

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

**Μοντελοποίηση και επίλυση της ροής ισχύος σε σιδηροδρομικό
δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΒΑΣΙΛΗ ΜΠΑΝΟΥ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Μοντελοποίηση και επίλυση της ροής ισχύος σε σιδηροδρομικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΒΑΣΙΛΗ ΜΠΑΝΟΥ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2018.

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

(Υπογραφή)

.....

ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΠΑΝΟΣ

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

© 2018 – All rights reserved

Copyright © – All rights reserved Βασίλης Μπανός,2018

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

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η επίλυση της ροής ισχύος σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος 2x25kV(2x25kV Bi-voltage Railway System) καθώς και ο υπολογισμός της τάσης όλων των ζυγών στο σύστημα αυτό.

Κατόπιν, μοντελοποιούνται κυκλωματικά και μαθηματικά όλα τα επιμέρους τμήματα ενός AC σιδηροδρομικού συστήματος όπως ο υποσταθμός που αποτελεί την AC τροφοδοσία του δικτύου, οι γραμμές μεταφοράς, ο αυτομετασχηματιστής, οι γραμμές μεταφοράς και οι ηλεκτρικοί συρμοί. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η μέθοδος επίλυσης ροής ισχύος, Sequential Linear Power Flow Method, με σκοπό να μελετηθεί η τάση και οι ισχείς στο σύστημα στις διαφορετικές καταστάσεις των τρένων όπως επιτάχυνση ή επιβράδυνση. Η μοντελοποίηση και ο αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος γίνεται σε περιβάλλον Matlab και Matlab-Simulink.

Τέλος εκτίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, εξάγονται συμπεράσματα για το δίκτυο και τον αλγόριθμο που εκτελέστηκε και παρουσιάζονται ιδέες για μελλοντική μελέτη.

Λέξεις Κλειδιά

Σιδηροδρομικά Δίκτυα, Μοντελοποίηση/Προσομοίωση Ηλεκτρικού Σιδηροδρομικού Δικτύου, AC δίκτυα, Τρένα, Υποσταθμός, Δίκτυα Εναλλασσόμενου Ρεύματος, Ροή Φορτίου, Bi-voltage railway system, Sequential Linear Power Flow Method

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the study, modeling and simulation of a AC Railway Tracking System in order to solve the power flow and calculate the voltage at all the nodes of the system.

Initially, the system in which we will solve the problem is determined and is the Bi-voltage system. After that, all the essential elements of the system like as the substation, the autotransformer, the power lines and the train are modeled mathematically. Consequently, the power flow method, Sequential Linear Power Flow Method, is used in order to study the voltage and the power that cause the different situations of the train, such as acceleration or deceleration. The modeling and the algorithm for solving the problem is developed in Matlab and Matlab-Simulink.

After all, the results of the simulations are shown, conclusions are exported for the system and the algorithm that solved and ideas are presented for study in future.

Keywords

Railway Tracking Systems, Modelling/Simulation of an electric Railway System, Train, Substation, Sequential Linear Power Flow Method , Power Flow, AC Railway Systems, Bi-Voltage System, 2x25 Railway System

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. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταπτυχιακό ερευνητή Φοίβο Παλαιογιάννη και τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Κλεφτάκη που πέρα από την συνεχή βοήθεια που μου παρείχαν, με εμπνεύσαν όσο λίγοι άνθρωποι στην διαδικασία επίλυσης ενός συνολικού προβλήματος μέσω της επιμονής, της υπομονής και της όψης των πραγμάτων από διαφορετικό κάθε φορά πρίσμα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την δύναμη που μου παρείχαν, που πολλοί θα ζήλευαν να την είχαν από έναν φίλο.

Τέλος η διπλωματική αυτή αφιερώνεται σε όλους τους παραπάνω καθώς και σε όσους και σε όσες συναντηθήκαμε στα φοιτητικά μας χρόνια, σε όσους πορευτήκαμε μαζί αυτούς τους περίεργους καιρούς, σε όσους τα βήματα μας συναντήθηκαν μαζί εκεί που η κοινωνία μας θέλει να περπατάμε μονάχοι.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	3
1.1	Πλαίσιο Προβλήματος.....	3
1.2	Στόχος της διπλωματικής και προσέγγιση του προβλήματος.....	4
1.3	Οργάνωση της διπλωματικής.....	4
2	Ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα.....	5
2.1	Ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι σήμερα.....	5
2.2	AC και DC σιδηροδρομικά δίκτυα.....	7
2.2.1	Το DC δίκτυο	13
2.2.2	Το AC δίκτυο.....	14
2.2.2.1	Τρόποι τροφοδότησης AC δικτύου.....	15
2.2.2.2	Δίκτυο AC Bi-voltage	17
2.2.2.3	Υποσταθμός.....	18
2.2.2.4	Ηλεκτρικοί Συρμοί.....	21
3	Μαθηματική Μοντελοποίηση.....	23
3.1	Δίκτυο 55/2x27,5kV με Αυτομετασχηματιστές.....	23
3.2	Υποσταθμός	24
3.3	Αυτομετασχηματιστής.....	28
3.4	Γραμμές μεταφοράς.....	30
3.5	Ηλεκτρικοί συρμοί.....	32
3.6	Μέθοδοι επίλυσης ροής ισχύος.....	34
3.6.1	Newton Raphson.....	35
3.6.2	Μέθοδος Backward-Forward.....	36
3.6.3	Μέθοδος Sequential Linear.....	37
3.7	Ανάπτυξη του αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος	37
3.7.1	Κατασκευή μήτρας αγωγιμότητας.....	37
3.7.2	Αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου.....	39
4	Προσομοιώσεις και αποτελέσματα.....	43
4.1	Προσδιορισμός παραμέτρων.....	44
4.2	Προσομοιώσεις.....	46
4.2.1	Δίκτυο AT-fed με 3 ζυγούς.....	46
4.2.2	Σύγκριση δικτύου με AT-fed και direct feeder.....	52
4.2.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων σε Matlab και Simulink.....	60
5	Συμπεράσματα και προοπτικές για μελλοντική μελέτη.....	69
5.1	Συμπεράσματα.....	69
5.2	Προτάσεις για μελλοντική μελέτη	70
	Βιβλιογραφία.....	71

1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση του προβλήματος το οποίο επιλύσαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αναφέρουμε το πλαίσιο του προβλήματος και τους λόγους που μας οδήγησαν στην επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Ακόμα παρουσιάζεται ο στόχος της εργασίας και η οργάνωση της εργασίας σε κεφάλαια.

1.1 Πλαίσιο Προβλήματος

Το πρόβλημα που επεξεργαστήκαμε έχει στόχο την επίλυση της ροής ισχύος σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. Όπως σε κάθε δίκτυο διανομής, έτσι και στα δίκτυα τροφοδότησης των σιδηροδρόμων απαραίτητη είναι η γνώση της ροής ισχύος για διαφορετικές καταστάσεις των φορτίων. Η κίνηση των συρμών προς διαφορετικές κατευθύνσεις, οι διαφορετικές καταστάσεις σε επίπεδο κίνησης καθώς και οι διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες διαμορφώνουν ένα δίκτυο δυναμικό το οποίο μελετάμε. Η μελέτη του δικτύου και των μεγεθών που καλούμαστε να προσδιορίσουμε γίνεται σε στιγμιότυπα χωρίς κίνηση να λαμβάνει μέρος στο πρόβλημα.

Ο τρόπος τροφοδότησης των δικτύων διαθέτει μια ποικιλία την οποία την καταγράψαμε. Για την επίλυση του προβλήματος μας διαλέγουμε τον τρόπο τροφοδότησης με αυτομετασχηματιστές (AT-fed) που βρίσκεται συνεχώς σε τεχνολογική ανάπτυξη επιτρέποντας μεγαλύτερες ταχύτητες στους συρμούς και μεγαλύτερη ασφάλεια

στο δίκτυο. Για αυτό το δίκτυο ήταν απαραίτητη η γνώση των δικτύων bi-voltage, ενός μονοφασικού δικτύου. Η επίλυση της ροής ισχύος σε ένα τέτοιο δίκτυο βασίστηκε στην ιδιότητα των δικτύων διανομής ως ακτινικά. Συνεπώς ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε προσπαθεί να επιλύσει για ένα ακτινικό δίκτυο την ροή ισχύος και να υπολογίσει την τάση. Με τον προσδιορισμό αυτών των μεγεθών είμαστε σε θέση να κρίνουμε πως το δίκτυο λειτουργεί, τα πλεονεκτήματα του έναντι άλλων, τα μειονεκτήματα του καθώς και τις κινήσεις που μπορούν να γίνουν με στόχο την βελτίωση των σιδηροδρομικών δικτύων.

1.2 Στόχος της διπλωματικής και προσέγγιση του προβλήματος

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η επίλυση της ροής ισχύος σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος 2x25kV(2x25kV Bi-voltage Railway System) καθώς και ο υπολογισμός της τάσης όλων των ζυγών ως προς τη γη στο σύστημα αυτό. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος ,αναλύουμε τους διαφορετικούς τρόπους τροφοδότησης που έχουν αναπτυχθεί για τα AC σιδηροδρομικά δίκτυα. Ακόμη παρουσιάζεται θεωρητικά το bi-voltage δίκτυο για την καλύτερη κατανόηση του δικτύου που εργαζόμαστε.

Εν συνεχεία κρίναμε ποια στοιχεία διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο για την όσο το δυνατόν πιο κοντινή στην πραγματικότητα ανάλυση και προσομοίωση του δικτύου που μελετούμε. Κατόπιν, προχωρήσαμε στην αναγκαία μαθηματική μοντελοποίηση κάθε στοιχείου. Αφού γίνει αυτό, παρουσιάζονται οι διαθέσιμοι μέθοδοι επίλυσης ροής ισχύος και αναπτύσσουμε την μέθοδο, sequential linear power flow, με την οποία εργαστήκαμε για την επίλυση του προβλήματος.

Αφού έχουμε προσδιορίσει την μαθηματική μοντελοποίηση του κάθε στοιχείου και ο αλγόριθμος που θα υλοποιήσουμε έχει αναπτυχθεί πλήρως, προχωρούμε στην επίλυση για το δίκτυο και στον προσδιορισμό της τάσης σε κάθε ζυγό.

1.3 Οργάνωση της διπλωματικής

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή και συνοπτική περιγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται η ηλεκτροκίνηση του σιδηρόδρομου ,παρουσιάζοντας τόσο τα DC όσο και τα AC δίκτυα. Ακόμα παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για το δίκτυο που χρησιμοποιούμε και για όλα τα στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία.

Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση του κάθε στοιχείου που συμμετέχει στο δίκτυο. Ακόμη παρουσιάζονται οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης ροής ισχύος. Τέλος παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος που χρησιμοποιούμε καθώς και ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε για την επίλυση του προβλήματος.

Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τα δίκτυα που διαλέξαμε για τις προσομοιώσεις μας. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε με τους αντίστοιχους πίνακες και τον απαραίτητο σχολιασμό.

Στο κεφάλαιο 5, εκτίθενται γενικές παρατηρήσεις και συμπεράσματα για τα αποτελέσματα από το κεφάλαιο 4 καθώς και προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα.

2 Ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύονται τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά συστήματα. Παρουσιάζονται οι λόγοι που έχουν οδηγήσει την ηλεκτροκίνηση στους σιδηρόδρομους σε ανάπτυξη και γίνεται διαχωρισμός των σιδηροδρομικών δικτύων. Αναλύουμε τόσο τα AC όσο και τα DC δίκτυα, που χρησιμοποιούνται. Ακόμη παρουσιάζουμε όλα τα στοιχεία που συμμετέχουν σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο και αναλύουμε το σύστημα 50kV/2x25kV.

2.1 Ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι σήμερα

Το 2006 το 25% του παγκόσμιου σιδηροδρομικού χάρτη (περίπου 240.000 km) και το 50% της μετακίνησης μέσω σιδηροδρόμων γινόνταν μέσω ηλεκτρικών οχημάτων. Προφανώς μέχρι σήμερα και με την συνεχή αύξηση της έρευνας και τεχνολογίας τα ποσοστά αυτά έχουν ανέβει με αλματώδη βήματα[1]. Η ανάπτυξη του ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου έρχεται να δώσει μια εναλλακτική απάντηση στην μετακίνηση με μεγαλύτερο σεβασμό στο περιβάλλον όσο και στην οικονομικότερη μετακίνηση του κοινού, με την όλοένα και συνεχόμενη μείωση του χρόνου μετακίνησης λόγω της αύξησης των ορίων ταχύτητας. Παρακάτω παραθέτουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών σιδηροδρόμων

Τα **πλεονεκτήματα** αφορούν τα:

- μικρότερα τρέχοντα έξοδα για τα οχήματα, με δυνατότητα αποτελούνται από πολλές κινούμενες μονάδες

- μικρότερα έξοδα συντήρησης για τα οχήματα, με δυνατότητα αποτελούνται από πολλές κινούμενες μονάδες
- μεγαλύτερος παράγοντας ισχύς προς βάρος, με αποτέλεσμα:
 - λιγότερα αναγκαία οχήματα
 - γρηγορότερη επιτάχυνση
 - υψηλότερο πρακτικό όριο παρεχόμενης ισχύος
 - υψηλότερο όριο ταχύτητας
- λιγότερη ακουστική μόλυνση (πιο ήσυχη λειτουργία)
- μειωμένες απώλειες ενέργειας σε μεγάλα υψόμετρα
- ανεξαρτησία από το αργό πετρέλαιο ως καύσιμο
- λιγότερη περιβαλλοντική μόλυνση καθώς δεν παράγουν καπνό ή καυσαέρια

Τα **μειονεκτήματα** προκύπτουν κυρίως από την αναβάθμιση που απαιτείται στα σιδηροδρομικά δίκτυα. Αυτά αφορούν το υψηλότερο κόστος λόγω:

- τουνελ, γεφυρών και άλλων εμποδίων που πρέπει να τροποποιηθούν για την καθαριότητα του δικτύου
- αλλαγές στα δίκτυα ώστε να συμπεριλάβουν τις νέες τεχνολογίες για την αυτόματη και ασφαλέστερη κίνηση, όπως είναι η τηλεδιοίκηση
- Επανακατασκευής του δικτύου ώστε περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα να χρησιμοποιούνται, που απαιτεί την εκ νέου τοποθέτηση ηλεκτρικών γραμμών
- σύνδεσης μεταξύ δικτύων διαφορετικών προτύπων.

