



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

Μοντελοποίηση και επίλυση της ροής ισχύος σε
σιδηροδρομικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΧΡΗΣΤΟΥ Μ. ΝΙΚΟΛΑΚΑΚΟΥ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Μοντελοποίηση και επίλυση της ροής ισχύος σε σιδηροδρομικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΡΗΣΤΟΥ Μ. ΝΙΚΟΛΑΚΑΚΟΥ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11η Ιουλίου 2017.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σταύρος Παπαθανασίου
Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Πάυλος Γεωργιάκης
Επ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

(Υπογραφή)

.....
ΧΡΗΣΤΟΣ Μ. ΝΙΚΟΛΑΚΑΚΟΣ

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

© 2017 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Copyright ©–All rights reserved Χρήστος Μ. Νικολακάκος, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του κυρίου Νικολάου Χατζηαργυρίου, καθηγητή του Ε.Μ.Π

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μεταπτυχιακό ερευνητή Φοίβο Παλαιογιάννη και τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Κλεφτάκη για την καθοριστική καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχαν. Ο χρόνος και η γνώση που μου προσέφεραν, ήταν καθοριστικές για την περάτωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους βρέθηκαν δίπλα μου και μου προσέφεραν τη φιλία ή την αγάπη τους, για όλες τις όμορφες στιγμές που περάσαμε κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Τέλος, φυσικά οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την απεριόριστη υπομονή και τη στήριξη που παρέχει όλα αυτά τα χρόνια σε κάθε μου βήμα.

Νικολακάκος Χρήστος

Αθήνα, Ιούλιος 2017

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η επίλυση της ροής ισχύος σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος καθώς και η εύρεση των διαφευγόντων ρευμάτων προς τη γη στο σύστημα αυτό.

Προς την κατεύθυνση αυτή, μοντελοποιούνται τα επιμέρους τμήματα ενός συστήματος τρένων όπως η DC τροφοδοσία δικτύου, οι γραμμές παροχής και κύλισης και τα οχήματα. Ακόμη μοντελοποιούνται οι διάφορες πιθανές καταστάσεις κίνησης, όπως η επιτάχυνση, η πέδηση με ανατροφοδότηση και η πέδηση με αντίσταση. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μέθοδος επίλυσης φορτίου για DC δίκτυα, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της κίνησης των τρένων στο σύστημα για διάφορες συνθήκες όπως πλήθος οχημάτων, χρόνος μεταξύ των οχημάτων, διαφορετικός αριθμός υποσταθμών κλπ.

Έπειτα, γίνεται η κατάλληλη μοντελοποίηση για την εύρεση των διαφευγόντων ρευμάτων στο δίκτυο με τη μέθοδο των Συγκεντρωμένων Στοιχείων και υπολογίζεται η τάση που αναπτύσσεται στη γραμμή κύλισης των συρμών ως προς γη. Η μοντελοποίηση και ο αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται σε περιβάλλον Matlab.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξάγονται συμπεράσματα για το δίκτυο και τη συμπεριφορά του σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και αναφέρονται ιδέες για μελλοντική μελέτη.

Λέξεις Κλειδιά

Σιδηροδρομικά Δίκτυα, Μοντελοποίηση/Προσομοίωση Ηλεκτρικού Σιδηροδρομικού Δικτύου, Τρένα, Υποσταθμοί, Δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος, Ροή Φορτίου, Μέθοδος Κόμβων, Διαφεύγοντα Ρεύματα

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the study, modelling and simulation of a DC Railway Tracking System and the analysis of stray currents phenomenon.

To this direction, each part of the Railway Tracking System (DC Feeders, Power Lines, Running Rails, Electric Trains) is modelled, as well as the different motion cases (accelerating, regenerative braking, resistance braking). After that, Power Flow solution for DC Grids is used, in order to study the influence of the vehicle motion on the grid for different situations, like different train number on the grid, different Headway, different Substations number, etc.

Moreover, the system is modelled according to the Concentrated Elements method, for the calculation of Running Rail to Ground Voltage. The modelling of the electric Railway Tracking System and its simulation is presented in Matlab environment.

Finally, the results of the simulation are presented and a conclusion is drawn based on them about the behaviour of the grid for different operation cases. Also ideas for further study are mentioned.

Keywords

Railway Tracking Systems, Modelling/Simulation of an electric Railway System, Trains, Substations, DC Grids, Power Flow, Nodal Analysis, Stray Currents.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	11
Κατάλογος Πινάκων	13
1 Εισαγωγή	17
1.1 Πλαίσιο του προβλήματος	17
1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας και προσέγγιση του προβλήματος	18
1.3 Οργάνωση του τόμου	18
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	21
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Σιδηροδρομικά δίκτυα ηλεκτρικών τρένων	21
2.3 Επιμέρους τμήματα του σιδηροδρομικού δικτύου	24
2.3.1 Σταθμοί παροχής ηλεκτρικής ισχύος	24
2.3.2 Γραμμές παροχής ηλεκτρικής ισχύος και κύλισης των τρένων	26
2.3.3 Ηλεκτρικοί συρμοί	27
2.3.3.1 Ηλεκτρικές Μηχανές για την κίνηση του συρμού	27
2.3.3.2 Διατάξεις Ηλεκτρονικών Ισχύος	29
2.4 Αναγεννητική πέδηση	31
2.5 Διαφεύγοντα ρεύματα	35
2.5.1 Διαφεύγοντα ρεύματα στο ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο	35
2.5.2 Ηλεκτροχημική διάβρωση	37
2.6 Ενεργειακή κατανάλωση των τρένων	37
2.7 Επίλυση της ροής ισχύος στο δίκτυο	38

3	Μαθηματική Μοντελοποίηση	41
3.1	Εισαγωγή	41
3.2	Περιγραφή μοντελοποίησης των επιμέρους ηλεκτρικών μερών του δικτύου . . .	41
3.2.1	Ηλεκτρικοί υποσταθμοί	41
3.2.2	Ηλεκτρικές γραμμές	42
3.2.3	Τρένο	43
3.2.3.1	Έλξη	43
3.2.3.2	Πέδηση	43
3.3	Επίλυση της ροής φορτίου	44
3.3.1	Η μέθοδος Newton-Rapshon	44
3.4	Μοντέλο για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων	46
3.4.1	Μέθοδος Κατανεμημένων Στοιχείων	47
3.4.1.1	Χωρίς Γείωση	47
3.4.1.2	Γειωμένη γραμμή κύλισης	48
3.4.1.3	Γειωμένη γραμμή κύλισης με διόδους	50
3.4.2	Μέθοδος Συγκεντρωμένων Στοιχείων	50
3.4.3	Επίλυση Γραμμικού Συστήματος $Ax = B$ μέσω της LU Παραγοντοποίησης.	52
3.5	Ανάπτυξη του αλγορίθμου για την επίλυση της ροής φορτίου	53
4	Προσομοίωση και Αποτελέσματα	61
4.1	Εισαγωγή	61
4.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο τεσσάρων Υποσταθμών και δεκατριών Σταθμών.	62
4.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το ίδιο δίκτυο με διαφορετικά Headways . .	85
4.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το ίδιο δίκτυο με διαφορετικό αριθμό υποσταθμών	89
4.5	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το ίδιο δίκτυο με διαφορετικό αριθμό συρμών	94
5	Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική μελέτη	99
5.1	Συμπεράσματα	99
5.2	Προτάσεις για μελλοντική μελέτη	100
	Βιβλιογραφία	103

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από τα Μέσα Μεταφοράς [18].	22
2.2	Μονογραμμικό διάγραμμα DC Υποσταθμού [3].	25
2.3	Μονογραμμικό διάγραμμα AC Υποσταθμού [3].	25
2.4	Παράδειγμα γραμμής παροχής ηλεκτρικής ισχύος (750V).	27
2.5	Παράδειγμα εναέριας γραμμής παροχής ηλεκτρικής ισχύος.	27
2.6	Χαρακτηριστική Καμπύλη Ροπής-Ταχύτητας για τις ηλεκτρικές μηχανές [3] . .	28
2.7	Κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας από την αναγεννητική πέδηση [4]. . .	32
2.8	Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας κατά μήκος των γραμμών ή σε υποσταθμό [4].	33
2.9	Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας επι του συρμού [4].	33
2.10	Αντιστροφείας αμφίπλευρης ροής ισχύος [4].	34
2.11	Διαφεύγοντα ρεύματα στο σιδηροδρομικό δίκτυο [23]	35
2.12	Διάταξη Μετασχηματιστή Ανύψωσης Τάσης για την αντιμετώπιση των διαφευγόντων ρευμάτων σε AC δίκτυο [3].	37
3.1	Μοντελοποίηση Ηλεκτρικού Υποσταθμού [5].	42
3.2	Μοντελοποίηση Ηλεκτρικών Γραμμών [5].	42
3.3	Συνολικό Μοντέλο Ηλεκτρικού Οχήματος.	44
3.4	Απλοποιημένο σύστημα για τη μελέτη των διαφευγόντων ρευμάτων [25].	47
3.5	Μοντέλο κατανεμημένων στοιχείων για τον υπολογισμό του δυναμικού γραμμής κύλισης και διαφευγόντων ρευμάτων χωρίς γείωση της γραμμής κύλισης [25]. .	47
3.6	Μοντέλο κατανεμημένων στοιχείων για τον υπολογισμό του δυναμικού γραμμής κύλισης και διαφευγόντων ρευμάτων στην περίπτωση γειωμένης γραμμής κύλισης [25].	49
3.7	Μοντέλο κατανεμημένων στοιχείων για τον υπολογισμό του δυναμικού γραμμής κύλισης και διαφευγόντων ρευμάτων στην περίπτωση γείωσης με διόδους [25].	50
3.8	Μοντέλο Συγκεντρωμένων Στοιχείων για τον υπολογισμό του δυναμικού γραμμής κύλισης και διαφευγόντων ρευμάτων [24].	51
3.9	Έλεγχος για ανάστροφη ροή ισχύος στους υποσταθμούς.	56
3.10	Έλεγχος για υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης στους συρμούς. . .	56
3.11	Ο συνολικός αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος της ροής ισχύος και των διαφευγόντων ρευμάτων.	58

4.1	Προφίλ Ισχύος-Χρόνου των συρμών.	62
4.2	Προφίλ Θέσης-Χρόνου των συρμών.	62
4.3	Ισοδύναμο Κύκλωμα Δικτύου που προσομοιώνεται.	64
4.4	Τάση στον πρώτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1 ^η Περίπτωση.	66
4.5	Τάση στον δεύτερο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1 ^η Περίπτωση.	66
4.6	Τάση στον τρίτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1 ^η Περίπτωση.	67
4.7	Τάση στον τέταρτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1 ^η Περίπτωση.	67
4.8	Ρεύμα στον πρώτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1 ^η Περίπτωση.	68
4.9	Ρεύμα στον δεύτερο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1 ^η Περίπτωση.	68
4.10	Ρεύμα στον τρίτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1 ^η Περίπτωση.	69
4.11	Ρεύμα στον τέταρτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1 ^η Περίπτωση.	69
4.12	Τάση και ρεύμα του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου στην 1 ^η Περίπτωση. .	70
4.13	Τάση και ρεύμα του τρίτου τρένου της γραμμής ανόδου στην 1 ^η Περίπτωση. .	71
4.14	Τάση και ρεύμα του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου στην 1 ^η Περίπτωση. .	71
4.15	Τάση και ρεύμα του τρίτου τρένου της γραμμής καθόδου στην 1 ^η Περίπτωση. .	72
4.16	Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου. .	73
4.17	Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του τέταρτου τρένου της γραμμής ανόδου. .	73
4.18	Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου. .	74
4.19	Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του τέταρτου τρένου της γραμμής καθόδου. .	74
4.20	Μέγιστη-Ελάχιστη τάση γραμμής κύλισης ως προς γη σε κάθε υποσταθμό. . .	75
4.21	Τάση στον πρώτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2 ^η Περίπτωση.	77
4.22	Τάση στον δεύτερο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2 ^η Περίπτωση.	77
4.23	Τάση στον τρίτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2 ^η Περίπτωση.	78
4.24	Τάση στον τέταρτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2 ^η Περίπτωση.	78
4.25	Ρεύμα στον πρώτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2 ^η Περίπτωση.	79
4.26	Ρεύμα στον δεύτερο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2 ^η Περίπτωση.	79
4.27	Ρεύμα στον τρίτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2 ^η Περίπτωση.	80
4.28	Ρεύμα στον τέταρτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2 ^η Περίπτωση.	80
4.29	Τάση και ρεύμα του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου στη 2 ^η Περίπτωση. .	81
4.30	Τάση και ρεύμα του τρίτου τρένου της γραμμής ανόδου στη 2 ^η Περίπτωση. .	81
4.31	Τάση και ρεύμα του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου στη 2 ^η Περίπτωση. .	82
4.32	Τάση και ρεύμα του τρίτου τρένου της γραμμής καθόδου στη 2 ^η Περίπτωση. .	82
4.33	Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου. .	83
4.34	Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του τέταρτου τρένου της γραμμής ανόδου. .	83
4.35	Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου. .	84
4.36	Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του τέταρτου τρένου της γραμμής καθόδου. .	84
4.37	Μέγιστη-Ελάχιστη τάση γραμμής κύλισης ως προς γη σε κάθε υποσταθμό. . .	85
4.38	Ρεύμα ροοστατών για κάθε Headway του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου. .	87
4.39	Ρεύμα ροοστατών για κάθε Headway του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου. .	88
4.40	Ρεύμα ροοστατών για κάθε Headway του τρίτου τρένου της γραμμής ανόδου. .	88
4.41	Ρεύμα ροοστατών για κάθε Headway του τρίτου τρένου της γραμμής καθόδου. .	89

4.42 Τάση του πρώτου υποσταθμού του δικτύου για κάθε περίπτωση.	90
4.43 Τάση του δεύτερου υποσταθμού του δικτύου για κάθε περίπτωση.	91
4.44 Τάση του τρίτου υποσταθμού του δικτύου για κάθε περίπτωση.	91
4.45 Μέγιστη τάση γραμμής κύλισης ως προς γη για κάθε περίπτωση.	92
4.46 Ρεύμα του υποσταθμού που βρίσκεται στον τρίτο σταθμό επιβίβασης αποβίβασης σε κάθε περίπτωση.	92
4.47 Ρεύμα του υποσταθμού που βρίσκεται στον πέμπτο σταθμό επιβίβασης αποβίβασης σε κάθε περίπτωση.	93
4.48 Ρεύμα του υποσταθμού που βρίσκεται στον δέκατο σταθμό επιβίβασης αποβίβασης σε κάθε περίπτωση.	93
4.49 Ρεύμα στους ροοστάτες για το πρώτο τρένο της γραμμής ανόδου σε κάθε περίπτωση.	96
4.50 Ρεύμα στους ροοστάτες για το πρώτο τρένο της γραμμής καθόδου σε κάθε περίπτωση.	96
4.51 Ρεύμα στους ροοστάτες για το δεύτερο τρένο της γραμμής ανόδου σε κάθε περίπτωση.	97
4.52 Ρεύμα στους ροοστάτες για το δεύτερο τρένο της γραμμής καθόδου σε κάθε περίπτωση.	97

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Παράμετροι Προσομοίωσης	63
4.2	Αποτελέσματα Προσομοίωσης για την γραμμή ανόδου στην 1 ^η Περίπτωση. . .	65
4.3	Αποτελέσματα Προσομοίωσης για την γραμμή καθόδου στην 1 ^η Περίπτωση. . .	65
4.4	Αποτελέσματα Προσομοίωσης για το συνολικό σύστημα στην 1 ^η Περίπτωση. . .	65
4.5	Αποτελέσματα Προσομοίωσης για τη γραμμή ανόδου στη 2 ^η Περίπτωσης . . .	76
4.6	Αποτελέσματα Προσομοίωσης για τη γραμμή καθόδου στη 2 ^η Περίπτωσης . . .	76
4.7	Αποτελέσματα Προσομοίωσης για το συνολικό σύστημα στη 2 ^η Περίπτωση . . .	76
4.8	Παράμετροι Προσομοίωσης για τη σύγκριση αποτελεσμάτων με διαφορετικό Headway	86
4.9	Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμής ανόδου για διαφορετικό Headway.	86
4.10	Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμής καθόδου για διαφορετικό Headway.	86
4.11	Συγκριτικά συνολικά αποτελέσματα για διαφορετικό Headway.	87
4.12	Παράμετροι Προσομοίωσης για τη σύγκριση αποτελεσμάτων με διαφορετικό αριθμό και θέση υποσταθμών.	90
4.13	Παράμετροι Προσομοίωσης για τη σύγκριση αποτελεσμάτων με διαφορετικό Headway	94
4.14	Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμής ανόδου για διαφορετικό αριθμό συρμών. . .	95
4.15	Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμής καθόδου για διαφορετικό αριθμό συρμών. . .	95
4.16	Συγκριτικά συνολικά αποτελέσματα για διαφορετικό αριθμό συρμών.	95

Στην οικογένειά μου.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στο πρόβλημα το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται μια αναφορά στο πλαίσιο του προβλήματος και οι λόγοι για τους οποίους κρίνεται σημαντική η επίλυση του, αναφέρεται ο στόχος της εργασίας και ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζεται και επιλύεται το πρόβλημα. Τέλος γίνεται αναφορά στην οργάνωση του τόμου για τη διευκόλυνση στην ανάγνωση της εργασίας.

1.1 Πλαίσιο του προβλήματος

Το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει αυτή η διπλωματική εργασία είναι η επίλυση της ροής ισχύος και ο υπολογισμός των διαφευγόντων ρευμάτων σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος. Η κίνηση των συρμών πάνω στο δίκτυο και οι διαφορετικές τους απαιτήσεις για ισχύ ανάλογα με την κατάσταση της κίνησης τους, δημιουργεί ένα δυναμικό δίκτυο καθώς όπως γίνεται σαφές, μεταβάλλεται συνεχώς. Ακόμη, εξαιτίας της ελλιπούς μόνωσης στις γραμμές κύλισης του συρμού, αναπτύσσεται τάση μεταξύ της γης και της γραμμής με αποτέλεσμα ρεύμα να διαφεύγει προς τη γη πράγμα που είναι επικίνδυνο και επιβλαβές για τους ανθρώπους αλλά και για τις εγκαταστάσεις του δικτύου, καθώς προκαλείται ηλεκτροχημική διάβρωση σε αυτές.

Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η δημιουργία ενός εργαλείου για την επίλυση του προβλήματος της ροής ισχύος και ο υπολογισμός των διαφευγόντων ρευμάτων προσομοιώνοντας την κίνηση των τρένων στο δίκτυο, καθώς θα συμβάλει στη μελέτη για τη δημιουργία νέων δικτύων ή την επέκταση ήδη υπάρχοντων, αφού μέσω της επίλυσης της ροής ισχύος, γίνονται γνωστές οι ανάγκες ισχύος που θα έχει το δίκτυο καθώς επίσης και οι τάσεις στους ζυγούς του ώστε αν δημιουργείται κάποιο πρόβλημα να γίνουν σε αντίστοιχες ενέργειες (π.χ προσθήκη επιπλέον υποσταθμού). Ακόμη μέσω του υπολογισμού των διαφευγόντων ρευμάτων καθίσταται δυνατό να εντοπιστούν τυχόν προβλήματα και αν αυτά υπερβαίνουν τα όρια που θέτει το πρότυπο [26] να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες ώστε αυτά να περιοριστούν.

1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας και προσέγγιση του προβλήματος

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για την επίλυση της ροής ισχύος στο δίκτυο καθώς επίσης και ο υπολογισμός της τάσης των γραμμών κύλισης των συρμών ως προς τη γη που είναι απαραίτητη για την εύρεση των διαφευγόντων ρευμάτων στο δίκτυο. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα και αναλύονται θεωρητικά τα επιμέρους τμήματα τους και η ενεργειακή τους κατανάλωση. Επίσης αναλύεται το φαινόμενο της αναγεννητικής πέδησης και αναφέρονται επιγραμματικά οι μέθοδοι καλύτερης εκμετάλλευσης της, καθώς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο δίκτυο. Ακόμη μελετάται το θεωρητικό υπόβαθρο για τα διαφεύγοντα ρεύματα και τα προβλήματα που αυτά δημιουργούν και επίσης παρουσιάζεται το πρόβλημα της ροής φορτίου, οι τρόποι της επίλυσης του και για ποιο λόγο αυτή είναι σημαντική σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο.

Εν συνεχεία, προκειμένου να γίνει δυνατή η προσομοίωση της λειτουργίας του δικτύου, παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση των επιμέρους στοιχείων του δικτύου (ηλεκτρικές γραμμές, συρμούς, υποσταθμούς) για διαφορετικές καταστάσεις (επιτάχυνση, φρενάρισμα) και διατυπώνονται οι περιορισμοί του δικτύου (ανάστροφη ροή ισχύος στους υποσταθμούς, υπέρβαση επιτρεπόμενης τάσης στους συρμούς). Αφού γίνει αυτό, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η επίλυση της ροής φορτίου στο δίκτυο, μέσω της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson. Επίσης, αναλύονται τα δύο μαθηματικά μοντέλα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων (Μέθοδος Συγκεντρωμένων και Κατανεμημένων Στοιχείων), επιλέγεται το κατάλληλο για το συγκεκριμένο πρόβλημα και παρουσιάζεται η μέθοδος της LU παραγοντοποίησης με την οποία επιλύεται το σύστημα που προκύπτει για την εύρεση της τάσης των γραμμών κύλισης ως προς γη.

Αφού το κάθε στοιχείο του δικτύου εκφράστηκε σε μαθηματικές εξισώσεις, είναι εφικτή πλέον να υλοποιηθεί ένας αλγορίθμος για την επίλυση του προβλήματος της ροής ισχύος στο δίκτυο, τον υπολογισμό της τάσης ως προς γη που αναπτύσσεται στη γραμμή κύλισης των συρμών και την εξαγωγή αποτελεσμάτων για διάφορες τοπολογίες.

1.3 Οργάνωση του τόμου

Το πρώτο κεφάλαιο, αποτελεί μια εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας και περιγράφει συνοπτικά το πρόβλημα το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει και τους τρόπους με τους οποίους αυτό επιλύεται.

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα και τα επιμέρους τμήματα τους, τα διαφεύγοντα ρεύματα και οι επιπτώσεις τους καθώς επίσης και η επίλυση της ροής ισχύος και οι λόγοι για τους οποίους είναι απαραίτητη σε κάθε ηλεκτρικό δίκτυο.

Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση των επιμέρους τμημάτων που αποτελούν το ηλεκτρικό δίκτυο σε κάθε πιθανή κατάσταση. Στη συνέχεια αναλύονται

οι μέθοδοι με τους οποίους μπορούν να υπολογιστούν τα διαφεύγοντα ρεύματα στο δίκτυο και η αριθμητική μέθοδος μέσω της οποίας επιλύεται η ροή ισχύος. Τέλος παρουσιάζεται και επεξηγείται ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του συστήματος

Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η υλοποίηση του αλγορίθμου που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, η προσομοίωση για διάφορα δεδομένα εισόδου με τα αντίστοιχα διαγράμματα και γίνονται συγκρίσεις και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο κεφάλαιο 5, εκθέτονται γενικές παρατηρήσεις σχετικά με τις προσομοιώσεις που έγιναν στο κεφάλαιο 4, εξάγονται συμπεράσματα από αυτές και προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

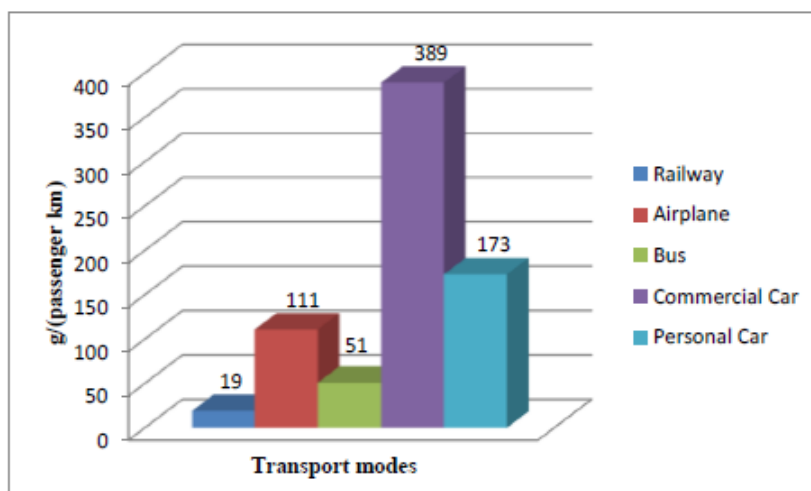
2.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίχτηκε η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Αναλυτικότερα γίνεται μια αναφορά στα Σιδηροδρομικά δίκτυα ηλεκτρικών τρένων και την τεχνολογία τους. Στη συνέχεια περιγράφονται τα επιμέρους τμήματα του δικτύου και η λειτουργία τους καθώς και η ενεργειακή κατανάλωση και οι μηχανικές απώλειες των ηλεκτρικών συρμών. Ακόμη αναφέρεται η τεχνολογία της αναγεννητικής πέδησης και η χρησιμότητα της για την ενεργειακή απόδοση των ηλεκτρικών τρένων και εν συνεχεία αναλύεται το θέμα των διαφευγόντων ρευμάτων στα σιδηροδρομικά δίκτυα και τα προβλήματα που αυτά προκαλούν, καθώς και τρόποι που μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις επιβλαβείς συνέπειες. Τέλος παρουσιάζεται το πρόβλημα της επίλυσης της ροής ισχύος στο δίκτυο και οι λόγοι για τους οποίους είναι σημαντική για την μελέτη και την μελλοντική ανάπτυξη του υπάρχοντος δικτύου.

2.2 Σιδηροδρομικά δίκτυα ηλεκτρικών τρένων

Σήμερα τα σιδηροδρομικά δίκτυα παρουσιάζουν ανάπτυξη σε πολλές χώρες, έπειτα από μια μεγάλη περίοδο ύφεσης. Αυτή η αναγέννηση, οφείλεται στην τάση που υπάρχει τα τελευταία χρόνια για μια πιο οικολογική και «πράσινη» παραγωγή αλλά και κατανάλωση ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών συρμών σε σύγκριση με τα συμβατικά αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα είναι κυρίως η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, η χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και η καλύτερη αναλογία χώρου και μεταφορικής ικανότητας, συγκρινόμενοι για παράδειγμα με το αυτοκίνητο. Επιπλέον, η ηλεκτρική ισχύς είναι ιδιαίτερα ελκυστική καθώς κάθε μορφή ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε τέτοια. Ως γνωστών, τα ορυκτά καύσιμα σήμερα είναι η κυριότερη πηγή μόλυνσης του περιβάλλοντος. Τα ηλεκτροκίνητα τρένα, δεν απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα διοξείδιο του άνθρακα σε σύγκριση με τα αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα (Εικόνα (2.1)), ιδιαίτερα αν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως από υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά κ.λ.π. Σημαντική είναι επίσης η αξιολογία καλύτερη αναλογία δύναμης - βάρους που αποδίδει η ηλεκτρική

έλξη σε σχέση με την αντίστοιχη του diesel.



Σχήμα 2.1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από τα Μέσα Μεταφοράς [18].

Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται ανάπτυξη των ήδη υπάρχοντων υποδομών αλλά και κατασκευή νέων. Επίσης η έρευνα πάνω στα συστήματα αυτά γνωρίζει ιδιαίτερη άνθιση τα τελευταία χρόνια. Τέλος, παρατηρείται αύξηση στο κοινό που χρησιμοποιεί τους σιδηροδρόμους άρα κατά συνέπεια μεγαλώνει και η κίνηση πάνω στις γραμμές, καθώς επίσης χρησιμοποιούνται πλέον γρηγορότερα τρένα.

Με τη βελτίωση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, από τα διακοπτικά στοιχεία υψηλής τάσεως, μέχρι τα ολοκληρωμένα κυκλώματα για επεξεργασία πληροφορίας, επήλθε σημαντική αλλαγή στις μεθόδους που δίνουν τη δυνατότητα για έλεγχο της ισχύος και της ταχύτητας των ηλεκτρικών κινητήρων. Περαιτέρω, με την ανάπτυξη που γνωρίζουν τα τελευταία χρόνια οι υπερπυκνωτές και οι μπαταρίες, δίνεται η ευκαιρία για την κατασκευή συστήματος αποθήκευσης της ενέργειας που προκύπτει από την αναγεννητική πέδηση των ηλεκτρικών συρμών. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνο μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος, αλλά παρατηρείται και σταθεροποίηση της τάσης. Ακόμη η μείωση της απαιτούμενης ισχύος, έχει σαν αποτέλεσμα τις μικρότερες απώλειες στις γραμμές παροχής ηλεκτρικής ισχύος [2, 3].

Οι σύγχρονοι ηλεκτρικοί συρμοί, είναι ικανοί να τροφοδοτήσουν το δίκτυο έως και το 40% της ισχύος που καταναλώνουν [1]. Εφόσον οι περισσότεροι από τους υποσταθμούς, δεν έχουν τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος ώστε να την παρέχουν στο υπόλοιπο δίκτυο, αντιλαμβάνεται κανείς πως αυτή η ενέργεια πρέπει είτε να διοχετευτεί σε άλλους συρμούς, είτε να καταναλωθεί σε αντιστάσεις που υπάρχουν για αυτό τον σκοπό. Το ποσοστό της ισχύος που θα διοχετευτεί σε άλλους συρμούς εξαρτάται από την κίνηση των συρμών στο δίκτυο. Έτσι όσα περισσότερα τρένα βρίσκονται εντός του δικτύου τόσες περισσότερες οι πιθανότητες είναι η ενέργεια να καταναλωθεί από αυτά [1].

Υπάρχουν και DC καθώς επίσης και AC σιδηροδρομικά δίκτυα. Τα επίπεδα τάσης που συναντώνται στα DC δίκτυα είναι τα εξής [3] :

1. 600-1000V. Χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα μετρό, τράμ, τρόλλεϋ 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 ηλεκτρικής ενέργειας με τις οποίες έρχονται σε επαφή με τις «κεραίες» του οχήματος όπως στα τρόλλεϋ και τα τράμ.

2. 1500V. Αυτό το επίπεδο τάσης είναι η πιο οικονομική επιλογή για δίκτυα μετρό μεγάλης χωρητικότητας και 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, στην πρώην Ε.Σ.Σ.Δ και την Νότιο Αφρική. Αυτό το επίπεδο τάσης, σήμερα έχει ξεπεραστεί και στη θέση του χρησιμοποιείται η τάση των 25kV AC.

Στα AC δίκτυα, τα επίπεδα τάσης που συναντώνται είναι τα [3] :

1. 15 kV, 16 2/3 Hz. Αυτό το επίπεδο τάσης ήταν το αρχικό που χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα εξαιτίας της περιορισμένης ικανότητας μεταγωγής που είχαν οι πρώιμοι μονοφασικοί AC κινητήρες μεταβλητών στροφών. Πλέον ο λόγος αυτός έχει εκλείψει, πάραυτα τα μεγάλα ποσά που δαπανήθηκαν για αυτές τις υποδομές δεν επιτρέπουν την αντικατάστασή τους και χρησιμοποιούνται ακόμα στη Βόρεια Ευρώπη (Γερμανία, Σουηδία, Αυστρία, Ελβετία).
2. Τριφασικό 3.6 kV, 16 2/3 Hz. 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, 50/60 Hz. Αυτό είναι το παγκόσμιο πρότυπο για κύριες αρτηρίες μετρό και για τους προαστιακούς σιδηρόδρομους. Το συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, απαιτεί ειδικά χαρακτηριστικά κατά τη μεταφορά, ώστε να μειώνεται το ρεύμα γης.
4. 50kV, 50/60 Hz. Αυτό το επίπεδο τάσης χρησιμοποιείται μόνο σε ιδιαίτερες περιπτώσεις που απαιτείται ρυμούλκηση βαρών αντικειμένων, για παράδειγμα σε ανθρακορυχεία.

Στους πρώτους ηλεκτρικούς σιδηρόδρομους χρησιμοποιήθηκε κυρίως συνεχής 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 η εναλλασσόμενη τάση είναι διαθέσιμη σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες. Ακόμη, ο έλεγχος της ταχύτητας των μηχανών εναλλασσόμενης τάσης σήμερα έχει γίνει ευκολότερος από το παρελθόν. Για το λόγο αυτό πολλά δίκτυα πλέον χρησιμοποιούν εναλλασσόμενη τάση.

Η συνεχής τάση παρουσιάζει σοβαρό πρόβλημα καθώς λόγω των επαγωγικών φαινομένων είναι πολύ δύσκολο να αντιμετωπιστούν σφάλματα σε DC κυκλώματα υψηλής τάσης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα DC δίκτυα περιορίζονται στα 3kV. Παρόλα αυτά και η AC μεταφορά ισχύος παρουσιάζει μειονεκτήματα, ειδικότερα όταν δεν είναι εφικτό το υψηλό επίπεδο τάσης, όπως για παράδειγμα η κίνηση του τράμ εντός του οδικού δικτύου, που οι κανόνες ασφαλείας απαιτούν επίπεδο τάσης έως 750V. Ακόμη οι απώλειες είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του DC δικτύου, για το λόγο αυτό, από οικονομικής απόψεως χρησιμοποιείται DC τάση όταν χρειαζόμαστε υψηλό ρεύμα με χαμηλή τάση.

2.3 Επιμέρους τμήματα του σιδηροδρομικού δικτύου

Είναι σημαντικό, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η συνολική λειτουργία του δικτύου, να αναλυθούν τα επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται αυτό και τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν.

2.3.1 Σταθμοί παροχής ηλεκτρικής ισχύος

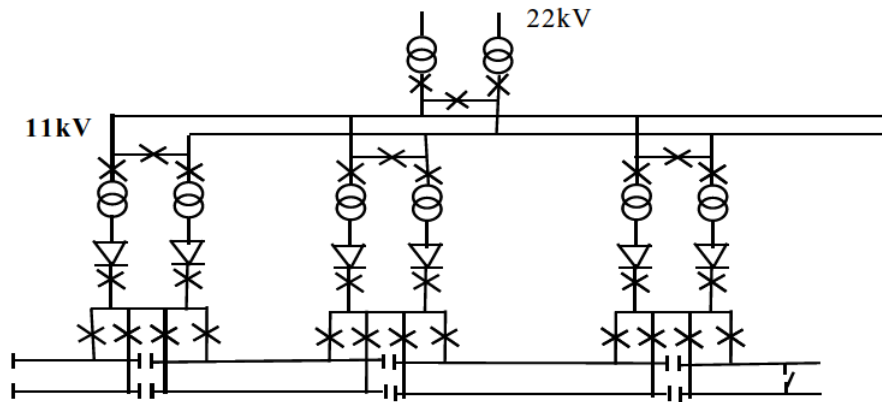
Οι σταθμοί παροχής ηλεκτρικής ισχύος, αρχικά χρησιμοποιούσαν συστοιχίες γεννητριών. Αυτή η τεχνολογία σήμερα είναι απαρχαιωμένη καθώς πλέον οι σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με ανορθωτές και έτσι απορροφούν την απαιτούμενη ισχύ του σιδηροδρομικού δικτύου από την AC τροφοδοσία.