Από περιβαλλοντικής και ενεργειακής απόψεως ειδικά οι ηλεκτροδοτημένοι σιδηρόδρομοι υπερταρούν των συμβατικών γιατί:

- τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πιο ελαφριά σε σχέση με αυτά που λειτουργούν με ντιζελ καθώς δεν χρειάζεται να κουβαλάν επιπλέον μέρη για την παραγωγή ενέργειας
- ο ηλεκτρισμός μπορεί να παραχθεί από ποικίλες μη ρυπογόνες πηγές ενέργειας όπως υδροηλεκτρικά εργοστάσια, ανεμογεννήτριες κλπ
- υπό συγκεκριμένες συνθήκες κάποια ειδικά οχήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν την αναγεννητική πέδηση. Η συγκεκριμένη ιδιότητα αποτελεί "επανάσταση" στην κίνηση καθώς το φορτίο μπορεί να λειτουργήσει ως πάροχος στέλνοντας ενέργεια στον κεντρικό πάροχο ή σε άλλα οχήματα που απαιτούν ενέργεια εκείνη την στιγμή.

2.2 AC και DC σιδηροδρομικά δίκτυα

Τα ηλεκτρικά συστήματα στα σιδηροδρομικά δίκτυα κατηγοριοποιούνται με βάση τρία κριτήρια:

- την τάση
- το ρεύμα και την συχνότητα
- τον τρόπο τροφοδότησης του τρένου από το δίκτυο

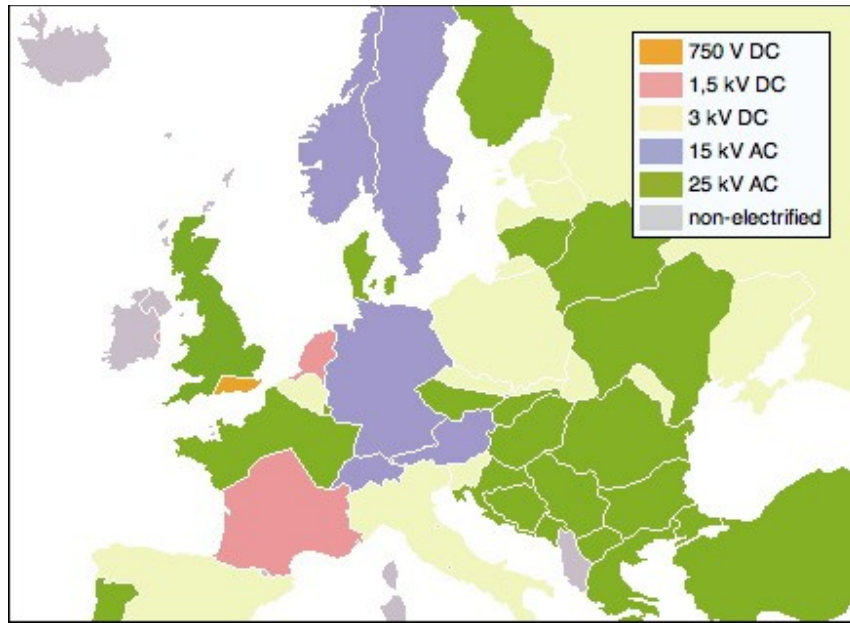
Η επιλογή των κριτηρίων αυτών γίνεται με βάση την βέλτιστη οικονομική αποδοτικότητα. Αυτή ορίζεται μέσα από ποικίλους παράγοντες όπως το ποσό καταναλισκώμενης, το ποσό και την ικανότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος συντήρησης, τα συνολικά κεφάλαια που απαιτούνται για την λειτουργία και το φορτίο. Ακόμη θα πρέπει η ζήτηση από τον ανθρώπινο παράγοντα σε σύγκριση με τα έξοδα που θα προκύψουν να είναι οικονομικά επωφελής.

Τα πρότυπα σιδηροδρομικά ηλεκτρικά συστήματα στην Ευρώπη και διεθνώς, είναι έξι όπως προσδιορίζονται και από τα διεθνή πρότυπα EN50163 και IEC60850. Τα πρότυπα είναι ανεξάρτητα του τρόπου επαφής και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Τα πρότυπα των σιδηροδρομικών δικτύων

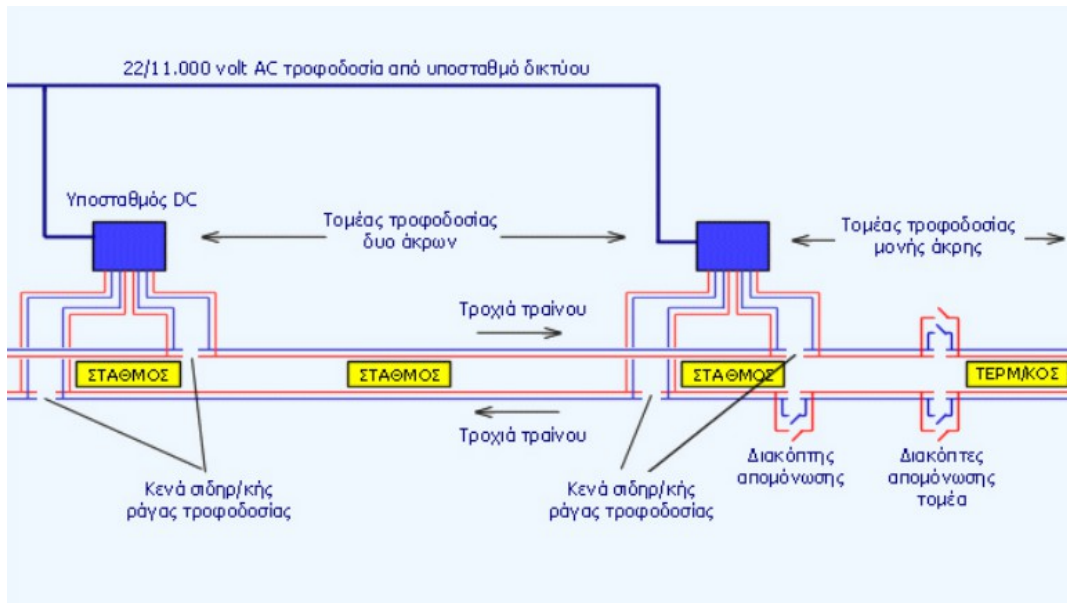
Τύπος τροφοδότησης	Τάση	Συχνότητα	Απόσταση υποσταθμών
DC χαμηλής τάσης	600 V	-	1-6 km
DC χαμηλής τάσης	750 V	-	1-6 km
DC μεσαίας τάσης	1.5 kV	-	15-30 km
DC υψηλής τάσης	3 kV	-	15-30 km
AC μονοφασικό	15 kV	16.7 Hz	
AC τριφασικό	25 kV	50 Hz	

Στο σχήμα 1 φαίνονται οι διαφορετικοί τρόποι ηλεκτροδότησης των σιδηροδρόμων στην Ευρώπη



Σχήμα 1: Χάρτης των διαφορετικών τρόπων ηλεκτροδότησης των σιδηροδρόμων στην Ευρώπη[1]

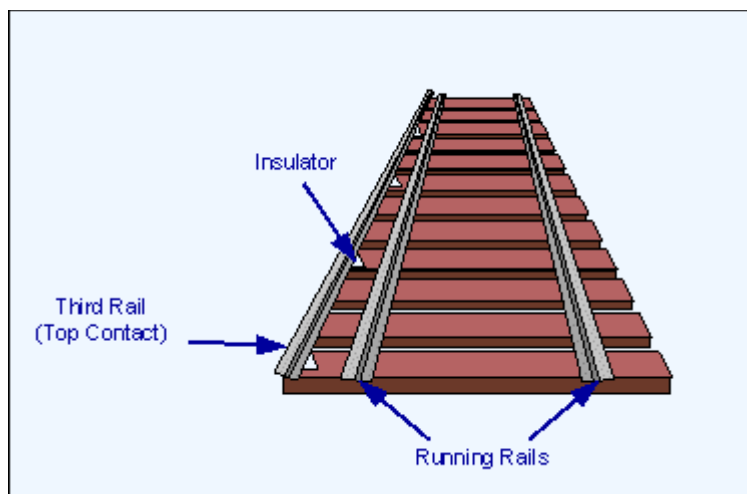
Όσον αφορά τον τρόπο τροφοδότησης, δύο είναι οι πιο διαδεδομένοι: α) η τρίτη ράγα και β) οι εναέριες γραμμές τροφοδοσίας. Για τους δύο αυτούς τρόπους έχουν αναπτυχθεί και αντίστοιχα μέσα για την σύνδεση μεταξύ της τροφοδοσίας και των συρμών. Στα AC δίκτυα, η τροφοδοσία γίνεται τμηματικά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2, με κάθε τμήμα να είναι απομονωμένο από ειδικούς μονωτές και η ηλεκτρική επανασύνδεση τους να γίνεται μέσω ειδικών διακοπών[1,2]. Τα τμήματα μόνωσης λέγονται ουδέτερα τμήματα.



Σχήμα 2: Η τμηματοποίηση ενός σιδηροδρομικού δικτύου[2]

Τρίτη Ράγα

Η τρίτη ράγα αποτελείται από έναν ακαμπτο συνεχή αγωγό τοποθετημένο δίπλα στις ράγες, τυπικά σε απόσταση 3 μέτρων, ή ανάμεσα από τις ράγες στις οποίες κινείται το τρένο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3. Συναντάται κατά πλειοψηφικό βαθμό σε DC συστήματα λόγω του ότι μπορεί να μεταφέρεται 41% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα AC συστήματα. Επίσης χρησιμοποιείται σε μικρότερης διαμέτρου τούνελ, για αυτό είναι ο πιο δημοφιλής τρόπος σε σιδηροδρόμους μετρό. Ακόμα η χρήση του γίνεται σε δίκτυα με μικρή σχετικά τάση λειτουργίας. Είναι φτηνότερο στην κατασκευή και στην συντήρηση της σε σχέση με τις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Η σύνδεση με την τρίτη ράγα γίνεται μέσω ενός αγωγού επαφής που ονομάζεται "παπούτσι". Η επαφή μπορεί να γίνεται από πάνω, από κάτω ή και από τα πλάγια. Η επαφή από τα πάνω, αν και είναι η πιο απλή, αποφεύγεται καθώς είναι επικύνδυνη, καθώς η τρίτη ράγα είναι εκτεθειμένη στους ανθρώπους. Ακόμη η ράγα είναι ευάλωτη από διαβρώσεις που προκαλούν η βροχή, το χιόνι και τα φύλλα από τα δέντρα. Το ίδιο ισχύει για την επαφή από τα πλάγια. Έτσι ο καλύτερος τρόπος είναι από τα κάτω που προστατεύεται σε όλο το εύρος της διαδρομής. Τα παπούτσια πιέζονται από ελατήρια για να προσαρμόζουν την επαφή με την τρίτη ράγα.



Σχήμα 3: Η τρίτη ράγα δίπλα από τις ράγες[2]

Τέταρτη ράγα

Προσθετικά στην τρίτη σε λίγα συστήματα υπάρχει και η τέταρτη. Η τέταρτη τοποθετήθηκε λόγω των προβλημάτων που δημιουργούσε η επιστροφή του ρεύματος μέσα από τις ράγες. Αυτό έχει οδηγήσει σε ηλεκτρολογικές παρεμβολές λόγω τόξων που δημιουργούν τα τεράστια ρεύματα, ειδικά σε DC συστήματα. Με την τέταρτη ράγα το πρόβλημα λύνεται. Η τέταρτη ράγα αποτελείται από αντιστάσεις, ώστε το ρεύμα που γυρνάει στον υποσταθμό να είναι διαχειρίσιμο.

Εναέριες Γραμμές Τροφοδοσίας

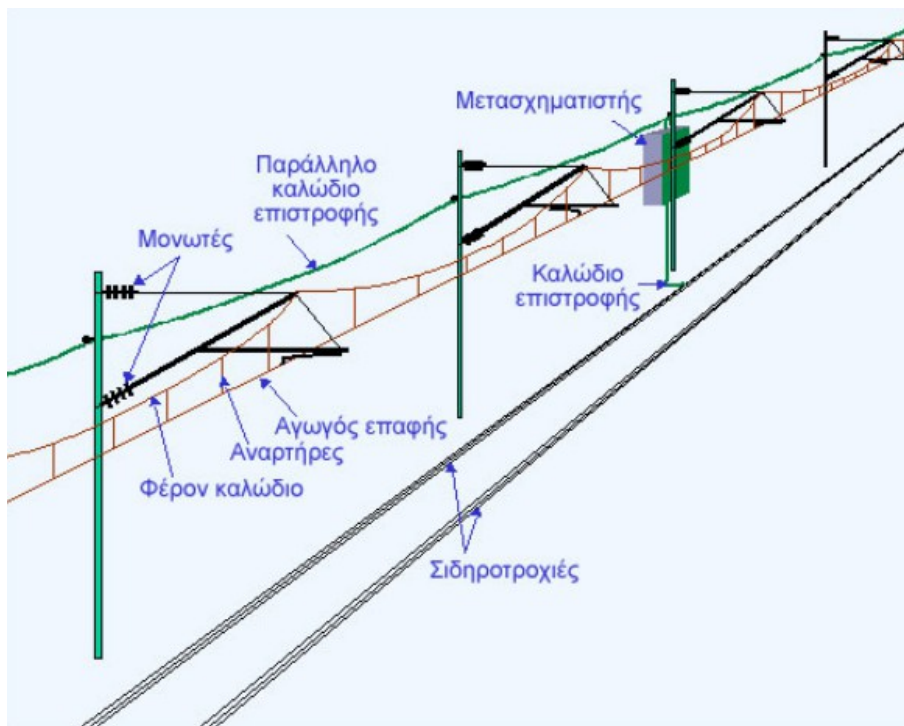
Ο συγκεκριμένος τρόπος αποτελεί τον πιο δημοφιλή για την διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε AC συστήματα. Ο βασικός λόγος που τον κάνει τον κυριότερο τρόπο μεταφοράς και διανομής είναι το μικρότερο κόστος σε σχέση με τα υπόγεια. Ακόμη είναι ευκολότερη και οικονομικότερη τόσο η τοποθέτηση όσο και η επισκευή τους. Ωστόσο απαιτείται να ληφθούν σοβαρά υπόψη διάφοροι παράμετροι για την ασφαλή και μακροβιότερη λειτουργία τους. Για αυτό πρέπει να αντέχουν στη θερμική και μηχανική καταπόνηση και να ελαχιστοποιούνται οι κίνδυνοι από το φαινόμενο Corona. Οι γραμμές λοιπόν ελέγχονται τόσο στην τοποθέτηση όσο και στη συντήρησή τους για σημεία διαβρώσεως, ρωγμές, θραυσμένα σύρματα και αποκλίσεις από την κατασκευαστική τους μορφή. Ακόμη λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η ταχύτητα ανέμου, το ονομαστικό ρεύμα, το προφίλ της σιδηροδρομικής γραμμής και η τοποθέτηση των σημείων τροφοδότησης [3].

Οι εναέριες γραμμές τροφοδοσίας στοχεύουν στην συνεχή τροφοδοσία των τρένων. Αποτελούνται από ένα σύνολο γραμμών και εγκαταστάσεων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4, που αναλυτικότερα είναι:

- ο αγωγός επαφής, με τον οποίο βρίσκεται σε συνεχή επαφή ο παντογράφος για την συλλογή ρεύματος και μεταφοράς του στο τρένο
- ο φέρων αγωγός, ο οποίος τροφοδοτεί τα διαδοχικά σημεία τροφοδοσίας κατά

μήκος της γραμμής

- η αλυσοειδής, που είναι σύστημα ανάρτησης της εναέριας γραμμής επαφής, στο οποίο ο αγωγός επαφής στηρίζεται μέσω αναρτήσεων στον φέροντα αγωγό. Η ανάρτηση τύπου Υ είναι ένα σύστημα αναρτήρων που τοποθετείται στην αλυσοειδή με στόχο την εξομάλυνση της ακαμψίας των αγωγών στα σημεία στήριξης. Η αλυσοειδής βρίσκεται σε ορισμένο ύψος και τρέχει κατά μήκος της διαδρομής στηριζόμενη από στύλους στην ανοιχτή γραμμή ή από ειδικά χαλύβδινα στηρίγματα σε ειδικά έργα όπως οι σήραγγες
- το κύκλωμα επιστροφής, που περιλαμβάνει όλους τους αγωγούς για την επιστροφή του ρεύματος έλξης όπως οι σιδηροδρομικές ράγες
- η παράλληλη τροφοδότηση ή αγωγός ενίσχυσης, που είναι εναέριος αγωγός σε κοντινή απόσταση από τον αγωγό επαφής
- και τέλος όλες τις απαραίτητες δομές για την στήριξη, την ανάρτηση, την ευθυγράμμιση, την τάνυση και την μόνωση των αγωγών όπως αναρτήσεις, δοκοί και θεμελιώσεις.



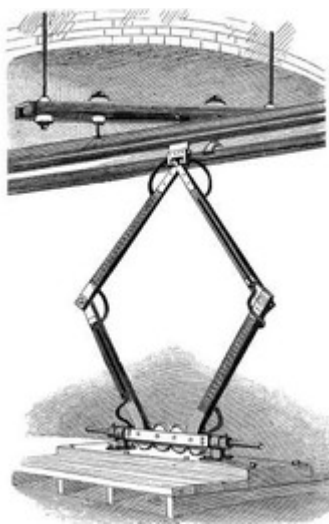
Σχήμα 4: Το σύστημα εναέριων γραμμών τροφοδοσίας[2]

Τα ουδέτερα τμήματα αυτού του τρόπου τροφοδότησης περιλαμβάνουν ένα σύνολο μαγνητών που απενεργοποιούν την λειτουργία του τρένου πριν και ένα σύνολο μαγνητών μετά που επανενεργοποιούν την λειτουργία. Ένα από τα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν είναι λόγω της παρεμβολής μεταξύ των αγωγών επικοινωνίας και του αγωγού επιστροφής. Αυτό μπορεί να προκαλέσει πτώση τάσης, προσθετικά σε αυτή που αναπτύσσεται λόγω της αυξανόμενης απόστασης από τον υποσταθμό. Προφανώς αυτό

το πρόβλημα μπορεί να προληφθεί μέσω της σωστής τοποθέτησης μετασχηματιστών σε όλο το μήκος της διαδρομής.

Παντογράφος

Ο τρόπος επαφής μεταξύ των εναέριων γραμμών μεταφοράς και του τρένου γίνεται μέσω του παντογράφου. Ο παντογράφος αποτελεί μια συσκευή που συλλέγει το ρεύμα από τις γραμμές στο τρένο και η πρώτη του χρήση χρονολογείται στο 1895. Ο παντογράφος αποτελεί εξέλιξη σε σχέση με το απλούστερο σύστημα των τρόλεις, καθώς επιτρέπει στα οχήματα να ταξιδεύουν με μεγαλύτερες ταχύτητες χωρίς να χάνει επαφή με τις γραμμές τροφοδοσίας. Η πρώτη του κατασκευαστική μορφή ήταν σε σχήμα διαμαντιού, όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Σήμερα η κατασκευαστική του μορφή, λεγόμενη και ως Z-asymmetrical ή "μισο-παντογράφος", επιτρέπει την αδιάλειπτη τροφοδοσία των τρένων σε εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες και προς τις δύο κατευθύνσεις. Για αυτό το λόγο οι παντογράφοι αποτελούν το κυρίαρχο τρόπο συλλογής ρεύματος από την τροφοδοσία στο τρένο.

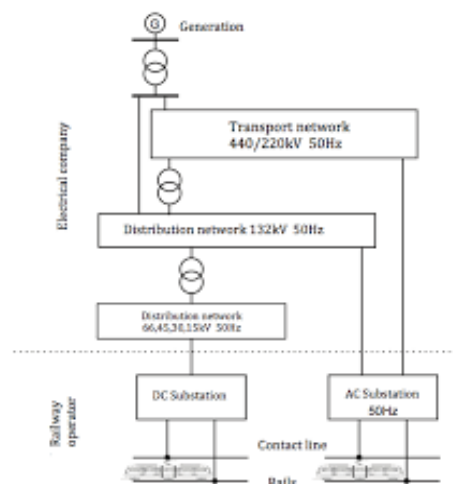


Σχήμα 5: Ο πρώτος παντογράφος [1]

Ο παντογράφος μέσω ενός παπουτσιού συνδέεται με τις εναέριες γραμμές και κυλάει κατά μήκος τους συλλέγοντας ρεύμα και τροφοδοτώντας το τρένο. Η λειτουργία τους συνήθως γίνεται μέσω συμπιεσμένου αέρα που παρέχεται από το σύστημα των φρένων του τρένου. Όταν λοιπόν υπάρχει ανάγκη ο παντογράφος να υψωθεί ο αέρας εκτονώνεται ενώ αντίστοιχα για να κατέβει χαλαρώνουν τα ελατήρια του. Ακόμη οι παντογράφοι διαθέτουν ένα ή και δύο στηρίγματα. Αν και τα συστήματα με δύο στηρίγματα είναι πιο βαριά και ακριβά, έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε σφάλματα.

2.2.1 Το DC δίκτυο

Το πιο κοινό σύστημα για την πλειοψηφία των τραμ και μετρό είναι αυτό των 600 ή 750 V DC[2]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό του Λονδίνου και του Μιλάνου που έχουν 630 V. Τα DC δίκτυα αποτελούν ακόμα τον πιο οικονομικό και σύνηθες δίκτυο για την μαζική μετακίνηση των επιβατών,σε επίπεδο αστικών κέντρων. Για περιφερειακά και υπεραστικά συστήματα αυτό που χρησιμοποιείται είναι το 1.5 kV. Στα τέλη του 19ου αιώνα μέχρι τις αρχές και του 20ου αιώνα που η έρευνα γύρω από το ζήτημα ήταν ισχνή,η λειτουργία των DC δικτύων στηριζόνταν στην α)σύνδεση των τρένων σε διάφορους συνδυασμούς σειράς-παράλληλης, β)αλλάζοντας τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία των κινητήρων και γ)την εισαγωγή ή αφαίρεση αντιστάσεων για την εκκίνηση του κινητήρα ώστε να μειωθεί το ρεύμα του κινητήρα. Με την ανάπτυξη στα μέσα του 20ου αιώνα των ημιαγωγών και των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος η σύσταση και η λειτουργία των DC δικτύων πέρασε στην μορφή που υπάρχει σχεδόν και σήμερα. Το πέρασμα αυτό έγινε με την **σύνδεση του DC δικτύου στο AC δίκτυο**, φαίνεται και στο σχήμα 6, μέσω της χρήσης μετατροπέων,χρησιμοποιώντας αρχικά περιστροφικό μετατροπέα (rotary converter),ο οποίος αντικαταστάθηκε από ανορθωτή υδραγύρου (mercury arc rectifier) και εν συνεχεία από ανορθωτή ημιαγωγών (semiconductor rectifier). Ένα χαρακτηριστικό των δικτύων είναι οτι εφόσον λειτουργούν με μικρή τάση σε σταθερή ισχύ παράγονται υπερβολικά μεγάλα ρεύματα.



Σχήμα 6: Σύνδεση σιδηροδρομικών δικτύων με δίκτυο παροχής AC ηλεκτρική ενέργειας[6]

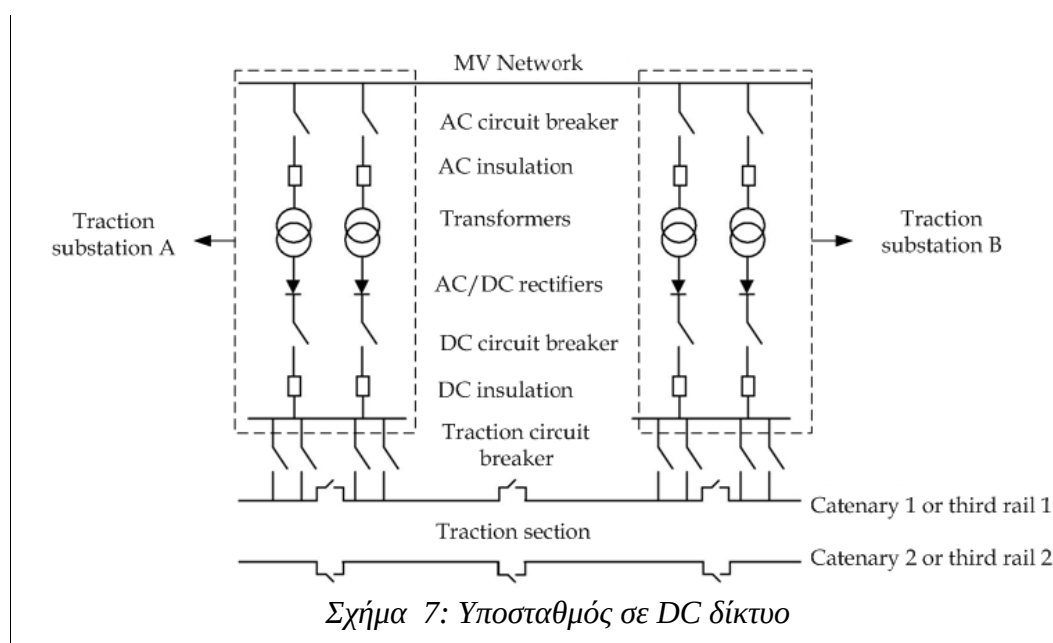
Απαιτείται λοιπόν για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου, η οποία ορίζεται από την ελαχιστοποίηση των απωλειών α) η χρήση λεπτών, πυκνών καλωδίων για την επαφή με το τρένο και β) η ανά πολύ μικρά διαστήματα τοποθέτηση υποσταθμών μετατροπής της τάσης. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των DC δικτύων έναντι των AC είναι οτι για την λειτουργία τους απαιτείται ένα μονοφασικό καλώδιο μη γειωμένο, ενώ αντίθετα στο AC απαιτούνται τουλάχιστον 2 μονοφασικά. Ακόμη η ισχύς που απαιτείται για την τροφοδοσία των φορτίων είναι μόνο ενεργός, χωρίς να εισαγεται η έννοια της

αέργου και τα όποια προβλήματα μπορεί να δημιουργεί σε ένα AC.

Η σύνδεση ενός DC δικτύου στο AC δίκτυο γίνεται μέσα από μετασχηματιστές και ανορθωτές, που ο καθένας αποτελείται από δύο γέφυρες 6-παλμικές δίνοντας 12-παλμική έξοδο [4,5].

Ένα σύστημα DC αποτελείται από τον υποσταθμό που αποτελείται από μετασχηματιστή ή μετατροπέα, την γραμμή και τον εξοπλισμό προστασίας[5]. Πιο συγκεκριμένα ο υποσταθμός, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7, αποτελείται από:

- ένα ζεύγος μετασχηματιστών
- AC αυτόματους διακόπτες για προστασία
- ανορθωτική διάταξη γέφυρας
- DC διακόπτες και απομωνοτές



Η τροφοδοσία στο επίπεδο της διανομής μετασχηματίζεται, μετατρέπεται και συνδέεται στον αγωγό επαφής και το τρένο σε αρκετά σημεία. Τροφοδοσίες οι οποίες είναι κοντινές μπορεί να απομονώνονται η μία από την άλλη και διακόπτες τοποθετούνται για τον καλύτερο έλεγχο των σφαλμάτων και για την διατήρηση της συνεχούς τροφοδότησης σε περιπτώσεις διακοπής για την συντήρηση του δικτύου.

2.2.2 Το AC δίκτυο

Τα δίκτυα αυτά λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα. Το συχνότερο δίκτυο

είναι αυτό των 25kV και 50Hz. Το εναλασόμενο ρεύμα μπορεί να μεταφερθεί σε μικρότερες τάσεις ,μέσω μετασχηματιστών,μέσα στο τρένο. Αυτό επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος σε μεγάλες τάσεις και συνεπώς με μικρότερα ρεύματα. Εφόσον αναπτύσσονται μικρά ρεύματα, υπάρχουν και μικρότερες απώλειες κατά μήκος της διαδρομής και μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας να μεταφερθούν και να καταναλωθούν από τα φορτία. Συνεπώς τα AC δίκτυα είναι τα καταλληλότερα για σιδηροδρόμους μεγάλων αποστάσεων καθώς δεν απαιτείται να τοποθετείται υποσταθμός παροχής ενέργειας ανά σύντομα διαστήματα. Κατα κύριο λόγο στο AC δίκτυο χρησιμοποιείται ως τρόπος τροφοδότησης οι εναέριες γραμμές μεταφοράς. Παρακάτω αναπτύσσονται κάποια από τα δίκτυα AC που χρησιμοποιούνται.