DC Δίκτυα :

Τα κύρια στοιχεία ενός DC υποσταθμού είναι τα ακόλουθα [3] :

- Ζεύγος μετασχηματιστών έτσι ώστε να παρέχεται το σωστό επίπεδο τάσης στην είσοδο της ανορθωτικής διάταξης, από το τριφασικό δίκτυο AC. Το επίπεδο τάσης του δικτύου αυτού συνήθως ανέρχεται στα 11kV.
- AC αυτόματους διακόπτες για την προστασία από πιθανά σφάλματα.
- AC διακόπτες/απομονωτές ώστε να μπορεί να υπάρχει επιλογή τροφοδοσίας, μετασχηματιστή κλπ για επείγουσες καταστάσεις και για συντήρηση.
- Ανορθωτική διάταξη γέφυρας. Συνήθως κάθε ανορθωτής αποτελείται από δύο 6-παλμικές γέφυρες συνδεδεμένες παράλληλα για το επίπεδο τάσης των 750V ή σε σειρά για αυτό των 1500kV δίνοντας 12-παλμική έξοδο.
- DC διακόπτες και απομονωτές, για την επιλογή του ανορθωτή που θα βρίσκεται σε λειτουργία, για την απομόνωση μέρους του δικτύου κλπ.
- DC αυτόματους διακόπτες υψηλής ταχύτητας για την προστασία των ηλεκτρικών συρμών. Οι συγκεκριμένοι είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένοι και δαπανηροί, ωστόσο απαραίτητοι καθώς όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.2, είναι φυσικά δύσκολο να διακοπεί ένα ισχυρό συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα επαγωγικό κύκλωμα.

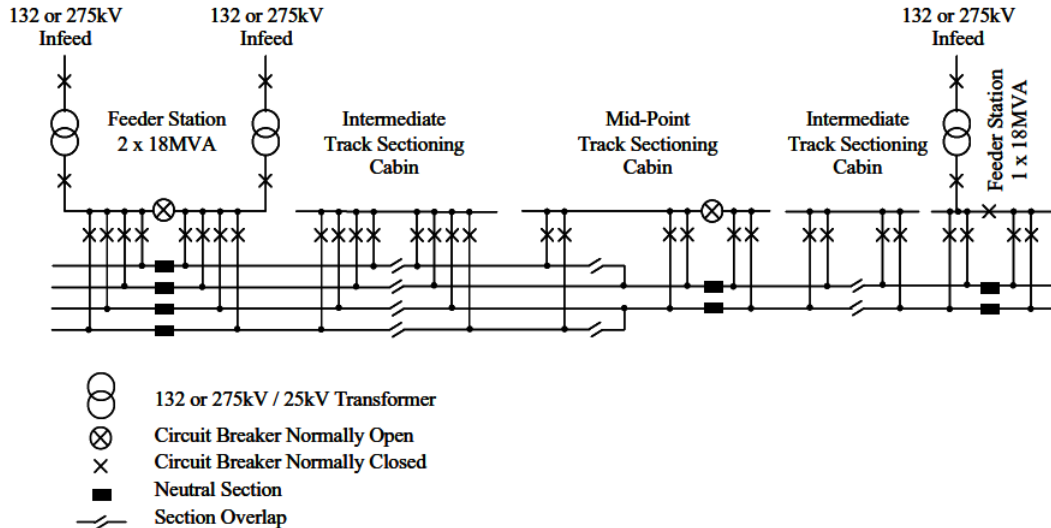
Ανάλογα την πυκνότητα της κίνησης, την παρεχόμενη τάση κλπ οι υποσταθμοί μπορούν να βρίσκονται στο δίκτυο σε απόσταση 3 έως 9 χιλιομέτρων μεταξύ τους. Στην εικόνα (2.2), φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα ενός τέτοιου υποσταθμού.



Σχήμα 2.2: Μονογραμμικό διάγραμμα DC Υποσταθμού [3].

AC Δίκτυα :

Και στον AC υποσταθμό, ισχύουν οι ίδιες αρχές όπως στους DC, τα βασικά στοιχεία δηλαδή υπάρχουν δύο φορές ώστε να παρέχεται ισχύς και σε περίπτωση βλάβης ή σφάλματος και υπάρχει και εφεδρική τροφοδοσία.



Σχήμα 2.3: Μονογραμμικό διάγραμμα AC Υποσταθμού [3].

Τα κύρια στοιχεία ενός AC υποσταθμού είναι τα ακόλουθα [3] :

- Ζεύγος μετασχηματιστών συνδεδεμένοι σε διαφορετικά ζεύγη φάσεων ώστε το φορτίο να είναι συμμετρικό. Ακόμη υποβιβάζουν το επίπεδο της τάσης στα 25kV ή τα 50kV από τα 132/275/400kV ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση παροχής. Συνήθως αρχούν μετασχηματιστές ικανότητας 20MVA ο καθένας.
- AC αυτόματους διακόπτες για την προστασία από πιθανά σφάλματα.
- Διακόπτες/απομονωτές του κυκλώματος για την προστασία από σφάλματα και ώστε να μπορεί να υπάρχει επιλογή τροφοδοσίας, μετασχηματιστή κλπ για επείγουσες καταστάσεις και για συντήρηση.
- Διακόπτες/απομονωτές σε ενδιάμεσο σημείο ώστε αν χρειαστεί να επιτρέπεται η τροφοδοσία έως τη μέση της γραμμής αν είναι απαραίτητο. Ακόμη τέτοιες ενδιάμεσες «καμπίνες» εφαρμόζονται στο δίκτυο ώστε να μειώνουν την αντίσταση της γραμμής. Η τροφοδοσία λαμβάνεται από το υψηλότερο δυνατό επίπεδο τάσης καθώς το φορτίο έλξης είναι εγγενώς μεταβλητό και αυτό μπορεί να εισάγει αστάθεια, αρμονική παραμόρφωση και flicker στην παροχή.

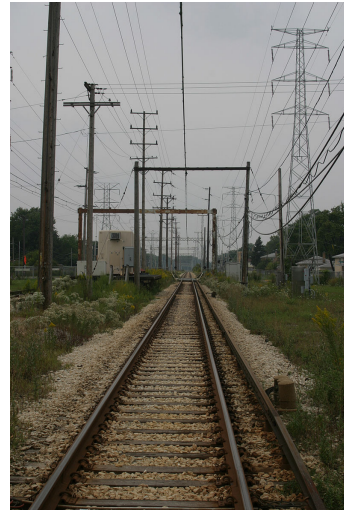
Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για την εξάλειψη των παραπάνω, όπως συστήματα αντιστάθμισης αέργου ισχύος και φίλτρα εξάλειψης αρμονικών συχνοτήτων που εφαρμόζονται στους υποσταθμούς καθώς και διατάξεις διόρθωσης συντελεστή ισχύος που εφαρμόζονται στους ηλεκτρικούς συρμούς. Οι μοντέρνοι PWM μετατροπείς, μπορούν να εξαλείψουν την αρμονική παραμόρφωση και να διορθώνουν τον συντελεστή ισχύος, όμως δε μπορούν να βοηθήσουν σε περιπτώσεις ασυμμετρίας και δε διορθώνουν το flicker. Στην εικόνα (2.3), φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα ενός τέτοιου υποσταθμού.

2.3.2 Γραμμές παροχής ηλεκτρικής ισχύος και κύλισης των τρένων

Η γραμμή παροχής είναι εκείνη, μέσω της οποίας η ηλεκτρική ισχύς φτάνει στον ηλεκτρικό συρμό ώστε να είναι εφικτή η κίνηση του. Πρόκειται για έναν ημισυνεχή αγωγό ο οποίος βρίσκεται συνήθως στην άκρη ή ανάμεσα στις γραμμές κύλισης των ηλεκτρικών συρμών όπως φαίνεται στην εικόνα (2.4) ή είναι εναέριος όπως για παράδειγμα στα τράμ και τα τρόλλεϋ. Συνήθως, στηρίζεται από κεραμικούς μονωτήρες ανά τρία μέτρα. Η ισχύς μεταφέρεται στους συρμούς μέσω μιας «κεραίας» που βρίσκεται στο δάπεδο τους, η οποία έρχεται σε επαφή με τον αγωγό. Το ρεύμα επιστρέφει όπως αναφέρεται και στο υποκεφάλαιο (2.11) μέσω των γραμμών κύλισης. Ο αγωγός διακόπτεται σε διαβάσεις, διασταυρώσεις και στους υποσταθμούς. Η επαφή μεταξύ του αγωγού πλέον γίνεται στο κάτω μέρος του αγωγού, ώστε να επιτρέπεται η μόνωση του στο πάνω μέρος με σκοπό μην υπάρχουν ατυχήματα λόγω πιθανής ακούσιας επαφής τους από κάποιον εργαζόμενο. Ακόμη με τον τρόπο αυτό ο αγωγός προστατεύεται από τις καιρικές συνθήκες (π.χ χιόνι).



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα γραμμής παροχής ηλεκτρικής ισχύος (750V).



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα εναέριας γραμμής παροχής ηλεκτρικής ισχύος.

Οι γραμμές κύλισης είναι αυτές πάνω στις οποίες γίνεται η κίνηση των συρμών. Ουσιαστικά, είναι η επιφάνεια πάνω στην οποία επιτρέπεται η κύλιση των τροχών του τρένου. Στους ηλεκτρικούς συρμούς όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα (2.2), η επιστροφή του ρεύματος στον υποσταθμό γίνεται μέσω των γραμμών κύλισης. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η επαρκής μόνωση τους ώστε να ελαχιστοποιούνται τα διαφεύγοντα ρεύματα προς τη γη.

2.3.3 Ηλεκτρικοί συρμοί

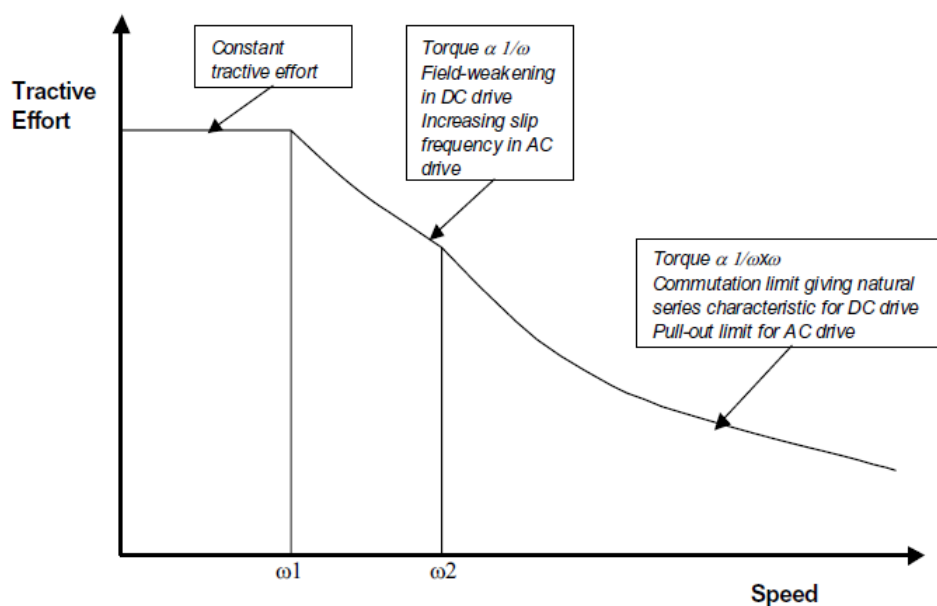
Οι ηλεκτρικοί συρμοί είναι εκείνοι μέσω των οποίων πραγματοποιείται η κίνηση μέσα στο δίκτυο. Ανάλογα με την κατάσταση της κίνησης, ένας συρμός μπορεί να καταναλώνει ενέργεια αν επιταχύνεται ή να επιστρέφει ενέργεια στο δίκτυο κατά την αναγεννητική πέδηση.

2.3.3.1 Ηλεκτρικές Μηχανές για την κίνηση του συρμού

Σήμερα, με τις μοντέρνες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και τους σύγχρονους μικροεπεξεργαστές, ο έλεγχος και των DC όσο και των AC μηχανών για την κίνηση των συρμών έχει γίνει εξίσου εφικτός τόσο με DC, όσο και με AC δίκτυο. Όλοι οι συνδυασμοί συναντώνται στα σύγχρονα σιδηροδρομικά ηλεκτρικά δίκτυα, παρόλο που υπάρχει πλέον η τάση στις νέες υλοποιήσεις να χρησιμοποιούνται AC μηχανές, συνήθως επαγωγικές αλλά και σύγχρονες. Ο σημαντικότερος λόγος για αυτό είναι η έλλειψη του συλλέκτη που χρειάζεται στις DC μηχανές γεγονός που αυξάνει την πυκνότητα ισχύος της μηχανής και την πιθανότητα να μη χρειαστεί ποτέ άνοιγμα του κελύφους της για συντήρηση. Το μειονέκτημα είναι πως υπάρχει απαίτηση για τροφοδοσία μεταβλητής τάσης, μεταβλητής συχνότητας (Variable-Voltage, Variable-Frequency ή vvnf), πράγμα που καθιστά τον έλεγχο του μετατροπέα πιο σύνθετο, ιδιαίτερα όταν τροφοδοτείται από AC παροχή, καθώς επίσης και λιγότερο αξιόπιστο και πιο δαπανηρό.

Η τελευταία γενιά των αντιστροφένων ηλεκτρονικών ισχύος που μπορούν να προσφέρουν παροχή Μεταβλητής Τάσης, Μεταβλητής Συχνότητας και βασίζονται σε διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Isolated Gate Bipolar Transistor ή εν συντομία IGBT) είναι πιο αξιόπιστοι, πιο συμπαγείς και πιο απλοί στον έλεγχο τους σε σχέση με τους αντιστροφείς προηγούμενης γενιάς που χρησιμοποιούσαν Θυρίστορ με διακοπή από την πυλη (Gate turn-off thyristor ή εν συντομία GTO) και μπορούν να ελέγξουν ακόμη και τις πιο μεγάλες μηχανές χωρίς να χρειάζεται η σύνδεση εν παραλλήλω ή εν σειρά πολλαπλών διακοπτικών διατάξεων.

Όσον αφορά την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης της μηχανής για την κίνηση του τρένου, δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των δύο τύπων. Στην πραγματικότητα και οι δύο αποτελούνται από σίδηρο και χαλκό και υπόκεινται στους ίδιους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί και στις δύο περιπτώσεις είναι ο περιορισμός του ρεύματος εξαιτίας της θερμότητας που προκαλείται στα τυλίγματα του σιδήρου και ο περιορισμός της πυκνότητας της μαγνητικής ροής λόγω του κορεσμού του σιδήρου. Ακόμη, αφού η ροπή εξόδου μιας μηχανής προκύπτει από το γινόμενο της μαγνητικής ροής επί του ρεύματος, όλες οι μηχανές έχουν εγγενώς ένα ανώτατο όριο ροπής εξόδου. Το άλλο σημαντικό στοιχείο, είναι η αντίθετη ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) που αναπτύσσεται (δημιουργείται στον αγωγό μια ηλεκτρεγερτική δύναμη που αντιτίθεται στην ηλεκτρεγερτική δύναμη που τροφοδοτεί τον αγωγό, δηλαδή ο κινητήρας λειτουργεί και σαν γεννήτρια, τροφοδοτώντας τον αγωγό και μειώνοντας το ρεύμα που τον διαρρέει), η οποία είναι το γινόμενο της μαγνητικής ροής και της ταχύτητας της μηχανής σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Έτσι, η τάση που παρέχεται στη μηχανή θα πρέπει να αυξάνεται με την ταχύτητα ενόσω η μαγνητική ροή θα διατηρείται στο μέγιστο της. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση στην αρχική σταθερή ροπή, στη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας σε όλες τις μηχανές. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια γενική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας :



Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστική Καμπύλη Ροπής-Ταχύτητας για τις ηλεκτρικές μηχανές [3] .

Όταν φτάσει στη μέγιστη δυνατή τάση από την παροχή, προκειμένου να συνεχίσει η αύξηση της ταχύτητας, πρέπει να μειωθεί η μαγνητική ροή αντιστρόφως με την ταχύτητα ούτως ώστε η αντίθετη ηλεκτρεγερτική δύναμη να μένει περίπου ίση με την σταθερή μέγιστη παρεχόμενη τάση. Στις AC μηχανές, αυτό προϋποθέτει την αύξηση της συχνότητας κρατώντας σταθερή την τάση στο δρομέα της μηχανής. Στις DC μηχανές, το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης πρέπει να μειωθεί, ανάλογα με τον τύπο της μηχανής. Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω, έχουν ως αποτέλεσμα να εισοδο σε μια περιοχή όπου η ροπή μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα όπως φαίνεται στο σχήμα (2.6). Για να γίνει αυτό εφικτό σε μια AC μηχανή, πρέπει να μειωθεί η συχνότητα ολίσθησης ώστε η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας να «μετακινηθεί» προς τα πάνω για να αντισταθμιστεί το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά μεγέθη μιας AC μηχανής εξαρτώνται από το τετράγωνο της τάσης εισόδου.

Το περιορισμένο πλαίσιο της ευσταθούς λειτουργίας της μηχανής, είναι ο λόγος για τον οποίο ο μόνος εφικτός τρόπος ελέγχου της ταχύτητας της μηχανής αυτής, είναι η μεταβολή της συχνότητας της τάσης εισόδου της. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια οικογένεια καμπυλών ροπής-ταχύτητας. Γίνεται αντιληπτό πως όταν γίνεται υπέρβαση ενός ορίου τάσης, η καμπύλη γίνεται φθίνουσα με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας. Ακόμη, μέσω αυτών των καμπυλών καθίσταται σαφές, πως μετακινώντας την καμπύλη προς τα δεξιά αλλάζοντας τη συχνότητα της τάσης εισόδου, επιτρέπεται στη ροπή να μειώνεται με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο της ταχύτητας (και όχι του τετραγώνου της). Υπάρχει ένα σημείο, μετά του οποίου η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί πτώση της ροπής με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας. Έτσι υπάρχει και μια τρίτη περιοχή, όπου η ροπή έχει ρυθμό πτώσης αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας.

Στις DC μηχανές, υπάρχει ένα αντίστοιχο αλλά διαφορετικό φαινόμενο που επίσης περιορίζει την περιοχή κατά την οποία η ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει ένα όριο του πόσο «αδύναμο» μπορεί να γίνει το πεδίο με την παρουσία μέγιστου ρεύματος στον κλωβό εξαιτίας της αλλοίωσης της μαγνητικής ροής. Επομένως το ρεύμα και η μαγνητική ροή μειώνονται με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο της ταχύτητας, προκαλώντας μείωση ρυθμού αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας στη ροπή. Το φαινόμενο αυτό συχνά αναφέρεται ως όριο συλλέκτη καθώς οι τάσεις δεν κατανέμονται ισόποσα στη μηχανή.

2.3.3.2 Διατάξεις Ηλεκτρονικών Ισχύος

Οι διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος, χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από μια μορφή σε κάποια άλλη, χρησιμοποιώντας διακοπτικά στοιχεία υψηλής τάσεως και ημιαγωγούς. Παρατηρούνται δύο βασικοί μέθοδοι για τον έλεγχο της τάσης χρησιμοποιώντας διακοπτικά στοιχεία :

- Για AC παροχή, ημιαγωγοί, όπως τα Θυρίστορ, άγουν εφόσον τους δοθεί ο παλμός έναυσης με κάποια καθυστέρηση φάσης, επιτρέποντας έτσι μόνο σε μέρος της ημιτονικής τάσης να φτάσει στο φορτίο. Ακόμη και σε επαγωγικά φορτία, το ρεύμα κατά την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης μηδενίζεται και το Θυρίστορ παύει να άγει. Η λειτουργία

αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος φάσης-γωνίας.

- Για AC παροχή, ημιαγωγοί, όπως τα διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης, χρησιμοποιούνται καθώς μπορούν να τεθούν εντός και εκτός λειτουργίας μέσω ενός παλμού έναυσης στην πύλη. Με τον τρόπο αυτό, είναι εφικτή η χρήση της Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation ή εν συντομία PWM), η οποία είναι μια σειρά ορθογώνιων παλμών συνήθως σταθερού πλάτους και συχνότητας, ενώ το εύρος του καθορίζεται με τρόπο κατάλληλο ώστε να μεταφέρουν την απαιτούμενη τάση στο φορτίο. Με υψηλή συχνότητα φέροντος σήματος (πχ 1 kHz) και ποικιλία εύρους παλμών σε συμφωνία με την επιθυμητή συχνότητα, η τεχνική αυτή επιτρέπει τη μετατροπή της DC τάσης εισόδου σε AC. Για να επιτευχθούν και οι δυο πολικότητες στην τάση εξόδου και στις τρεις φάσεις απαιτείται μια πλήρης γέφυρα έξι διακοπτικών στοιχείων με αντιπαράλληλες διόδους.

Μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις τροφοδοσίας :

AC Τροφοδοσία σε DC μηχανές :

Υπάρχουν δύο τοπολογίες για τη τροφοδοσία της μηχανής σε αυτή την περίπτωση :

- Πλήρης ανόρθωση σε συνδεσμολογία γέφυρας συνδεδεμένη με μετασχηματιστή ενδιάμεσων λήψεων (taps).
- Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρας ανόρθωσης με έλεγχο φάσης-γωνίας. Για τη βελτίωση του Συντελεστή Ισχύος συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δύο γέφυρες εν σειρά.
Οι ασύμμετρες γέφυρες, όπως φαίνονται, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν μια οδό ελεύθερης διέλευσης (flywheel) για το ρεύμα της μηχανής. Παρόλο που οι DC μηχανές, μπορούν να παρέχουν ισχύ μέσω της πέδησης, οι παραπάνω μετατροπείς ηλεκτρικής ισχύος δε μπορούν να υποστηρίξουν την αμφίπλευρη ροή ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με μετατροπείς συνδεδεμένους εν σειρά, οι οποίοι όμως έχουν χαμηλό Συντελεστή Ισχύος και μεγάλη αρμονική παραμόρφωση.

DC Τροφοδοσία σε DC μηχανές :

Αρχικά, οι μηχανές αυτές ελεγχόντουσαν με μια μεταβλητή αντίσταση όσο η ταχύτητα αυξανόταν ούτως ώστε να διατηρηθεί σταθερό το ρεύμα διέγερσης. Σήμερα ο έλεγχος γίνεται μέσω ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (chopper). Οι μετατροπείς αυτοί λειτουργούν σε σταθερή συχνότητα και χρησιμοποιούν τη Διαμόρφωση Εύρους Παλμών για να μεταβάλουν την τάση. Χρησιμοποιείται έλεγχος κλειστού βρόχου ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό ρεύμα που απαιτείται για τη συγκεκριμένη ταχύτητα. Για τον περιορισμό των αρμονικών, πρέπει να εισαχθεί στην τοπολογία το απαραίτητο LC φίλτρο εισόδου. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι πως με πολύ απλές προσθήκες στο κύκλωμα μπορεί να επιστρέψει στο δίκτυο την ισχύ από την αναγεννητική πέδηση.

DC Τροφοδοσία σε AC μηχανές :

Για να γίνει εφικτή η τροφοδοσία της μηχανής, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας αντιστροφέα (Inverter). Με την κατάλληλη τοπολογία έξι ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων και διόδων γίνεται να επιτευχθεί παροχή μεταβλητής τάσης, μεταβαλλόμενης συχνότητας τριών φάσεων κατευθείαν από την DC παροχή. Αυτό γίνεται μέσω της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation ή εν συντομία SPWM). Η λογική πίσω από αυτή, είναι πως γίνεται σύγκριση της επιθυμητής κυματομορφής ημιτόνου που για την είσοδο της μηχανής με ένα τριγωνικό παλμό στη φέρουσα συχνότητα. Το αποτέλεσμα είναι μια σειρά ορθογώνιων παλμών πλάτους ίσου με της DC παροχής και εύρους αναλόγου της τιμής του δεδομένης τιμής του ημιτόνου. Δεδομένου του γεγονότος ότι η μηχανή είναι στην ουσία ένα βαθυπερατό φίλτρο, ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη συνιστώσα της σύνθετης κυματομορφής που εξάγεται, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η επιθυμητή συχνότητα τροφοδοσίας της μηχανής. Η τοπολογία αυτή επιτρέπει την αμφίπλευρη ροή ισχύος από και προς το δίκτυο.

AC Τροφοδοσία σε AC μηχανές :

Μέσω του κυκλομετατροπέα, είναι εύκολο να μετατραπεί μια πηγή σταθερής τάσης, σταθερής συχνότητας σε πηγή μεταβλητής τάσης, μεταβλητής συχνότητας. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για την τροφοδότηση σιδηροδρομικών ηλεκτρικών δικτύων που λειτουργούν σε συχνότητα $16\frac{2}{3}$ Hz, από το δίκτυο που λειτουργεί στα 50 Hz. Στην πραγματικότητα, η μόνη εφικτή λύση είναι η ανόρθωση την AC τάσης ώστε να τροφοδοτηθεί ένας DC ζυγός και μέσω αυτού, να τροφοδοτηθεί έναν αντιστροφέα. Η ανόρθωση επιτυγχάνεται μέσω ενός ανορθωτή με διόδους ενώ ένας μετατροπέας με θυρίστορ χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί σταθερή τάση στο ζυγό που τροφοδοτεί έναν μονοφασικό αντιστροφέα.

Το γεγονός αυτό προσφέρει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, χαμηλή αρμονική παραμόρφωση, απλή κατασκευή και τη δυνατότητα αμφίπλευρης ροής ισχύος.

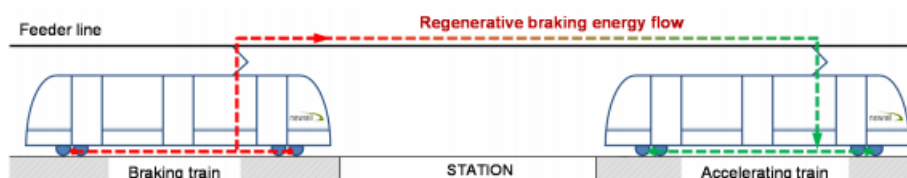
Εκτός από τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται DC τροφοδοσία, η τελευταία λέξη της τεχνολογίας για την τροφοδοσία μιας επαγωγικής μηχανής είναι μέσω αντιστροφέα που τροφοδοτείται από έναν DC ζυγό, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτείται από έναν μετατροπέα που ελέγχεται με τη μέθοδο PWM.

2.4 Αναγεννητική πέδηση

Όπως έγινε σαφές στην ενότητα (2.2), τα σιδηροδρομικά δίκτυα ηλεκτρικών τρένων, διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην αειφόρο ανάπτυξη των μητροπολιτικών περιοχών εξαιτίας της ενεργειακής του απόδοσης και της καλύτερης αναλογίας κατανάλωσης ενέργειας ως προς την ικανότητα μεταφοράς σε σχέση με τα άλλα μέσα μεταφοράς. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να γίνουν περαιτέρω βελτιώσεις στην αποδοτικότητα τους ώστε να διατηρήσουν τα πλεονεκτήματα που διαθέτουν. Σημαντικό ρόλο σε αυτό, διαδραματίζει η Δυναμική - Αναγεννητική πέδηση.

Κατά το φρενάρισμα του οχήματος, οι κινητήρες έχουν τη δυνατότητα να συμπεριφέρονται ως γεννήτριες, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρισμό. Η λειτουργία αυτή είναι γνωστή ως δυναμική πέδηση. Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου πέδησης σε σχέση με τη συμβατική πέδηση λόγω τριβής, είναι πως η δυναμική πέδηση, δεν παράγει φθορά, σκόνη, θερμότητα, οσμή ή ήχο. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται κατά την πέδηση μπορεί είτε να επιστραφεί και να επαναχρησιμοποιηθεί στο δίκτυο, λειτουργία γνωστή ως αναγεννητική πέδηση, είτε να καταναλωθεί σε μεταβλητές αντιστάσεις, λειτουργία γνωστή ως ροοστατική πέδηση. Παλαιότερα η ροοστατική πέδηση ήταν η μόνη επιλογή για τη διαχείριση της ισχύος που παραγόταν από την αναγεννητική πέδηση. Με τη σημαντική εξέλιξη όμως των ηλεκτρονικών ισχύος, η αναγεννητική πέδηση γνωρίζει μεγαλύτερη απήχηση στις μέρες μας και αποτελεί έναν βασικό τρόπο για τη μείωση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα ηλεκτρικών οχημάτων.

Στην αναγεννητική πέδηση, η παραγόμενη ενέργεια αρχικά χρησιμοποιείται στις βοηθητικές λειτουργίες των συρμών, (π.χ φωτισμός, κλιματισμός κλπ). Η υπόλοιπη ενέργεια επιστρέφεται στο δίκτυο μέσω της γραμμής παροχής ηλεκτρικής ισχύος και μπορεί να καταναλωθεί από άλλα οχήματα που βρίσκονται εντός του δικτύου. Υπάρχει περίπτωση, το δίκτυο να μη μπορεί πάντοτε να απορροφήσει την πλεονάζουσα, από την αναγεννητική πέδηση, ενέργεια δηλαδή να μην είναι δεκτικό. Αυτό συμβαίνει διότι, η επιστροφή της ενέργειας στο δίκτυο, μπορεί να είναι εφικτή μόνο εφόσον υπάρχει ταυτόχρονη κατανάλωση σε αυτό, όπως για παράδειγμα όταν ένας άλλος συρμός επιταχύνει στο ίδιο δίκτυο (εικόνα (2.7)). Η ενέργεια αυτή, η οποία δε μπορεί να καταναλωθεί, αναγκαστικά πρέπει να καταναλωθεί από τα ίδια τα οχήματα που την παράγουν, μέσω μεταβλητών αντιστάσεων (απορριπτικών φορτίων), τα οποία μπορεί να αποβούν ζημιογόνα καθώς προσθέτουν βάρος στον συρμό, κόστος αλλά και κίνδυνο ενδεχόμενης πυρκαγιάς.



Σχήμα 2.7: Κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας από την αναγεννητική πέδηση [4].

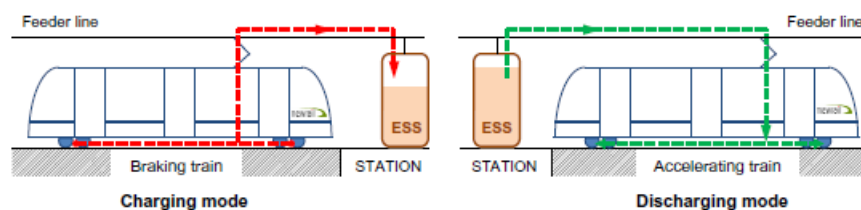
Η αναγεννητική πέδηση εκτός του ότι με την ενέργεια που παράγει αυξάνει την ενεργειακή απόδοση του σιδηροδρομικού δικτύου, συμβάλει στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων που συναντώνται στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η πτώσης τάσης στις γραμμές μεταφοράς. Ακόμη, σε υπόγειες εφαρμογές όπως το μετρό, η αναγεννητική πέδηση συμβάλει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης για τη θέρμανση, τον κλιματισμό και τον εξαερισμό.

Παρά το γεγονός ότι η αναγεννητική πέδηση, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, μόνο ένα μικρό ποσοστό της ανακτώμενης ενέργειας χρησιμοποιείται για τις βοηθητικές λειτουργίες του συρμού ή επιστρέφει πίσω στο δίκτυο. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας καταναλώνεται σε ηλεκτρικές αντιστάσεις. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν υπάρχει εμπειρία από

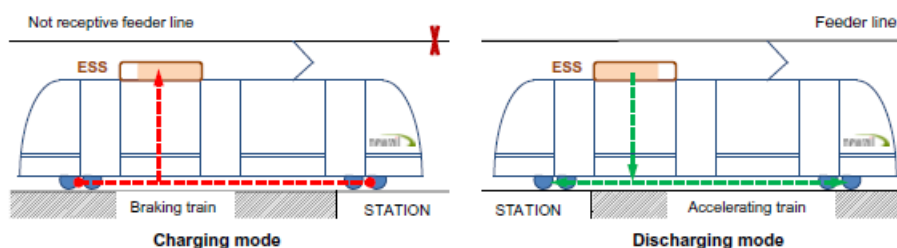
τους διαχειριστές του δικτύου, μιας και οι τεχνολογίες που επιτρέπουν την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της ενέργειας που εξοικονομείται από την αναγεννητική πέδηση είναι σχετικά σύγχρονες.

Οι μέθοδοι για την καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας που ανακτάται μέσω της αναγεννητικής πέδησης είναι οι παρακάτω [19] :

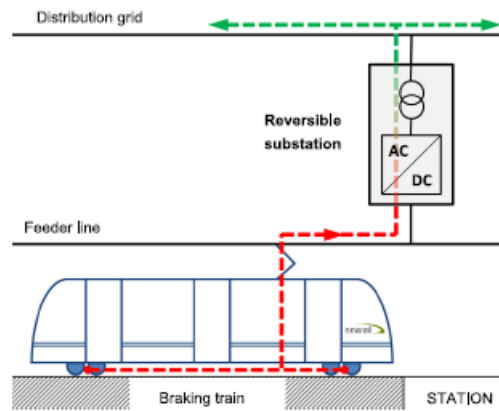
1. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στους ηλεκτρικούς συρμούς ώστε να μπορούν να αποθηκεύουν προσωρινά την πλεονάζουσα αναγεννητική ενέργεια και να την εγχέουν στο δίκτυο ή σε βοηθητικές λειτουργίες σε μεταγενέστερο χρόνο.
2. Βελτίωση της δεκτικότητας του δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ως εξής :
 - Οι υποσταθμοί παροχής ηλεκτρικής ισχύος να είναι εφοδιασμένοι με αντιστροφείς οι οποίοι επιτρέπουν την αμφίπλευρη ροή ισχύος με το δίκτυο (λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων) (Εικόνα (2.10)). Έτσι η πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να διατεθεί στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης.
 - Εξοπλισμός με συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε κάποιους υποσταθμούς ή και κατά μήκος των γραμμών (Εικόνα (2.8)). Ακόμη, τέτοια συστήματα μπορούν να τοποθετηθούν και πάνω σε κάθε τρένο (Εικόνα (2.9)). Με τον τρόπο αυτό η πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτά τα συστήματα και να διοχετευτεί στο δίκτυο όταν απαιτείται.
 - Βελτιστοποίηση του προγραμματισμού των δρομολογίων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν καλύτερα ο συγχρονισμός επιτάχυνσης και επιβράδυνσης των διαφόρων συρμών στο δίκτυο.



Σχήμα 2.8: Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας κατά μήκος των γραμμών ή σε υποσταθμό [4].



Σχήμα 2.9: Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας επι του συρμού [4].



Σχήμα 2.10: Αντιστροφείας αμφίπλευρης ροής ισχύος [4].

2.5 Διαφεύγοντα ρεύματα

Σύμφωνα με το ορισμό του πρότυπου [26], διαφεύγοντα ρεύματα είναι το μέρος του συνολικού ρεύματος το οποίο ακολουθεί διαφορετική διαδρομή από την προβλεπόμενη. Τα ρεύματα αυτά παρεκκλίνουν της προκαθορισμένης διαδρομής επειδή η αντίσταση της μη προκαθορισμένης διαδρομής είναι μικρότερη από αυτή της προκαθορισμένης ή ο παράλληλος συνδυασμός των αντιστάσεων, επιτρέπει μέρος του συνολικού ρεύματος να ακολουθήσει τη μη προκαθορισμένη διαδρομή. Συχνά στην καθημερινότητα, χρειάζεται να αντιμετωπιστούν προβλήματα που συνδέονται με τις επιβλαβείς επιπτώσεις που δημιουργούν συνεχείς πηγές ρεύματος σε κοντινά στη γείωση τους αντικείμενα (π.χ σωλήνωση, υπόγεια καλωδίωση κ.λ.π) [23].

2.5.1 Διαφεύγοντα ρεύματα στο ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο

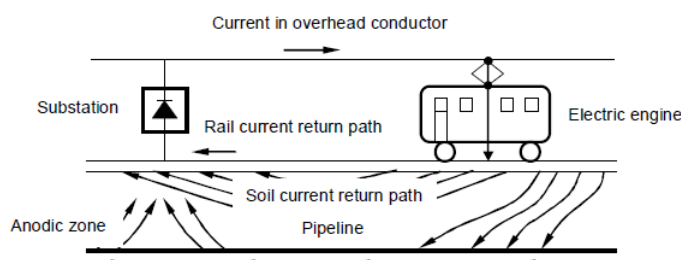
Τα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα, είναι κυρίως ηλεκτρικά και συγκεκριμένα συνεχούς ρεύματος (DC). Συνήθως στα συστήματα αυτά, οι γραμμές κύλισης χρησιμοποιούνται και σαν γραμμές επιστροφής του ρεύματος, για την ελαχιστοποίηση του κόστους. Εξαιτίας της ηλεκτρικής αντίστασης και αγωγιμότητας ως προς γή των γραμμών αυτών, παρόλο που είναι μονωμένες, μέρος του ρεύματος επιστροφής από το ηλεκτρικό τρένο προς τον Σταθμό Παροχής Ηλεκτρικής Ισχύος διαφεύγει στη γη. Το ρεύμα αυτό αποτελεί το διαφεύγων ρεύμα στο ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο [24].

Το γεγονός αυτό εισάγει δύο προβλήματα τα οποία θα πρέπει να μελετηθούν ως προς την αντιμετώπισή τους:

- Η αύξηση του δυναμικού της γραμμής κύλισης σε σχέση με τη γη.
- Οι επιπτώσεις των διαφευγόντων ρευμάτων, με κυριότερη την ηλεκτροχημική διάβρωση η οποία αναλύεται στην υποενότητα (2.5.2).

Ενώ ο πιο σημαντικός κίνδυνος που απασχολεί, είναι η πιθανή άμεση επαφή ανθρώπου με μια γραμμή κύλισης η οποία βρίσκεται υπό τάση, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν το διαφεύγων ρεύμα κατά μήκος των μη ιδανικών μονώσεων μεταξύ γραμμών κύλισης και γης [22].

Το πρόβλημα των διαφευγόντων ρευμάτων στο DC σιδηροδρομικό δίκτυο, εμφανίζεται σχηματικά στην εικόνα (2.11) :



Σχήμα 2.11: Διαφεύγοντα ρεύματα στο σιδηροδρομικό δίκτυο [23]

Κατά την κίνηση του ηλεκτρικού συρμού, ιδιαίτερα κατά την επιτάχυνση, το ρεύμα που απαιτείται για την κίνηση μπορεί να ανέρχεται έως και τα 6000 amperes. Θεωρώντας την αντίσταση των γραμμών κύλισης μεταξύ των 15-20 mΩkm⁻¹, το διαφεύγων ρεύμα υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να προκαλέσει πτώση τάσης της τάξης των 120 Vkm⁻¹. Η τάση αυτή, εξαιτίας της ανεπαρκούς μόνωσης των γραμμών και των υπόγειων υποδομών, επιτρέπει στο ρεύμα να διαρρέυσει το έδαφος [23, 24].

Η αντιμετώπιση του προβλήματος των διαφευγόντων ρευμάτων μπορεί να επιτευχθεί είτε με αλλαγές στο σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος, είτε με αλλαγές στις γειτνιάζουσες υπόγειες υποδομές. Ο καλύτερος έλεγχος των διαφευγόντων ρευμάτων επιτυγχάνεται με τους εξής τρόπους [25] :

1. Μειώνοντας την ηλεκτρική αντίσταση της επιστροφής του κυκλώματος, στην περίπτωση των σιδηροδρομικών ηλεκτρικών δικτύων την αντίσταση της γραμμής κύλισης των συρμών.
2. Αυξάνοντας την αντίσταση μεταξύ της γραμμής επιστροφής και της γης.
3. Αυξάνοντας την αντίσταση μεταξύ των υπογείων υποδομών και της γης.
4. Αυξάνοντας την αντίσταση των μεταλλικών υπογείων υποδομών.

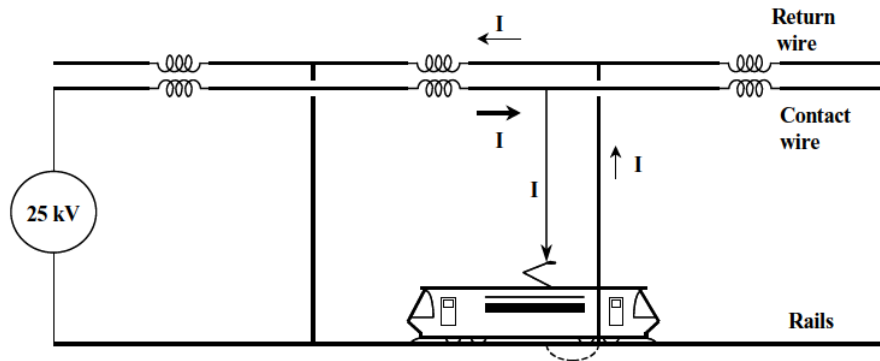
Οι μέθοδοι [1] και [2], αναφέρονται στην τροποποίηση του συστήματος μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος, ενώ οι [3] και [4] στην τροποποίηση των υπόγειων υποδομών του σιδηροδρομικού δικτύου [25].

Όπως και στα DC δίκτυα, έτσι και στα AC, τα διαφεύγοντα ρεύματα αποτελούν μεγάλο ζήτημα, αλλά για διαφορετικούς λόγους. Η ηλεκτροχημική διάβρωση, δεν είναι σύνθητες φαινόμενο στα AC δίκτυα. Όμως το διαφεύγων ρεύμα μπορεί να δημιουργήσει τα παρακάτω προβλήματα:

- Αύξηση της αυτεπαγωγής της γραμμής παροχής ισχύος, με συνέπεια μεγαλύτερη πτώση τάσης και απαίτηση για πιο κοντινούς υποσταθμούς παροχής ισχύος.
- Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται, επηρεάζει τις κοντινές γραμμές τηλεφωνίας με αποτέλεσμα να προκαλεί παρεμβολές ή ακόμη και επικίνδυνες τάσεις σε περιπτώσεις σφάλματος στο δίκτυο.

Όλα τα παραπάνω, μπορούν να επηρεάσουν το δίκτυο ή ακόμη και γειτονικές εγκαταστάσεις που δεν ανήκουν σε αυτό. Για το λόγο αυτό πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε να αμβλύνουν το πρόβλημα.

Σε ένα σύστημα των 25kV για παράδειγμα, ο τρόπος που ενδείκνυται για τη μείωση των διαφευγόντων ρευμάτων είναι η ύπαρξη ενός αγωγού επιστροφής του ρεύματος ψηλά και όχι στο δάπεδο, συνδεδεμένος εν σειρά με τα δευτερεύοντα τυλίγματα μιας σειράς Μετασχηματιστών Ανύψωσης, τα πρωτεύοντα τυλίγματα των οποίων είναι εν σειρά συνδεδεμένα με τη γραμμή παροχής. Αυτή η διάταξη η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα (2.12) επαναλαμβάνεται ανά τρία περίπου χιλιόμετρα.



Σχήμα 2.12: Διάταξη Μετασχηματιστή Ανύψωσης Τάσης για την αντιμετώπιση των διαφευγόντων ρευμάτων σε AC δίκτυο [3].

2.5.2 Ηλεκτροχημική διάβρωση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που προκύπτουν από τα διαφεύγοντα ρεύματα, είναι αυτό της Ηλεκτροχημικής Διάβρωσης. Τα διαφεύγοντα ρεύματα, μπορούν να εισέλθουν σε γειτονικές μεταλλικές υποδομές, όπως σωληνώσεις και σαν αποτέλεσμα της ανοδίσωσης προκαλούν ηλεκτροχημική διάβρωση στη διαδρομή που ακολουθούν. Το μέγεθος της απώλειας μάζας που προκαλείται από την ηλεκτροχημική διάβρωση σαν αποτέλεσμα της ανοδίσωσης εξαιτίας της ροής ρεύματος $i(t)$ από ένα μέταλλο σε ένα ηλεκτρολυτικό περιβάλλον μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση :

$$M = C \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt. \quad (2.1)$$

όπου C, ο ηλεκτροχημικός συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο του μετάλλου, του ηλεκτρολύτη και των χημικών υπολογισμών.

Για παράδειγμα ο όρος C υπολογίζεται $9.11 \text{ KgAYear}^{-1}$ για τον σίδηρο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ρεύμα έντασης 1 ampere μπορεί να προκαλέσει οξείδωση σε 9.11 κιλών σίδηρου κάθε χρόνο. Αυτό όπως γίνεται αντιληπτό μπορεί να μειώσει την ασφάλεια και την διάρκεια ζωής των δομών και των υποδομών στις σήραγγες. Για να γίνει σαφές το μέγεθος του προβλήματος, αξίζει να σημειωθεί πως εξαιτίας των διαφευγόντων ρευμάτων προκαλούνται καταστροφές αξίας 500 εκατομμυρίων δολλαρίων στον Αμερικάνικο Σιδηρόδρομο [24].

2.6 Ενεργειακή κατανάλωση των τρένων

Οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός ηλεκτρικού συρμού, δε περιορίζονται μόνο σε αυτές για την κίνηση του και μπορούν να κατανεμηθούν στις παρακάτω κατηγορίες ανάλογα με το είδος των απωλειών [18] :

- Μηχανικές Απώλειες. Προκειμένου να υπάρξει κίνηση, η μηχανική ισχύς στους τροχούς πρέπει να ξεπεράσει τις αντιστάσεις που δημιουργούνται εξαιτίας της τριβής, της αδράνειας και της αντίστασης της κίνησης.

- Απώλειες συστημάτων κίνησης. Οι διάφοροι μηχανισμοί πέδησης των συρμών και η μηχανική ισχύς που καταναλώνεται σε αυτούς, προκαλεί σημαντικό ποσό θερμικών απωλειών.
- Απώλειες βοηθητικών υπηρεσιών. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι απώλειες εξαιτίας διαφόρων βοηθητικών λειτουργιών, όπως για παράδειγμα ο εξαερισμός των βαγονιών. Ακόμη, σημαντικό είναι το ποσοστό της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την εξασφάλιση ανέσεων για τους επιβάτες όπως για παράδειγμα ο φωτισμός, η θέρμανση κλπ.
- Απώλειες γραμμών μεταφοράς. Όπως είναι γνωστό, οι γραμμές μεταφορές δεν αποτελούν τέλειους αγωγούς, αλλά διαθέτουν κάποια αντίσταση. Επομένως μέρος της τροφοδοτούμενης ισχύος καταναλώνεται στην πορεία από τους υποσταθμούς στον συρμό, εξαιτίας των αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς.

2.7 Επίλυση της ροής ισχύος στο δίκτυο

Η ισχύς αποτελεί το βασικό μέτρο, το οποίο χαρακτηρίζει το μέγεθος και την ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο ως σύνολο όσο και κάθε στοιχείου της εγκατάστασής του. Η ηλεκτρική ισχύς στο συνεχές ρεύμα ισούται με το γινόμενο της τάσεως επί του ρεύματος [20].

Η επίλυση της ροής ισχύος, αφορά τον υπολογισμό των τάσεων καθώς και των ροών ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο ορίζεται από τις καταναλώσεις των φορτίων την παραγωγή της ισχύος και τις τάσεις των γεννητριών. Η μελέτη της ροής ισχύος σε ένα δίκτυο είναι απαραίτητη για διάφορους λόγους εκ των οποίων μερικοί είναι [21] :

- Για τον έλεγχο των τάσεων και ροών, ώστε να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας (π.χ θερμικά όρια γραμμών).
- Για τη μελέτη των επιπτώσεων ενδεχόμενων διαταραχών (απώλεια γραμμής, γεννήτριας κλπ).
- Για την επιλογή της πλέον οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος, καθώς κατά τη διάρκεια της ημέρας τα φορτία συνεχώς μεταβάλλονται, επομένως απαιτείται συχνά εκ νέου ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας, ώστε τα φορτία να τροφοδοτούνται με τον οικονομικότερο τρόπο.
- Για μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τα παραπάνω, γίνεται σαφές πως η ανάλυση των ροών φορτίου είναι το βασικό στοιχείο για όλες τις μελέτες που αφορούν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και πρόκειται για το πιο συνηθισμένο εργαλείο που χρησιμοποιούν οι αναλυτές των συστημάτων αυτών [21].

Για την επίλυση της ροής ισχύος, απαιτείται να είναι γνωστή η μήτρα αγωγιμοτήτων καθώς και οι εγχύσεις ισχύος σε κάθε κόμβο του συστήματος. Η επίλυση γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστή, με διάφορες μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης, όπως η Newton-Raphson, η Gauss-Seidel, η αποζευγμένη ροή φορτίου κ.λ.π [16].

Κεφάλαιο 3

Μαθηματική Μοντελοποίηση

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 3, θα μελετηθούν εκτενώς τα μοντέλα τα οποία αντιπροσωπεύουν κάθε τμήμα του δικτύου, καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που τα διέπουν, ώστε να είναι εφικτή η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος. Αυτό σημαίνει πως παρουσιάζεται και αναλύεται η μαθηματική μοντελοποίηση των σταθμών παροχής ηλεκτρικής ισχύος, των ηλεκτρικών συρμών σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις κίνησης τους (επιτάχυνση, πέδηση) καθώς και των ηλεκτρικών γραμμών παροχής ισχύος.

Ακόμη αναλύεται η επίλυση της ροής φορτίου μέσω της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson και τέλος, εξηγούνται οι δύο τρόποι μοντελοποίησης του δικτύου για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων και του δυναμικού, οι εξισώσεις των μαθηματικών μοντέλων και ο τρόπος επίλυσης του συστήματος που προκύπτει μέσω της LU παραγοντοποίησης.

Στο τέλος, με τη βοήθεια της παραπάνω μοντελοποίησης, παρουσιάζεται ο συνολικός αλγόριθμος για την επίλυση της ροής φορτίου και τον υπολογισμό της τάσης ως προς γη που αναπτύσσεται στις γραμμές κύλισης.

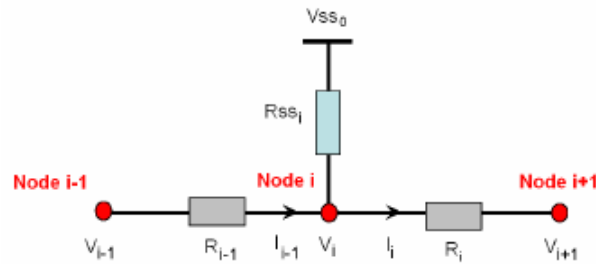
3.2 Περιγραφή μοντελοποίησης των επιμέρους ηλεκτρικών μερών του δικτύου

Στη συγκεκριμένη ενότητα, θα μελετηθεί η μοντελοποίηση των επιμέρους τμημάτων που αποτελούν το συνολικό δίκτυο. Θα περιγραφούν αναλυτικά τα μαθηματικά μοντέλα, τα ισοδύναμα κυκλώματα και οι εξισώσεις για τους υποσταθμούς, τις γραμμές παροχής και τους ηλεκτρικούς συρμούς.

3.2.1 Ηλεκτρικοί υποσταθμοί

Το σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελείται από ένα πλήθος ηλεκτρικών υποσταθμών. Αυτοί μοντελοποιούνται μέσω μιας DC πηγής τάσης, εν σειρά με μια εσωτερική αντίσταση και μια δίοδο. Η πηγή τάσης χρησιμοποιείται ώστε να παρέχει μια συνεχή τάση προκειμένου να

ηλεκτροδοτείται το δίκτυο. Στην περίπτωση που υπάρχει ανάστροφη ροή ισχύος, η διόδος βρίσκεται σε κατάσταση μη αγωγής, επομένως η αντίσταση της θεωρείται άπειρη, πράγμα που σημαίνει πως συμπεριφέρεται σαν ανοιχτοκύκλωμα.



Σχήμα 3.1: Μοντελοποίηση Ηλεκτρικού Υποσταθμού [5].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αν υπάρχει ροή ισχύος από το δίκτυο προς τον υποσταθμό, τότε η αντίσταση R_{SS} λαμβάνει μια μεγάλη τιμή προκειμένου να θεωρηθεί ως ανοιχτοκύκλωμα.

Οι εξισώσεις που χρειάζονται για τον προσδιορισμό των αγνώστων μεταβλητών της τάσης και του ρεύματος είναι οι :

- Κατά την αγωγή της διόδου :

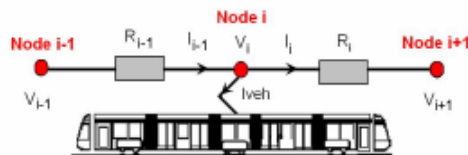
$$\begin{aligned} R_{SSi}(I_i - I_{i-1}) + V_i &= V_{SS0} \\ V_i - V_{i+1} - R_i \times I_i &= 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

- Κατά την αποκοπή :

$$\begin{aligned} I_i &= I_{i-1} \\ V_i + R_{i-1}I_{i-1} &= V_{i-1} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2.2 Ηλεκτρικές γραμμές

Το δίκτυο αποτελείται από δύο κατευθύνσεις όδευσης των τρένων. Κάθε κατεύθυνση περιέχει δύο γραμμές μεταφοράς οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα μεταξύ τους, συνδέοντας τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς διαδοχικά. Οι γραμμές αυτές στην πράξη μοντελοποιούνται ως μεταβλητές ωμικές αντιστάσεις, οι οποίες εξαρτώνται από την απόσταση του συρμού από την αρχή της γραμμής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, όσο το τρένο κινείται κατά μήκος της γραμμής, να μεταβάλλεται αντίστοιχα η αντίσταση.



Σχήμα 3.2: Μοντελοποίηση Ηλεκτρικών Γραμμών [5].

Οι εξισώσεις υπολογισμού των αντιστάσεων είναι οι :

$$\begin{aligned} R_{i-1} &= (x - SubstationDistance_{i-1}) \times R_{line} \\ R_i &= (SubstationDistance_i - x) \times R_{line} \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου:

x = Η απόσταση του τρένου από την αρχή της γραμμής.

$SubstationDistance_i$ = Η απόσταση του Υποσταθμού i από την αρχή της γραμμής.

R_{line} = Η χαρακτηριστική αντίσταση της ηλεκτρικής γραμμής (Ωkm^{-1}).

3.2.3 Τρένο

Για τη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού τρένου, θα πρέπει να γίνει διάκριση δύο καταστάσεων, αυτή της Έλξης και αυτή της Πέδησης του συρμού ώστε να είναι εφικτή η μαθηματική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του.

3.2.3.1 Έλξη

Κατά την έλξη του συρμού, το τρένο συμπεριφέρεται ως μια εξαρτημένη πηγή ρεύματος. Τότε οι εξισώσεις που μοντελοποιούν το υποσύστημα του τρένου είναι οι :

$$\begin{aligned} I_i - I_{i-1} &= -I_{veh} \\ V_i - V_{i+1} &= R_i \times I_i \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.2.3.2 Πέδηση

Κατά την πέδηση εφόσον η τάση του τρένου είναι μικρότερη από αυτή που έχει τεθεί ως μέγιστη επιτρεπτή, το τρένο μοντελοποιείται ακριβώς με τις ίδιες εξισώσεις της έλξης απλά το ρεύμα του τρένου I_{veh} έχει διαφορετικό πρόσημο με πριν.

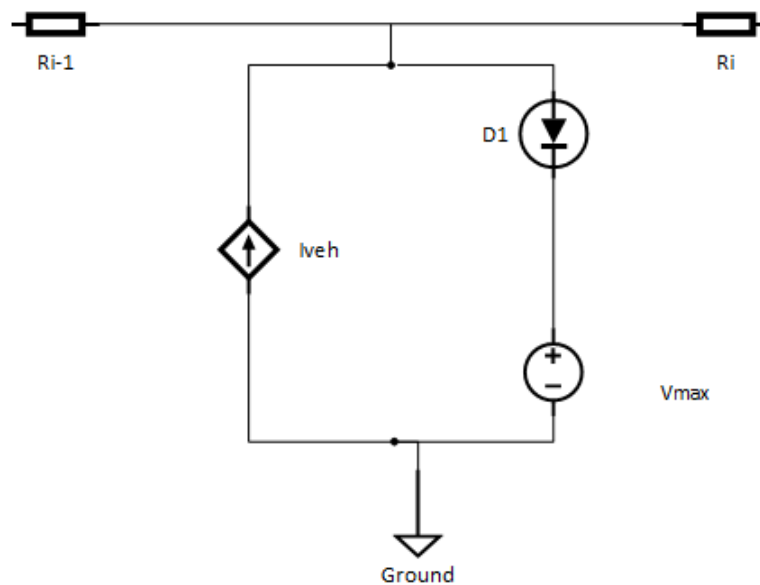
Αν κατά τη διάρκεια της πέδησης η τάση του ζυγού του συρμού ξεπεράσει την επιτρεπόμενη μέγιστη τιμή τάσης που έχει τεθεί, όταν δηλαδή η ισχύς που παράγεται δε μπορεί να καταναλωθεί από κάποιο άλλο συρμό στο δίκτυο, τότε ο συρμός μοντελοποιείται ως μια πηγή τάσης, της οποίας η τιμή ορίζεται ως τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της τάσης του τρένου :

$$\begin{aligned} V_i &= V_{max} \\ V_i - V_{i+1} &= R_i \times I_i \end{aligned} \quad (3.5)$$

Συνολικά, το μοντέλο του τρένου θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί ως μια εξαρτημένη πηγή ρεύματος, συνδεδεμένη παράλληλα με μια πηγή τάσης, η οποία θα έχει τιμή τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή τάσης του συρμού, μέσω μιας διόδου.

Συνεπώς, η τιμή της αντίστασης της διόδου θα είναι μεγάλη όταν η τάση του ζυγού του τρένου έχει τάση μικρότερη της μέγιστης τιμής, ώστε να θεωρούμε τη diόδο σαν ανοιχτό κύκλωμα.

Αντιθέτως όταν η τιμή της τάσης στο ζυγό του τρένου ξεπεράσει τη μέγιστη τιμή, τότε η αντίσταση της διόδου αντικαθίσταται με μια μικρή τιμή, ώστε να θεωρείται η διόδος σαν βραχυκύκλωμα και η τάση του ζυγού του τρένου να ταυτίζεται με αυτή της πηγής τάσης, δηλαδή τη μέγιστη επιτρεπόμενη δυνατή. Το συνολικό μοντέλο παριστάνεται στο επόμενο σχήμα :



Σχήμα 3.3: Συνολικό Μοντέλο Ηλεκτρικού Οχήματος.

Το ρεύμα για την έλξη του συρμού είναι μια μεταβλητή που εξαρτάται από το DC μοντέλο του δικτύου και το μηχανικό-δυναμικό μοντέλο του συστήματος, ανάλυση του οποίου δε γίνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Το μηχανικό-δυναμικό μοντέλο του συρμού επιτρέπει τον υπολογισμό της κίνησης και της απόδοσης του.

3.3 Επίλυση της ροής φορτίου

Στο κεφάλαιο 2, έγινε αναφορά στη ροή φορτίου και στους λόγους για τους οποίους είναι ιδιαίτερα σημαντική η επίλυση της για τον διαχειριστή του δικτύου. Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση του τρόπου επίλυσης της ροής φορτίου, με τη βοήθεια της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson, για ένα DC δίκτυο.

3.3.1 Η μέθοδος Newton-Raphson

Η συγκεκριμένη μέθοδος ανακυκλώσεως είναι σύνθετη αλλά ασφαλής καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις συγκλίνει, ειδικά αν η επαναληπτική διαδικασία ξεκινήσει κοντά στη ζητούμενη λύση, και μάλιστα ταχύτερα από άλλες μεθόδους (π.χ Gauss-Seidel).

Η μέθοδος Newton-Raphson, εφαρμόζεται σε ένα δίκτυο n ζυγών ως εξής [17] : Αρχικά οι ισχύς των ζυγών, εκφράζονται ως μη γραμμικές συναρτήσεις των τάσεων των ζυγών σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις :

$$\begin{aligned}
P_1 &= V_1(G_{11}V_1 + G_{12}V_2 + \dots + G_{1n}V_n) \\
P_2 &= V_2(G_{21}V_1 + G_{22}V_2 + \dots + G_{2n}V_n) \\
&\vdots \\
P_n &= V_n(G_{n1}V_1 + G_{n2}V_2 + \dots + G_{nn}V_n)
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Οι αλλαγές στις τάσεις των ζυγών (Πίνακας $[\Delta V]$), αναμένεται να προκαλέσουν αλλαγές στις αντίστοιχες ισχύς των ζυγών (Πίνακας $[\Delta P]$). Συνεπώς μια γραμμικοποιημένη προσέγγιση των μεταβολών της ισχύος σε κάθε ζυγό σαν συνάρτηση των μεταβολών των τάσεων μπορεί να εκφραστεί με το παρακάτω σύστημα εξισώσεων :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \frac{\partial P_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Ο παραπάνω πίνακας μπορεί να γραφεί συμβολικά ως εξής :

$$[\Delta P] = [J] [\Delta V] \tag{3.8}$$

όπου $[J]$, αναφέρεται ο Ιακωβιανός πίνακας, ο οποίος περιέχει τις μερικές παραγώγους των ισχύων ως προς αυτές των τάσεων για ένα σύνολο τάσεων, δηλαδή οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων 3.6. Ο Ιακωβιανός πίνακας αλλάζει όταν υπάρξει αλλαγή σε μια ή περισσότερες τάσεις.

Στο δεδομένο πρόβλημα, οι ζυγοί των Σταθμών Παροχής Ηλεκτρικής Ισχύος, θεωρούνται άπειροι ζυγοί (slack buses), επομένως οι τάσεις τους θεωρούνται σταθερές. Κατά συνέπεια οι εξισώσεις που αφορούν τους άπειρους ζυγούς, μπορούν να παραληφθούν από το σύστημα εξισώσεων 3.7.

Οι αλλαγές στις παραπάνω τάσεις, εξαιτίας των αλλαγών των ισχύων μπορούν να υπολογιστούν εύκολα με την αναστροφή του Ιακωβιανού πίνακα $[J]$:

$$[\Delta V] = [J]^{-1} [\Delta P] \tag{3.9}$$

Συνεπώς τα βήματα της μεθόδου Newton-Raphson, είναι τα εξής :

1. Ανάθεση εκτιμώμενων τιμών στις τάσεις που επιθυμούμε να υπολογίσουμε.
2. Υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών των ισχύων, μέσω των εξισώσεων 3.6

3. Υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ της τιμής ισχύος που υπολογίστηκε με την καθορισμένη τιμή ως εξής :

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= P_1 - P'_1 \\ \Delta P_2 &= P_2 - P'_2 \\ &\vdots \\ \Delta P_n &= P_n - P'_n\end{aligned}\tag{3.10}$$

4. Υπολογισμός των νέων εκτιμήσεων των τάσεων των ζυγών από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}_{new} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}_{old} - [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix}\tag{3.11}$$

Η εξίσωση (3.11), είναι η βασική εξίσωση της μεθόδου Newton-Raphson. Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στον τρόπο που ορίζεται η διαφορά ΔP , από την (3.10).

5. Επανάληψη των βημάτων 2 έως 4 έως ότου οι διαφορές που υπολογίζονται από την 3.10 να είναι μικρότερα από μια τιμή που ορίζουμε ως ανοχή της μεθόδου. Ακόμη ορίζουμε έναν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων εντός των οποίων πρέπει να συγκλίνει η μέθοδος. Όπως γίνεται αντιληπτό, κριτήριο σύγκλισης της μεθόδου είναι το :

$$\Delta P \leq \textit{tolerance} , \textit{iterations} \leq \textit{maximum iterations}$$

, όπου *tolerance* η ανοχή της μεθόδου που ορίσαμε προηγουμένως, *iterations*, ο αριθμός των επαναλήψεων των βημάτων και *maximum iterations* ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που θέτουμε.

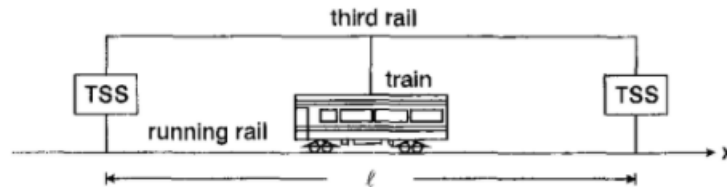
3.4 Μοντέλο για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων. Αυτά είναι το μοντέλο που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των κατανεμημένων στοιχείων και αυτό που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Θα αναλυθούν όλες οι πιθανές περιπτώσεις γείωσης, όπως η σταθερή γείωση, η γείωση με διόδους και η έλλειψη γείωσης.

3.4.1 Μέθοδος Κατανεμημένων Στοιχείων

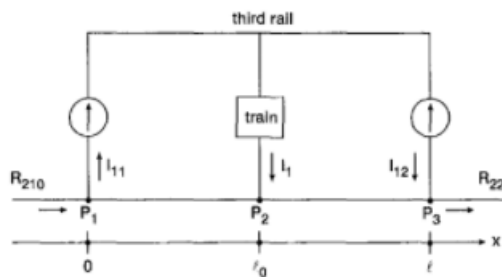
3.4.1.1 Χωρίς Γείωση

Για ένα απλοποιημένο σύστημα με ένα τρένο και δύο υποσταθμούς, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (3.4), με τη γραμμή παροχής να έχει πεπερασμένο μήκος l και θεωρώντας αντίσταση μεταξύ γραμμής κύλισης και γης ομογενή η μέθοδος των κατανεμημένων στοιχείων περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα.



Σχήμα 3.4: Απλοποιημένο σύστημα για τη μελέτη των διαφυγόντων ρευμάτων [25].

Για τον προσδιορισμό των διαφυγόντων ρευμάτων, οι υποσταθμοί αντικαθίστανται από πηγές εξαρτημένες ρεύματος. Τα σημεία P1 και P3 είναι σταθερά ενώ το σημείο P2 είναι μεταβλητό καθώς αντιπροσωπεύει τη θέση του τρένου, όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.5: Μοντέλο κατανεμημένων στοιχείων για τον υπολογισμό του δυναμικού γραμμής κύλισης και διαφυγόντων ρευμάτων χωρίς γείωση της γραμμής κύλισης [25].

Από το νόμο του Kirchoff προκύπτουν οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις για το ρεύμα και το δυναμικό της γραμμής παροχής ισχύος :

$$\frac{\partial^2 i(x)}{\partial x^2} - \gamma^2 i(x) = 0 \quad (3.12)$$

$$V(x) = -\frac{1}{G} \frac{\partial i(x)}{\partial x} \quad (3.13)$$

Με την επίλυση των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων, προκύπτουν οι τελικές εξισώσεις του ρεύματος της γραμμής παροχής ισχύος $i(x)$ καθώς και του δυναμικού της $v(x)$, για κάθε διάστημα. Μεταξύ των σημείων P1 P2 και P3 P4 προκύπτουν ως εξής [25]

Στο διάστημα μεταξύ των P1 P2:

$$i(x) = c_1 e^{\gamma x} + c_2 e^{-\gamma x} \quad (3.14)$$

$$v(x) = -R_0(c_1e^{\gamma x} + c_2e^{-\gamma x}) \quad (3.15)$$

Στο διάστημα μεταξύ των P_3 P_4 :

$$i(x) = c_3e^{\gamma x} + c_4e^{-\gamma x} \quad (3.16)$$

$$v(x) = -R_0(c_3e^{\gamma x} + c_4e^{-\gamma x}) \quad (3.17)$$

όπου:

$$\gamma = \text{σταθερά διάδοσης (m}^{-1}\text{)} = \sqrt{RG}$$

$$R_0 = \text{Χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής παροχής ισχύος (\Omega}^{-1}\text{)} = \sqrt{RG}$$

$$R = \text{Αντίσταση ανά μονάδα μήκους (\Omega m}^{-1}\text{)}$$

$$G = \text{Αγωγιμότητα γραμμής ως προς γη (Sm}^{-1}\text{)}$$

c_1, c_2, c_3 και c_4 σταθερές που καθορίζονται από τις οριακές συνθήκες.

Αντικαθιστώντας τις οριακές συνθήκες και χρησιμοποιώντας τους Νόμους του Kirchhoff για το ρεύμα και την τάση, οι σταθερές, c_1, c_2, c_3 και c_4 μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$c_1 = \Delta^{-1} \left[-(1 - k_2)e^{-\gamma l} I_{11} + (1 + k_1)I_{12} + (1 + k_1)\frac{k_p I_1}{2} \right] \quad (3.18)$$

$$c_2 = \Delta^{-1} \left[(1 + k_2)e^{\gamma l} I_{11} - (1 - k_1)I_{12} - (1 - k_1)\frac{k_p I_1}{2} \right] \quad (3.19)$$

$$c_3 = \Delta^{-1} \left[-(1 - k_2)e^{-\gamma l} I_{11} + (1 + k_1)I_{12} + (1 + k_1)\frac{k_p I_1}{2} \right] + \frac{I_1}{2} e^{-\gamma l_0} \quad (3.20)$$

$$c_4 = \Delta^{-1} \left[(1 + k_2)e^{\gamma l} I_{11} - (1 - k_1)I_{12} - (1 - k_1)\frac{k_p I_1}{2} \right] + \frac{I_1}{2} e^{\gamma l_0} \quad (3.21)$$

όπου:

$$\Delta = (1 - k_1)(1 - k_2)e^{-\gamma l} - (1 + k_1)(1 + k_2)e^{\gamma l}$$

$$k_p = (1 + k_2)e^{\gamma l_p} + (1 - k_2)e^{-\gamma l_p}$$

$$l_p = l - l_0$$

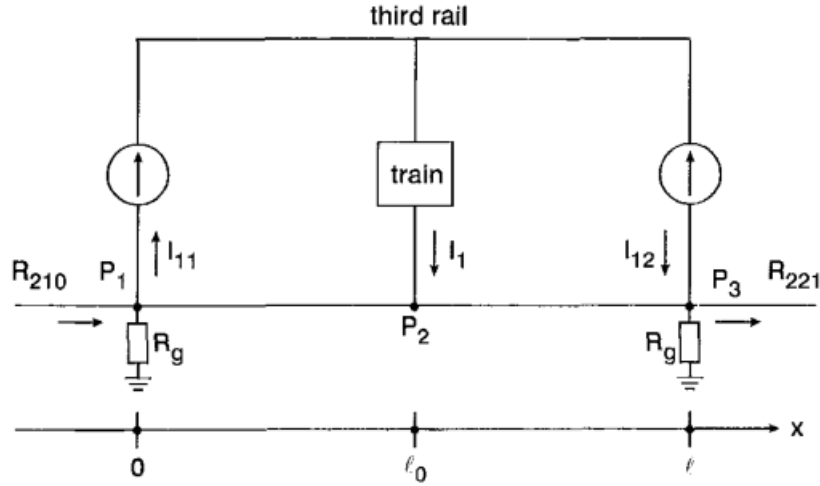
$$k_1 = \frac{R_0}{R_{210}}$$

$$k_2 = \frac{R_0}{R_{221}}$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 3.18 - 3.21 στις εξισώσεις 3.14 - 3.17, μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό της γραμμής και το διαφεύγων ρεύμα στο κάθε κομμάτι της γραμμής.