Χαμηλής συχνότητας AC δίκτυα

Λόγω των επαγωγικών αντιστάσεων και των δινορευμάτων που αναπτύσσονται στην βιομηχανική συχνότητα, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούσαν επιλέχθηκαν μικρότερες συχνότητες. Αργότερα με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος ήταν αχρείαστη η μείωση της συχνότητας. Σε 5 ευρωπαϊκές χώρες η συχνότητα λειτουργία είναι τα 16.7 Hz.

Τριφασικά AC συστήματα

Το σύστημα παρέχει αναγεννητική πέδηση ,με ενέργεια να γυρνάει πίσω στον πάροχο, κάτι που κάνει ιδανικό το σύστημα για σιδηροδρόμους σε βουνά. Τα τρένα χρησιμοποιούν τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες. Το βασικότερο μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι απαιτούνται δυο αγωγί για την τροφοδότηση του τρένου.

2.2.2.1 Τρόποι τροφοδότησης AC δικτύου

Ένας ηλεκτροδοτημένος σιδηρόδρομος λειτουργεί παρόμοια με ένα σύστημα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια διαφορά είναι ότι τα φορτία είναι δυναμικά λόγω της κίνησης με διαφορετικές ταχύτητες του τρένου, που απαιτεί διαφορετικές ποσότητες ενέργειας. Γενικά κάθε σιδηροδρομικό σύστημα μπορεί να τμηματοποιηθεί σε ένα αριθμό απομονωμένων ηλεκτρικά τμημάτων. Σε κάθε τέτοιο τμήμα υπάρχει ένας υποσταθμός δηλαδή η μονάδα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρακάτω παραθέτουμε τους διαφορετικούς τρόπους τροφοδότησης ενός τμήματος από τον υποσταθμό,όπως περιγράφονται στο [6].

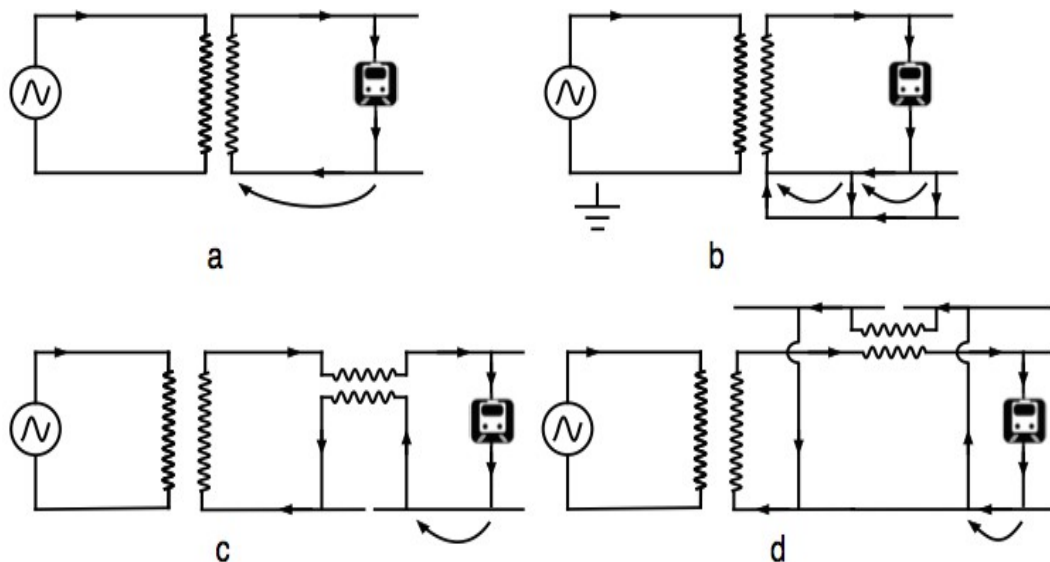
Απευθείας τροφοδότηση (Direct Feeder)

Αποτελεί την απλούστερη και την πιο οικονομική επιλογή για τροφοδότηση του δικτύου. Το κύκλωμα φαίνεται στο 8α. Η τροφοδότηση γίνεται από τον υποσταθμό στο τρένο μέσω εναέριου καλωδίου,του catenary, και με επιστροφή από τις ράγες. Ωστόσο υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα. Οι τεράστιες απώλειες λόγω των ρευμάτων που αναπτύσσονται μόνο σε έναν αγωγό, η μεγάλη τάση που αναπτύσσεται ανάμεσα στην γή

και τις ράγες που προκαλούν προβλήματα ασφάλειας και, τέλος, τα ρεύματα που διοχετεύονται στην γή και μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που βρίσκονται κοντά. Για την καταπολέμηση του τελευταίου προβλήματος μπορεί να προστεθεί ένας επιπλέον αγωγός για την επιστροφή του ρεύματος. Αυτή η επιλογή είναι ασφαλέστερη αλλά επηρεάζει σημαντικά το κόστος του έργου. Το κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 8β.

Booster transformer(BT)

Οι πρώτοι BT's τοποθετήθηκαν στην Ιαπωνία το 1964 με ονομαστική ισχύ περίπου τα 150 kVA με στόχο την βελτίωση του αρχικού τρόπου τροφοδότησης μέσω direct feeder για την μείωση των απωλειών και συνεπώς την ελαχιστοποίηση ανάγκης υπάρξης συνεχόμενων κοντινών υποσταθμών. Οι BT's συνήθως τοποθετούνται κατά μήκος του catenary ανά 3-4 km . Το πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα συνδέονται από τη μία κατα πλάτος του αγωγού τροφοδοσίας, catenary, και από την άλλη στις ράγες. Επειδή το πρόβλημα επιστροφής του ρεύματος υπάρχει και εδώ αντίστοιχη μέθοδος με επιπλέον αγωγό, όπως στο direct feeder, χρησιμοποιείται. Τα κυκλώματα φαίνονται στο σχήμα 8γ και 8δ.



Σχήμα 8: AC συστήματα τροφοδότησης σιδηροδρόμων α)Απευθείας σύνδεση β)Απευθείας σύνδεση με αγωγό επιστροφής γ)Booster transformer και δ) Booster transformer με αγωγό επιστροφής[6]

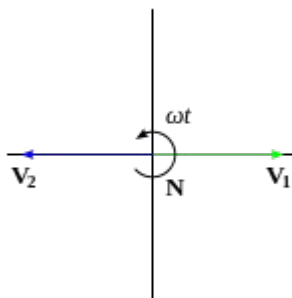
Αυτομετασχηματιστές (Autotransformers-AT's)

Οι πρώτοι αυτομετασχηματιστές χρησιμοποιήθηκαν στις αρχές του 20ου αιώνα στην Φιλαδέλφεια, ύστερα στην Ιαπωνία το 1972 και μετά το 1981 όλο και περισσότερες χώρες άρχισαν να τους χρησιμοποιούν στα σιδηροδρομικά συστήματα δημιουργώντας έτσι νέα πρότυπα για τα AC δίκτυα. Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της μεταφοράς ενέργειας σε υψηλότερη τάση και τα πλεονεκτήματα της χρήσης εξοπλισμού σε πρότυπα 25kV/50kV. Τα τυλίγματα του AT συνδέονται ανάμεσα στον αγωγό κύριας τροφοδοσίας, catenary, και ενός βοηθητικού αγωγού τροφοδοσίας, που ονομάζεται feeder, με τις ράγες

να βρίσκονται σε ενδιάμεσο σημείο στην ηλεκτρολογική σύνδεση. Η αρχή λειτουργίας των ΑΤ στο σύστημα είναι ότι τα τρένα παίρνουν ρεύμα από τους δύο γειτονικούς ΑΤ. Προφανώς το ρεύμα στους ΑΤ εξαρτάται από την θέση του τρένου. Τα ρεύματα των ραγών διοχετεύονται μέσα στα τυλίγματα των ΑΤ ώστε να διατηρείται η ισορροπία των ρευμάτων στους πυρήνες. Οι ΑΤ λειτουργούν ισορροπώντας την τάση. Αυτό είναι το κύριο πλεονέκτημα απέναντι στους booster transformers.

2.2.2.2 Δίκτυο AC Bi-voltage

Το σύστημα αυτό ονομάζεται bi-voltage ή split phase ή μονοφασικό με τρία καλώδια και είναι τύπος διανομής μονοφασικής ηλεκτρικής ενέργειας[7]. Ιστορικά το κύκλωμα αυτό αναπτύχθηκε από τον Thomas Edison βάζοντας σε σειρά λαμπτήρες και παρατηρώντας ότι διπλασιάζοντας την τάση μειώνεται σημαντικά το μέγεθος των αγωγών που απαιτείται. Η διάταξη αυτή αποτελείται από έναν μετασχηματιστή με το δευτερεύον τυλίγμα να έχει 3 καλώδια με το δεύτερο να αποτελείται από μια ενδιάμεση λήψη (tap) συνδεδεμένη με τη γη. Έτσι η διανομή γίνεται μέσω δύο πηγών που έχουν την ίδια τάση με διαφορά φάσης 180 μοίρες. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 9.



Σχήμα 9: Το μέτρο και η φορά των τάσεων σε κάθε αγωγό τροφοδοσίας[7]

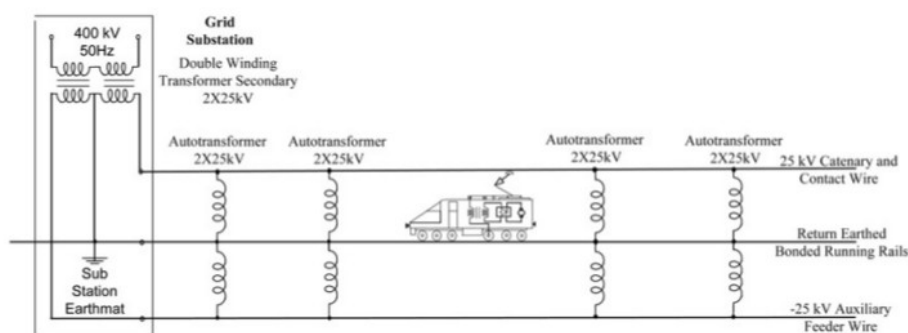
Δηλαδή η τάση γραμμής με γή είναι μισή από την τάση γραμμής-γραμμής. Έτσι για συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, το ρεύμα διαμοιράζεται. Το δίκτυο αυτό, λόγω της ύπαρξης του ουδέτερου αγωγού, χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε δίκτυα με δυναμικά φορτία. Ο ουδέτερος αγωγός δίνει την δυνατότητα σε οποιαδήποτε κατάσταση μη ισορροπίας να διοχετευτεί το επιπλέον ρεύμα σε αυτόν, δημιουργώντας εκ νέου κατάσταση ισορροπίας του συστήματος. Στα δίκτυα αυτά το συνολικό ρεύμα θα είναι συνεχώς το διπλάσιο ονομαστικό για το μεγαλύτερο φορτίο που μπρεί να συνδεθεί.

Στην Ευρώπη τέτοια συστήματα υπάρχουν, όπως το σύστημα των 230V/460V για την τροφοδότηση φαρμών και μικρά συγκροτήματα σπιτιών. Στην Νότια Αμερική επίσης είναι διαδεδομένο σε επαρχιακές περιοχές και για τον φωτισμό των διαφημίσεων.

Σιδηροδρομικά συστήματα με 2X25kV

Το σύστημα αυτό είναι διαδεδομένο με τρόπο τροφοδότησης των

αυτομετασχηματιστών, στα AC δίκτυα. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε DC δίκτυα μέσω DC/DC μετατροπών αντί για αυτομετασχηματιστές. Η τοποθέτηση των αυτομετασχηματιστών γίνεται ανά 10-15 km κατά μήκος της διαδρομής και η ονομαστική ισχύς τους είναι 5-10 MVA. Οι αυτομετασχηματιστές λοιπόν συνδέονται με το ένα άκρο στον αγωγό τροφοδοσίας του catenary και με το άλλο στον δευτερεύον αγωγό τροφοδοσίας feeder. Τέλος οι ουδέτεροι αγωγοί του αυτομετασχηματιστή συνδέονται με την ενδιάμεση λήψη του συστήματος. Οι δύο αγωγοί λοιπόν τροφοδοτούνται με 25 kV ο καθένας ως προς τη γη, αλλά με διαφορά τάσης 50 kV μεταξύ τους. Λόγω του ισομοιρασμού της τάσης κάθε αγωγού τροφοδοσίας όσο και από τον τρόπο τοποθέτησης των αυτομετασχηματιστών, ο λόγος του αριθμού των τυλιγμάτων ισούται με 1. Το σύστημα που δημιουργείται φαίνεται και κυκλωματικά στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Κυκλωματικό ισοδύναμο για σιδηροδρομικό δίκτυο 50/2x25kV [8]

Συνοψίζοντας τα πλεονεκτήματα αυτού του δικτύου έχουμε:

- μικρότερα ρεύματα στο δίκτυο
- μικρότερες απώλειες ισχύος κατά μήκος της διαδρομής
- μεγαλύτερη διαδρομή του κάθε τμήματος που μπορεί να τροφοδοτηθεί από έναν υποσταθμό
- μεγαλύτερη ασφάλεια λόγω των μικρότερων ρευμάτων στην επιστροφή
- αντιμετώπιση των παρεμβολών που δημιουργούνται μεταξύ του δικτύου ηλεκτροδότησης και των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που βρίσκονται κοντά.

2.2.2.3 Υποσταθμός

Αντίστοιχα με τα όσα αναπτύξαμε για τους υποσταθμούς σε DC δίκτυα, έτσι και εδώ υπάρχουν δύο φορές ώστε να παρέχεται ισχύς αλλά και σε περίπτωση σφάλματος να υπάρχει εφεδρική τροφοδοσία[5]. Τα κυριότερα στοιχεία ενός υποσταθμού DC είναι:

- Μετασχηματιστές συνδεδεμένοι σε διαφορετικά ζεύγη φάσεων ώστε να δημιουργείται συμμετρία για το φορτίο. Η λειτουργία τους στοχεύει στον

υποβιβασμό της τάσης συνήθως από τα 132/220/400 kV στα 25 ή kV. Η ονομαστική ισχύς τους είναι συνήθως από 10-20 MVA.