3.4.1.2 Γειωμένη γραμμή κύλισης

Το μοντέλο της γειωμένης γραμμής κύλισης, είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιούμε όταν δεν υπάρχει γείωση με τη διαφορά ότι γραμμή είναι γειωμένη στους υποσταθμούς όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.6 :



Σχήμα 3.6: Μοντέλο καταναμημένων στοιχείων για τον υπολογισμό του δυναμικού γραμμής κύλισης και διαφυγόντων ρευμάτων στην περίπτωση γειωμένης γραμμής κύλισης [25].

. Οι εξισώσεις για τον προσδιορισμό των διαφυγόντων ρευμάτων και του δυναμικού της γραμμής είναι ίδιες με τις 3.14 - 3.17. Το μόνο που πρέπει να προστεθεί, είναι η αντίσταση της γείωσης στις εξισώσεις των σταθερών. Έτσι προκύπτει :

$$c_1 = \Delta^{-1} \left[-(1 - k_2 - k_g)e^{-\gamma l} I_{11} + (1 + k_1 + k_g) I_{12} + (1 + k_1 + k_g) \frac{k_p I_1}{2} \right] \quad (3.22)$$

$$c_2 = \Delta^{-1} \left[(1 + k_2 + k_g)e^{\gamma l} I_{11} - (1 - k_1 - k_g) I_{12} - (1 - k_1 - k_g) \frac{k_p I_1}{2} \right] \quad (3.23)$$

$$c_3 = \Delta^{-1} \left[-(1 - k_2 - k_g)e^{-\gamma l} I_{11} + (1 + k_1 + k_g) I_{12} + (1 + k_1 + k_g) \frac{k_p I_1}{2} \right] + \frac{I_1}{2} e^{-\gamma l_0} \quad (3.24)$$

$$c_4 = \Delta^{-1} \left[(1 + k_2 + k_g)e^{\gamma l} I_{11} - (1 - k_1 - k_g) I_{12} - (1 - k_1 - k_g) \frac{k_p I_1}{2} \right] + \frac{I_1}{2} e^{\gamma l_0} \quad (3.25)$$

όπου:

$$\Delta = (1 - k_1 - k_g)(1 - k_2 - k_g)e^{-\gamma l} - (1 + k_1 + k_g)(1 + k_2 + k_g)e^{\gamma l}$$

$$k_2 = R_0/R_{221}$$

$$k_g = R_0/R_g$$

$$k_p = (1 + k_2 + k_g)e^{\gamma l_p} + (1 - k_2 - k_g)e^{-\gamma l_p}$$

$$l_p = l - l_0$$

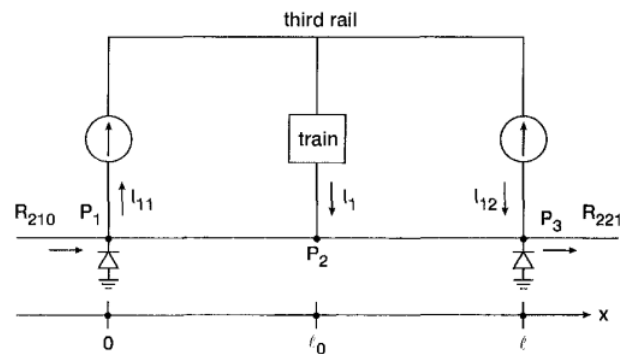
Όμοια με πριν αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 3.22 - 3.25 στις εξισώσεις 3.14 - 3.17 μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό που αναπτύσσεται στη γραμμή σε σχέση με τη γη και το διαφεύγον ρεύμα.

3.4.1.3 Γειωμένη γραμμή κύλισης με διόδους

Η γειωμένη γραμμή κύλισης με διόδους αντιπροσωπεύει μια ενδιάμεση λύση σε σχέση με τις δύο που προαναφέρθηκαν. Συχνά το σχήμα αυτό χρησιμοποιείται για να περιορίσει τη διάβρωση από τα διαφεύγοντα ρεύματα, αλλά να διατηρεί και το δυναμικό σε ένα ασφαλές επίπεδο. Τα συστήματα αυτά περιέχουν μια μεταλλική επαφή κατευθείαν στο ζυγό του ανορθωτή μέσω της γείωσης μέσω μιας διόδου. Η διάδος επιτρέπει το ρεύμα να ρέει προς τον αρνητικό ζυγό όταν η ένταση ξεπεράσει κάποιο κατώφλι. Το κατώφλι αυτό εξαρτάται από την κατάσταση του υποσταθμού και μπορεί να είναι από 10 έως και 50 Volts.

Με τον τρόπο αυτό, το ηλεκτρικό δυναμικό διαχέεται προτού φτάσει σε επικίνδυνο επίπεδο. Τα συστήματα αυτά ακολουθούν τις αρχές που ειπώθηκαν πριν, όπως για παράδειγμα να διατηρούν υψηλή αντίσταση μεταξύ της γραμμής και της γης. Πάραυτα, σε τέτοια συστήματα μπορεί να συμβεί διάβρωση των υποδομών, ειδικά στις γραμμές κύλισης και στις ενώσεις τους όπου συναντώνται μικρές αντιστάσεις ανάμεσα στη γραμμή και τη γη.

Οι εξισώσεις της μεθόδου αυτής για το δυναμικό και το διαφεύγον ρεύμα είναι συνδυασμός των αποτελεσμάτων της έλλειψης γείωσης και της γειωμένης γραμμής ανάλογα με το αν άγει ή όχι η διάδος, για το λόγο αυτό δε χρειάζεται να επαναπροσδιορίσουμε τις εξισώσεις. Η αναλυτική μοντελοποίηση του δυναμικού και των διαφευγόντων ρευμάτων μεταξύ δύο υποσταθμών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (3.7) :



Σχήμα 3.7: Μοντέλο κατανεμημένων στοιχείων για τον υπολογισμό του δυναμικού γραμμής κύλισης και διαφευγόντων ρευμάτων στην περίπτωσης γείωσης με διόδους [25].

3.4.2 Μέθοδος Συγκεντρωμένων Στοιχείων

Η δεύτερη αυτή μέθοδος βασίζεται στη χρήση Συγκεντρωμένων Στοιχείων ή του ισοδυναμίου Π στη DC λειτουργία. Στη μέθοδο αυτή η γραμμή διαιρείται σε ίσα τμήματα, με κάθε τμήμα να μοντελοποιείται με μια αντίσταση και μια αγωγιμότητα ως προς γη.

Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο κατακερματισμός του δίκτυο σε «μικρά» κομμάτια ώστε να ισχύει :

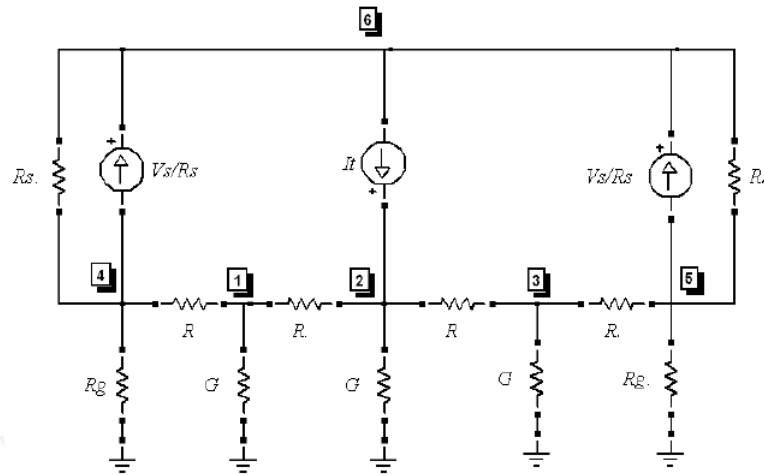
$$\gamma \times l < 0.1 \quad (3.26)$$

Τότε η ηλεκτρική γραμμή μπορεί να θεωρηθεί ηλεκτρικά «μικρή» και έτσι μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των Συγκεντρωμένων Στοιχείων με αποδεκτή ακρίβεια [22], γιατί σε αυτή τη

περίπτωση η εκθετική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί ως :

$$e^x = 1 + x \quad (3.27)$$

Αφού ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη, κάθε υποσταθμός μοντελοποιείται με βάση το ισοδύναμο του κύκλωμα κατά Thevenin, δηλαδή με μια πηγή τάσης εν σειρά με την ισοδύναμη αντίσταση ή με το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Norton, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.8). Το τρένο επίσης μοντελοποιείται ως μια χρονομεταβλητή πηγή ρεύματος.



Σχήμα 3.8: Μοντέλο Συγκεντρωμένων Στοιχείων για τον υπολογισμό του δυναμικού γραμμής κύλισης και διαφευγόντων ρευμάτων [24].

Εν τέλει, βάσει το προτεινόμενο μοντέλο και εφαρμόζοντας τους κανόνες της μεθόδου κόμβων είναι εφικτός ο υπολογισμός του δυναμικού της γραμμής κύλισης ως προς γη όπως και τα διαφεύγοντα ρεύματα. Το γραμμικό σύστημα που προκύπτει από τη μέθοδο κόμβων είναι το :

$$\bar{Y}_n \cdot \bar{e} = \bar{i}_s \quad (3.28)$$

όπου :

\bar{Y}_n η μήτρα αγωγιμοτήτων του συστήματος

\bar{e} η μήτρα που περιέχει την τάση του κάθε κόμβου

\bar{i}_s η μήτρα που περιέχει τις πηγές ρεύματος του κάθε ζυγού.

Στη μήτρα αγωγιμοτήτων, τα στοιχεία y_{ii} υπολογίζονται ως το άθροισμα όλων των αγωγιμοτήτων που συνδέονται με τον i-οστό ζυγό και τα στοιχεία y_{ij} υπολογίζονται ως το αρνητικό άθροισμα όλων των αγωγιμοτήτων που συνδέουν τους ζυγούς i και j. Επιπλέον, στη μήτρα των πηγών ρευμάτων, το στοιχείο i_{si} , υπολογίζεται ως το άθροισμα όλων των ρευμάτων που εισέρχονται στον i-οστό κόμβο. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν στον υπολογισμό της μήτρας των ρευμάτων και η φορά των ρευμάτων ώστε αν εισέρχεται στον κόμβο να έχει θετικό πρόσημο και αν εξέρχεται να έχει αρνητικό. Η μήτρα των τάσεων είναι ο άγνωστος και υπολογίζεται

λύνοντας το γραμμικό σύστημα (3.28). Ο πίνακας αυτός αντιπροσωπεύει το δυναμικό μεταξύ της γραμμής κύλισης και της γης.

Εξαιτίας της ύπαρξης του δικτύου των αντιστάσεων, η μήτρα αγωγιμοτήτων είναι συμμετρική και έχει θετική ορίζουσα. Η τάση του κάθε υποσταθμού μπορεί να υπολογιστεί από την επίλυση της ροής ισχύος του δικτύου. Επίσης το ρεύμα I_t του μοντέλου του τρένου, μπορεί να βρεθεί από τις εξισώσεις ρεύματος - ταχύτητας του.

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την προσομοίωση και τη μοντελοποίηση διαφόρων δομών του δικτύου με μικρές αλλαγές. Τέλος αφού όλες οι εξισώσεις τις μεθόδου είναι γραμμικές, οι προσομοιώσεις θα έχουν αποδεκτή απόδοση.

3.4.3 Επίλυση Γραμμικού Συστήματος $Ax = B$ μέσω της LU Παραγοντοποίησης.

Μια μέθοδος που προσφέρεται για την υπολογιστική επίλυση γραμμικών συστημάτων είναι αυτή της τριγωνικής ή LU παραγοντοποίησης.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, ο πίνακας του συστήματος γράφεται ως γινόμενο ενός κάτω τριγωνικού πίνακα L ($I_{ij} = 0, j > i$) και ενός άνω τριγωνικού πίνακα U ($I_{ij} = 0, i > j$), στη μορφή δηλαδή :

$$A = LU \quad (3.29)$$

Αν ο πίνακας A του γραμμικού συστήματος $Ax = B$, μπορεί να διασπαστεί κατά αυτόν τον τρόπο, τότε το σύστημα έχει τη μορφή:

$$LUx = B \quad (3.30)$$

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος, ανάγεται στην επίλυση δυο συστημάτων, του $Ly = B$ ως προς y με εμπρός αντικατάσταση και του $Ux = y$ με πίσω αντικατάσταση.

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποδοτική στη περίπτωση πολλών συστημάτων με κοινό πίνακα A και διαφορετικά δεύτερα μέλη B , άρα η παραγοντοποίηση γίνεται μια φορά.

Η βάση της ανάπτυξης της LU παραγοντοποίησης είναι η μέθοδος Gauss. Όταν η διάσπαση είναι εφικτή, ο πίνακας L περιλαμβάνει τους πολλαπλασιαστές της μεθόδου Gauss, ενώ ο U είναι ο τελικός τριγωνικός πίνακας A_{n-1} .

Αν κατά την τριγωνοποίηση του πίνακα A δεν υπάρξει αντιμετάθεση γραμμών, τότε ο πίνακας παραγοντοποιείται στη μορφή της 3.29. Στη περίπτωση που κατά την τριγωνοποίηση υπάρξει ανταλλαγές γραμμών, μπορούμε να γενικεύσουμε το παραπάνω συμπέρασμα. Έτσι, για κάθε αντιστρέψιμο πίνακα A ($n \times n$) πίνακα υπάρχουν ένας κάτω τριγωνικός πίνακας L , ένας άνω τριγωνικός U και ένας μεταθετικός πίνακας P , τέτοιοι ώστε να ισχύει :

$$PA = LU \quad (3.31)$$

Από τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε πως ένας ομαλός πίνακας A είτε θα είναι είτε άμεσα παραγοντοποιήσιμος στη μορφή LU εφόσον κατά τη φάση της απαλοιφής δεν απαιτούνται αλλαγές γραμμών είτε έμμεσα παραγοντοποιήσιμος στη μορφή PA όπου P οι μεταθέσεις των γραμμών του. Συνεπώς, κάθε ομαλό σύστημα $Ax = B$, μπορεί να παραγοντοποιηθεί στη μορφή $PAx = PB$ ή $LUx = Pb$ και να λυθεί σε δυο φάσεις. Πρώτα λύνεται το σύστημα $Ly = PB$ με εμπρός αντικατάσταση και μετέπειτα το $Ux = y$ με πίσω αντικατάσταση. Για να γίνει αυτό πρέπει να υπολογιστεί ο μεταθετικός πίνακας P . Ο υπολογισμός του απαιτεί διαδικασία, παρόμοια με αυτή της απαλοιφής. Πρέπει να βρεθούν οι γραμμές-οδηγοί μέσω του προσδιορισμού των πολλαπλασιαστών P_{ik} . Για να γίνει αυτό εφαρμόζουμε μερική οδήγηση.

3.5 Ανάπτυξη του αλγορίθμου για την επίλυση της ροής φορτίου

Στις παραπάνω ενότητες, αναλύθηκε εκτενώς η μοντελοποίηση κάθε στοιχείου του δικτύου καθώς και οι μαθηματικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος της ροής φορτίου και των διαφευγόντων ρευμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο συνολικός αλγόριθμος που δημιουργήθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

Δεδομένα Εισόδου :

Αρχικά, απαραίτητα για την επίλυση είναι τα δεδομένα εισόδου.

Αυτά συνοψίζονται στα :

- Το προφίλ του κάθε τρένου, δηλαδή η σχέση μεταξύ Θέσης-Χρόνου και Ισχύος-Χρόνου του τρένου κατά τη διάρκεια του προσομοιωμένου χρόνου λειτουργίας. Το προφίλ αυτό, προκύπτει από το μηχανικό μοντέλο του τρένου. Ανάλογα με την κατάσταση της κίνησης του, το μηχανικό προφίλ μας δίνει και την απαιτούμενη ισχύ του συρμού. Σε αυτή προστίθεται μια σταθερή κατανάλωση ισχύος για την κάλυψη των βοηθητικών λειτουργιών του τρένου.
- Αντίσταση γραμμής παροχής ισχύος και γραμμής κύλισης ανά χιλιόμετρο (Ωkm^{-1})
- Η ονομαστική τάση στο δίκτυο (Volt)
- Ο αριθμός των Δημόσιων Σταθμών Επιβίβασης-Αποβίβασης, καθώς επίσης και ο αριθμός και η θέση των Ηλεκτρικών Υποσταθμών.
- Ο μέγιστος αριθμός των τρένων που μπορούν να βρίσκονται σε κάθε γραμμή.
- Το headway μεταξύ των τρένων.

Επεξεργασία των δεδομένων εισόδου :

Από τα δεδομένα εισόδου, μπορεί να εξαχθεί το πρόγραμμα (Schedule) που ακολουθούν τα τρένα στις γραμμές ανόδου και καθόδου. Πρόκειται για έναν πίνακα διαστάσεων $N_{Trains} \times$

$N_{Stations}$, όπου N_{Trains} ο μέγιστος αριθμός των τρένων σε κάθε γραμμή και $N_{Stations}$ ο αριθμός των σταθμών επιβίβασης-αποβίβασης, ο οποίος περιέχει τη χρονική στιγμή την οποία το τρένο ξεκινά από το κάθε σταθμό αυξημένο κατά το αντίστοιχο Headway.

Στη συνέχεια, με βάση το πρόγραμμα που υπολογίστηκε προηγουμένως, δημιουργείται ένας νέος πίνακας με διαστάσεις $(SimEnd + 1) \times ((N_{Stations} - 1) * N_{Trains})$, όπου $SimEnd$ ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης, που περιέχει το συνολικό προφίλ των τρένων στη κάθε γραμμή. Ουσιαστικά το δίκτυο χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα με βάση των αριθμών των δημοσίων σταθμών επιβίβασης-αποβίβασης. Ανάμεσα από δύο σταθμούς παρεμβάλλεται ένας κόμβος που αντιπροσωπεύει τον συρμό που κινείται μεταξύ των σταθμών αυτών. Έχοντας το συνολικό προφίλ του τρένου από τα δεδομένα εισόδου, χωρίζοντας το σε αντίστοιχα τμήματα όπως χωρίστηκε και το δίκτυο, είναι γνωστή η θέση των τρένων και η ισχύς τους σε κάθε κόμβο, λαμβάνοντας υπόψιν το χρόνο, αλλά και το Headway μεταξύ των συρμών.

Τέλος δημιουργούνται ακόμη δύο πίνακες, διαστάσεων ίδιων με του προηγούμενου οι οποίοι περιέχουν την αποστάσεις από την αρχή της γραμμής την ισχύ κάθε συρμού που αντιστοιχεί στον κάθε κόμβο συρμού.

Είναι απαραίτητο για την επίλυση της ροής φορτίου, να αναφερθούν οι κανόνες με τους οποίους γίνεται η αρίθμηση των κόμβων στο κύκλωμα.

Οι κανόνες που ακολουθούνται είναι οι εξής :

1. Αρχικά αριθμούνται διαδοχικά τα ζεύγη των ζυγών των υποσταθμών (άνοδος και κάθοδος της διόδου).
2. Έπειτα αριθμούνται διαδοχικά οι ζυγοί των σταθμών επιβίβασης-αποβίβασης και οι ζυγοί των συρμών στην γραμμή της ανόδου.
3. Μετά αριθμούνται οι ζυγοί των διόδων περιορισμού της τάσης των συρμών της γραμμής ανόδου.
4. Στη συνέχεια αριθμούνται διαδοχικά οι ζυγοί των συρμών στη γραμμή καθόδου.
5. Τέλος αριθμούνται διαδοχικά οι ζυγοί των διόδων περιορισμού της τάσης των συρμών της γραμμής καθόδου.

Συνεπώς, οι ζυγοί των υποσταθμών ξεκινούν από το ζυγό 1 και με βήμα 2 φτάνουν έως το $2 * Substations - 1$, όπου $Substations$ ο αριθμός των υποσταθμών. Οι ζυγοί των Δημοσίων Σταθμών Επιβίβασης-Αποβίβασης ξεκινούν από τον ζυγό με αριθμό $2 * Substations + 1$ και με βήμα 2 φτάνουν μέχρι τον αριθμό $2 * (Substations + Stations) - 1$, όπου $Stations$ ο αριθμός των Δημοσίων Σταθμών Επιβίβασης-Αποβίβασης. Όμοια ο κόμβος του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου, αριθμείται ως $2 * Substations + 2$ και οι υπόλοιποι διαδοχικά με βήμα 2 έως τον αριθμό $2 * (Substations + Stations - 1)$. Οι κόμβοι των διόδων περιορισμού του κάθε ζυγού που αντιπροσωπεύει το τρένο αριθμούνται από το $2 * (Substations + Stations)$ με βήμα 1 για κάθε από τους $(Stations - 1)$ ζυγούς των διόδων περιορισμού. Αντίστοιχα αριθμούνται και οι ζυγοί της γραμμής καθόδου. Συνεχίζοντας από τον αριθμό της τελευταίας

διόδου αριθμούμε πρώτα τους (*Stations* – 1) ζυγούς των συρμών και συνεχίζουμε με τους ζυγούς των διόδων περιορισμού της κάτω γραμμής.

Αντίστοιχη λογική ακολουθείται και για το μοντέλο που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της τάσης της γραμμής κύλισης ως προς γη και των διαφευγόντων ρευμάτων. Οι κανόνες που ακολουθούνται σε αυτή την περίπτωση είναι οι εξής :

1. Αρχικά αριθμούνται διαδοχικά οι ζυγοί των σταθμών επιβίβασης-αποβίβασης.
2. Έπειτα αριθμούνται διαδοχικά εναλλάξ οι κόμβοι των συρμών σε γραμμή ανόδου και καθόδου.
3. Στο τέλος αριθμείται ο κόμβος που αντιπροσωπεύει τη γη.

Ακόμη είναι απαραίτητο, για την επίλυση της ροής φορτίου να οριστούν ποιοι είναι άπειροι και ποιοι όχι.

Ως άπειροι (slack) θεωρούνται :

- Οι ζυγοί που αντιπροσωπεύουν τους υποσταθμούς του δικτύου
- Οι ζυγοί που αντιπροσωπεύουν την πηγή τάσης V_{max} στις διόδους περιορισμού.

Ως μη άπειροι ζυγοί θεωρούνται :

- Οι ζυγοί που βρίσκονται στην άνοδο της ανόρθωσης του κάθε υποσταθμού για τη σύνδεση με το Σταθμό Επιβίβασης-Αποβίβασης
- Οι ζυγοί των Σταθμών Επιβίβασης-Αποβίβασης.
- Οι ζυγοί των συρμών.

Τέλος ως αρχικές συνθήκες για την εκκίνηση της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson ορίζονται:

- Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση των συρμών στους ζυγούς που αντιπροσωπεύουν την πηγή τάσης V_{max} .
- Τη τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} που την ορίζουμε εμείς στα δεδομένα εισόδου σε όλους τους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου.

Επίλυση της ροής φορτίου :

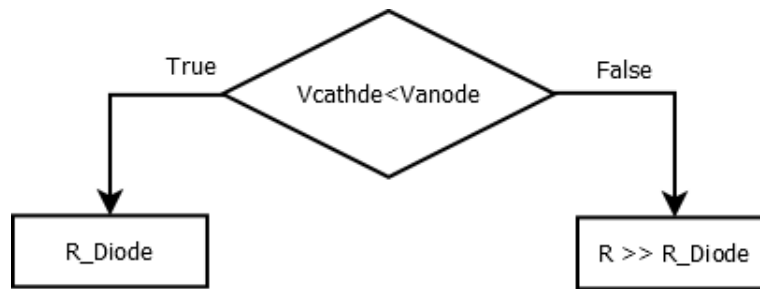
Για κάθε χρονική στιγμή, με τη βοήθεια των προηγούμενων πινάκων, γίνεται υπολογισμός των μεταβλητών αντιστάσεων γραμμής παροχής και κύλισης και έπειτα γίνεται ο υπολογισμός της μήτρας αγωγιμοτήτων του συστήματος μας. Επιπλέον από τους παραπάνω πίνακες, γίνεται ο υπολογισμός της κατανάλωσης ή παραγωγής ισχύος σε κάθε ζυγό που είναι απαραίτητο για την επίλυση της ροής φορτίου. Ακόμη, απαραίτητο για την επίλυση της ροής φορτίου είναι η ανάθεση αρχικών τιμών τάσεων στους ζυγούς του δικτύου για την εκκίνηση της αριθμητικής μεθόδου. Αφού έχουν γίνει τα παραπάνω, εκτελείται η αριθμητική μέθοδος Newton-Raphson (3.3) για την επίλυση της ροής φορτίου στο δεδομένο δίκτυο.

Έλεγχος συνθηκών μετάβασης :

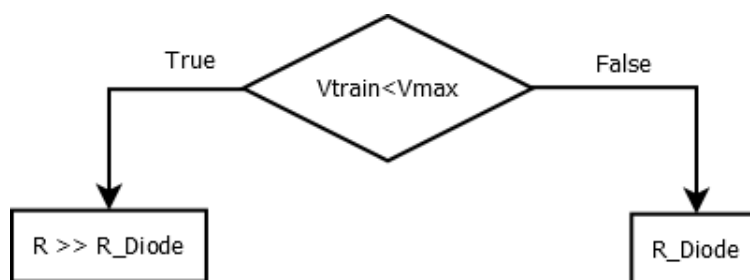
Στη συνέχεια πρέπει να ελεγχθεί αν ικανοποιείται κάποια από τις συνθήκες μετάβασης ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες αλλαγές. Ως συνθήκες μετάβασης ορίζονται οι συνθήκες αυτές οι οποίες προκαλούν την αλλαγή της τιμής της αντίστασης της διόδου, συνεπώς την αλλαγή της συμπεριφοράς της ως ανοιχτούκλωμα ή βραχυκύκλωμα αντίστοιχα. Αυτές είναι :

- Η ανάστροφη ροή ισχύος στους υποσταθμούς
- Η υπέρβαση της μέγιστης τιμής τάσεως στους ζυγούς των συρμών.

Εφόσον εντοπιστεί παραβίαση του πρώτου περιορισμού τότε μεταβάλλεται η τιμή της αντίστασης διόδου του αντίστοιχου υποσταθμού. Ανάλογα, αν εντοπιστεί παραβίαση του δεύτερου περιορισμού τότε μεταβάλλεται η τιμή της αντίστασης διόδου ώστε να περιορίζεται η τάση στη μέγιστη επιτρεπόμενη. Αντίστοιχα, αν οι τιμές των διόδων δε συνάδουν με τα αποτελέσματα της ροής ισχύος, τότε μεταβάλλονται αναλόγως (για παράδειγμα αν δεν άγει μια δίοδος υποσταθμού παρόλο που δεν υπάρχει ροή ισχύος προς αυτόν). Τα διαγράμματα ροής των ελέγχων της τιμής αντίστασης των διόδων των υποσταθμών και των διόδων περιορισμών της τάσης απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα :



Σχήμα 3.9: Έλεγχος για ανάστροφη ροή ισχύος στους υποσταθμούς.



Σχήμα 3.10: Έλεγχος για υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης στους συρμούς.

Αν εντοπιστούν αλλαγή στις τιμές των αντιστάσεων των διόδου, τότε είναι αναγκαία η εκ νέου επίλυση της ροής ισχύος στο δίκτυο λαμβάνοντας υπόψιν τις νέες τιμές των αντιστάσεων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να μην υπάρχουν αλλαγές στις τιμές αντίστασης των διόδων. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου αφού έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι αλλαγές είναι και τα τελικά αποδεκτά.

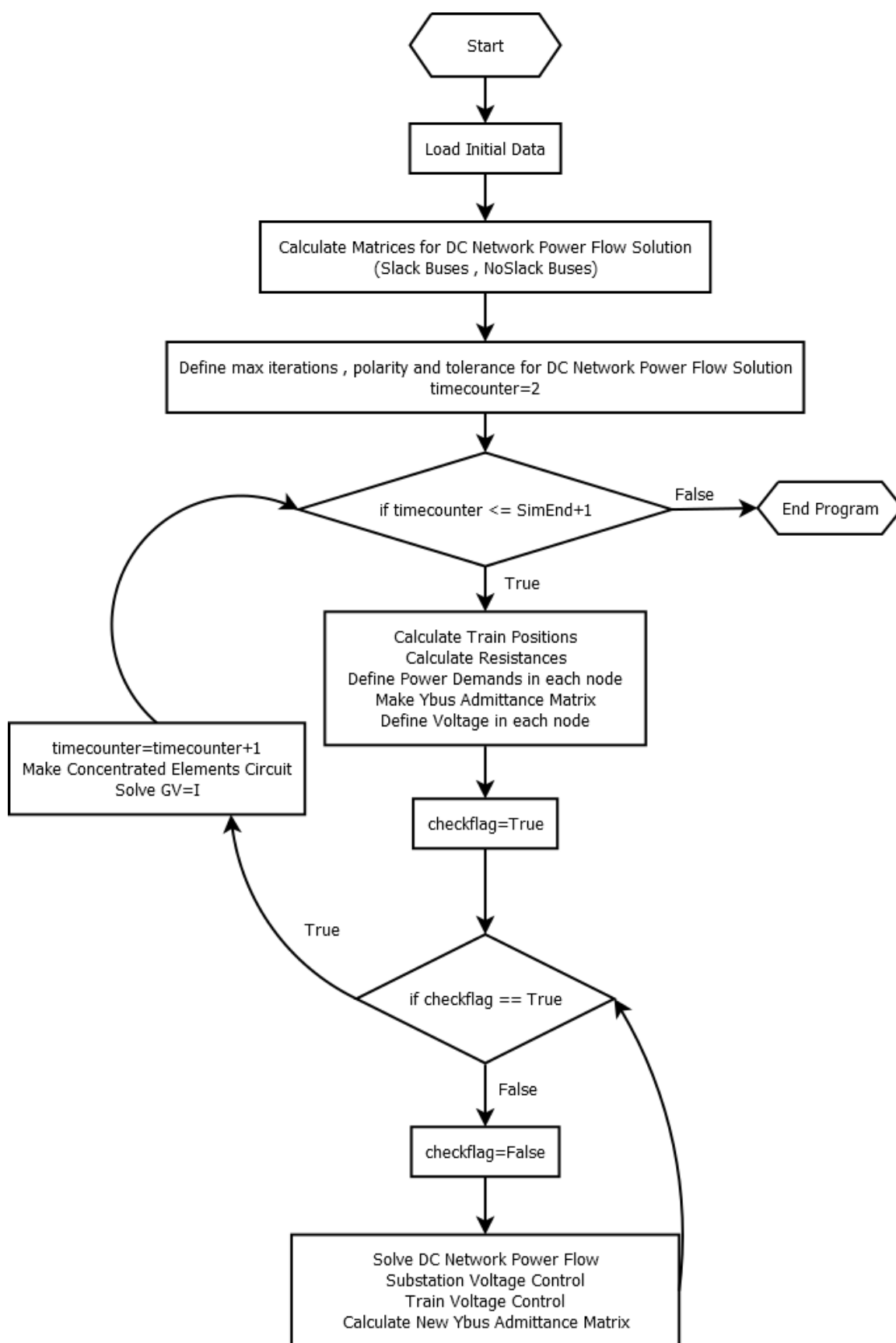
Δεδομένα εξόδου :

Στη συνέχεια τα αποτελέσματα της ροής φορτίου πρέπει να αποθηκευτούν με κατάλληλο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η εξαγωγή των αποτελεσμάτων για κάθε συρμό και υποσταθμό. Αρχικά, κάθε τρένο που βρίσκεται στο δίκτυο, αντιστοιχείται με τον ανάλογο ζυγό. Αυτό είναι εφικτό, καθώς γνωρίζουμε τη απόσταση του συρμού από την αρχή του δικτύου για κάθε χρονική στιγμή. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τις τάσεις και τις εγχύσεις ισχύος σε κάθε ζυγό από την επίλυση της ροής φορτίου, υπολογίζεται το ρεύμα του κάθε συρμού, που απαιτείται για τις κύριες και βοηθητικές (Hotel) λειτουργίες, ως το πηλίκο της έγχυσης ισχύος στο ζυγό δια τη τάση σε αυτόν, το ρεύμα στους ροοστάτες ως το πηλίκο της έγχυσης ισχύος στο ζυγό της πηγής της τάσης περιορισμού δια την τιμή της τάσης (απορριπτικό φορτίο) και το ρεύμα της γραμμής παροχής ως το άθροισμα του ρεύματος του συρμού και του ρεύματος στους ροοστάτες. Ακόμη, μπορούν να βρεθούν οι τάσεις σε κάθε ζυγό που αντιστοιχεί σε υποσταθμό.

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων και των τάσεων ως προς γη, δημιουργείται το δίκτυο πού αναφέρθηκε στην υποενότητα (3.4.2). Τα ρεύματα σε κάθε κόμβο μπορούν να υπολογιστούν, αφού στο προηγούμενο βήμα έχει επιλυθεί η ροή ισχύος με αποτέλεσμα να είναι γνωστή η τάση και η ισχύς σε κάθε ζυγό του συστήματος. Συνεπώς διαιρώντας αυτές τις δυο τιμές, υπολογίζεται την έγχυση ρεύματος σε κάθε κόμβο του δικτύου. Στη συνέχεια, αντίστοιχα με πριν, ανάλογα με τη θέση των συρμών υπολογίζονται τις αντιστάσεις των γραμμών κύλισης αλλά και η αγωγιμότητα ως προς γη σε κάθε κόμβο. Έτσι, επιλύοντας το σύστημα $GV = I$ που προκύπτει, από την παραπάνω διαδικασία, μέσω της LU παραγοντοποίησης υπολογίζεται το δυναμικό ως προς γη για κάθε κόμβο του δικτύου. Τέλος αυξάνεται ο χρόνος κατά ένα δευτερόλεπτο και επαναλαμβάνεται η όλη διαδικασία. Ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται όταν ο χρόνος ξεπεράσει το χρόνο που προβλέπεται ως χρόνος λήξης της προσομοίωσης.

Έτσι κατά το τέλος του αλγορίθμου, υπάρχουν αποθηκευμένα για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης τις τάσεις και τα ρεύματα σε κάθε ηλεκτρικό υποσταθμό και κάθε συρμό, που αποτελεί σημαντική πληροφορία καθώς μέσω αυτών μπορούν να υπολογιστούν οι καταναλώσεις ισχύος, η ισχύς που ανακτάται από την αναγεννητική πέδηση καθώς και το απορριπτικό φορτίο. Τέλος αποθηκεύεται επίσης το δυναμικό μεταξύ γραμμής κύλισης και γης για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης.

Το διάγραμμα ροής του παραπάνω αλγορίθμου, φαίνεται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 3.11: Ο συνολικός αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος της ροής ισχύος και των διαφραγμάτων ρευμάτων.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του παραπάνω αλγορίθμου είναι πως επιδέχεται παραμετροποίησης στα δεδομένα εισόδου του. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συστηματική αρίθμηση των κόμβων. Με τον τρόπο αυτό, είναι γνωστό σε κάθε περίπτωση ποίος κόμβος αντιπροσωπεύει κάθε μέρος του ηλεκτρικού δικτύου μας. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να υπάρξουν αλλαγές τα δεδομένα εισόδου (π.χ αριθμό και θέση των υποσταθμών) χωρίς να υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην εκτέλεση του αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 4

Προσομοίωση και Αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάστηκε αναλυτικά η μοντελοποίηση των επιμέρους στοιχείων του δικτύου καθώς και οι μέθοδοι για την επίλυση της ροής ισχύος και για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων. Ακόμη παρουσιάστηκε ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, ο αλγόριθμος που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, θα υλοποιηθεί σε κώδικα μέσω του περιβάλλοντος της Matlab, θα προσομοιωθεί το σύστημα και θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής, όπως οι τάσεις στο δίκτυο, η κατανάλωση ισχύος, η ισχύς που παράγεται από την αναγεννητική πέδηση, το απορριπτικό φορτίο κ.λ.π. Ακόμη θα παρουσιαστούν οι τάσεις ως προς γη της γραμμή κύλισης που υπολογίζονται από το μοντέλο για τα διαφεύγοντα ρεύματα.

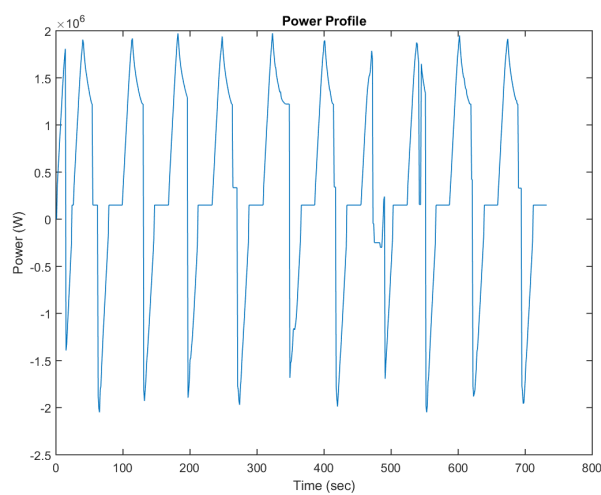
Αξίζει να αναφερθεί πως είναι πλήρως παραμετροποιήσιμος, δίνει δηλαδή τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τον αριθμό των Δημοσίων Σταθμών Επιβίβασης-Αποβίβασης, τον αριθμό και τη θέση των Ηλεκτρικών Υποσταθμών, τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής παροχής και της γραμμής κύλισης και το Headway με τους τρόπους που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί η ροή ισχύος στο δίκτυο σε διάφορες περιπτώσεις προγραμματισμού των τρένων αλλά και σε διαφορετικές τοπολογίες του δικτύου. Για το λόγο αυτό θα ακολουθήσουν προσομοιώσεις με διαφορετικά δεδομένα εισόδου και θα γίνουν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων.

Το δίκτυο το οποίο εξετάζεται αποτελείται από δύο γραμμές με αντίθετες κατευθύνσεις (θα αναφέρονται ως γραμμές ανόδου και καθόδου) και δεκατρείς Δημοσίους Σταθμούς Επιβίβασης-Αποβίβασης και ο αριθμός των συρμών που κινούνται στο δίκτυο και των υποσταθμών μεταβάλλονται ανάλογα με τη προσομοίωση. Για την επίλυση της ροής ισχύος στο DC δίκτυο μας χρησιμοποιείται μια παραλλαγή της συνάρτησης `dcnetworkpf` του πακέτου `MATACDC`. Ακόμη για την επίλυση του συστήματος $GV = I$ για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων, χρησιμοποιείται η συνάρτηση `linsolve` της Matlab, η οποία επιλύει γραμμικά συστήματα μέσω της LU παραγοντοποίησης. Ο υπολογισμός της ενέργειας γίνεται εφαρμόζοντας την αριθμητική μέθοδο ολοκλήρωσης του Τραπεζίου μέσω της συνάρτησης `trapz` της Matlab.

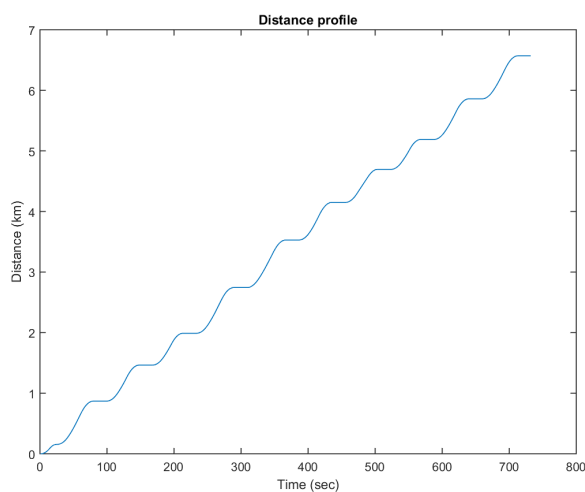
4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο τεσσάρων Υποσταθμών και δεκατριών Σταθμών.

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα εκτελεστούν προσομοιώσεις για την περίπτωση που τα τρένα εισέρχονται διαδοχικά το ένα μετά το άλλο στο δίκτυο, ανάλογα με το Headway που έχουμε ορίσει και για τη περίπτωση που έχουμε όλα τα τρένα πάνω στο δίκτυο κατά την κανονική λειτουργία του.

Το προφίλ Ισχύος-Θέσης των τρένων στο δίκτυο που θα προσομοιωθεί σε αυτή την ενότητα απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα(4.1) :



Σχήμα 4.1: Προφίλ Ισχύος-Χρόνου των συρμών.



Σχήμα 4.2: Προφίλ Θέσης-Χρόνου των συρμών.

Από το προφίλ της θέσης σε σχέση με το χρόνο, από τη κλίση της γραφικής παράστασης φαίνεται πως ο συρμός επιταχύνεται μόλις φεύγει από τον κάθε σταθμό μέχρι να φτάσει τη μέγιστη ταχύτητα του όπου και τη διατηρεί και στη συνέχεια επιβραδύνεται όταν φτάσει σε κάποια απόσταση πριν τον επόμενο σταθμό, όπου και παραμένει ακινητοποιημένο για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα. Γίνεται επίσης αντιληπτό πως και το προφίλ της ισχύος ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μοτίβο. Αρχικά, όταν ο συρμός αποχωρεί από το σταθμό και επιταχύνεται, η ισχύς του τρένου αυξάνεται μέχρις ότου φτάσει σε μια μέγιστη τιμή κατά την οποία σταματά να επιταχύνεται ο συρμός και έπειτα έχει φθίνουσα τάση. Πριν φτάσει στον επόμενο σταθμό, παρατηρείται πως η ισχύς γίνεται αρνητική, πράγμα που σημαίνει πως εξαιτίας της αναγεννητικής πέδησης το τρένο επιστρέφει ισχύ στο δίκτυο. Ακόμη, κατά την παραμονή στο σταθμό επιβίβασης-αποβίβασης, είναι ορατό πως η ισχύς δεν είναι μηδενική αλλά έχει κάποια θετική σταθερή τιμή. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των βοηθητικών λειτουργιών του τρένου, οι οποίες απαιτούν συνεχώς μια δεδομένη ισχύ.

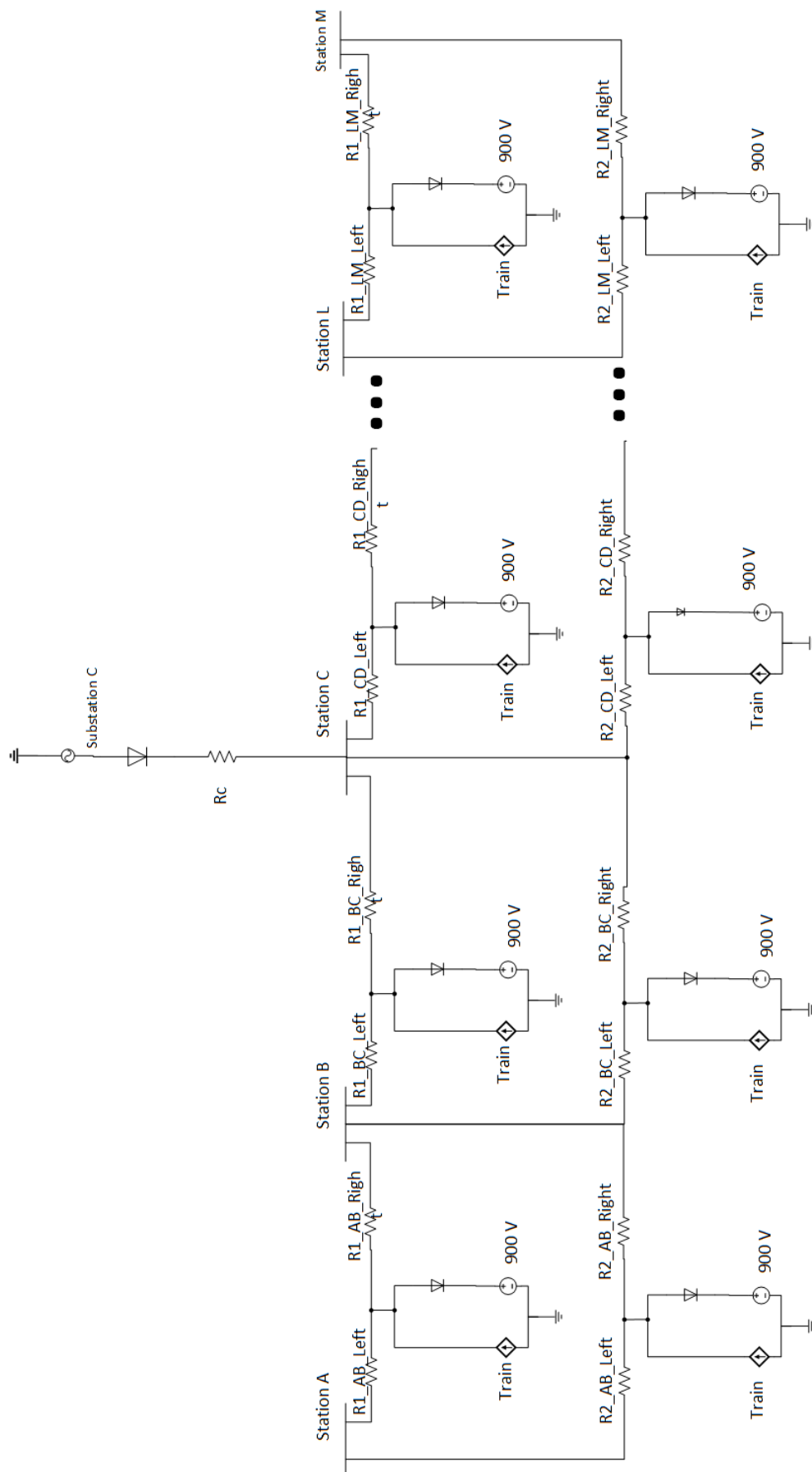
Πρώτη Περίπτωση

Το δίκτυο το οποίο εξετάζεται στη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι δεκατριών Σταθμών Επιβίβασης-Αποβίβασης με τέσσερις Ηλεκτρικούς Υποσταθμούς στον τρίτο, πέμπτο, έβδομο και δέκατο σταθμό αντίστοιχα όπως φαίνεται στο σχήμα (4.3).

Τα τρένα εισέρχονται ένα-ένα στο δίκτυο ανάλογα με το Headway κατά την προσομοίωση. Τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Αριθμός Σταθμών Επιβίβασης - Αποβίβασης	13
Αριθμός Ηλεκτρικών Υποσταθμών	5
Θέση Υποσταθμών	3 5 7 10
Headway	110 sec
Μέγιστος Αριθμός Τρένων στη Γραμμή	6
Τάση Δικτύου	750V
Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Παροχής Ισχύος	$15,04 \times 10^{-3} \Omega km^{-1}$
Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Κύλισης	$20 \times 10^{-3} \Omega km^{-1}$
Ανοχή Μεθόδου Newton-Raphson	10^{-4}
Μέγιστος Αριθμός Επαναλήψεων Μεθόδου Newton-Raphson	1000
Διάρκεια Προσομοίωσης	731 sec

Πίνακας 4.1: Παράμετροι Προσομοίωσης



Σχήμα 4.3: Ισοδύναμο Κύκλωμα Δικτύου που προσομοιώνεται.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης :

Συνολική Ενέργεια Συρμών	296.14 kWh
Συνολική Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Μερών	269.77 kWh
Συνολική Αναγεννητική Ενέργεια	-198.13 kWh
Συνολική Ενέργεια Ροοστατών	26.37 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	13.31%

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα Προσομοίωσης για την γραμμή ανόδου στην 1^η Περίπτωση.

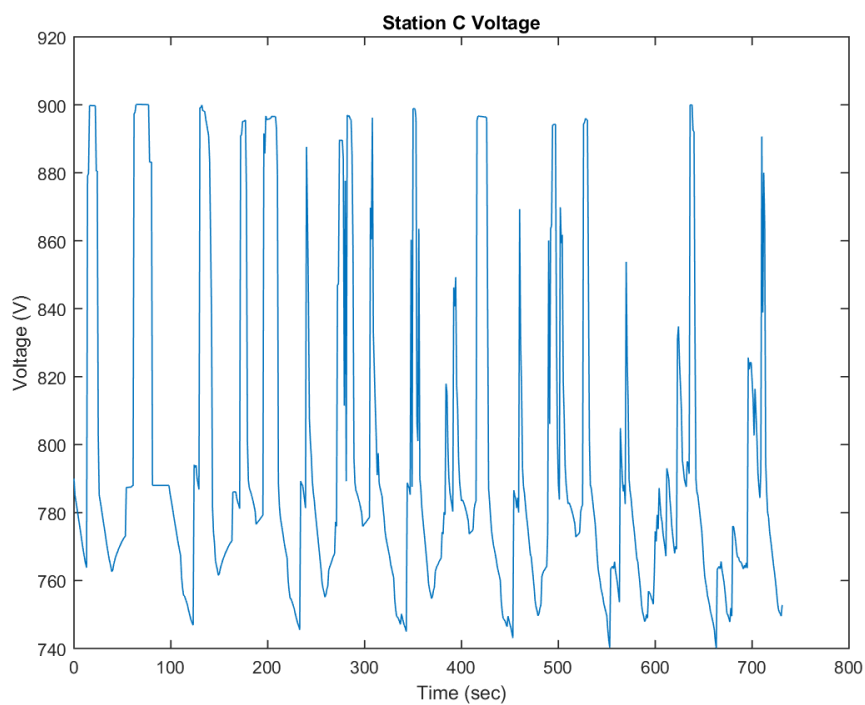
Συνολική Ενέργεια Συρμών	311.32 kWh
Συνολική Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Μερών	289.55 kWh
Συνολική Αναγεννητική Ενέργεια	-189.67 kWh
Συνολική Ενέργεια Ροοστατών	21.77 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	11.48%

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα Προσομοίωσης για την γραμμή καθόδου στην 1^η Περίπτωση.

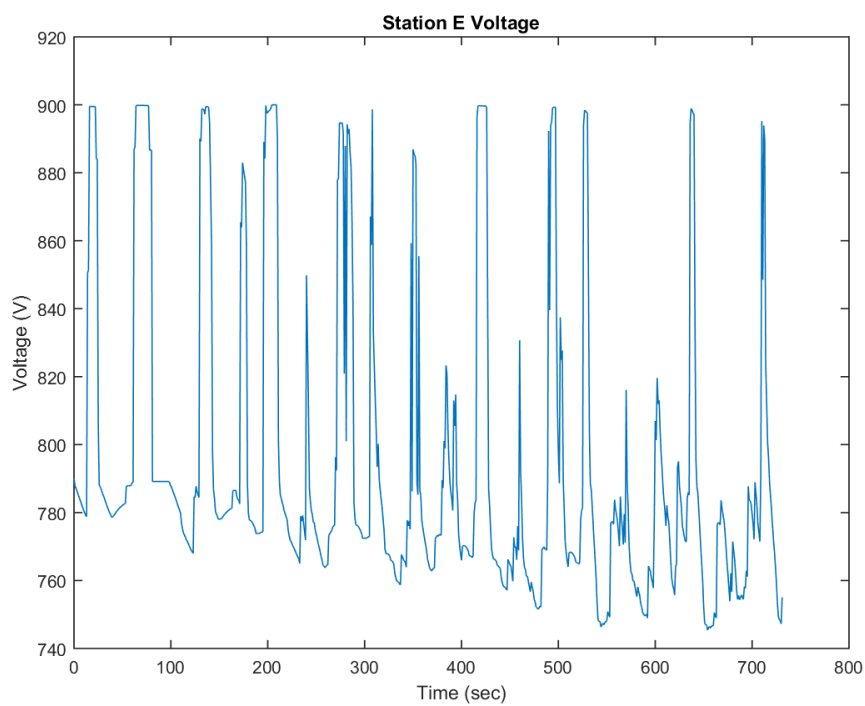
Συνολική Ενέργεια Υποσταθμών	-644.40 kWh
Συνολική Ενέργεια Συρμών	607.46 kWh
Συνολική Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Λειτουργιών	559.32 kWh
Συνολική Αναγεννητική Ενέργεια	-387.82 kWh
Συνολική Ενέργεια Ροοστατών	48.14 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου και στις δύο γραμμές	12.41%

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα Προσομοίωσης για το συνολικό σύστημα στην 1^η Περίπτωση.

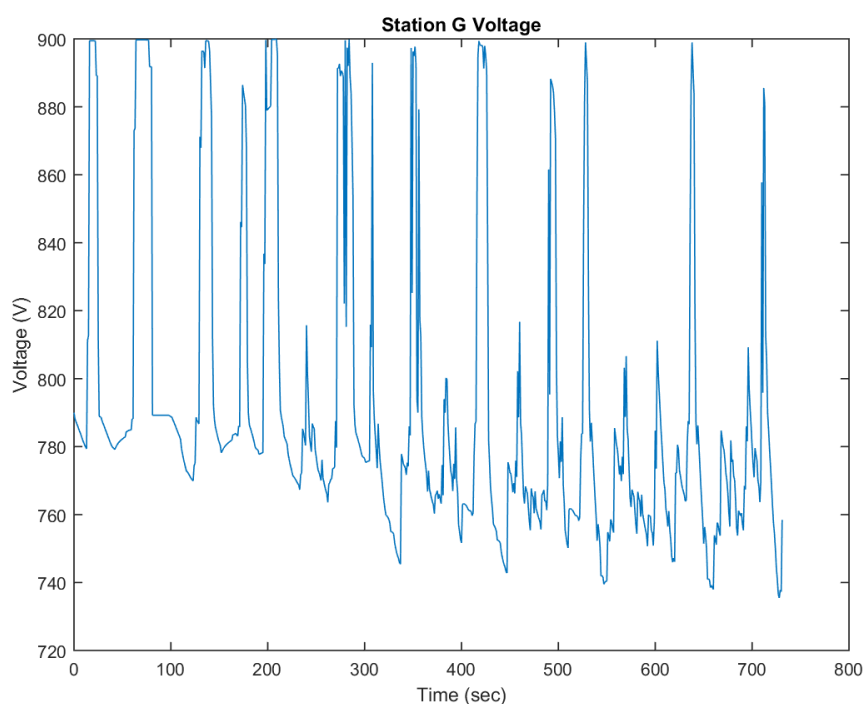
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των τάσεων για τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς του συστήματος :



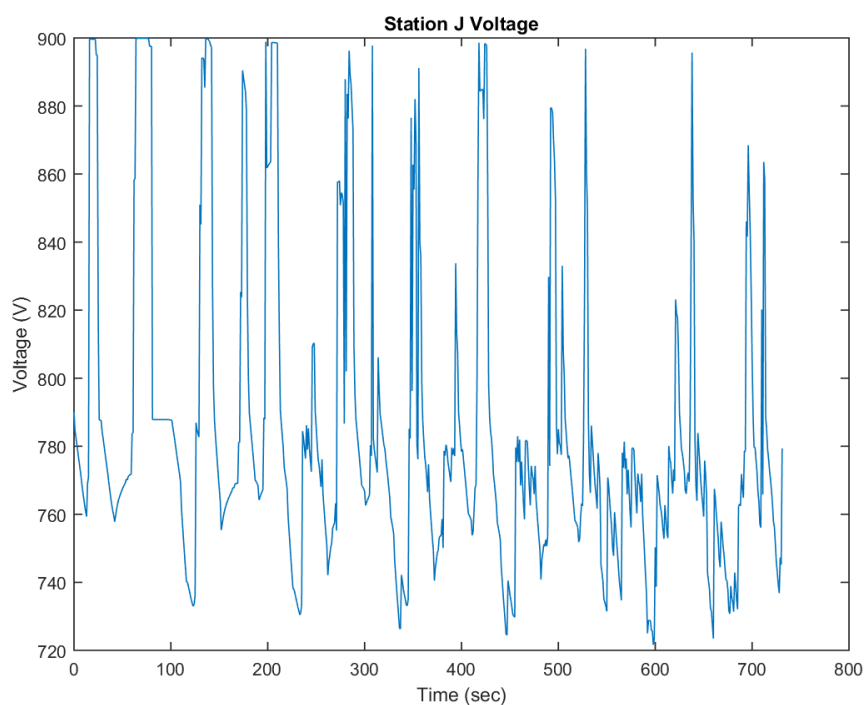
Σχήμα 4.4: Τάση στον πρώτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1^η Περίπτωση.



Σχήμα 4.5: Τάση στον δεύτερο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1^η Περίπτωση.



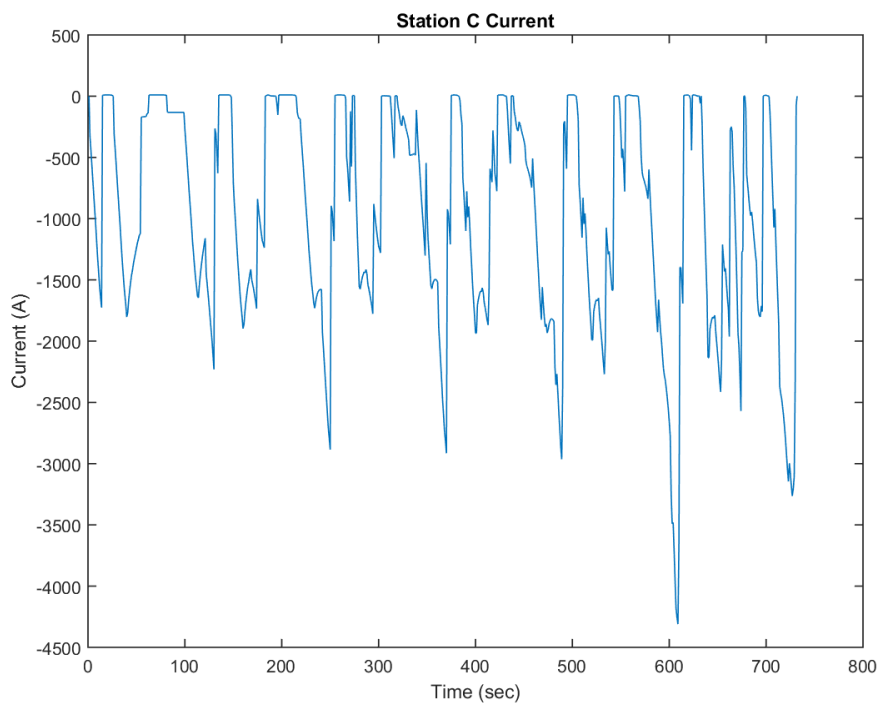
Σχήμα 4.6: Τάση στον τρίτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1^η Περίπτωση.



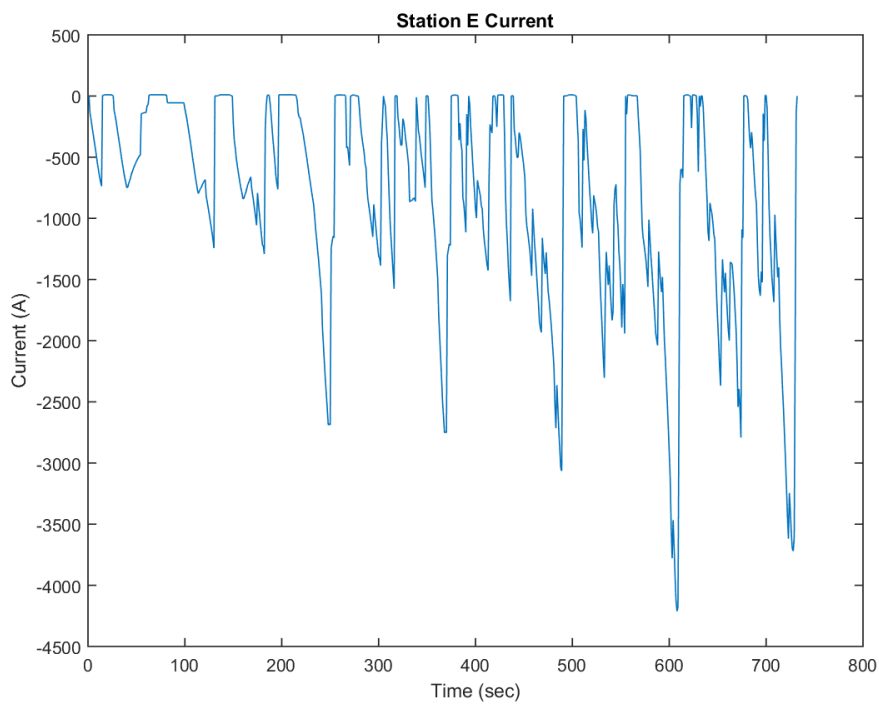
Σχήμα 4.7: Τάση στον τέταρτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1^η Περίπτωση.

Στη συνέχεια παραθέτονται οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος των υποσταθμών του

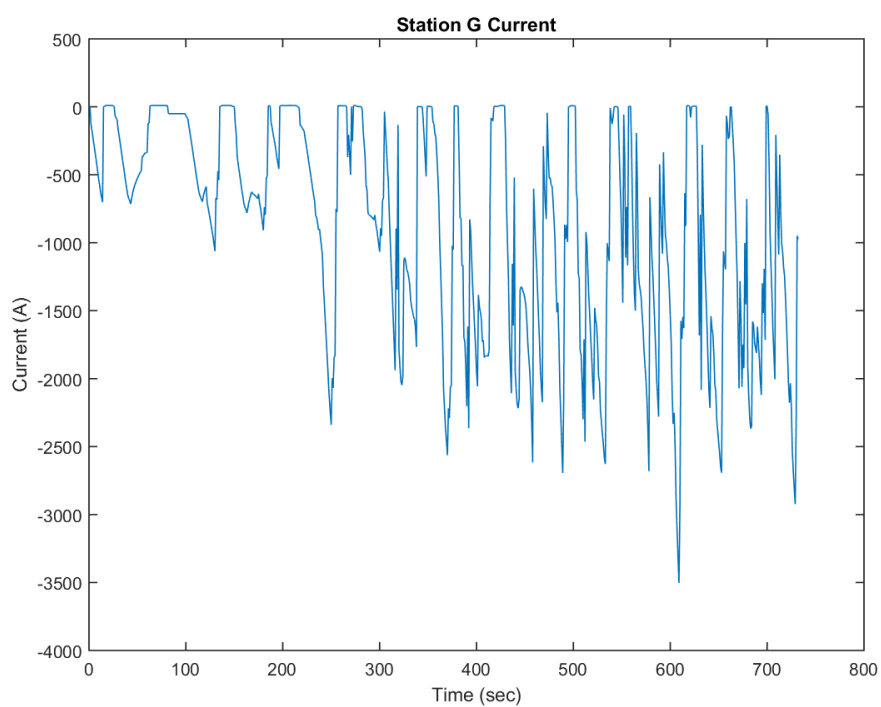
δικτύου :



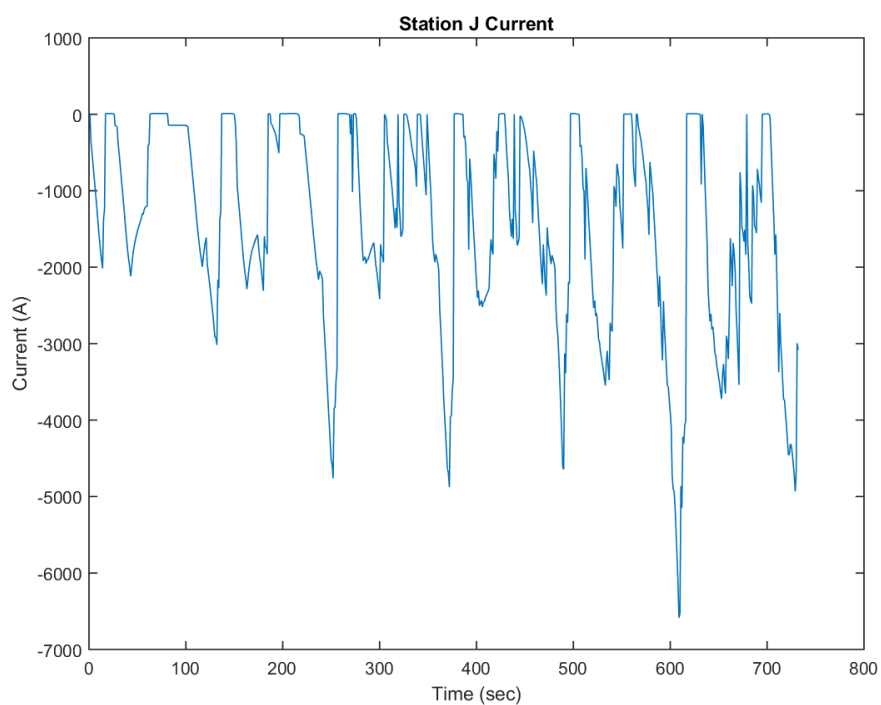
Σχήμα 4.8: Ρεύμα στον πρώτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1^η Περίπτωση.



Σχήμα 4.9: Ρεύμα στον δεύτερο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1^η Περίπτωση.

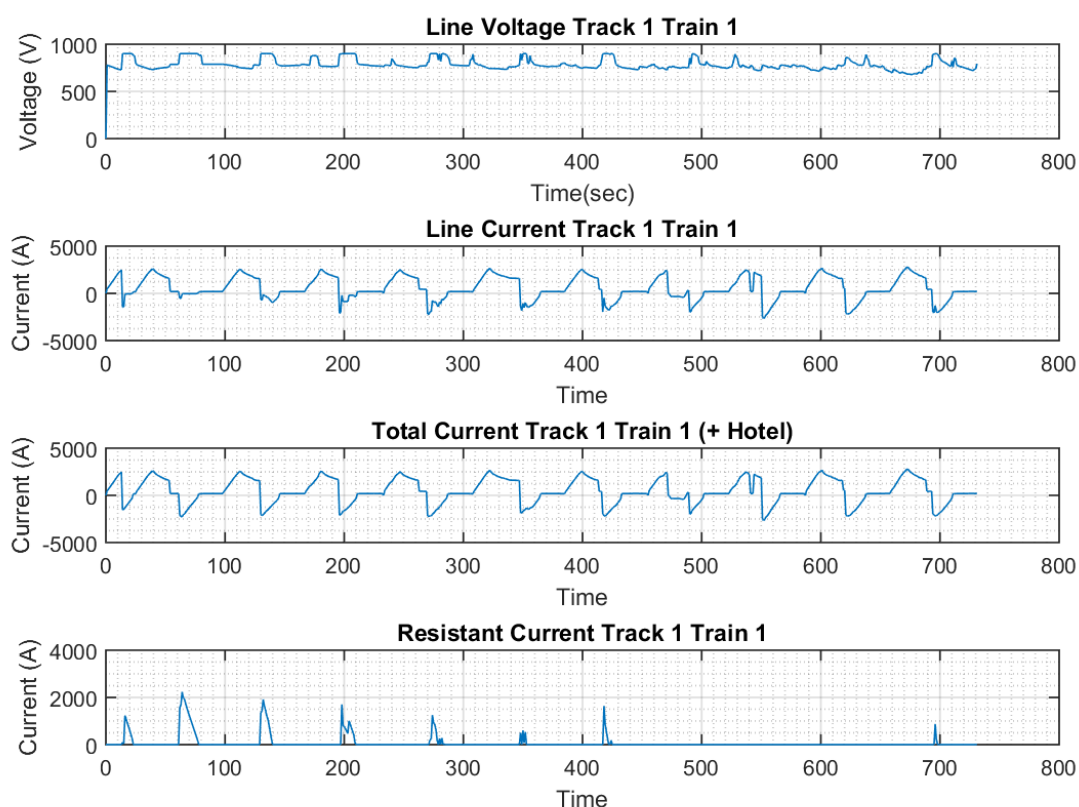


Σχήμα 4.10: Ρεύμα στον τρίτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1^η Περίπτωση.

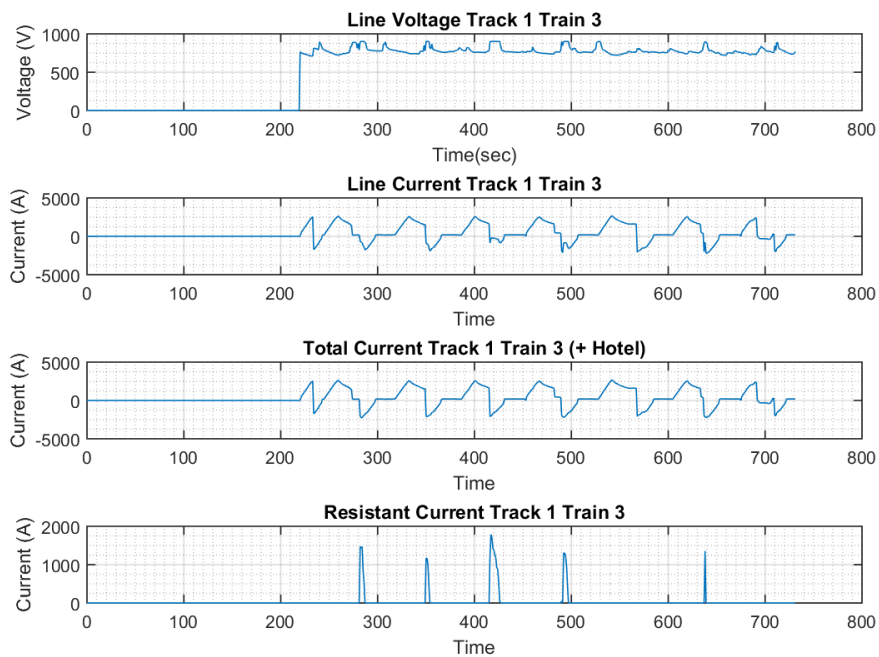


Σχήμα 4.11: Ρεύμα στον τέταρτο ηλεκτρικό υποσταθμό στην 1^η Περίπτωση.

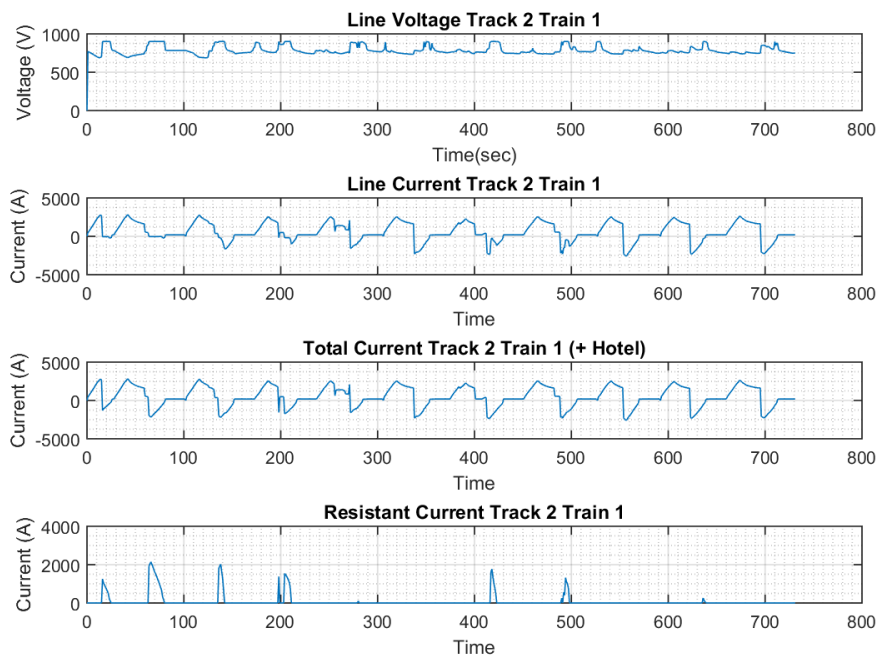
Στη συνέχεια παραθέτονται οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος και της τάσεως των τρένων του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει την τάση της γραμμής παροχής της ηλεκτρικής ισχύος, το δεύτερο διάγραμμα το ρεύμα της γραμμής παροχής, το τρίτο διάγραμμα το συνολικό ρεύμα που είναι το άθροισμα του ρεύματος γραμμής παροχής με αυτό του ρεύματος στο απορριπτικό φορτίο και το τέταρτο διάγραμμα το ρεύμα στο απορριπτικό φορτίο.