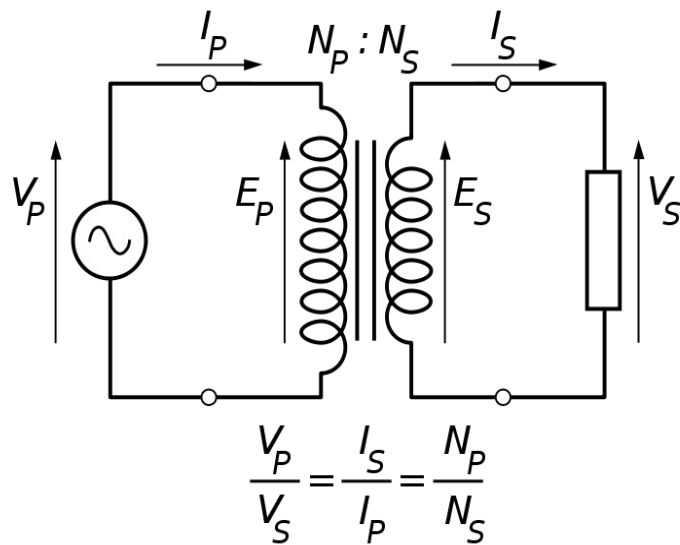
- Απομονωτές ή διακόπτες για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος στο τρένο ή μέσα στον υποσταθμό.
- Απομονωτές ή διακόπτες στο μέσο της διαδρομής ώστε να υπάρχει παροχή της γραμμής μέχρι το μέσο σε έκτακτες περιπτώσεις.
- Αλεξικέραυνο για την προστασία από κεραυνούς.

Θεωρία Μετασχηματιστών

Η βασική αποστολή των μετασχηματιστών είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη τάση ενός διαφορετικού επιπέδου τάσης, στην ίδια συχνότητα [7]. Ο μετασχηματιστής χωρίζεται σε δύο τμήματα. Η σύνδεση των τμημάτων του μετασχηματιστή γίνεται διαμέσου μαγνητικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Η βασική μαθηματική αρχή είναι η ισότητα του λόγου των τάσεων των δύο τυλιγμάτων με τον λόγο των αριθμών N των περιελίξεων

του σύρματος στα αντίστοιχα τυλίγματα $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} = a$, όπου V_s η τάση στο

πρωτεύον, V_p η τάση στο δευτερεύον, N_s ο αριθμός των τυλιγμάτων και N_p ο αριθμός των τυλιγμάτων στο δευτερεύον. Αν ο συντελεστής a είναι μεγαλύτερος του 1 τότε ο μετασχηματιστής λειτουργεί ανυψώνοντας την τάση, ενώ αν a είναι μικρότερος του 1 τότε λειτουργεί υποβιβάζοντας την τάση. Ιδανικά ο μετασχηματιστής έχει τέλεια αποδοτικότητα δηλαδή όλη η εισερχόμενη ενέργεια από το πρωτεύον μεταφέρεται μέσω του μαγνητικού πεδίου στο δευτερεύον. Συνεπώς $P_{inp} = I_p * V_p = I_s * V_s = P_{out}$. Το κύκλωμα ενός ιδανικού μετασχηματιστή φαίνεται στο σχήμα 11.



Σχήμα 11: Ιδανικός μετασχηματιστής με φορτίο στο δευτερεύον[7]

Η ανάλυση του μετασχηματιστή σε κυκλωματικό ισοδύναμο αναπαρίσταται από τις σύνθετες αντιστάσεις σε ένα από τα δύο τυλίγματα και ένας εγκάρσιος κλάδος που αναπαριστά την σύζευξη και λέγεται κλάδος μαγνήτισης. Οι παράμετροι του κυκλώματος προσδιορίζονται μέσω της δοκιμής βραχυκυκλώματος και της δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος.

Μία μεγάλη ποικιλία μετασχηματιστών έχουν αναπτυχθεί για την κάλυψη των διαφόρων φορτίων και την προσαρμογή στα απαραίτητα δίκτυα [9]. Κάποια από αυτά είναι:

- Ο μονοφασικός
- Ο Scott
- Ο Le-Blanc συνδεδεμένος
- Ο αστέρας-τρίγωνο για τριφασικά συστήματα
- Ο τρίγωνο-τρίγωνο για τριφασικά συστήματα
- Ο V/V συνδεδεμένος

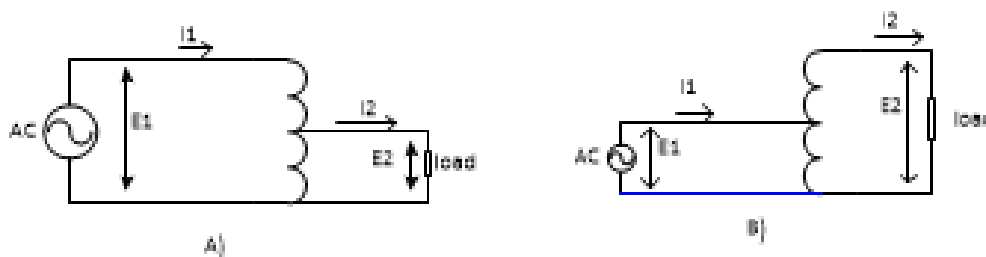
Πιο συγκεκριμένα, οι μετασχηματιστές τύπου Scott και Le-Blanc στοχεύουν στην μετατροπή ενός ισορροπημένου τριφασικού δικτύου σε διφασικό ισορροπημένο δίκτυο. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι ο πυρήνας του Le-Blanc κατασκευάζεται τρίποδος. Οι V/V είναι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται ευρέως σε σιδηροδρομικά δίκτυα. Αποτελείται από δύο μονοφασικούς μετασχηματιστές με στόχο την τροφοδοσία τριφασικών συστημάτων και την ισομερή τροφοδοσία μονοφασικών φορτίων μεταξύ των τριών φάσεων.

Θεωρία αυτομετασχηματιστών

Για την αποκατάσταση της τάσης σε μια μεγάλη σε μήκος γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιούνται οι αυτομετασχηματιστές. Προφανώς και θα ήταν φοβερά δαπανηρή η τοποθέτηση ενός ακόμα μετασχηματιστή στη θέση του αυτομετασχηματιστή. Η διαφορά του από τον μονοφασικό μετασχηματιστή είναι ότι τα τυλίγματα συνδέονται σε σειρά, με το ένα να είναι κοινό μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του αυτομετασχηματιστή.

Αντίστοιχα με την βασική εξίσωση των μετασχηματιστών έχουμε $\frac{V_C}{V_{SE}} = \frac{N_C}{N_{SE}}$, όπου V_C

η κοινή τάση, V_S η τάση σειράς, N_C ο αριθμός των σπειρών του κοινού τυλιγμάτος και N_{SE} ο αριθμός των σπειρών του τυλιγμάτος σειράς. Ανάλογα με το αν ο μετασχηματιστής είναι ανύψωσης ή υποβιβασμούς τάσης τοποθετούνται κατάλληλα και τα τυλίγματα, όπως φαίνονται αντίστοιχα στο σχήμα 12.



Σχήμα 12: Αυτομετασχηματιστής α) υποβιβασμού β) ανύψωσης

2.2.2.4. Ηλεκτρικοί Συρμοί

Το τρένο αποτελεί τον κυριότερο τρόπο κίνησης σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο. Η ανάπτυξη των τρένων έγινε σταδιακά από ατμομάζες, σε ντιζελοκίνητα και πλέον μέσω ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Η συνεχής ανάπτυξη μικροεπεξεργαστών και διατάξεων ισχύος επέτρεπε στην χρήση των κινητήρων σε όλοένα και περισσότερα ηλεκτρικά δίκτυα. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η ανάπτυξη των thyristor ή chopper στον έλεγχο της τροφοδοσίας των κινητήρων με ηλεκτρικό ρεύμα, οδηγώντας στην μεγάλη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα και στην μικρότερη κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Τριφασικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος

Η λειτουργία των τρένων μέσω τριφασικών εναλλασσόμενου ρεύματος έχει ξεκινήσει από το 1980[11]. Μέχρι τότε κάτι τέτοιο δεν ήταν εφικτό καθώς ο μετατροπέας της τροφοδοσίας από εναέριες γραμμές ή τρίτη ράγα σε μεταβλητή αντίσταση ή συχνότητα ήταν υπέρογκος και δεν συνέφερε η τοποθέτηση του. Με την βοήθεια της ηλεκτρονικής τα όποια προβλήματα ξεπεράστηκαν, δημιουργώντας μετατροπείς σε διαχειρίσιμο βάρος και μέγεθος.

Οι τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος χαρακτηρίζονται αποδοτικότεροι από τους άλλους γιατί:

- όντας επαγωγικοί κινητήρες δεν έχουν ψήκτρες, διακόπτες αναστροφής ούτε μηχανικά τμήματα επαφής. Συνεπώς η συντήρησή τους είναι απλούστερη και είναι περισσότερο αξιόπιστος.
- είναι περισσότερο συμπαγής από τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος
- η ροπή στρέψεως μεγαλώνει με την ταχύτητα, ενώ στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος στην αρχή αυξάνει απότομα και πέφτει όσο αυξάνεται η ταχύτητα.
- Ο κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος μεταπίπτει πιο εύκολα σε γεννήτρια. Συνεπώς μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ιδιότητα της αναγεννητικής πέδησης εξοικονομώντας ηλεκτρική ενέργεια.

Ένα από τα προβλήματα στην χρήση ηλεκτρικών συρμών είναι η συμβατότητα του κινητήρα με το δίκτυο. Όπως είδαμε, για παράδειγμα. Στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται πολλά διαφορετικά δίκτυα. Αν ένα τρένο ταξιδεύει διασχίζοντας διαφορετικά δίκτυα θα πρέπει πριν μπει στο νέο δίκτυο να αλλάξει μηχανή. Στην Γαλλία τελειοποιήθηκε για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος η τεχνολογία των πολυρευματικών ηλεκτρικών κινητήριων μονάδων.

3 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για το σύστημα που εργαστήκαμε. Παρουσιάζονται τα κυκλωματικά μοντέλα στα οποία βασιστήκαμε. Γίνεται η μαθηματική αναπαράσταση, λοιπόν, του υποσταθμού, του αυτομετασχηματιστή, των εναέριων γραμμών μεταφοράς και, τέλος, δίνονται όλα τα διαθέσιμα κυκλωματικά μοντέλα για το τρένο καθώς και αυτό που επιλέξαμε.

Ακόμη παρουσιάζονται οι κυριότεροι τρόποι επίλυσης ροής ισχύος, όπως η Newton-Raphson, η Backward-Forward [11,12,13,15]. Τέλος αναλύεται εκτενώς η μέθοδος Sequential Linear Power Flow, που χρησιμοποιήσαμε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου μας. Εν συνεχεία παρουσιάζεται η κατασκευή της μήτρας αγωγιμοτήτων σε τριφασικά συστήματα.

Τέλος κάνουμε αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου που αναπτύξαμε παρουσιάζοντας τα δεδομένα εισόδου, τα δεδομένα εξόδου και όλα τα βήματα για την επίλυση του αλγορίθμου.

3.1. Δίκτυο 55/2x27,5kV με Αυτομετασχηματιστές

Όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 2, τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται είναι τα bivoltage AC. Θεωρητικά είδαμε πως μέσω αυτού του συστήματος μπορούμε να κάνουμε πιο ασφαλή τον σιδηρόδρομο, να εξαλείψουμε τις παρεμβολές με τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά συστήματα και να μειώσουμε τις απώλειες και τις πτώσεις τάσης που αναπτύσσεται κατά μήκος της διαδρομής. Αν και το σύστημα παρομοιάζει πιο πολύ με

τριφασικό,θα πρέπει να τονίσουμε οτι είναι μονοφασικό. Όπως είδαμε και θεωρητικά ,οι εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι απαραίτητες για την συνεχή τροφοδότηση του τρένου. Συσχετίζοντας την θεωρία με το δίκτυο στο οποίο δουλεύουμε καταγράφουμε τους αγωγούς που είναι αναγκαίοι για την περιγραφή τόσο όποιουδήποτε μοντέλου όσο και του συνολικού συστήματος. Στη συνέχεια οι τρεις αγωγοί που διέπουν όλο το σύστημα θα αναφέρονται ως:

- catenary, ο αγωγός επαφής
- feeder, ο αγωγός ενίσχυσης
- και rail, ο αγωγός επιστροφής που είναι οι ράγες και συνδέεται με την ενδιάμεση λήψη του μετασχηματιστή

Στα κυκλώματα, αντίστοιχα, οι τρεις αγωγοί αναγράφονται ως C για το catenary, R για το rail και F για το feeder.

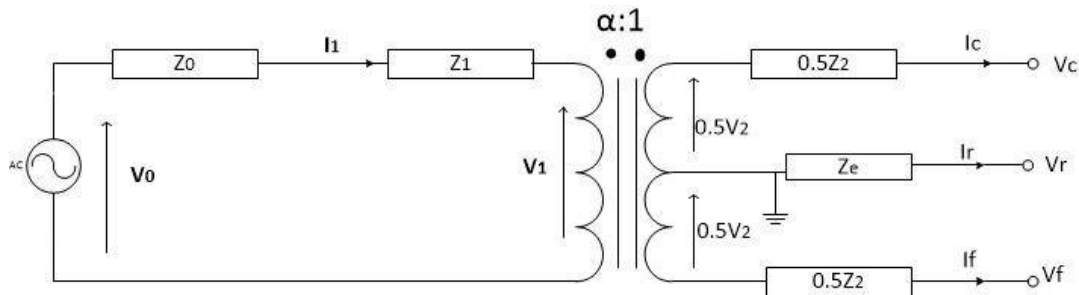
Τέλος, όπως είπαμε, το δίκτυο είναι μονοφασικό με τρία καλώδια. Η ιδιομορφία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς διευκόλυνση μας, αν θεωρήσουμε οτι αποτελεί ένα τριφασικό ασύμμετρο σύστημα. Η ευκολία αυτής της αναγωγής μπορεί να φανεί χρήσιμη καθώς για το συγκεκριμένο δίκτυο οι μέθοδοι επίλυσης ροής ισχύος δεν είναι ανεπτυγμένοι, όπως συμβαίνει για τριφασικά συστήματα.