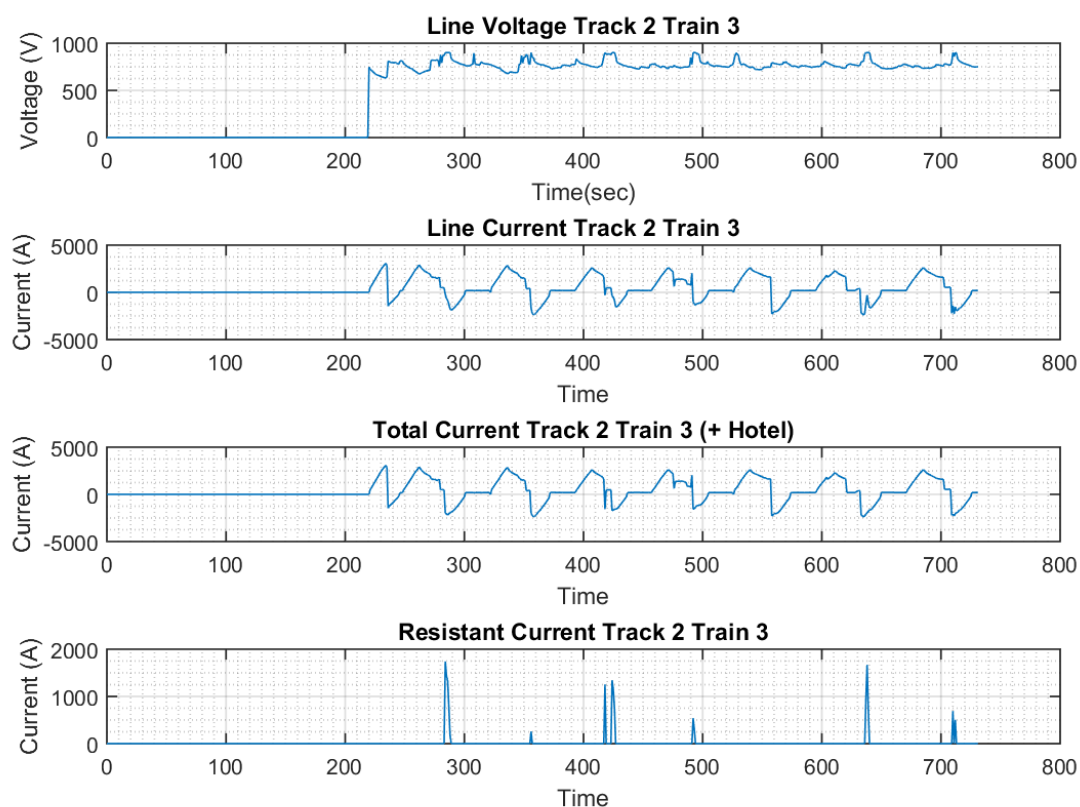
Σχήμα 4.12: Τάση και ρεύμα του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου στην 1^η Περίπτωση.



Σχήμα 4.13: Τάση και ρεύμα του τρίτου τρένου της γραμμής ανόδου στην 1^η Περίπτωση.

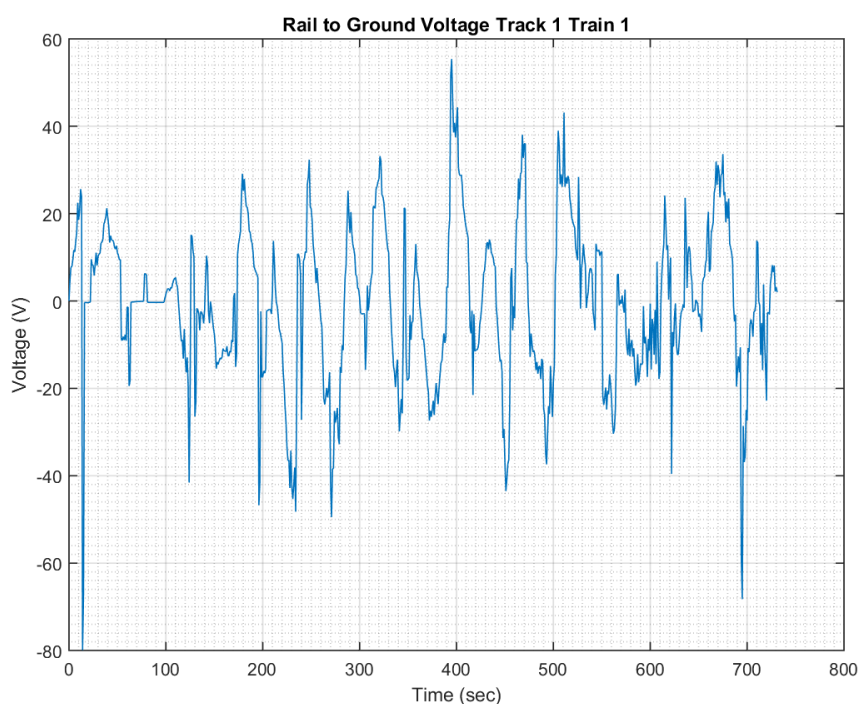


Σχήμα 4.14: Τάση και ρεύμα του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου στην 1^η Περίπτωση.

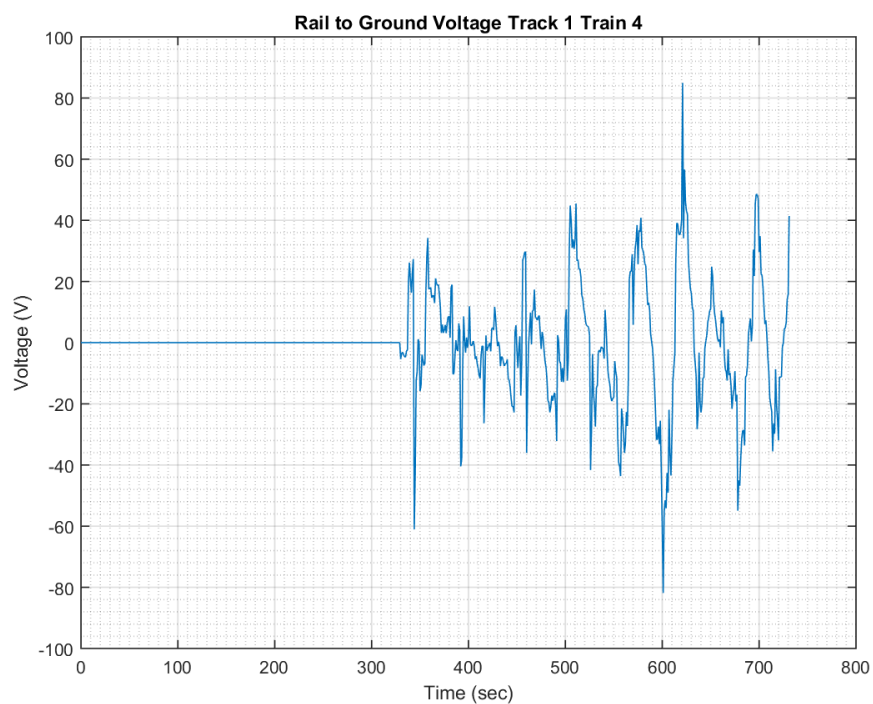


Σχήμα 4.15: Τάση και ρεύμα του τρίτου τρένου της γραμμής καθόδου στην 1^η Περίπτωση.

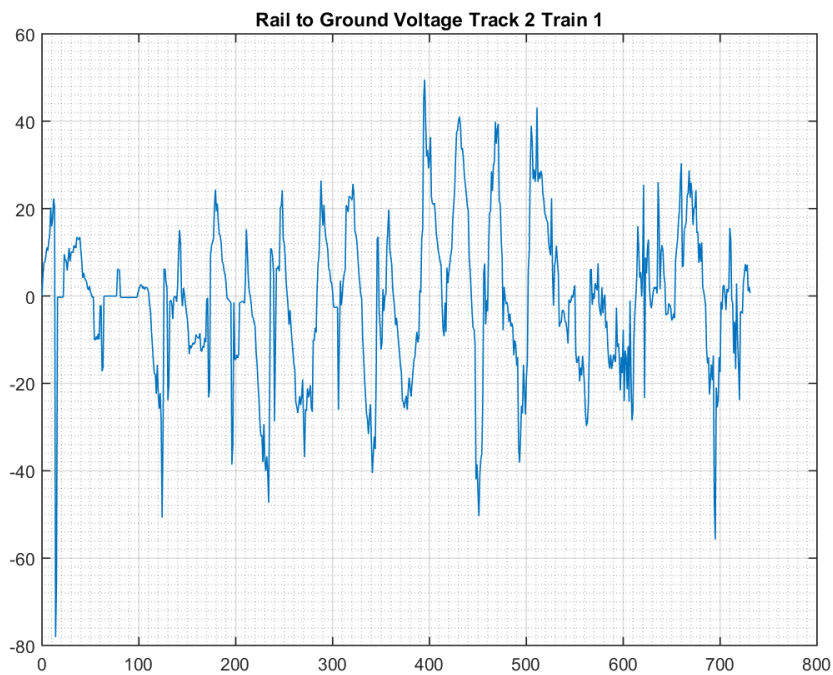
Τέλος, παραθέτονται οι τάσεις της γραμμής κύλισης ως προς γη και στη θέση μερικών από τους συρμούς καθώς και η μέγιστη-ελάχιστη τάση ως προς γη στη θέση κάθε υποσταθμού :



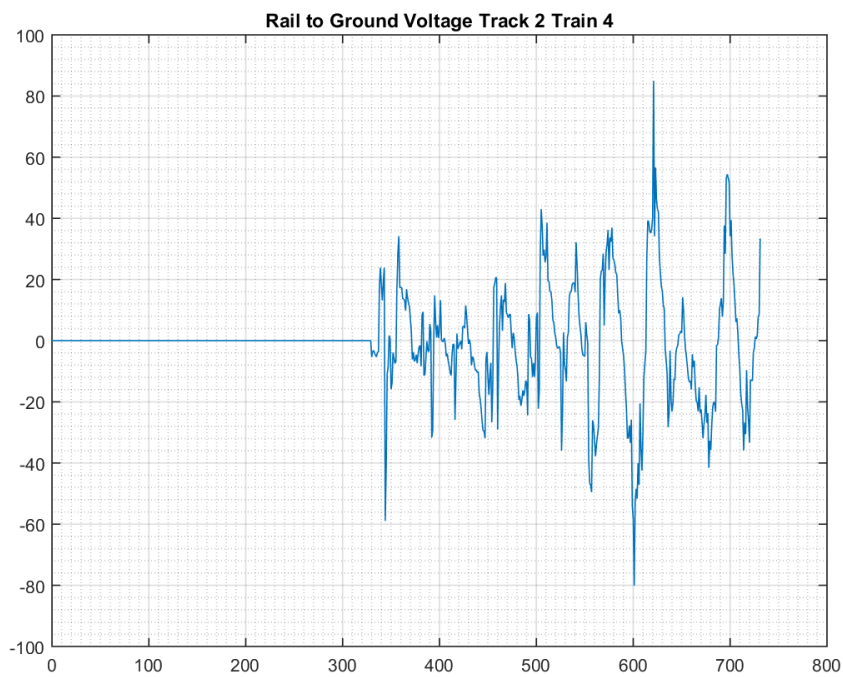
Σχήμα 4.16: Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου.



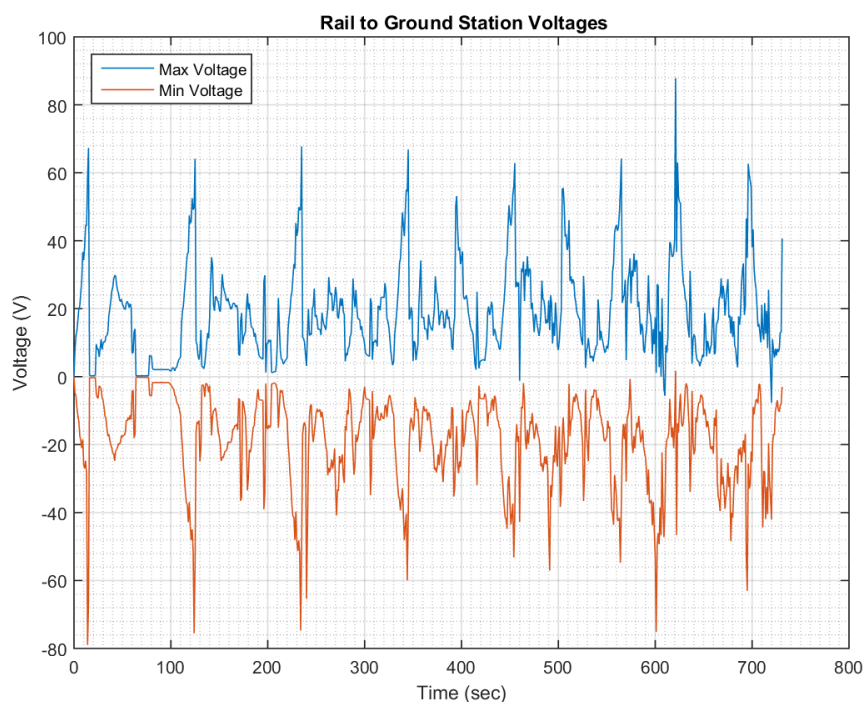
Σχήμα 4.17: Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του τέταρτου τρένου της γραμμής ανόδου.



Σχήμα 4.18: Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου.



Σχήμα 4.19: Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του τέταρτου τρένου της γραμμής καθόδου.



Σχήμα 4.20: Μέγιστη-Ελάχιστη τάση γραμμής κύλισης ως προς γη σε κάθε υποσταθμό.

Στα διαγράμματα που απεικονίζουν τις τάσεις των υποσταθμών, φαίνεται πως αρχικά, οι τάσεις στους υποσταθμούς παρουσιάζουν πιο συχνά «κορυφές» στα 900 Volts, πράγμα που σημαίνει πως οι δίοδοι τους παύουν να άγουν για να αποτρέψουν την ανάστροφη ροή ισχύος. Αυτό συμβαίνει καθώς η ισχύς από την αναγεννητική πέδηση δε μπορεί να απορροφηθεί από άλλους συρμούς του δικτύου, αφού στην αρχή και μέχρι τη χρονική στιγμή $t=Headway$, υπάρχει μόνο ένας συρμός σε κάθε γραμμή με αποτέλεσμα να ανυψώνεται η τάση, να φτάνει στη μέγιστη επιτρεπόμενη των 900 Volts και η πλεονάζουσα ισχύς να καταναλώνεται στους ροοστάτες. Όσο περνάει ο χρόνος και προσθέτονται περισσότεροι συρμοί στο δίκτυο, παρατηρείται μείωση των κορυφών στα διαγράμματα που είναι αναμενόμενο καθώς υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα η αναγεννητική ισχύς να καταναλωθεί από κάποιο άλλο συρμό. Τα ίδια συμπεράσματα εξάγονται παρατηρώντας τις κυματομορφές των ρευμάτων των υποσταθμών καθώς στην αρχή της προσομοίωσης εντοπίζονται πιο πυκνά διαστήματα κατά τα οποία το ρεύμα μηδενίζεται, που σημαίνει πως οι δίοδοι βρίσκονται σε φάση αποκοπής ενώ στη συνέχεια αυτά μειώνονται.

Από τα διαγράμματα που αφορούν τα τρένα φαίνεται πως για τα αρχικά, το ρεύμα των ροοστατών είναι μεγαλύτερο σε σχέση των τρίτων που απεικονίζονται, που συνεπάγεται και μεγαλύτερο απορριπτικό φορτίο, καθώς όπως αναφέρθηκε προηγουμένως όσα περισσότερα τρένα βρίσκονται στο δίκτυο τόσο πιο πιθανή είναι η κατανάλωση ισχύος της αναγεννητικής πέδησης σε αυτά. Ακόμη, η τάση της γραμμής παροχής έχει λιγότερες κορυφές αφού προστεθούν περισσότερα τρένα στο δίκτυο. Τέλος, είναι σαφές πως τα διαγράμματα του συνολικού ρεύματος των συρμών που ακολουθούν τους πρώτους είναι τα ίδια, απλά μετατοπισμένα κατά το αντίστοιχο Headway.

Δεύτερη Περίπτωση

Το δίκτυο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το ίδιο με τη προηγούμενη (Σχήμα 4.3), απλά αυτή τη φορά υπάρχουν όλα τα τρένα πάνω στο δίκτυο και δεν εισάγονται ένα ένα όπως τη προηγούμενη φορά. Πρόκειται δηλαδή για ένα χρονικό πλαίσιο κατά τη κανονική λειτουργία του δικτύου μας. Οι παράμετροι της προσομοίωσης είναι ίδιοι με αυτές του πίνακα (4.1).

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου :

Συνολική Ενέργεια Συρμών	407.67 kWh
Συνολική Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Μερών	396.51 kWh
Συνολική Αναγεννητική Ενέργεια	-323.35 kWh
Συνολική Ενέργεια Ροοστατών	11.16 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	3.45%

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης για τη γραμμή ανόδου στη 2^η Περίπτωσης

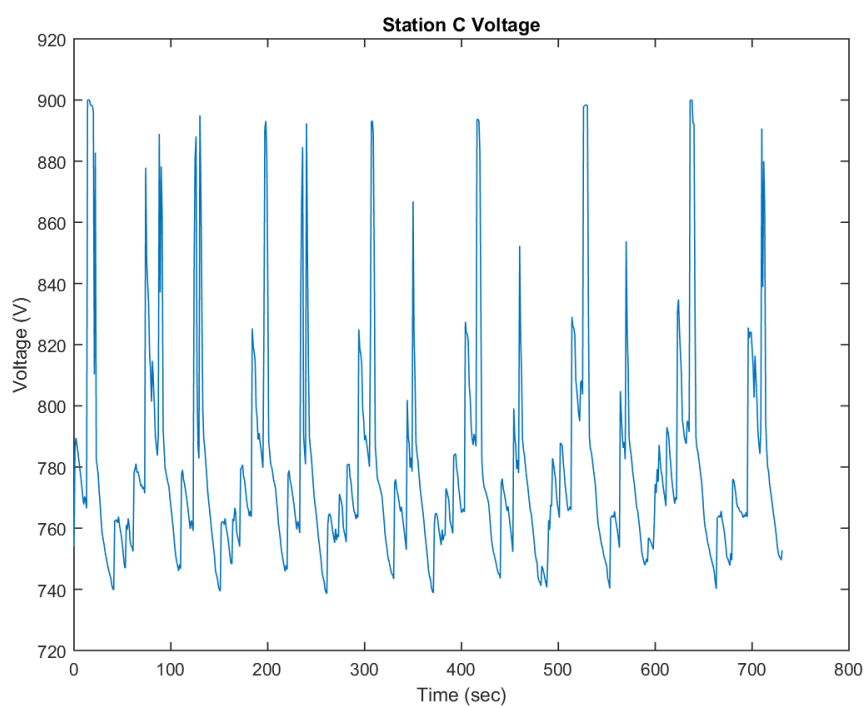
Συνολική Ενέργεια Συρμών	427.72 kWh
Συνολική Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Μερών	420.70 kWh
Συνολική Αναγεννητική Ενέργεια	-319.79 kWh
Συνολική Ενέργεια Ροοστατών	7.02 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	2.2%

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα Προσομοίωσης για τη γραμμή καθόδου στη 2^η Περίπτωσης

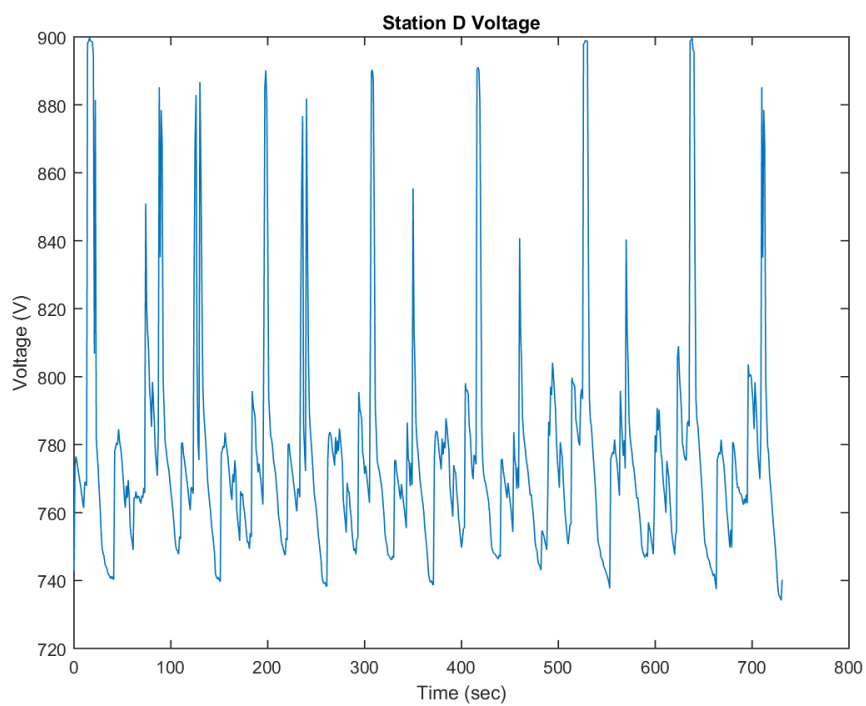
Συνολική Ενέργεια Υποσταθμών	-903.28 kWh
Συνολική Ενέργεια Συρμών	835.39 kWh
Συνολική Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Λειτουργιών	817.20 kWh
Συνολική Αναγεννητική Ενέργεια	-643.14 kWh
Συνολική Ενέργεια Ροοστατών	18.19 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου και στις δύο γραμμές	2.83%

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα Προσομοίωσης για το συνολικό σύστημα στη 2^η Περίπτωσης

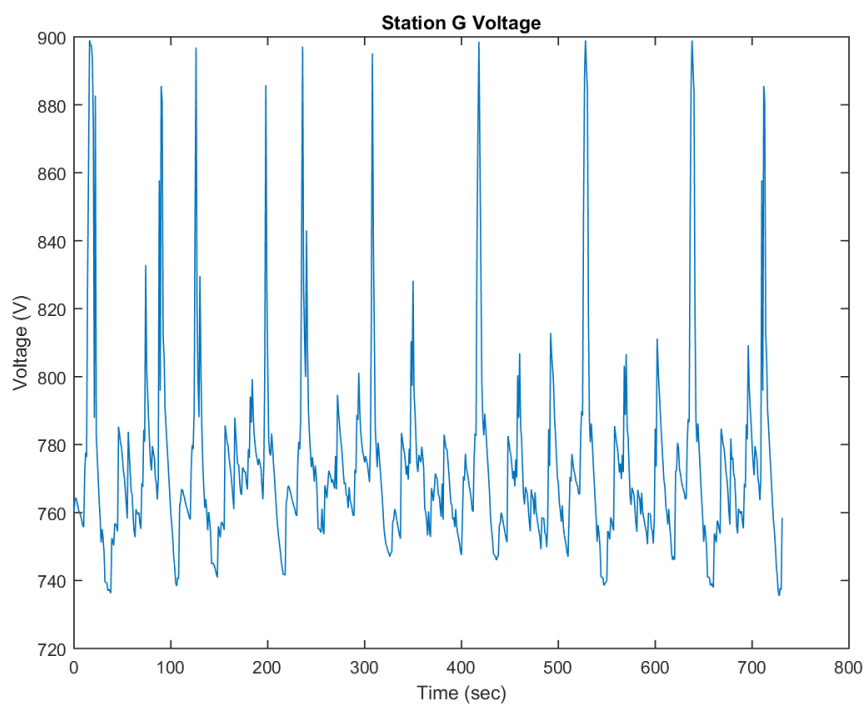
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των τάσεων για τους υποσταθμούς του συστήματος :



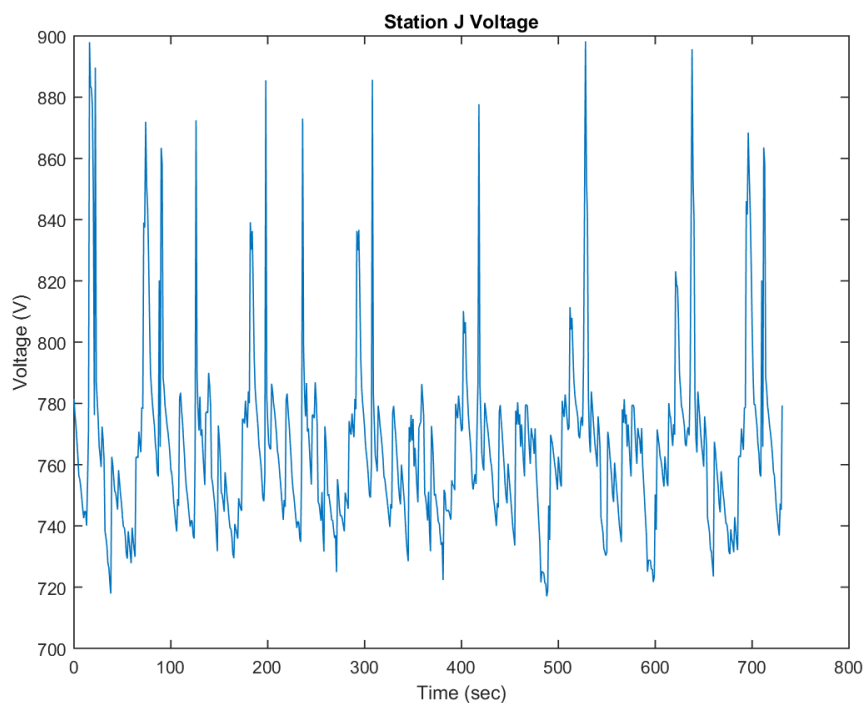
Σχήμα 4.21: Τάση στον πρώτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2^η Περίπτωση.



Σχήμα 4.22: Τάση στον δεύτερο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2^η Περίπτωση.



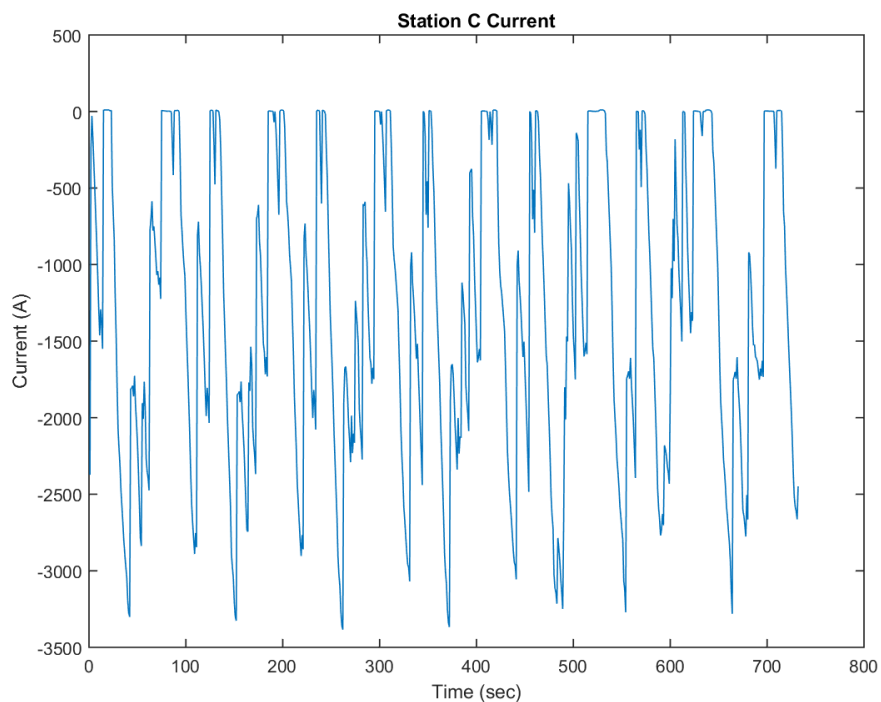
Σχήμα 4.23: Τάση στον τρίτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2^η Περίπτωση.



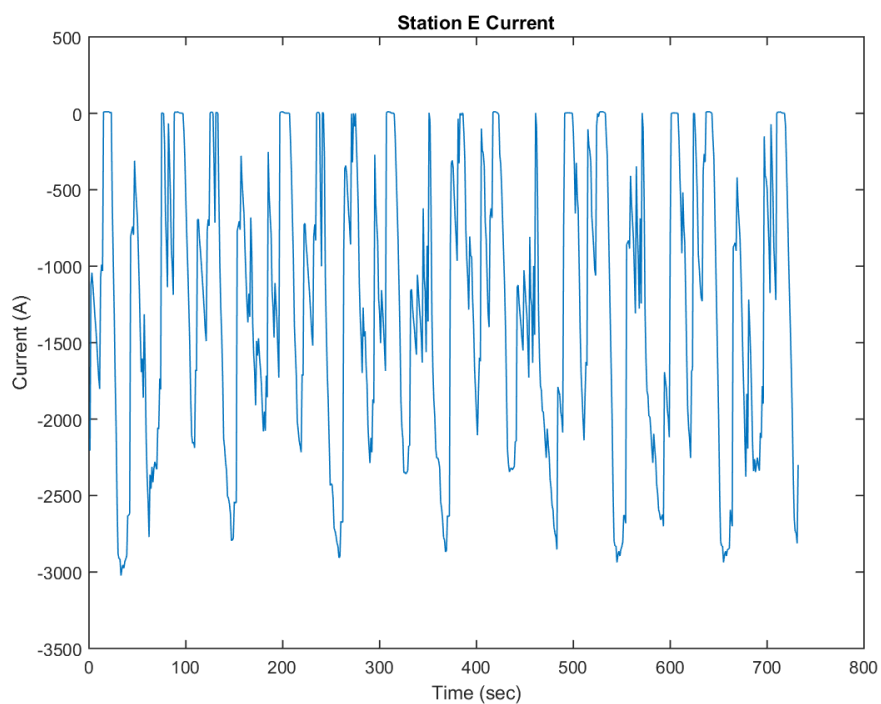
Σχήμα 4.24: Τάση στον τέταρτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2^η Περίπτωση.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος των υποσταθμών του δι-

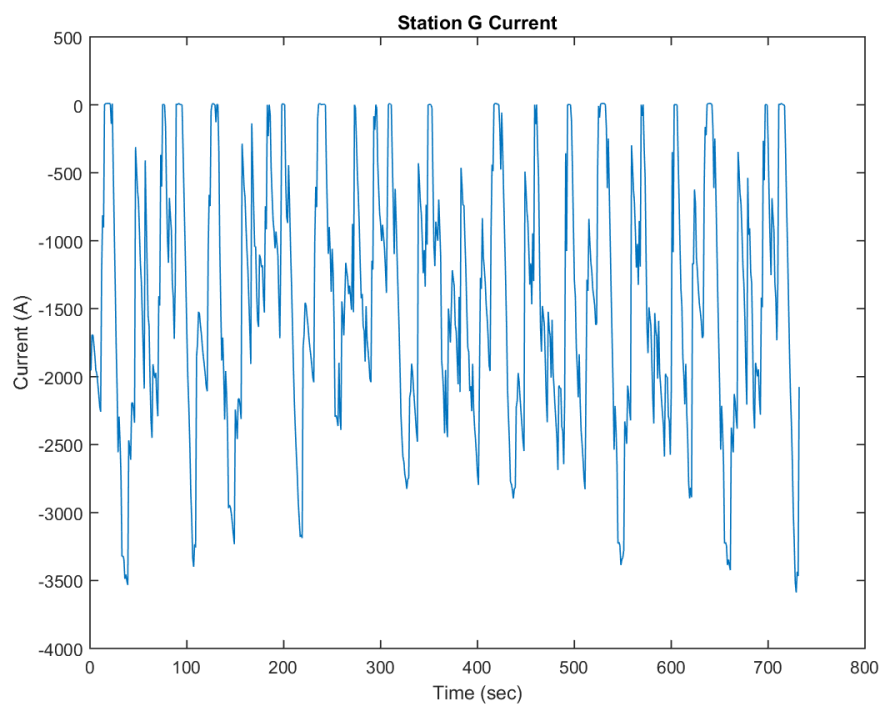
κτύου :



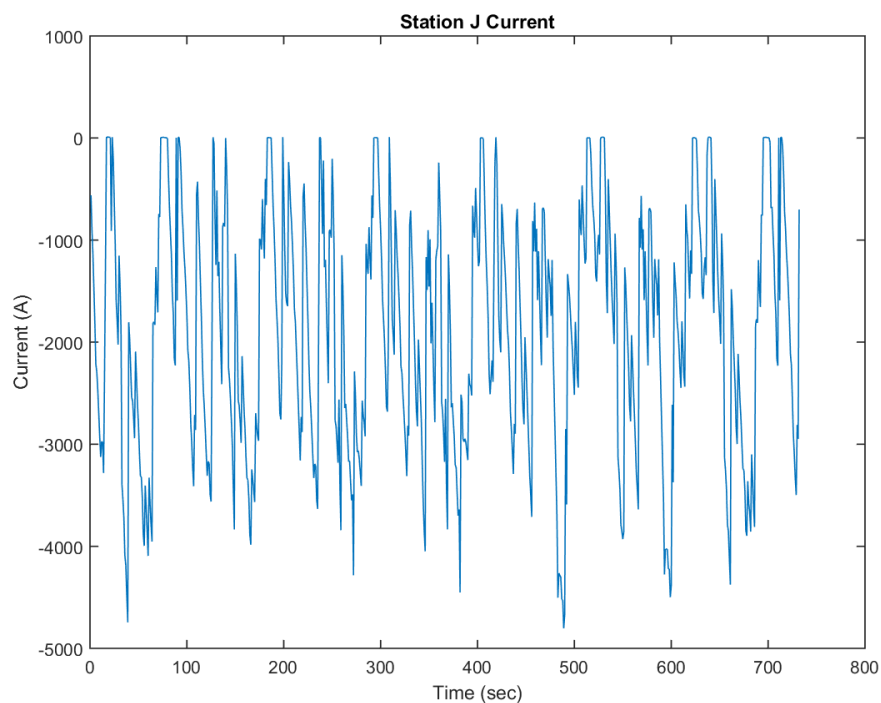
Σχήμα 4.25: Ρεύμα στον πρώτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2^η Περίπτωση.



Σχήμα 4.26: Ρεύμα στον δεύτερο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2^η Περίπτωση.