Η ίδια λογική που διέπει το δίκτυο 50kV/2x25kV διέπει και το δίκτυο με 55/2x27,5kV. Θα υλοποιήσουμε το δίκτυο 55/2x27,5kV καθώς έχουμε μεγαλύτερη πληθώρα πληροφοριών και γνώσεων για τα στοιχεία του δικτύου και αυτό μας επιτρέπει μεγαλύτερη ρεαλιστικότητα στα αποτελέσματα και μεγαλύτερη ακρίβεια στα συμπεράσματα. Το δίκτυο 55/2x27,5kV χρησιμοποιείται στους υψηλής ταχύτητας σιδηροδρόμους της Κίνας .

3.2 Υποσταθμός

Ο υποσταθμός στο δίκτυο μας παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 2. Για την αναλύση του υποσταθμού θα επικεντρωθούμε στους μετασχηματιστές, χωρίς αυτό να σημαίνει οτι δεν είναι απαραίτητα στην λειτουργία τα υπόλοιπα συστήματα όπως οι αυτόματοι διακόπτες, οι μονωτές κλπ. Γνωρίζουμε οτι ο υποσταθμός αποτελείται από έναν μετασχηματιστή μεσαίας λήψης προσαρμοσμένο στο δίκτυο μας, των 55kV/2x27,5kV. Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δύο τυλίγματα ,με το πρώτο τύλιγμα να συνδέεται στο δίκτυο παροχής υψηλής τάσης 220kV. Η ιδιομορφία του δικτύου πάνω στο οποίο εργαζόμαστε φαίνεται στο κύκλωμα του δεύτερου τυλίγματος. Το κύκλωμα του δευτερεύοντος τυλίγματος, αν και μονοφασικό, αποτελείται απο τρία καλώδια, με το δεύτερο γειωμένο καθώς είναι μια ενδιάμεση λήψη(tap).

Παρακάτω παραθέτουμε το κύκλωμα ,που αναλύσαμε, στο σχήμα 13.



Σχήμα 13: Κυκλωματικό ισοδύναμο του μοντέλου του μετασχηματιστή

Διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων

Ο προσδιορισμός των αυτεπαγωγών και των αντιστάσεων που εμφανίζονται στο κύκλωμα είναι δυνατό να γίνει μόνο πειραματικά. Για τον λόγο αυτό μέσα από την δοκιμή βραχυκυκλώματος και την δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος μπορούμε να προσδιορίσουμε τις τιμές των παραμέτρων.

Από δοκιμή βραχυκυκλώματος έχουμε:

- $R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{2n}^2}$ (3.1), όπου P_{sc} οι απώλειες από την δοκιμή βραχυκυκλώματος, R_{eq} η συνολική αντίσταση ανηγμένη στο δευτερεύον και I_{2n} το ρεύμα ανηγμένο στο δευτερεύον.
- $X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq}^2 - R_{eq}^2)}$ (3.2), όπου V_{sc} η τάση από την δοκιμή βραχυκυκλώματος

Επειδή θεωρούμε ίσες τις σύνθετες αντιστάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα έχουμε

στον C και F τις εξής σύνθετες αντιστάσεις $\frac{Z_{eq}}{2} + a^2 * \frac{Z_{eq}}{2}$

Από την δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος με αντίστοιχο τρόπο θα έχουμε:

- $R_m = \frac{I_{2n}^2}{P_{oc}}$ (3.3), όπου R_m, P_{oc}, I_{2n} η αντίστασης του κλάδου μαγνήτισης, οι απώλειες ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα στο δευτερεύον του κυκλώματος αντίστοιχα.

$$Y_m = I_{oc} / V_{2n}$$

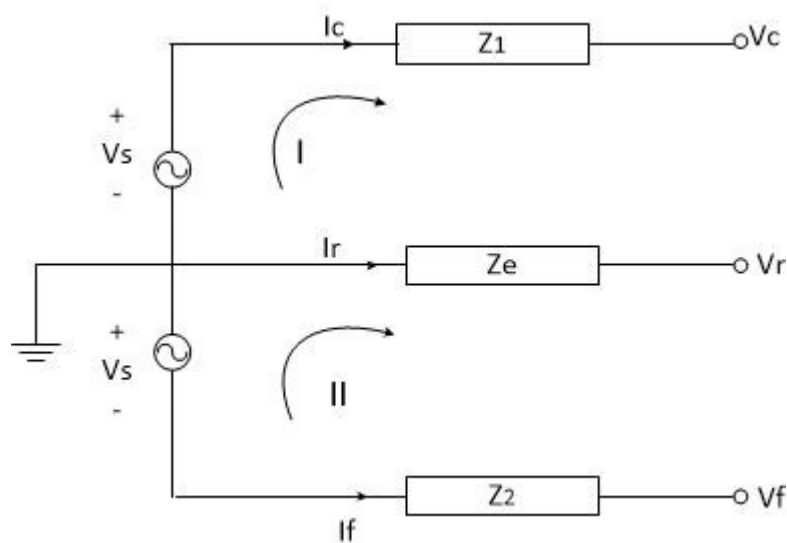
$$\Rightarrow X_m = \frac{1}{\sqrt{(Y_m^2 - R_m^2)}} \quad (3.4). \quad \text{Ακόμα } I_{oc}, V_{2n}, Y_m, X_m \text{ το ρεύμα ανοιχτού}$$

κυκλώματος, η τάση δευτερεύοντος, η σύνθετη αγωγιμότητα και η αντίδραση μαγνήτισης αντίστοιχα.

Μαθηματική μοντελοποίηση του μετασχηματιστή

Αφού παρουσιάστηκε το πλήρες μοντέλο του μετασχηματιστή και ο τρόπος προσδιορισμού των παραμέτρων, θα αναλύσουμε την μαθηματική μοντελοποίηση του μετασχηματιστή. Επιλέγουμε λοιπόν σε ποιο από τα δύο τμήματα του μετασχηματιστή θα εργαστούμε, μέσω της αναγωγής. Επειδή όλο το υπόλοιπο σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δευτερεύον του κυκλώματος θα κάνουμε αναγωγή των στοιχείων του πρωτεύοντος στο δευτερεύον. Επίσης η σύνθετη αντίσταση Z_0 είναι πάρα πολύ μικρή και μπορούμε

για λόγους ευκολίας να την αγνοήσουμε. Παρακάτω παραθέτουμε το κυκλωματικό μοντέλο στο σχήμα για τον μετασχηματιστή, όπως προκύπτει, μετά την αναγωγή όλων των στοιχείων στο δευτερεύον. Ακόμα αγνοείται ο κλάδος διέγερσης. Ο κλάδος διέγερσης προσθέτει έναν ακόμη κόμβο κάνοντας πολύπλοκη την ανάλυση. Όπως είδαμε και θεωρητικά στο κεφάλαιο 2 αλλά όπως αποδεικνύεται και στο κεφάλαιο 4 μέσω του αριθμητικού υπολογισμού, το ρεύμα του κλάδου διέγερσης είναι πολύ μικρό και συνεπώς θεωρούμε την επίδραση της μικρή και άρα δεν λαμβάνεται υπόψη στη συγκεκριμένη εργασία.



Σχήμα 14: Κυκλωματικό ισοδύναμο του μοντέλου του μετασχηματιστή

Στο κύκλωμα λοιπόν έχουμε :

- V_s την τάση του δευτερεύοντος κυκλώματος,
- $Z_1 = R_1 + j * X_1$ την σύνθετη αντίσταση δευτερεύοντος τυλίγματος στο C,

- $Z_e = R_e + j * X_e$ την σύνθετη αντίσταση του R,
- $Z_2 = R_2 + j * X_2$ την σύνθετη αντίσταση του F,
- τα ρεύματα και τις κατευθύνσεις τους όπως φαίνονται σε κάθε αγωγό C,R,F αντίστοιχα I_c, I_r και I_f
- και τέλος οι τάσεις στους αντίστοιχους αγωγούς είναι V_c, V_r και V_f .

Για την μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος θα εργαστούμε χρησιμοποιώντας τους θεμελιώδεις νόμους της θεωρίας των κυκλωμάτων. Στο κύκλωμα δημιουργούνται δύο βρόχοι στους οποίους θα εργαστούμε χρησιμοποιώντας τον νόμο τάσεων Kirchhoff (NTK). Αντίστοιχα για την τάση στον αγωγό R θα εργαστούμε χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm σε σχέση με την ενδιάμεση λήψη, η οποία και φαίνεται να είναι γειωμένη.

Από NTK στους βρόχους I,II και από νόμο του Ohm στο V_r προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\bullet \quad V_s = I_s * Z_1 + (V_c - V_r) - I_r * Z_e \quad (3.5)$$

$$\bullet \quad V_s = I_r * Z_e + (V_r - V_f) - I_f * Z_2 \quad (3.6)$$

$$\bullet \quad V_r = -I_r * Z_e \quad (3.7)$$

Από τις εξισώσεις (3.5-3.7) δημιουργούμε την αναπαράσταση του κυκλώματος υπό την μορφή πινάκων

$$\begin{bmatrix} Z_1 & -Z_e & 0 \\ 0 & Z_e & -Z_2 \\ 0 & -Z_e & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_c \\ I_r \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} * V_s + \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_c \\ V_r \\ V_f \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Από την εξίσωση 4.4 έχουμε την μητρική μορφή του κυκλώματος

$$\begin{bmatrix} I_c \\ I_r \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} \\ 0 \\ -\frac{1}{Z_2} \end{bmatrix} * V_s + \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{Z_e} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{Z_2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_c \\ V_r \\ V_f \end{bmatrix} \quad (3.9-\alpha)$$

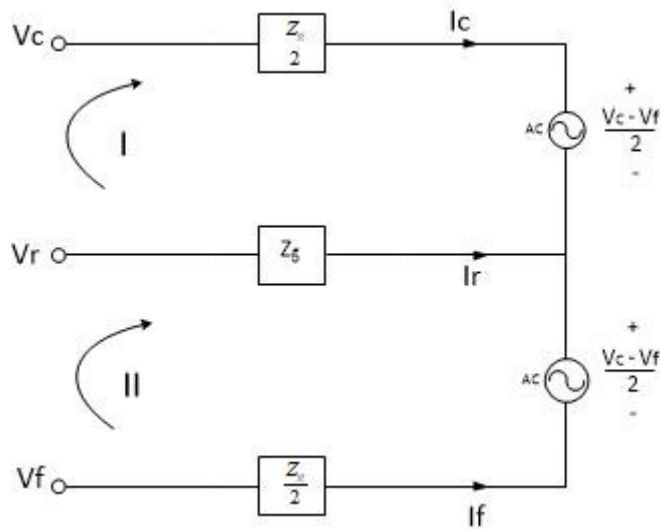
Η εξίσωση του (3.9-α) μπορεί να αναγραφεί και υπό την μορφή

$$[I]=[J_{ss}]-[Y_{ss}]*[V] \quad (3.9-\beta)$$

$$\text{όπου } [I]=\begin{bmatrix} I_c \\ I_r \\ I_f \end{bmatrix}, \quad [J_{ss}]=\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} \\ 0 \\ -\frac{1}{Z_2} \end{bmatrix} * V_s, \quad [Y_{ss}]=\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_e} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_2} \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad [V]=\begin{bmatrix} V_c \\ V_r \\ V_f \end{bmatrix}$$

3.3 Αυτομετασχηματιστής

Το δεύτερο κύκλωμα που θα αναλύσουμε και θα δώσουμε την μαθηματική αναπαράσταση είναι αυτό του αυτομετασχηματιστή. Σε αντίθεση με τα κυκλώματα αυτομετασχηματιστών που μας είναι γνωστά, έχουμε τροποποιήσει κάποια από τα στοιχεία καθώς η εγκάρσια σύνδεση κάνει αρκετά πολύπλοκη την διαδικασία ανάλυσης. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε αυτομετασχηματιστή με $N_1=N_2$ είναι για να ισορροπήσουμε την τάση στο C και στο F. Λόγω της πτώσης τάσης που δημιουργείται κατά μήκος της διαδρομής υπάρχει η ανάγκη να εξομαλυνθεί η τάση και να ισορροπηθεί. Έτσι τα τυλίγματα μπορούμε να τα μοντελοποιήσουμε με την ημιδιαφορά των τάσεων στο C και στο F. Όπως και στο μοντέλο του μετασχηματιστή, μπορούμε να αγνοήσουμε τον κλάδο μαγνήτισης καθώς το ρεύμα διέγερσης είναι πάρα πολύ μικρό. Ο θεωρητικός προσδιορισμός των παραμέτρων γίνεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα για τους μετασχηματιστές.



Σχήμα 15: Κυκλωματικό ισοδύναμο του μοντέλου του αυτομετασχηματιστή

Στο κύκλωμα φαίνονται:

- $\frac{V_c - V_f}{2}$ που είναι οι εξαρτημένες πηγές τάσης με τάση ίση με την ημιδιαφορά των τάσεων στον αγωγό C και F,
- $Z_1 = R_1 + j * X_1$ την σύνθετη αντίσταση δευτερεύοντος τυλίγματος στον αγωγό C,
- $Z_e = R_e + j * X_e$ την σύνθετη αντίσταση του αγωγού R,
- $Z_2 = R_2 + j * X_2$ την σύνθετη αντίσταση του F
- I_c, I_r και I_f τα ρεύματα και οι κατευθύνσεις τους φαίνονται σε κάθε αγωγό C, R, F αντίστοιχα
- και τέλος οι τάσεις στους αντίστοιχους αγωγούς είναι V_c, V_r και V_f .

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που κάναμε την μαθηματική αναπαράσταση στο κύκλωμα του μετασχηματιστή εργαζόμαστε και εδώ.