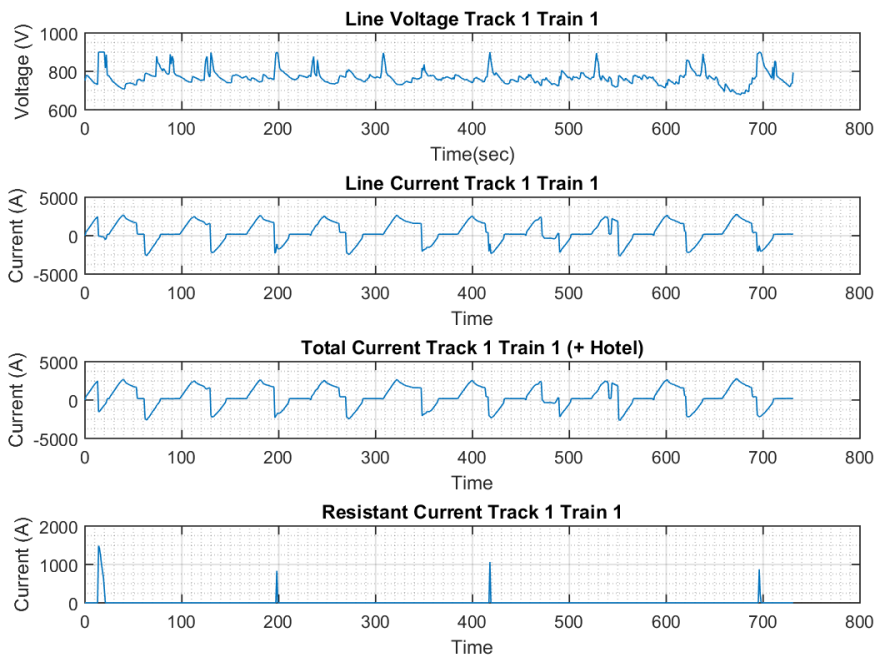
Σχήμα 4.27: Ρεύμα στον τρίτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2^η Περίπτωση.



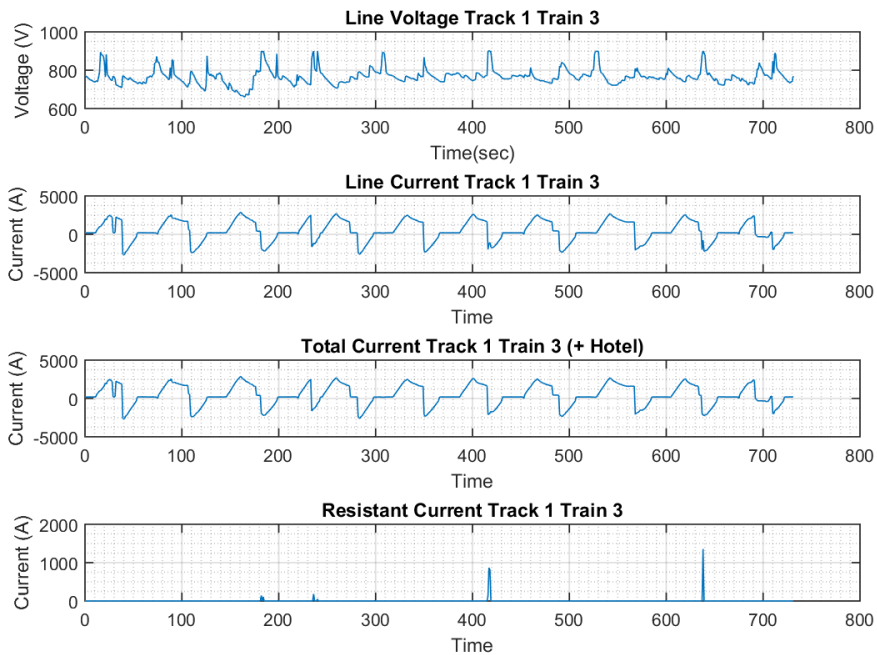
Σχήμα 4.28: Ρεύμα στον τέταρτο ηλεκτρικό υποσταθμό στη 2^η Περίπτωση.

Στη συνέχεια παραθέτονται οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος και της τάσης κάποιων εκ

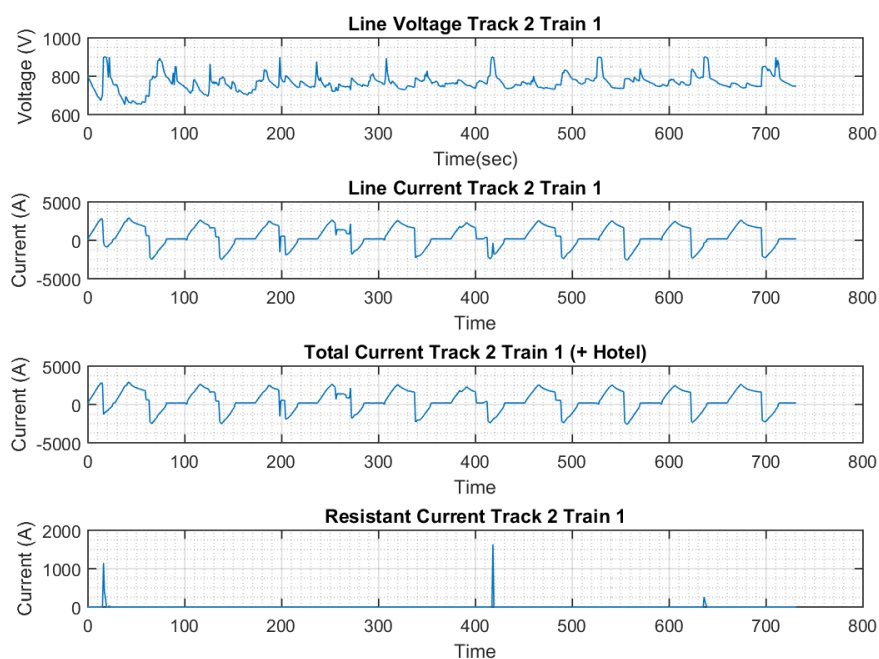
των τρένων του δικτύου :



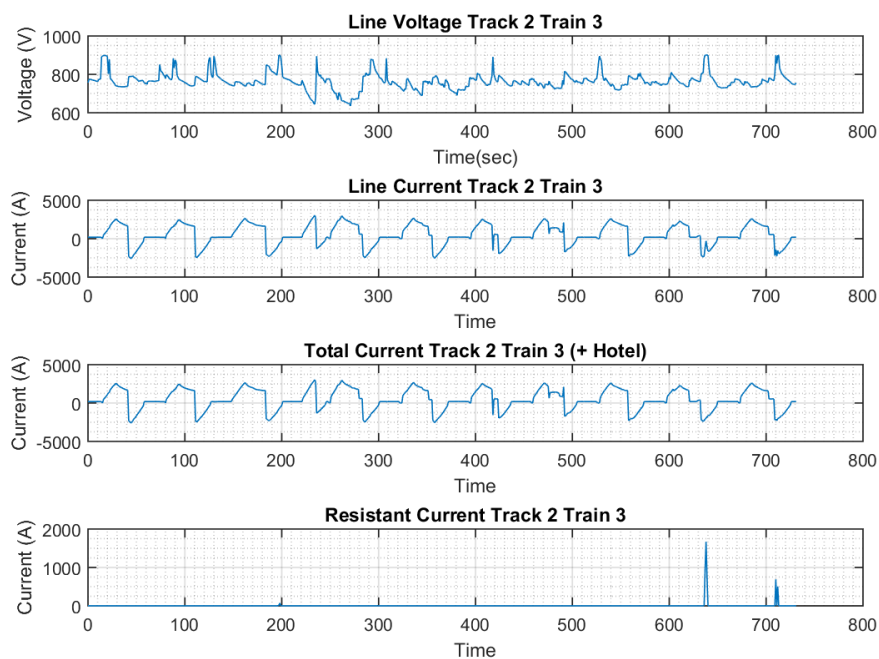
Σχήμα 4.29: Τάση και ρεύμα του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου στη 2^η Περίπτωση.



Σχήμα 4.30: Τάση και ρεύμα του τρίτου τρένου της γραμμής ανόδου στη 2^η Περίπτωση.



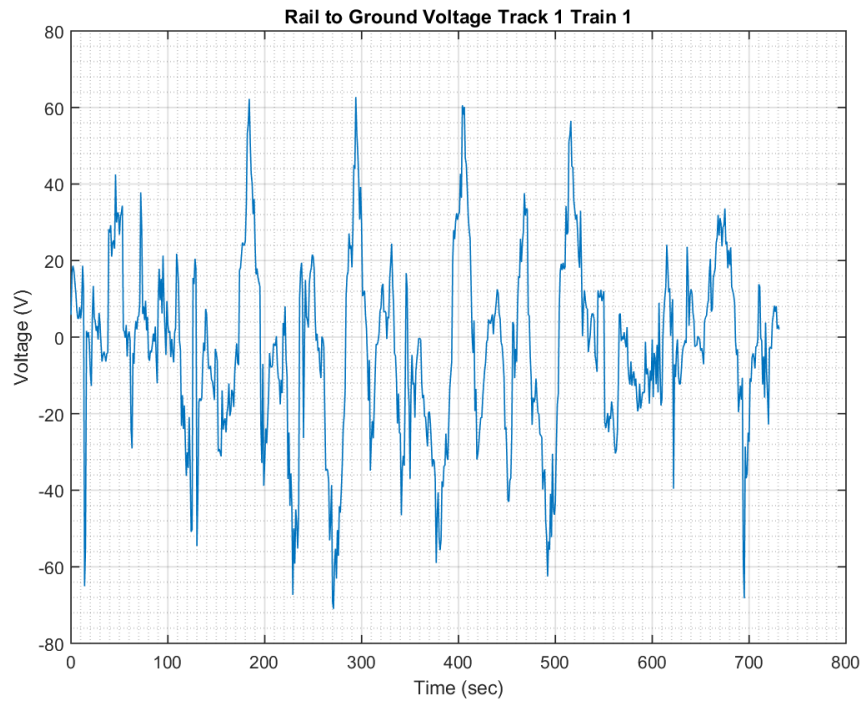
Σχήμα 4.31: Τάση και ρεύμα του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου στη 2^η Περίπτωση.



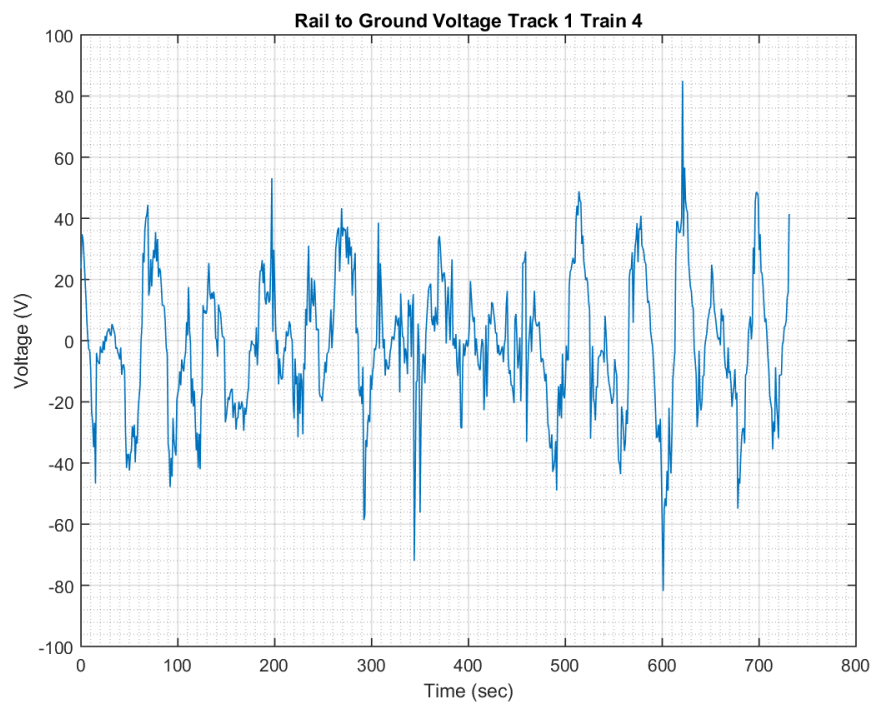
Σχήμα 4.32: Τάση και ρεύμα του τρίτου τρένου της γραμμής καθόδου στη 2^η Περίπτωση.

Τέλος, παραθέτονται οι τάσεις της γραμμής κύλισης ως προς γη και μερικούς από τους συρμούς

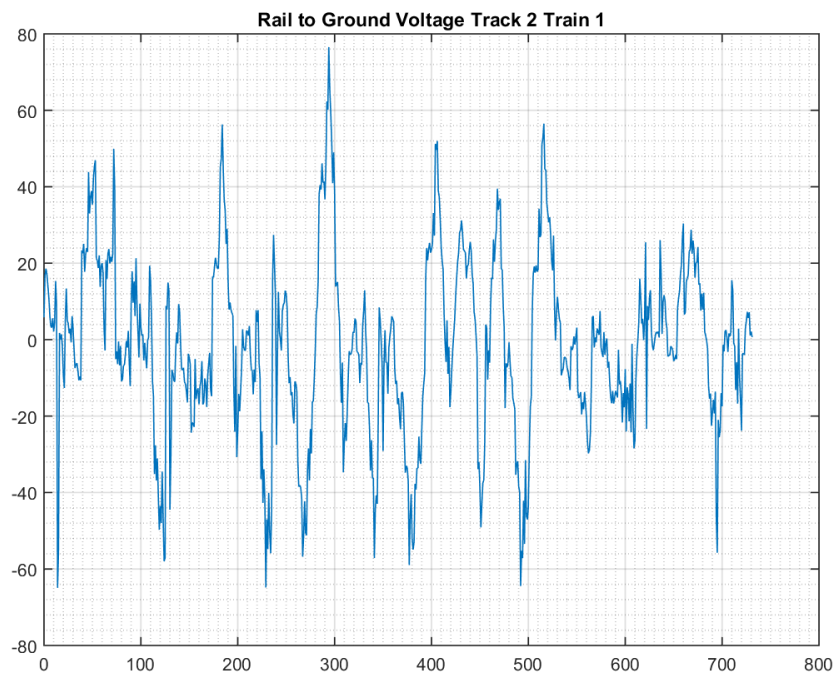
καθώς και η μέγιστη-ελάχιστη τάση ως προς γη σε κάθε υποσταθμό :



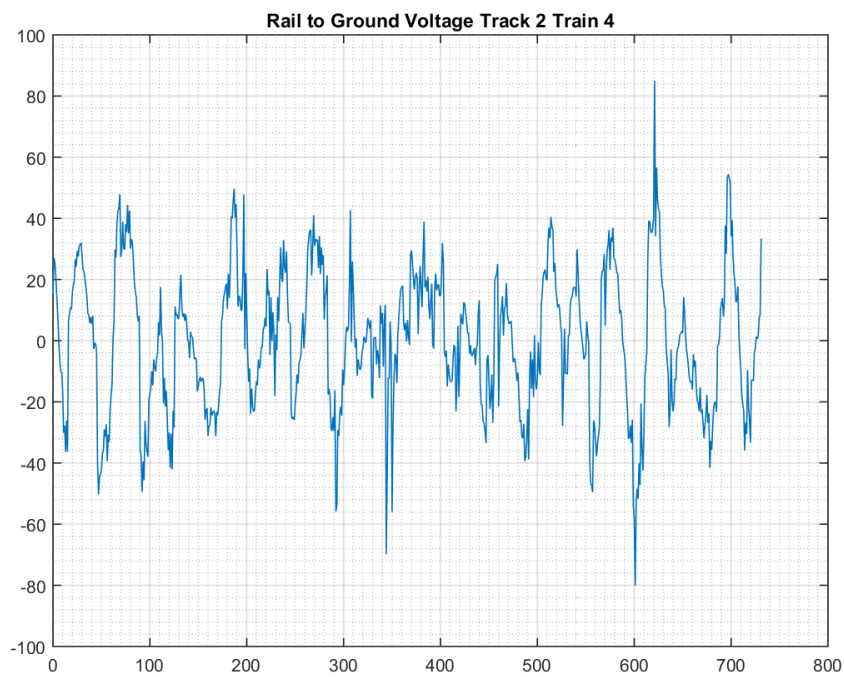
Σχήμα 4.33: Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου.



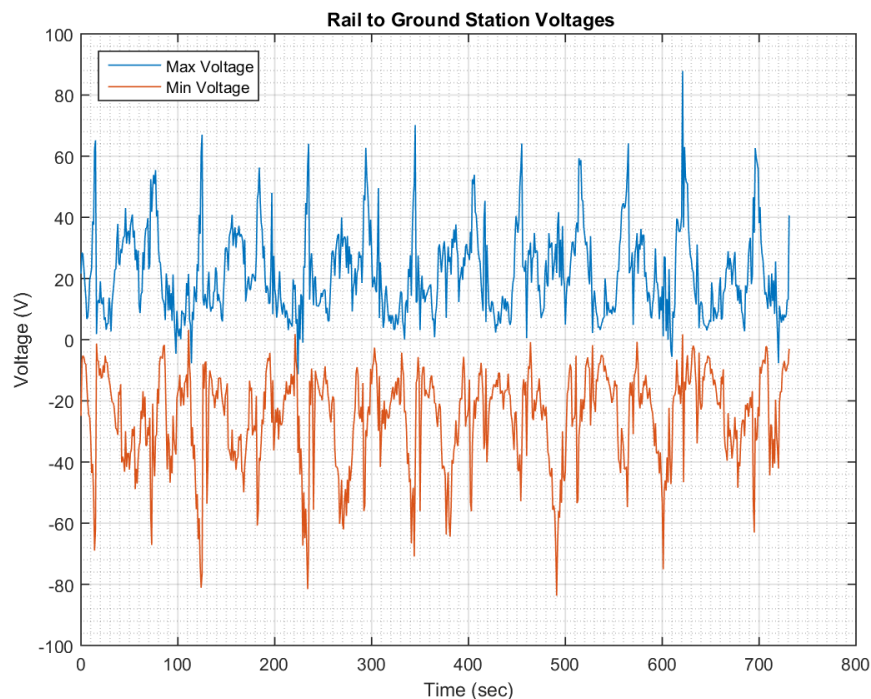
Σχήμα 4.34: Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του τέταρτου τρένου της γραμμής ανόδου.



Σχήμα 4.35: Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου.



Σχήμα 4.36: Τάση γραμμής κύλισης ως προς γη του τέταρτου τρένου της γραμμής καθόδου.



Σχήμα 4.37: Μέγιστη-Ελάχιστη τάση γραμμής κύλισης ως προς γη σε κάθε υποσταθμό.

Φαίνεται πως, κατά την κανονική λειτουργία του δικτύου με όλα τα τρένα πάνω σε αυτό το ποσοστό της απορριπτόμενης ισχύος από την αναγεννητική πέδηση είναι πολύ μικρότερο από αυτό της πρώτης περίπτωσης. Επιπλέον η ισχύς που παρέχεται από τους υποσταθμούς είναι ισομοιρασμένη σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση που στην αρχή η ισχύς παρεχόταν κυρίως από τους ακραίους υποσταθμούς εξαιτίας της θέσης των τρένων. Ακόμη οι τάσεις και τα ρεύματα των υποσταθμών παρουσιάζουν λιγότερες κορυφές αφού πλέον η τάση στο δίκτυο δεν ανυψώνεται αφού η επιπλέον ισχύς καταναλώνεται σε άλλα τρένα. Επίσης και σε αυτή τη περίπτωση η τάση της γραμμής κύλισης ως προς γη είναι εντός των επιτρεπτών ορίων. Το μικρότερο ποσοστό του απορριπτόμενου φορτίου γίνεται αντιληπτό με την παρατήρηση των γραφικών παραστάσεων του ρεύματος των ροοστατών που στη δεύτερη περίπτωση είναι μικρότερο από την πρώτη για όλα τα τρένα.

4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το ίδιο δίκτυο με διαφορετικά Headways

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιάσουμε συγκριτικά τα αποτελέσματα για ένα δίκτυο ίδιο με αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα (4.3) με τα παρακάτω δεδομένα εισόδου :

Αριθμός Σταθμών Επιβίβασης - Αποβίβασης	13
Αριθμός Ηλεκτρικών Υποσταθμών	4
Θέση Υποσταθμών	3 5 7 10
Headway	110/120/130 sec
Μέγιστος Αριθμός Τρένων στη Γραμμή	6
Τάση Δικτύου	750V
Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Παροχής Ισχύος	$15,04 \times 10^{-3} \Omega km^{-1}$
Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Κύλισης	$20 \times 10^{-3} \Omega km^{-1}$
Ανοχή Μεθόδου Newton-Raphson	10^{-4}
Μέγιστος Αριθμός Επαναλήψεων Μεθόδου Newton-Raphson	1000
Διάρκεια Προσομοίωσης	731 sec

Πίνακας 4.8: Παράμετροι Προσομοίωσης για τη σύγκριση αποτελεσμάτων με διαφορετικό Headway

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης :

Καταναλώσεις	Headway		
	110	120	130
Ενέργεια Συρμών	407.67 kWh	423.13 kWh	397.73 kWh
Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Μερών	396.51 kWh	397.18 kWh	329.77 kWh
Αναγεννητική Ενέργεια	-323.35 kWh	-322.93 kWh	-269.88 kWh
Ενέργεια Ροοστατών	11.16 kWh	25.95 kWh	67.96 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	8.04%	12.44%	25.18%

Πίνακας 4.9: Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμής ανόδου για διαφορετικό Headway.

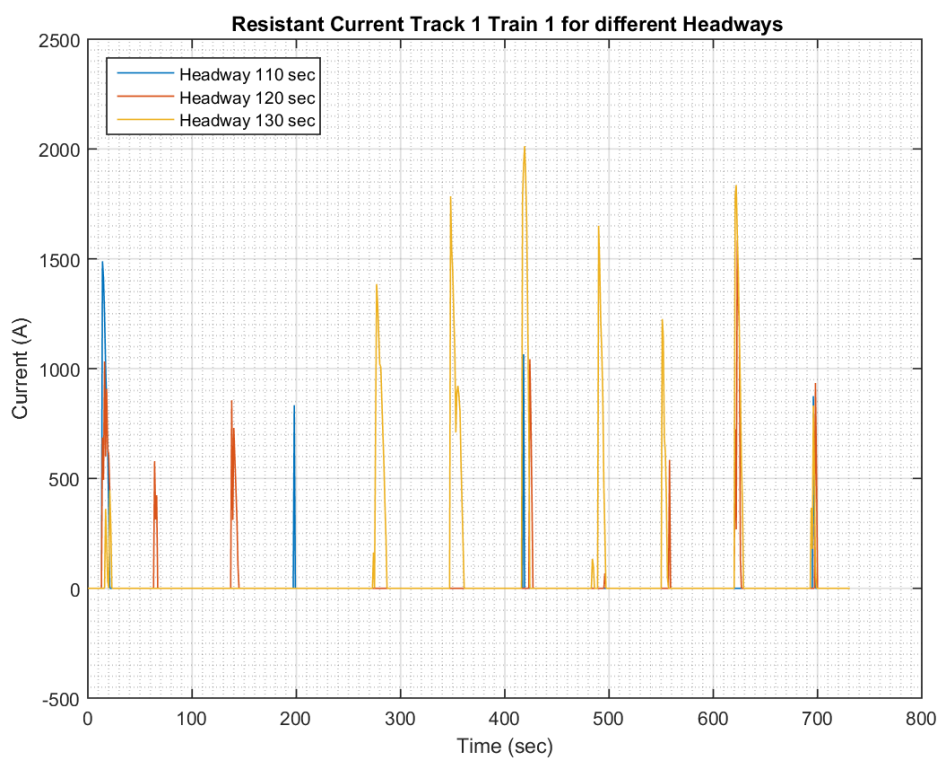
Καταναλώσεις	Headway		
	110	120	130
Ενέργεια Συρμών	427.72 kWh	449.94 kWh	410.66kWh
Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Μερών	420.70 kWh	421.33 kWh	351.11 kWh
Αναγεννητική Ενέργεια	-319.79 kWh	-319.26 kWh	-265.83 kWh
Ενέργεια Ροοστατών	7.03 kWh	28.61 kWh	59.55 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	2.20%	8.96%	22.40%

Πίνακας 4.10: Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμής καθόδου για διαφορετικό Headway.

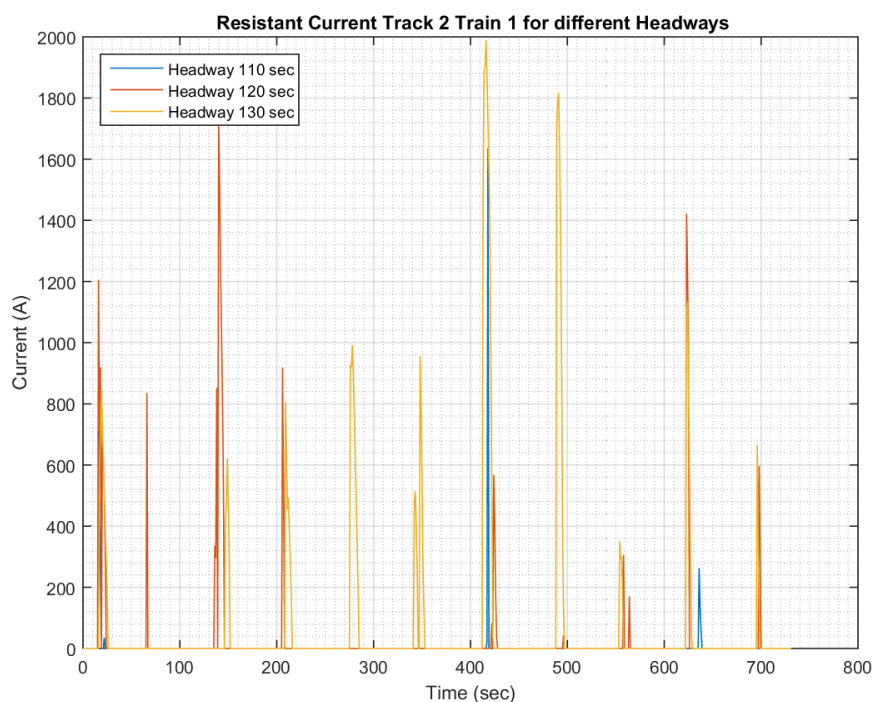
Καταναλώσεις	Headway		
	110	120	130
Ενέργεια Υποσταθμών	-903.28 kWh	-938.86 kWh	-867.01 kWh
Ενέργεια Συρμών	835.39 kWh	873.07 kWh	808.39 kWh
Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Λειτουργιών	817.20 kWh	818.51 kWh	680.88 kWh
Αναγεννητική Ενέργεια	-643.14 kWh	-642.19 kWh	-535.71 kWh
Ενέργεια Ροοστατών	18.19 kWh	54.56 kWh	127.51 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	2.83%	8.50%	23.80%

Πίνακας 4.11: Συγκριτικά συνολικά αποτελέσματα για διαφορετικό Headway.

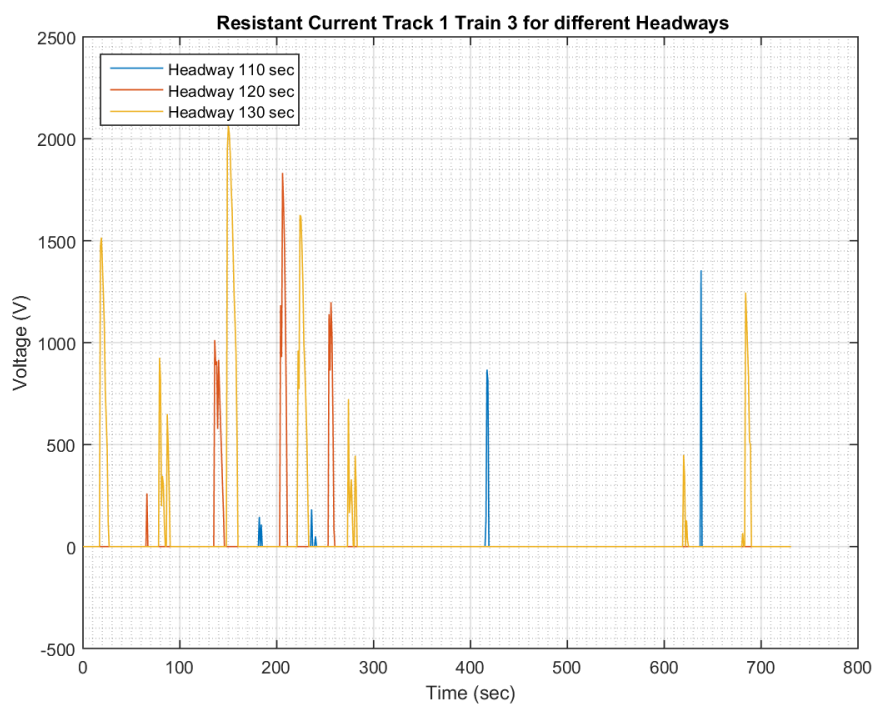
Ακολουθούν τα διαγράμματα του ρεύματος που καταναλώνεται στους ροοστάτες για το πρώτο τρένο κάθε γραμμής σε όλες τις περιπτώσεις :



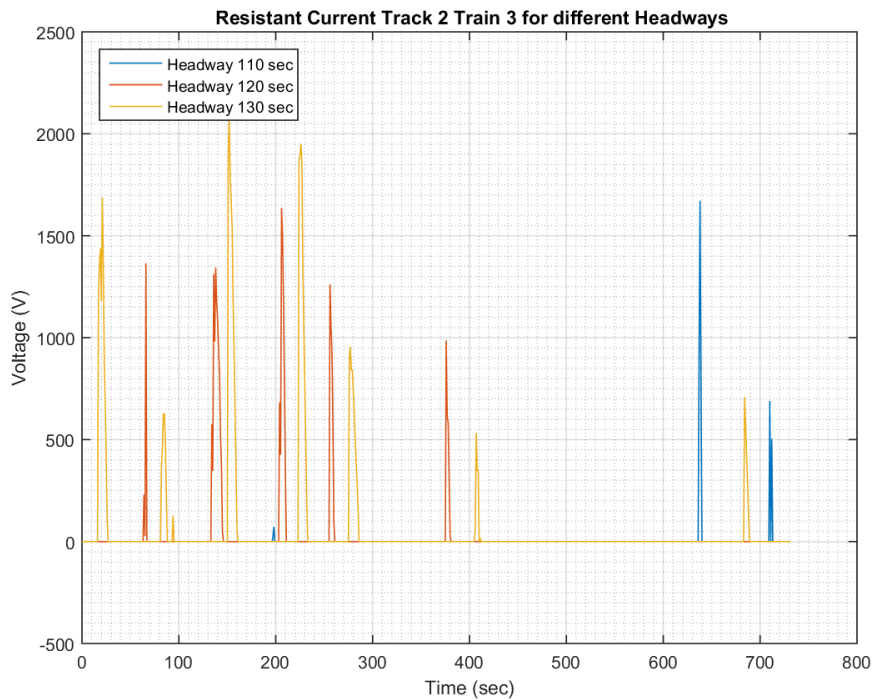
Σχήμα 4.38: Ρεύμα ροοστατών για κάθε Headway του πρώτου τρένου της γραμμής ανόδου.



Σχήμα 4.39: Ρεύμα ροοστατών για κάθε Headway του πρώτου τρένου της γραμμής καθόδου.



Σχήμα 4.40: Ρεύμα ροοστατών για κάθε Headway του τρίτου τρένου της γραμμής ανόδου.



Σχήμα 4.41: Ρεύμα ροοστατών για κάθε Headway του τρίτου τρένου της γραμμής καθόδου.

Παρατηρείται η διαφορά που υπάρχει στο απορριπτόμενο φορτίο με κάθε διαφορετικό Headway. Αυτό συμβαίνει διότι όσο πιο «πυκνή» είναι η κίνηση στο δίκτυο, τόσο πιο πιθανό είναι η ισχύς που προκύπτει από την αναγεννητική πέδηση να καταναλωθεί από κάποιο άλλο τρένο το οποίο επιταχύνεται την ίδια στιγμή, επομένως καταναλώνει ισχύ και να μην απορροφηθεί στους ροοστάτες. Αυτό γίνεται σαφές και από το ποσοστό του απορριπτικού φορτίου σε κάθε περίπτωση αλλά είναι επίσης και εμφανές από το ρεύμα που καταναλώνεται στους ροοστάτες στις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Στην παραπάνω προσομοίωση φαίνεται πως για Headway 110 δευτερολέπτων με 6 τρένα πάνω στη κάθε γραμμή, ένα ελάχιστο ποσό αναγεννητικής ενέργειας καταναλώνεται στους ροοστάτες καθώς η περισσότερη απορροφάται από το δίκτυο, ενώ για Headway 130 δευτερόλεπτα και 5 τρένα στη κάθε γραμμή το ποσοστό της απορριπτόμενης ισχύος είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το προηγούμενο.

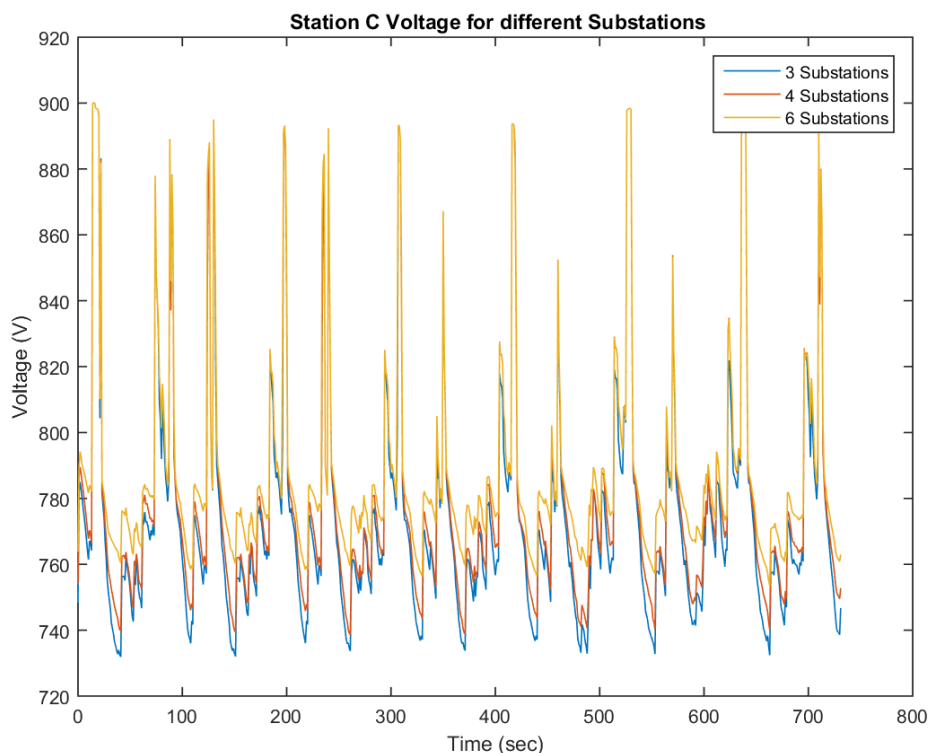
4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το ίδιο δίκτυο με διαφορετικό αριθμό υποσταθμών

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που μας δίνει ένα δίκτυο δεκατριών Δημοσίων Σταθμών Επιβίβασης-Αποβίβασης για διαφορετικό αριθμό υποσταθμών και θα παρουσιαστεί η επίδραση που έχουν οι υποσταθμοί στο επίπεδο της τάσης του δικτύου και στη μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στις γραμμές κύλισης ως προς γη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου για κάθε περίπτωση :

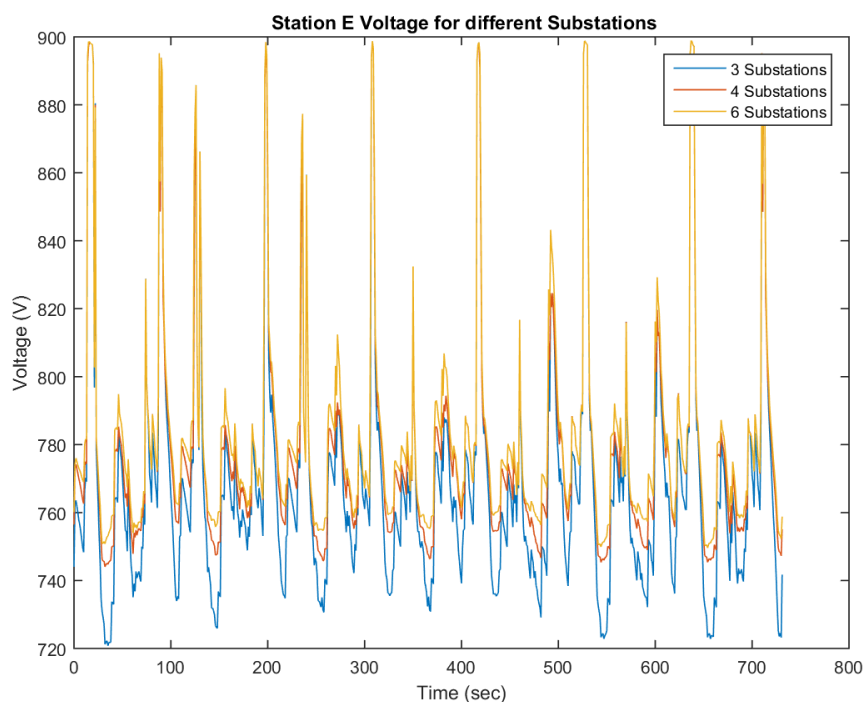
Αριθμός Σταθμών Επιβίβασης - Αποβίβασης	13
Αριθμός Ηλεκτρικών Υποσταθμών	3/4/6
Θέση Υποσταθμών	3 5 10/3 5 7 10/1 3 5 7 10 13
Headway	110sec
Μέγιστος Αριθμός Τρένων στη Γραμμή	6
Τάση Δικτύου	750V
Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Παροχής Ισχύος	$15,04 \times 10^{-3} \Omega km^{-1}$
Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Κύλισης	$20 \times 10^{-3} \Omega km^{-1}$
Ανοχή Μεθόδου Newton-Raphson	10^{-4}
Μέγιστος Αριθμός Επαναλήψεων Μεθόδου Newton-Raphson	1000
Διάρκεια Προσομοίωσης	731 sec

Πίνακας 4.12: Παράμετροι Προσομοίωσης για τη σύγκριση αποτελεσμάτων με διαφορετικό αριθμό και θέση υποσταθμών.