Χρησιμοποιώντας τον ΝΤΚ στους δύο επιμέρους βρόχους και με ΝΡΚ για το V_r μας δίνονται οι κάτωθι εξισώσεις:

$$\bullet \quad -V_c + I_c * \frac{Z_g}{2} + \frac{(V_c - V_f)}{2} - I_r * Z_g + V_r = 0 \rightarrow -\frac{V_c}{2} + V_r - \frac{V_f}{2} + \frac{I_c * Z_g}{2} - I_r * Z_g = 0 \quad (3.10)$$

$$\bullet \quad -V_r + I_r * Z_g + \frac{(V_c - V_f)}{2} - I_f * \frac{Z_g}{2} + V_f = 0 \rightarrow \frac{V_c}{2} + V_r + \frac{V_f}{2} + I_r * Z_g - \frac{I_f * Z_g}{2} = 0 \quad (3.11)$$

$$\bullet \quad I_c + I_r + I_f = 0 \quad (3.12)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε την αποτύπωση του κυκλώματος υπό την μορφή πινάκων

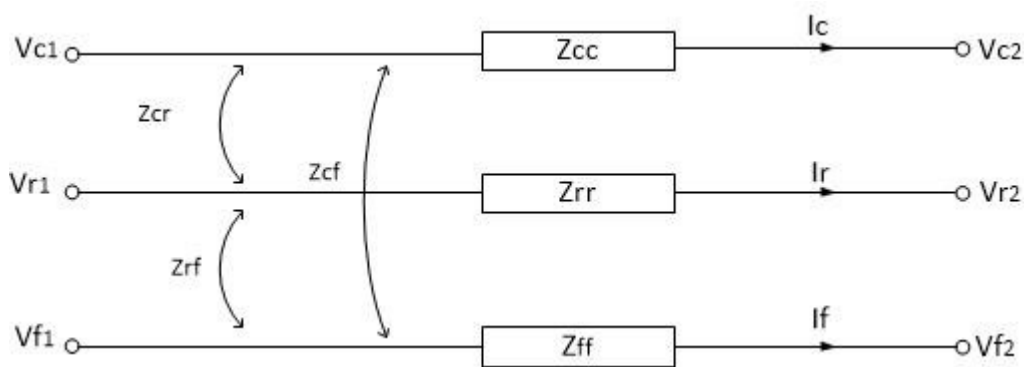
$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_c \\ V_r \\ V_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_g}{2} & -Z_g & 0 \\ 0 & Z_g & -\frac{Z_g}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_c \\ I_r \\ I_f \end{bmatrix} = 0 \quad (3.13-\alpha)$$

ή αλλιώς $[I] = [Y_{at}] * [V]$,

$$\text{όπου } [I] = \begin{bmatrix} I_c \\ I_r \\ I_f \end{bmatrix}, \quad [Y_{at}] = \frac{1}{5Z_g} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad [V] = \begin{bmatrix} V_c \\ V_r \\ V_f \end{bmatrix} \quad (3.14-\beta)$$

3.4 Γραμμές μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς μοντελοποιούνται, όπως είναι γνωστό, ως σύνθετες αντιστάσεις τόσο σε κάθε αγωγό, που ονομάζονται ιδίες όσο και μεταξύ των αγωγών οι σύνθετες αντιστάσεις που αναπτύσσονται και λέγονται αμοιβαίες. Παρακάτω παραθέτουμε το κυκλωματικό μοντέλο των γραμμών μεταφοράς.



Σχήμα 16: Κυκλωματικό μοντέλο για τις γραμμές μεταφοράς

Στο σχήμα του κυκλώματος φαίνονται:

- V_{c1}, V_{r1} και V_{f1} οι τάσεις στην αναχώρηση του κυκλώματος αντίστοιχα για κάθε αγωγό
- V_{c2}, V_{r2} και V_{f2} οι τάσεις στην άφιξη του κυκλώματος για κάθε αγωγό αντίστοιχα
- I_c, I_r και I_f τα ρεύματα που διέπουν κάθε αγωγό αντίστοιχα
 $Z_{cc} = R_{cc} + j * X_{cc}$,
- $Z_{rr} = R_{rr} + j * X_{rr}$ και $Z_{ff} = R_{ff} + j * X_{ff}$, οι ίδιες σύνθετες αντιστάσεις για κάθε αγωγό C,R και F αντίστοιχα
- και τέλος $Z_{cr}, Z_{rc}, Z_{cf}, Z_{fc}, Z_{rf}, Z_{fr}$ και Z_{cf}, Z_{fc} οι αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ C-R,R-F και C-F αντίστοιχα

Χρησιμοποιώντας τον θεμελιώδη νόμο του Ohm κατασκευάζουμε την μητρική μορφή των εξισώσεων για τις γραμμές μεταφοράς .

Επομένως:

$$\Delta(\vec{v}) = Z * \vec{I} \quad , \text{όπου} \quad \Delta(\vec{v}) = \vec{V}_1 - \vec{V}_2 \quad \text{και πιο αναλυτικά έχουμε}$$

$$\begin{bmatrix} V_{c1} \\ V_{r1} \\ V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{c2} \\ V_{r2} \\ V_{f2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cr} & Z_{cf} \\ Z_{rc} & Z_{rr} & Z_{rf} \\ Z_{fc} & Z_{fr} & Z_{ff} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_c \\ I_r \\ I_f \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.5 Ηλεκτρικοί συρμοί

Η μοντελοποίηση ενός φορτίου εξαρτάται από τα δεδομένα που μας δίνονται για το είδος του και τις συνθήκες που βρίσκεται[15]. Απαιτείται λοιπόν ένα μοντέλο που να είναι απλό ώστε να μειώνει τη δυσκολία του προβλήματος. Δεδομένα που είναι γνωστά στον ηλεκτρικό πίνακα ενός τρένου είναι το μέτρο της τάσης στον παντογράφο, το μέτρο του ρεύματος που εισέρχεται στο τρένο, η ισχύς και ο συντελεστής ισχύος. Με βάση αυτά τα δεδομένα καθώς και άλλες συνθήκες αποφασίζουμε για το καταλληλότερο μοντέλο. Παραθέτουμε τα τέσσερα μοντέλα φορτίου που χρησιμοποιούνται ευρέως:

➤ Γραμμικό μοντέλο

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 17α) το μοντέλο αποτελείται από μια πηγή τάσης E_t σε σειρά μια σύνθετη αντίσταση Z_t . Τα στοιχεία αυτά ορίζονται συναρτήσει της ταχύτητας, της τάσης στον παντογράφο και της ελκτικής δύναμης κατά τη διάρκεια όλης της κίνησης. Ωστόσο απαιτείται ο συγχρονισμός της γωνίας του φορτίου με τη γωνία του υποσταθμού, κάτι που δεν είναι άμεσα υπολογίσιμο.

➤ Μοντέλο αντίστασης

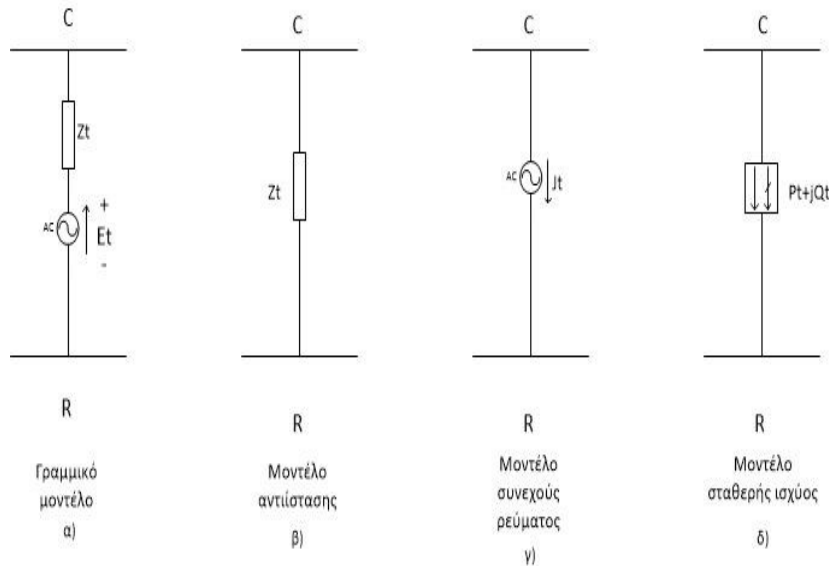
Για αυτό το μοντέλο, που φαίνεται στο σχήμα 17β), απαιτείται η γνώση και των τεσσάρων παραμέτρων που αναφέραμε παραπάνω. Το μέτρο της τάσης στα άκρα της αντίστασης βρίσκεται ως ο λόγος της τάσης παντογράφου και του ρεύματος και η γωνία της τάσης αντίστοιχη της γωνίας του συντελεστή ισχύος.

➤ Μοντέλο συνεχούς ρεύματος

Αν και το μέτρο του ρεύματος μπορεί να μετρηθεί από τα μετρητικά που περιέχει το τρένο. Ωστόσο παραμένουν άγνωστα το μέτρο της τάσης και οι γωνίες ρεύματος-τάσης. Το μοντέλο φαίνεται στο σχήμα 17γ)

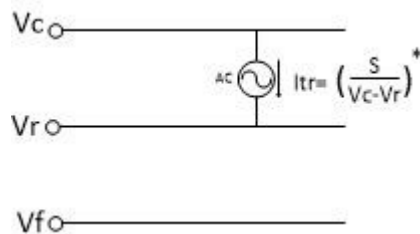
➤ Μοντέλο σταθερής ισχύος

Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι διαδεδομένο στα τριφασικά συστήματα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται καθώς η ισχύς και ο συντελεστής ισχύος είναι εύκολο να μετρηθούν. Το μοντέλο φαίνεται στο σχήμα 17δ)



Σχήμα 17 : Ισοδύναμα μοντέλα για δυναμικά φορτία

Στο πρόβλημα μας, τα φορτίου σταθερής ισχύος και συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά απλά. Ωστόσο η μοντελοποίηση του φορτίου θα γίνει μέσω του μοντέλου φορτίου σταθερής ισχύος, καθώς δεν απαιτείται η γνώση τάσης και γωνίας. Χρησιμοποιείται επίσης γιατί η ισχύς και ο συντελεστής ισχύος είναι δύο ποσότητες που μπορούν να μετρηθούν από το κέντρο ελέγχου του τρένου.



Σχήμα 18: Κυκλωματική μοντελοποίηση του τρένου

Αν και η μοντελοποίηση γίνεται με βάσει το μοντέλο φορτίου σταθερής ισχύος, στο κύκλωμα σχεδιάζεται ως πηγή συνεχούς ρεύματος. Ο λόγος που γίνεται αυτό έχει να κάνει με την επιλογή μας όλες οι πηγές να μοντελοποιούνται ως πηγές ρεύματος. Η επιλογή αυτή έχει να κάνει και με την μέθοδο επίλυσης της ροής ισχύος.

Η εξίσωση που περιγράφει το ρεύμα του τρένου είναι

$J_{tr} = \left(\frac{S}{V_c - V_r} \right)^*$ (3.16), όπου S φαινόμενη ισχύς και V_c, V_r οι τάσεις στον C και R αντίστοιχα

3.6 Μέθοδοι επίλυσης ροής ισχύος

Όπως σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργεια ζητούμενο είναι να προμηθεύει την πραγματική ισχύ που απαιτείται για την λειτουργία των φορτίων που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα. Συνεπώς δημιουργείται η ανάγκη γνώσης της δημιουργούμενης ροής φορτίου σε μία ενδεχόμενη κατάσταση ζήτησης συγκεκριμένου ποσού ισχύος στην κατανάλωση. Μια τέτοια κατάσταση ονομάζεται μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η οποία αποτελεί μια ορισμένη εικόνα των φορτίων, σε επίπεδο παραγόμενης ισχύος, και των τάσεων. Ακόμη η ανάλυση του συστήματος επηρεάζεται από την μορφή του δικτύου. Το δίκτυο που εξετάζουμε, όπως και κατα κανόνα τα δίκτυα διανομής, είναι ακτινικό.

Συνεπώς τα διανύσματα που χρησιμοποιούμε για κάθε μέγεθος είναι ένα διάνυσμα τριών στοιχείων. Η τάση και το ρεύμα σε κάθε ζυγό i λοιπόν αναπαριστάται ως

$$V_i = \begin{bmatrix} V_i^{(c)} \\ V_i^{(r)} \\ V_i^{(f)} \end{bmatrix} \text{ και } J_i = \begin{bmatrix} J_i^{(c)} \\ J_i^{(r)} \\ J_i^{(f)} \end{bmatrix} \text{ αντίστοιχα}$$

Μέσω των μεθόδων επίλυσης ροής ισχύος επιχειρούμε να προσδιορίσουμε στην συγκεκριμένη τοπολογία και κατάσταση του δικτύου τα παρακάτω μεγέθη :

- το μέτρο της τάσης στον ζυγό
- την γωνία της τάσης στον ζυγό
- την ενεργό ισχύ που ρέει σε όλες τις γραμμές και τις διακλαδώσεις του συστήματος
- την άεργο ισχύ που ρέει σε όλες τις γραμμές και τις διακλαδώσεις του συστήματος

Για τον προσδιορισμό αυτών των μεγεθών έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις με τις δύο πιο γνωστές:

- Power Injection Mismatch Method(PIM)
- Current Injection Mismatch Method(CIM)

Στην πρώτη προσέγγιση PIM στηριζόμαστε πάνω στο ότι όλες οι εγχυόμενες φαινόμενες ισχείς σε κάθε ζυγό ισούνται με μηδέν.

Αντίστοιχα στην CIM στηριζόμαστε πάνω στο νόμο του Khirchhoff σε κάθε ζυγό ,δηλαδή ότι το άθροισμα όλων των ρευμάτων σε κάθε ζυγό ισούνται με μηδέν.

Λόγω της μοντελοποίησης που έχει προκύψει έχοντας τον υποσταθμό ,διαταγμένο μέσω του ισοδύναμου Norton και τις πηγές του, σε μορφή πηγών έντασης καθώς και το τρένο σε μοντέλο πηγής έντασης θα χρησιμοποιήσουμε την προσέγγιση CIM[11,15].