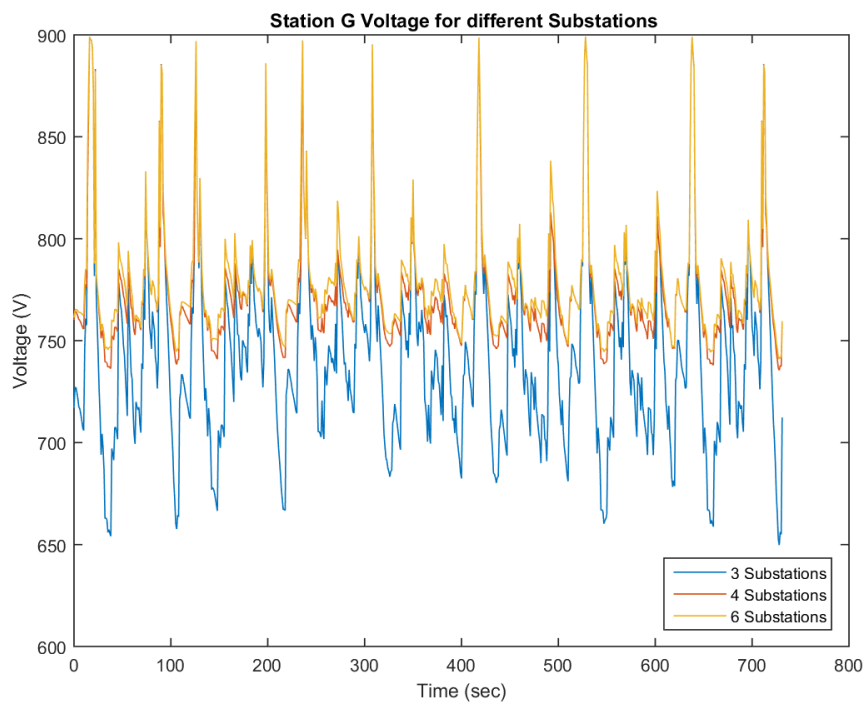
Ακολουθούν τα διαγράμματα των τάσεων για κάποιους από τους Δημόσιους Σταθμούς Επιβίβασης-Αποβίβασης του δικτύου για κάθε τοπολογία που εξετάστηκε :



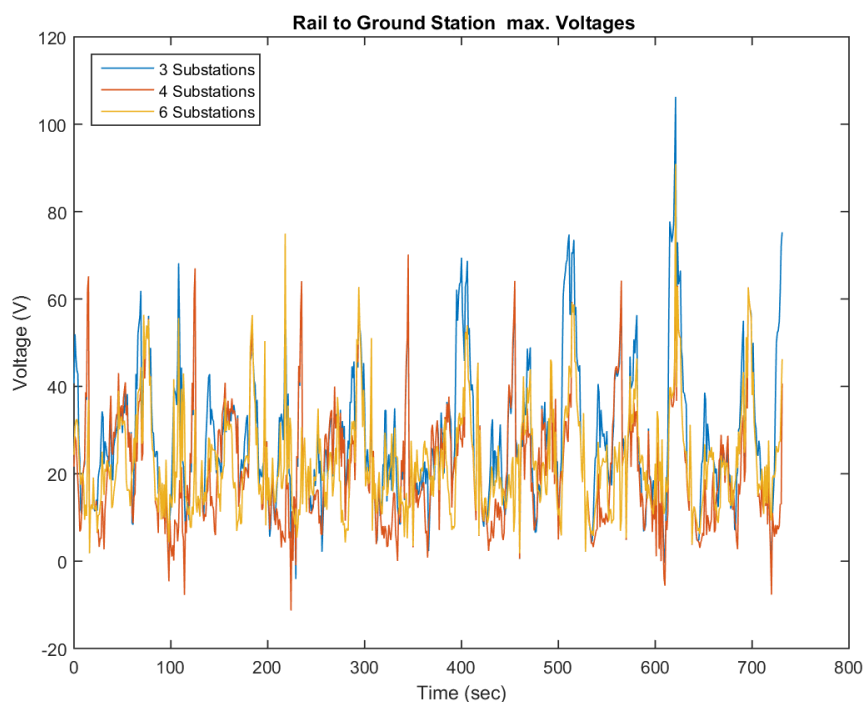
Σχήμα 4.42: Τάση του πρώτου υποσταθμού του δικτύου για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.43: Τάση του δεύτερου υποσταθμού του δικτύου για κάθε περίπτωση.

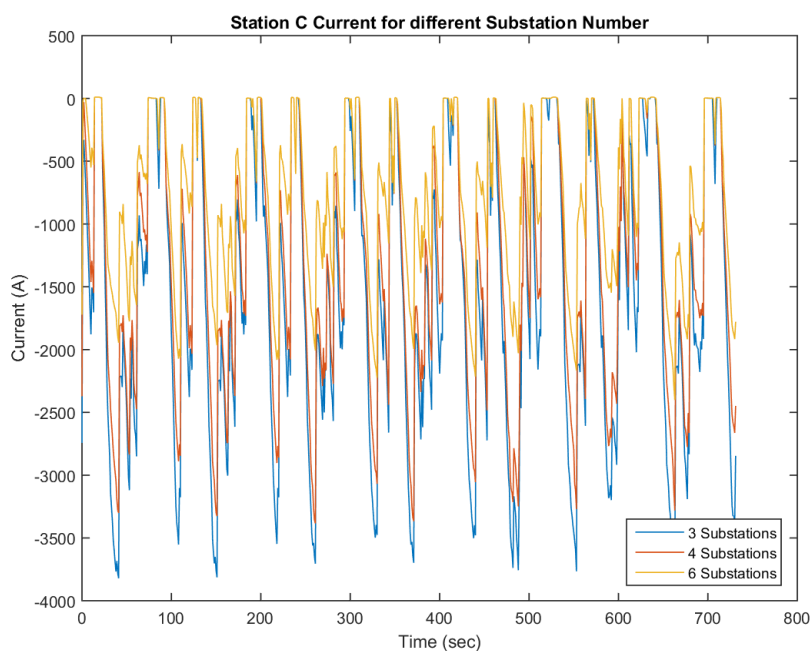


Σχήμα 4.44: Τάση του τρίτου υποσταθμού του δικτύου για κάθε περίπτωση.

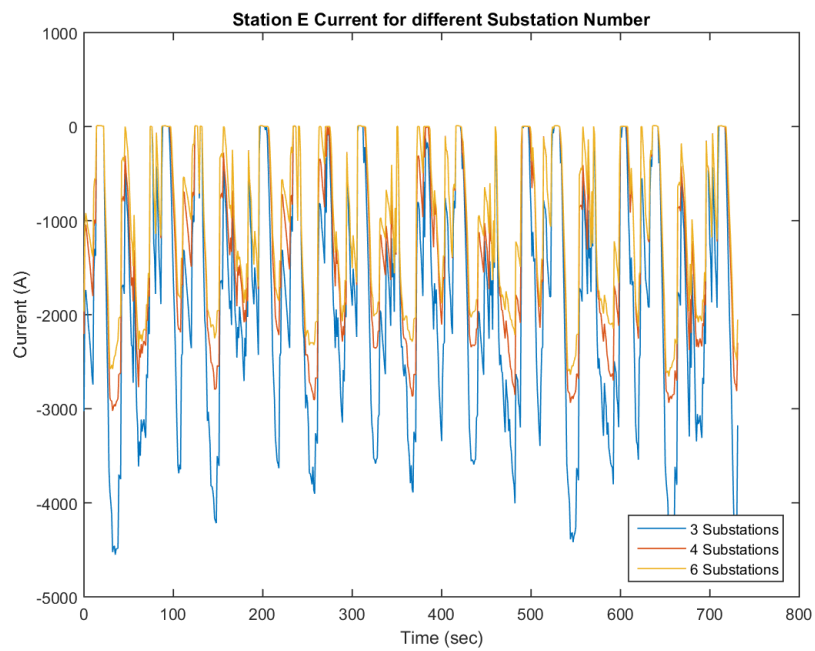


Σχήμα 4.45: Μέγιστη τάση γραμμής κύλισης ως προς γη για κάθε περίπτωση.

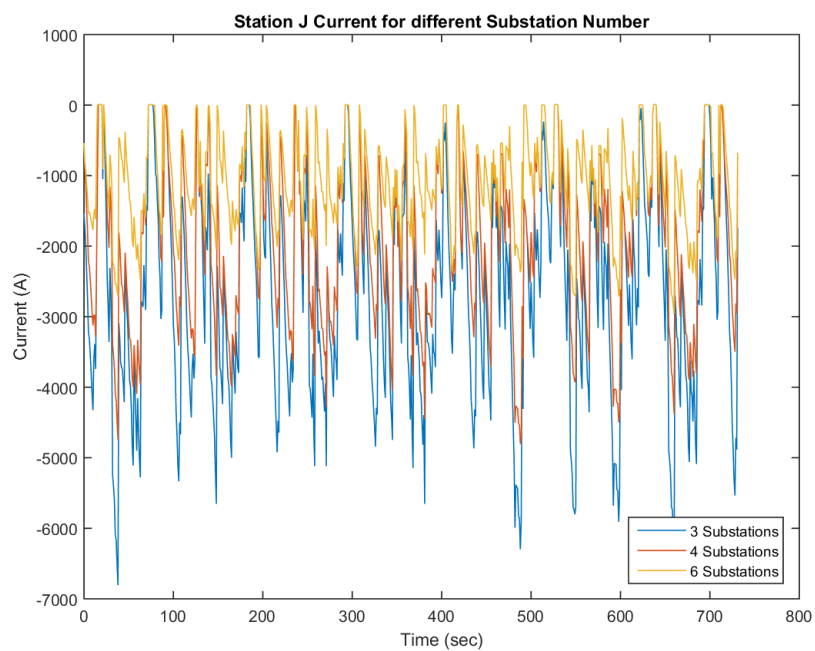
Ακολουθούν τα συγκριτικά διαγράμματα των ρευμάτων των υποσταθμών σε κάθε περίπτωση :



Σχήμα 4.46: Ρεύμα του υποσταθμού που βρίσκεται στον τρίτο σταθμό επιβίβασης αποβίβασης σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.47: Ρεύμα του υποσταθμού που βρίσκεται στον πέμπτο σταθμό επιβίβασης αποβίβασης σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.48: Ρεύμα του υποσταθμού που βρίσκεται στον δέκατο σταθμό επιβίβασης αποβίβασης σε κάθε περίπτωση.

Παρατηρείται εύκολα πως όσο περισσότεροι είναι οι υποσταθμοί στο δίκτυο τόσο πιο «στιβαρή» είναι η τάση σε αυτό. Αυτό είναι λογικό καθώς οι ζυγοί των υποσταθμών θεωρούνται άπειροι ζυγοί (slack buses), έτσι όσο περισσότεροι είναι αυτοί, τόσο περισσότερο θα διατηρείται η τάση στα επίπεδα τους σε όλους τους ζυγούς. Στο συγκριτικό διάγραμμα γίνεται κατανοητή η παραπάνω παρατήρηση καθώς φαίνεται πως η μεγαλύτερη πτώση τάσης παρατηρείται στη περίπτωση που το δίκτυο έχει τους λιγότερους υποσταθμούς. Ακόμη συμπεραίνεται πως όσο αυξάνεται ο αριθμός των υποσταθμών, τόσο χαμηλώνει η ισχύς που παρέχει ο καθένας από αυτούς στο δίκτυο όπως φαίνεται στα διαγράμματα (4.46)-(4.48). Αυτό συνεπάγεται πως ο εξοπλισμός των υποσταθμών απαιτεί μικρότερη ικανότητα ισχύος και πιθανώς μικρότερο κόστος για τον εξοπλισμό τους.

Διαφορά παρατηρείται όμως και στη τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των γραμμών κύλισης των τρένων και της γης. Συγκεκριμένα στην περίπτωση των λιγότερων υποσταθμών γίνεται αντιληπτό ότι αναπτύσσεται μεγαλύτερη τάση μεταξύ της γραμμής κύλισης και της γης και συγκεκριμένα για την περίπτωση των τριών υποσταθμούς είναι εκτός των ορίων ασφαλείας καθώς σε κάποια χρονική στιγμή της λειτουργίας υπερβαίνει τα 100 Volts. Αυτό σημαίνει πως και τα διαφεύγοντα ρεύματα θα είναι μεγαλύτερα σε αυτή την περίπτωση, συνεπώς η αύξηση των υποσταθμών όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 συμβάλει στην μείωση τους.

4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το ίδιο δίκτυο με διαφορετικό αριθμό συρμών

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιάσουμε συγκριτικά τα αποτελέσματα για ένα δίκτυο ίδιο με αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα (4.3), με όλα τα τρένα να κινούνται στο δίκτυο ταυτόχρονα, με τα παρακάτω δεδομένα εισόδου :

Αριθμός Σταθμών Επιβίβασης - Αποβίβασης	13
Αριθμος Ηλεκτρικών Υποσταθμών	6
Θέση Υποσταθμών	1 3 5 7 10 13
Headway	110 sec
Αριθμός Τρένων στη Γραμμή	3/5/6
Τάση Δικτύου	750V
Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Παροχής Ισχύος	$15,04 \times 10^{-3} \Omega km^{-1}$
Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Κύλισης	$20 \times 10^{-3} \Omega km^{-1}$
Ανοχή Μεθόδου Newton-Raphson	10^{-4}
Μέγιστος Αριθμός Επαναλήψεων Μεθόδου Newton-Raphson	1000
Διάρκεια Προσομοίωσης	731 sec

Πίνακας 4.13: Παράμετροι Προσομοίωσης για τη σύγκριση αποτελεσμάτων με διαφορετικό Headway

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ενεργειακή κατανάλωση των συρμών σε κάθε περίπτωση :

Καταναλώσεις	Αριθμός Συρμών στην κάθε γραμμή		
	3	5	6
Ενέργεια Συρμών	230.95 kWh	350.37 kWh	407.91 kWh
Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Μερών	199.00 kWh	330.85 kWh	396.51 kWh
Αναγεννητική Ενέργεια	-161.42 kWh	-269.38 kWh	-323.35 kWh
Ενέργεια Ροοστατών	31.94 kWh	19.51 kWh	11.41 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	19.79%	7.24%	3.53%

Πίνακας 4.14: Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμής ανόδου για διαφορετικό αριθμό συρμών.

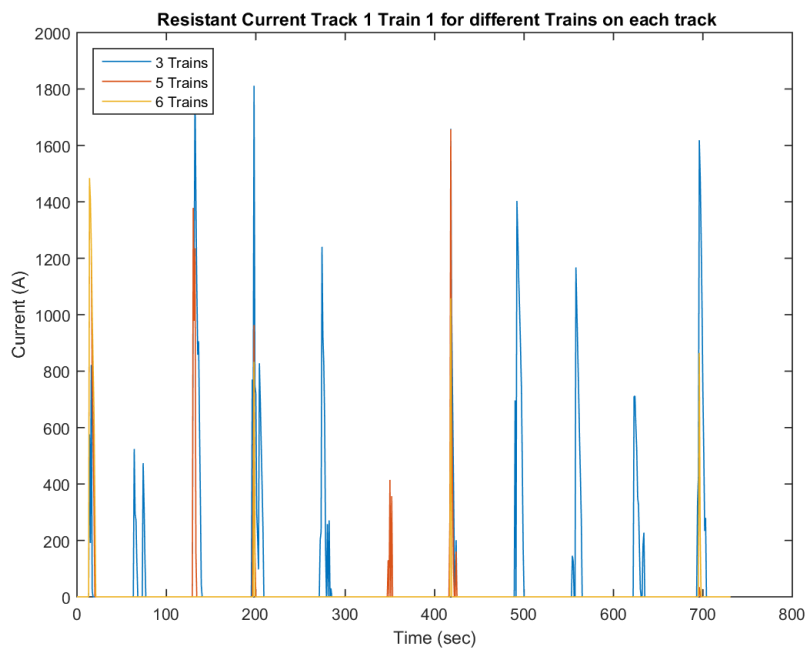
Καταναλώσεις	Αριθμός Συρμών στην κάθε γραμμή		
	3	5	6
Ενέργεια Συρμών	244.89 kWh	363.11 kWh	427.72 kWh
Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Μερών	209.98 kWh	420.70 kWh	351.1069kWh
Αναγεννητική Ενέργεια	-159.89 kWh	-266.49 kWh	-319.7875 kWh
Ενέργεια Ροοστατών	34.90 kWh	12.74 kWh	7.03 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	21.83%	4.78%	2.20%

Πίνακας 4.15: Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμής καθόδου για διαφορετικό αριθμό συρμών.

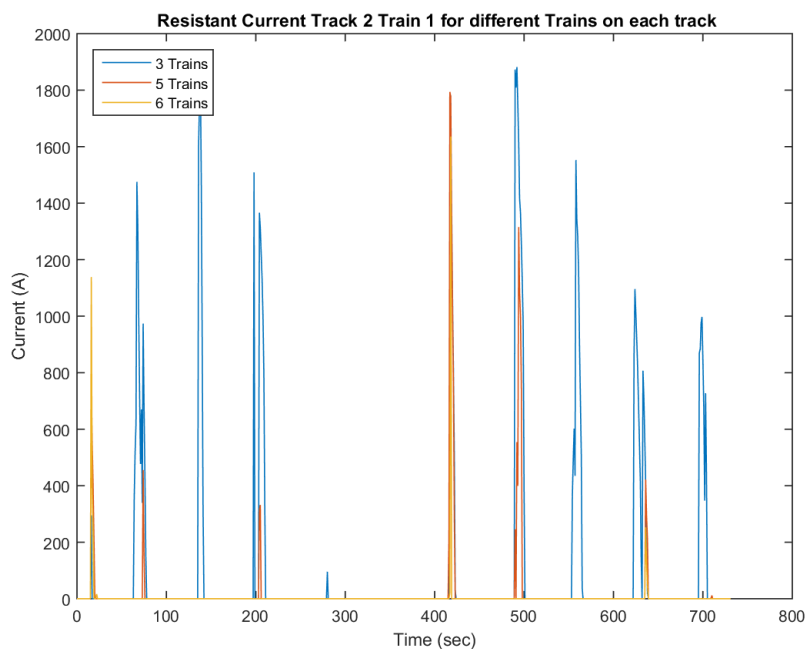
Καταναλώσεις	Αριθμός Συρμών στην κάθε γραμμή		
	3	5	6
Ενέργεια Υποσταθμών	-501.59 kWh	-758.46 kWh	-890.30kWh
Ενέργεια Συρμών	475.84 kWh	713.47 kWh	835.64 kWh
Ενέργεια Κινητήρα και Βοηθητικών Λειτουργιών	408.99 kWh	681.22 kWh	817.20 kWh
Αναγεννητική Ενέργεια	-321.32 kWh	-535.87 kWh	-643.14 kWh
Ενέργεια Ροοστατών	66.88 kWh	32.25 kWh	18.44 kWh
Ποσοστό Απορριπτόμενου Φορτίου	20.80%	6.02%	2.87%

Πίνακας 4.16: Συγκριτικά συνολικά αποτελέσματα για διαφορετικό αριθμό συρμών.

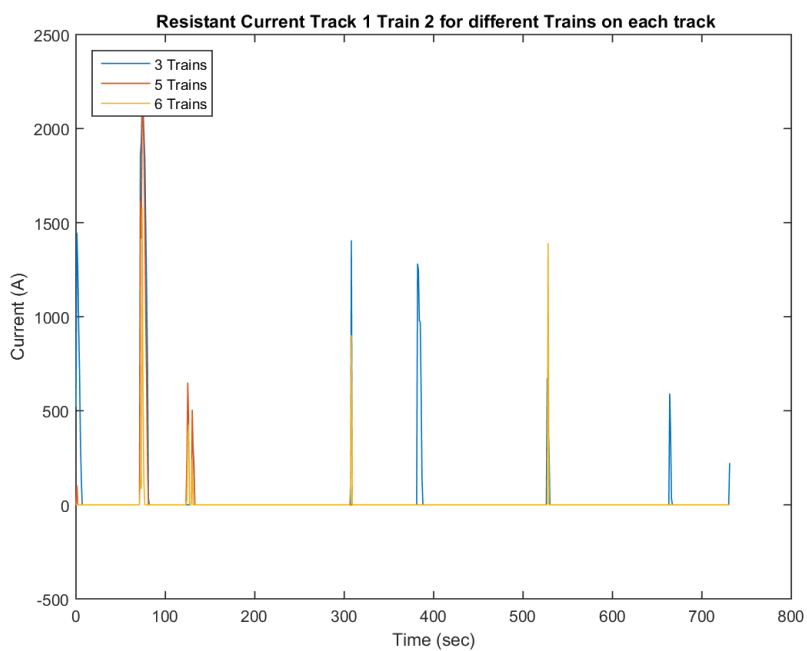
Ακολουθούν οι συγκριτικές γραφικές παραστάσεις του ρεύματος στους ροοστάτες για κάθε περίπτωση :



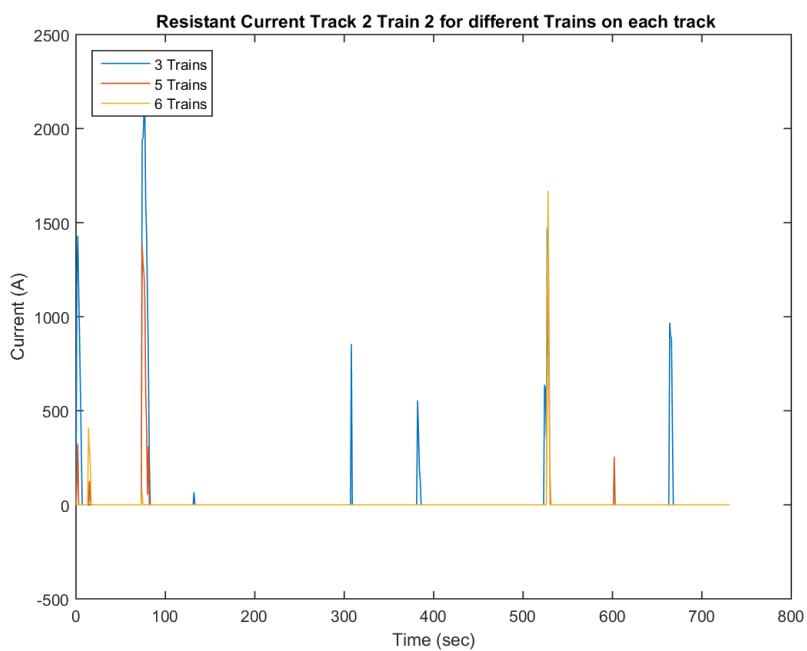
Σχήμα 4.49: Ρεύμα στους ροοστάτες για το πρώτο τρένο της γραμμής ανόδου σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.50: Ρεύμα στους ροοστάτες για το πρώτο τρένο της γραμμής καθόδου σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.51: Ρεύμα στους ροοστάτες για το δεύτερο τρένο της γραμμής ανόδου σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.52: Ρεύμα στους ροοστάτες για το δεύτερο τρένο της γραμμής καθόδου σε κάθε περίπτωση.

Είναι και εδώ εμφανές πως η ισχύς που παράγεται από την πέδηση και καταναλώνεται στους ροοστάτες εξαρτάται από τον αριθμό των συρμών που βρίσκονται πάνω στο δίκτυο τη δεδομένη στιγμή. Συγκεκριμένα, όσα περισσότερα τρένα βρίσκονται πάνω στις γραμμές, τόσο λιγότερο είναι και το απορριπτικό φορτίο που καταναλώνεται στους ροοστάτες καθώς η αναγεννητική ισχύς από την πέδηση καταναλώνεται σε άλλα τρένα του δικτύου που εκείνη τη στιγμή επιταχύνονται.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Στο προηγούμενο κεφάλαιο ο αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος που αντιμετωπίζει η συγκεκριμένη διπλωματική αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab και υπολογίστηκαν τα αποτελέσματα της ροής φορτίου για διάφορα δεδομένα εισόδου και τοπολογίες του δικτύου. Ακόμη, υπολογίστηκε η τάση ως προς γη που αναπτύσσεται στη γραμμή κύλισης για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Στο κεφάλαιο αυτό της διπλωματικής θα εξαχθούν συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν καθώς επίσης και θα προταθούν ιδέες για μελλοντική μελέτη.

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μοντελοποιήθηκαν τα επιμέρους τμήματα του δικτύου ενός ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου συνεχούς ρεύματος. Ακόμη μελετήθηκαν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των διαφευγόντων ρευμάτων. Τέλος αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος της ροής φορτίου στο δίκτυο και για τον υπολογισμό της τάσης ως προς γη που αναπτύσσεται στις γραμμές κύλισης των συρμών με τη μέθοδο των Συγκεντρωμένων Στοιχείων. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα διπλωματική εργασία κινούνται σε δυο κατευθύνσεις.

Σχετικά με την απόδοση του δικτύου, παρατηρούμε πως στην περίπτωση της κανονικής λειτουργίας με όλα τα τρένα εντός του δικτύου το ποσοστό της ισχύος από την αναγεννητική πέδηση που δεν αναχτάται και καταναλώνεται στους ροοστάτες είναι εξαιρετικά μικρό. Συνεπώς, η εγκατάσταση ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μην είναι οικονομικά συμφέρουσα για ένα τόσο μικρό ποσοστό ενέργειας. Ακόμη, στις περισσότερες περιπτώσεις, εκτός από αυτή των τριών υποσταθμών, η τάση στο δίκτυο βρίσκεται πάνω από το όριο που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία των επιμέρους στοιχείων του, όπως αντιστροφείς, μηχανές κλπ. Επίσης, η τάση της γραμμής κύλισης ως προς γη είναι εντός των ορίων ασφαλείας για τις περισσότερες των περιπτώσεων, εκτός από αυτή που το σύστημα τροφοδοτείται από τρεις υποσταθμούς.

Αναφορικά με τη λειτουργία του δικτύου σε σχέση με τα διαφορετικά δεδομένα εισόδου, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων γίνεται σαφές πως όσο μικρότερο είναι το Headway μεταξύ των τρένων, τόσο λιγότερη ισχύς καταναλώνεται στους ροοστάτες. Ακόμη, σχετικά με το πλήθος των υποσταθμών παρατηρείται πως όσο περισσότεροι είναι στο δίκτυο, τόσο πιο σταθερό διατηρείται το επίπεδο της τάσης, χωρίς μεγάλες πτώσεις που μπορούν να αποβούν ζημιογόνες για το σύστημα. Τέλος σε σχέση με το πλήθος των τρένων παρατηρείται πως όσο αυτό αυξάνεται, τόσο μικρότερο ποσοστό ανακτώμενης ισχύος από την αναγεννητική πέδηση καταλήγει να καταναλώνεται στους ροοστάτες σαν απορριπτικό φορτίο. Από τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα πως ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την οικονομοτεχνική μελέτη του συστήματος μιας και γνωρίζοντας τις απαιτήσεις ισχύος του δικτύου, είναι εφικτό να μελετηθεί αν το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει τα ανάλογα προγράμματα κίνησης των συρμών, ως προς την τάση και την ισχύ που απαιτούνται αλλά και να διαπιστωθεί αν η εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης είναι ή όχι οικονομικά συμφέρουσα. Ακόμη μπορεί να μελετηθεί και ο αριθμός των συρμών πάνω σε κάθε γραμμή ο οποίος μπορεί να υποστηριχθεί από το σύστημα.

Σχετικά με την τάση ως προς γη που αναπτύσσεται στις γραμμές κύλισης, είναι εμφανές πως ο αριθμός και η απόσταση των υποσταθμών μεταξύ τους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο μέγεθος της και στην περίπτωση των τριών υποσταθμών στο σύστημα, τα όρια ασφαλείας παραβιάζονται. Ο υπολογισμός της τάσης αυτής έχει ιδιαίτερη σημασία για το σύστημα, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερα θα είναι και τα διαφεύγοντα ρεύματα που θα διαρρέουν μέσω της γης τις υπόγειες εγκαταστάσεις, δημιουργώντας προβλήματα σε αυτές που προκαλούνται από την ηλεκτροχημική διάβρωση. Συνεπώς μέσω του αλγορίθμου, μπορεί να διαπιστωθεί αν το δίκτυο τηρεί τις απαιτήσεις ασφαλείας που ορίζονται από το αντίστοιχο πρότυπο και να δοκιμαστούν διάφοροι τρόποι για τη μείωση τους, όπως για παράδειγμα η αύξηση των υποσταθμών στο δίκτυο.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, θα μπορούσε να βελτιωθεί και να του προστεθούν κάποιες επιπλέον λειτουργίες για πιο ολοκληρωμένη μελέτη και την αξιολόγηση του δικτύου. Κάποια στοιχεία που μπορούν να προστεθούν στον αλγόριθμο θα μπορούσαν να είναι :

- Μελέτη της αλληλεπίδρασης που έχει το σύστημα με το δίκτυο διανομής μέσω υβριδικής ροής φορτίου AC/DC για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας.
- Μελέτη του ορίου της τάσης για τη σωστή λειτουργία του δικτύου, που εξαρτάται από τα συστήματα οδήγησης των μηχανών και τις ίδιες τις μηχανές. Ακόμη αφού μελετηθεί αυτό το όριο μπορεί να καθοριστεί αν το κάθε σύστημα μπορεί να υποστηρίξει την απαιτούμενη ισχύ από τους συρμούς.
- Αλλαγή του τρόπου αρίθμησης και ορισμού των κόμβων για τη βελτιστοποίηση του αλγορίθμου, καθώς σε μεγαλύτερα δίκτυα ο αριθμός των κόμβων παίζει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα επίλυσης μέσω των αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται.

- Τροποποίηση του αλγορίθμου ώστε να μπορεί να δεχτεί διακλαδώσεις στις επιμέρους γραμμές κίνησης.
- Βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος, καθορίζοντας το κατάλληλο πρόγραμμα και τον μέγιστο αριθμό συρμών πάνω στην κάθε γραμμή.
- Μοντελοποίηση του αντιστροφέα του υποσταθμού για να μελετηθεί η αμφίπλευρη ροή ισχύος στο δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- [1] R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo. Quasi-static simulation method for evaluation of energy consumption in hybrid light rail vehicles. In *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, 2008.
- [2] R. Teymourfar, B. Asaei, H. Imaneini, R.N. Fard. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line. In *Energy Conversion and Management*, 56:206–214, April 2012.
- [3] 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.
- [4] A. González Gil, R. Palacin, P. Batty. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. In *Energy Conversion and Management*, 75:374–388, November 2013.
- [5] S. Chehn, M. Sautreuil, D. Riu, N. Retiere. Quasi-static decoupled load flow modelling of a power supply network with AC-DC converters applied to light rail system. In *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, September 2007.
- [6] R.J. Hill, Y. Cai, S.H. Case, M.R. Irving. Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking. In *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 143(6):613–615, November 1996.
- [7] C.L. Pires, S.I. Nabeta, J.R. Cardoso. ICCG method applied to solve DC traction load flow including earthing models. In *IET Electric Power Applications*, 1(2):193–198, May 2009.
- [8] C.L. Pires, S.I. Nabeta, J.R. Cardoso. DC traction load flow including AC distribution network. In *IET Electric Power Applications*, 3(4):289–297, May 2009.
- [9] P. Arboleya, G. Diaz, M. Coto. Unified AC/DC Power Flow for Traction Systems: A New Concept. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(6):2421–2430, July 2012.

- [10] P. Arboleya, M. Coto, C. Gonzàles-Morà, R. Arregui. *On board accumulator model for power flow studies in DC traction networks*. In *Electric Power Systems Research*, 116:266–275, November 2014.
- [11] M. Coto, P. Arboleya, C. Gonzàles-Morà. *Optimization approach to unified AC/DC power flow applied to traction systems with catenary voltage constraints*. In *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53(1):434–441, December 2013.
- [12] Y. Cai, M.R. Irving, S.H. Case. *Modelling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems*. In *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 142(5):323–328, September 1995.
- [13] L. Abrahamsson. *Optimal Railroad Power Supply System Operation and Design*. Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 2012.
- [14] L. Abrahamsson. *Railway Power Supply Models and Methods for Long-term Investment Analysis*. Licentiate Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 2008.
- [15] C.J. Goodman, L.K. Siu, T.K. Ho. *A review of simulation models for railway systems*. In *Developments in Mass Transit Systems*, Conf. Publ. No. 453, 20-23 April 1998.
- [16] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr. *Power System Analysis*. McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Series, 1994.
- [17] Γ. Μουεμίν. *Πιθανοτική ροή φορτίου σε DC δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π, Αθήνα, Οκτώβριος 2016.
- [18] Θ. Γ. Γούλας. *Εξοικονόμηση ενέργειας σε σιδηροδρομικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος με τη χρήση υπερπυκνωτών*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π, Αθήνα, Μάρτιος 2017.
- [19] Γ. Πετράτος. *Μελέτη Βέλτιστης Τοποθέτησης Συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας Σε Ηλεκτρικό Σιδηροδρομικό Δίκτυο Για Μεγιστοποίηση Εξοικονόμησης Ενέργειας*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π, Αθήνα, Μάρτιος 2017.
- [20] Β.Κ. Παπαδιάς. *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 1985
- [21] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής. *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [22] 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.

-
- [23] K. Budnik, W. Machczyński, J. Szymenderski. *Simulation of stray currents generated by DC Electric Traction*. In *Poznan University of Technology Academic Journals*, No.82, 2015.
- [24] M.A. Sandidzadeh, A. Shafipour. *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, Signalling and Security in Railway, Chapter 9, 4 April 2012.
- [25] M.H. Lee, H.M. Wang. *Effects of grounding schemes on rail potential and stray currents in Taipei Rail Transit Systems*. In *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 148(2):148–154, March 2001.
- [26] European Standard EN 50122-2 *Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit-Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by D.C. traction systems*. October 2010.