Η μαθηματική εξίσωση ,λοιπόν, για κάθε ζυγό i ενός συστήματος με N ζυγούς προκύπτει απο το νόμο του Kirchhoff και έτσι έχουμε:

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik} * V_k = J_i \quad , \text{όπου } Y \text{ η μήτρα αγωγιμότητας του συστήματος. (3.17)}$$

3.6.1 Newton Raphson

Η μέθοδος αυτή είναι από τις πιο γνωστές αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιείται ευρέως και,ειδικότερα, στο πρόβλημα επίλυσης ροής φορτίου. Πλεονεκτεί έναντι άλλων λόγω του ταχέως ρυθμού σύγκλισης ειδικά αν η αρχικοποιημένη τιμή είναι "κοντά" στην ζητούμενη. Στα μειονεκτήματα είναι ο αναγκάιος επαναληπτικός υπολογισμός του ιακωβιανού πίνακα,που θα αναλυθεί παρακάτω. Ακόμη για την χρήση της μεθόδου σε υπολογιστικό περιβάλλον,όπως matlab, απαιτείται σημαντική μνήμη για την αποθήκευση πολλών μεταβλητών και μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο χρόνο εκτέλεσης σε σχέση με άλλες μεθόδους[11,12].

Ως προς την διαδικασία που ακολουθείται για την μέθοδο επίλυσης:

- αρχικοποιούνται τάσεις σε όλους τους ζυγούς,συνήθως ίσες με τις ονομαστικές
- Ορίζουμε την μη γραμμική συνάρτηση F_i ως $F_i = \sum_{k=1}^N Y_{ki} * V_k - J_i$ (3.18), όπου $J_i = J_{ss,i} - J_{tr,i}$

με $J_{ss,i}$ το ρεύμα που παράγεται από τον υποσταθμό και $J_{tr,i}$ το ρεύμα που καταναλώνεται από το τρένο.

- Ορίζουμε την γραμμικοποιημένη εξίσωση που θέλουμε να επιλύσουμε την $-J(\vec{x}) * \Delta(\vec{x}) = F(\vec{x})$,όπου $J(\vec{x})$ είναι ο τετραγωνικός ιακωβιανός πίνακας, ο οποίος αποτελείται από τις μερικές παραγώγους 1ης τάξης της $F(\vec{x})$.
- υπολογίζουμε τον ιακωβιανό πίνακα $J(\vec{x})$
- επιλύουμε την εξίσωση της μορφής $[V^{(k+1)}] = [V^{(k)}] + [\Delta u] + j * [\Delta v]$

όπου $[\Delta u + j \Delta v]$ είναι το διάνυσμα που αναπαριστά την αλλαγή που παρατηρείται σε κάθε

επανάληψη της μεθόδου.

- η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το κριτήριο σύγκλισης να ικανοποιηθεί και να έχουμε βρει τις βέλτιστες λύσεις για τα ζητούμενα

Με βάση τη σύγκριση με άλλες μεθόδους βλέπουμε ότι η μέθοδος συγκλίνει γρήγορα[12]. Ωστόσο λόγω του υπολογισμού του J_T ο υπολογισμός ανάγεται σε δευτέρας τάξης, οπότε το σύστημα γίνεται πιο πολύπλοκο. Έτσι μπορεί μέσω της μεθόδου να υλοποιείται ταχύτερα ωστόσο είναι αρκετά πιο πολύπλοκο, λόγω και του ιακωβιανού πίνακα, και απαιτεί περισσότερη μνήμη.

3.6.2 Μέθοδος Backward-Forward

Η μέθοδος Backward-Forward χρησιμοποιείται σε ακτινικά ή ασθενώς βροχοειδή AC και DC δίκτυα[11,12]. Η ευκολία στην χρήση της μεθόδου σε τέτοια δίκτυα είναι ότι μπορούν να αναπαρασταθούν ως γράφοι, υπό την μορφή δέντρων. Έτσι η επαναληπτική διαδικασία μπορεί να επισκέπτεται κάθε κόμβο με βάση την ανεπτυγμένη ιεραρχία για τον κυρίως κλάδο και τα παρακλάδια.

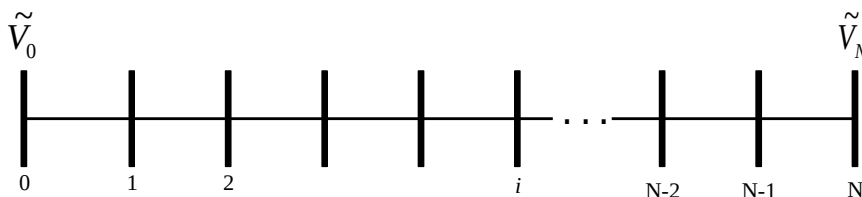
Ως προς την διαδικασία που ακολουθείται για την μέθοδο επίλυσης

- αρχικοποιούνται τάσεις σε όλους τους ζυγούς, ίσες με τις ονομαστικές
- υπολογίζονται τα ρεύματα που εγχύονται στους ζυγούς φορτίων ως

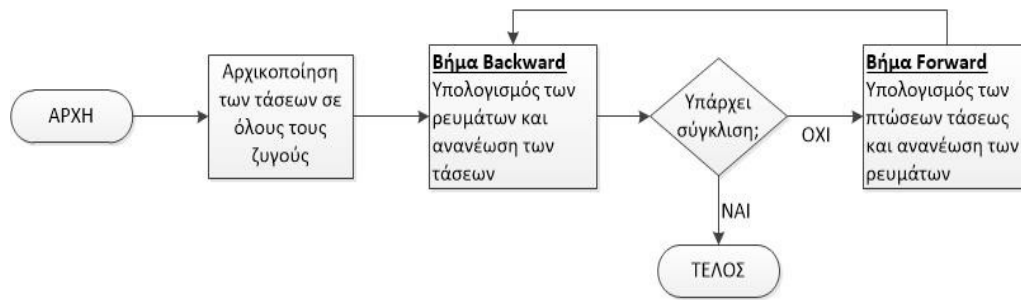
$$J_d(i) = \left(\frac{S}{V(i)} \right)^{(*)}$$

- εκτελείται το backward step. Ξεκινώντας από το τέλος του δέντρου προς την αρχή υπολογίζονται τα ρεύματα μέσω Kirchhoff
- εκτελείται το forward step. Με δεδομένα τα ρεύματα που βρέθηκαν από το προηγούμενο βήμα και με θεωρώντας την αρχικοποιημένη τάση ως τάση του ζυγού αναφοράς ξεκινάμε και υπολογίζουμε προς το τέλος τις τάσεις των ζυγών
- η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το κριτήριο σύγκλισης να ικανοποιηθεί και να έχουμε βρει τις βέλτιστες λύσεις για τα ζητούμενα

Για να γίνει πιο κατανοητή η μέθοδος παραθέτουμε το παρακάτω σχήμα και διάγραμμα ροής.



Σχήμα 19: Ένα ακτινικό δίκτυο N ζυγών



Σχήμα 20: Διάγραμμα ροής της μεθόδου επίλυσης ροής ισχύος backward-forward

3.6.3 Μέθοδος Sequential Linear

Επί της ουσίας η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται πάνω στην μέθοδο των κόμβων[15]. Η δυνατότητα αυτή δίνεται σε δίκτυα που τα φορτία μπορούν να μοντελοποιηθούν ως πηγές ρεύματος. Με αυτόν τον τρόπο αντί να γραμμικοποιούνται οι εξισώσεις των φορτίων λύνουμε γραμμικά συστήματα εξισώσεων όπως περιγράφονται από την εξίσωση (3.18).

Ως προς την διαδικασία που ακολουθείται για την μέθοδο επίλυσης

- αρχικοποιούμε τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς στο δίκτυο
- υπολογίζουμε το ρεύμα του φορτίου ως $J_d(i) = \left(\frac{S}{V(i)}\right)^{(*)}$
- υπολογίζουμε τις νέες τάσεις $V^{(k+1)} = Y^{(-1)} * J(k)$
- υπολογίζουμε εκ νέου το ρεύμα του φορτίου με τις νέες τάσεις
- επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια σύγκλισης

3.7 Ανάπτυξη του αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος

3.7.1 Κατασκευή μήτρας αγωγιμότητας

Κατ' αρχάς στο συγκεκριμένο δίκτυο έχοντας τρεις αγωγούς η μήτρα που δημιουργείται για κάθε στοιχείο είναι ένας πίνακας 3x3. Συνεπώς η συνολική μήτρα αγωγιμότητας θα έχει μέγεθος 3Nx3N.

Τα στοιχεία της μήτρα αγωγιμότητας προκύπτουν ως εξής :

- Τα διαγώνια στοιχεία αποτελούνται από το άθροισμα των αγωγιμοτήτων των στοιχείων και των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων, που συνδέονται στον αντίστοιχο ζυγό.
- Τα μη διαγώνια στοιχεία αποτελούνται από την αντίθετη αγωγιμότητα του στοιχείου που συνδέει της δύο γραμμές. Προφανώς αν δυο ζυγοί δεν συνδέονται στον πίνακα τοποθετούμε 0.

Τελικά έχουμε:

$$\text{για τα διαγώνια στοιχεία} \rightarrow [Y_{ii}] = \sum_{j=1}^N Y_{ij} + Y_{i0}, \text{ όπου } Y_{i0} \text{ η εγκάρσια αγωγιμότητα του } i \text{ ζυγού}$$

$$\text{και για τα μη διαγώνια στοιχεία} \rightarrow [Y_{ij}] = -Y_{ij}$$

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας κατασκευής της μήτρας αγωγιμότητας θα δώσουμε ένα απλό παράδειγμα . Έστω ένα δίκτυο στο οποίο συνδέονται ένας υποσταθμός(SS), δύο γραμμές μεταφοράς(line1 και line2 αντίστοιχα), ένα τρένο(train) σε σειρά και ένας αυτομετασχηματιστής(AT) εγκάρσια στο μέσο των δύο γραμμών μεταφοράς, όπως φαίνονται στο σχήμα 21. Για την κατασκευή θα πρέπει να είναι γνωστές οι μήτρες αγωγιμότητας του κάθε στοιχείου που συμμετέχει στο δίκτυο

Με βάση τον παραπάνω κανόνα θα έχουμε

$$[Y_{11}] = [Y_{SS}] + [Y_{line1}], \text{ αντικαθιστώντας από } [Y_{i0}] = Y_{SS} \text{ και } \sum_{j=1}^N Y_{ij} = Y_{line1}$$

$$[Y_{12}] = -[Y_{line1}]$$

Αντίστοιχα για τους υπόλοιπους ζυγούς

$$[Y_{21}] = -[Y_{line1}]$$

$$[Y_{22}] = [Y_{at}] + [Y_{line1}] + [Y_{line2}]$$

$$[Y_{23}] = -[Y_{line2}]$$

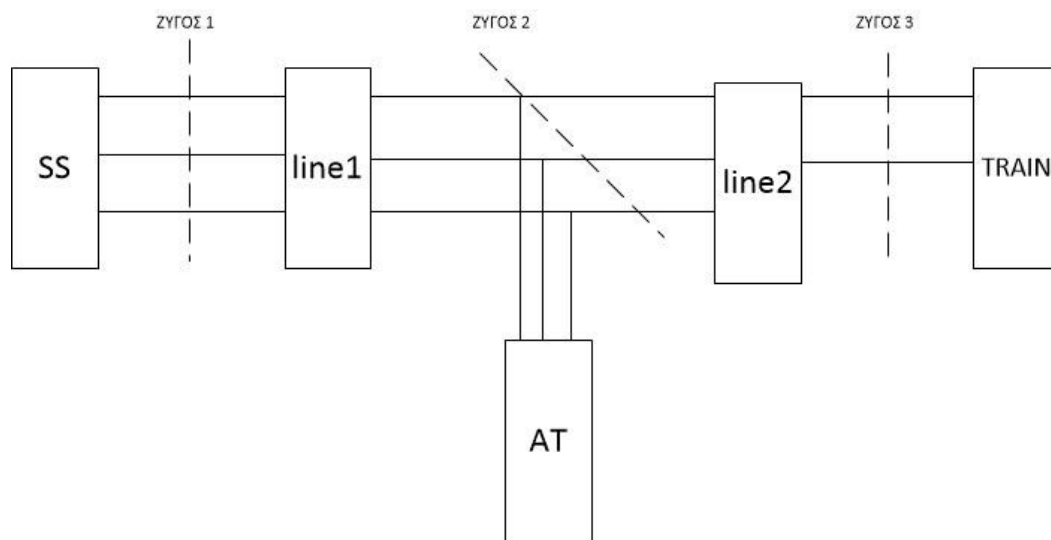
$$[Y_{32}] = -[Y_{line2}]$$

$$[Y_{33}] = [Y_{line2}]$$

Τα υπόλοιπα στοιχεία θα είναι μηδενικοί πίνακες 3x3, καθώς δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των ζυγών άρα δεν μπορεί να υπάρχει κάποια αναπαράσταση στην μήτρα αγωγιμότητας

Η συνολική μήτρα αγωγιμότητας θα έχει την κάτωθι εικόνα

$$[Y] = \begin{bmatrix} [Y_{11}] & [Y_{12}] & [Y_{13}] \\ [Y_{21}] & [Y_{22}] & [Y_{23}] \\ [Y_{31}] & [Y_{32}] & [Y_{33}] \end{bmatrix}, \text{ με μέγεθος } 9 \times 9$$



Σχήμα 21: Τοπολογία με δίκτυο 3 ζυγών για τον υπολογισμό μήτρας αγωγιμότητας

3.7.2 Αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου

Στις παραπάνω ενότητες αναλύθηκαν επαρκώς τα μαθηματικά μοντέλα καθώς και οι μέθοδοι επίλυσης της ροής ισχύος. Παρακάτω αναλύουμε τα δεδομένα εισόδου, τα ζητούμενα και τον αλγόριθμο που ακολουθούμε για την επίλυση του προβλήματος. Ο αλγόριθμος στηρίζεται πάνω στην μέθοδο επίλυσης ροής ισχύος που αναλύσαμε και παραπάνω Sequential Linear power flow method.

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου πρέπει να προσδιορίσουμε τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου, την διαδικασία που ακολουθείται και τα ζητούμενα που πρέπει ο αλγόριθμος να μας επιστρέψει.

Δεδομένα εισόδου:

- η ονομαστική τάση του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή και ο λόγος των τυλιγμάτων
- η συχνότητα του δικτύου
- η ονομαστική ισχύς του τρένου
- ο αριθμός των ζυγών
- ο αριθμός των τρένων
- οι τιμές των αντιστάσεων R και των πηνίων X όλων των μεταβλητών

- η τοπολογία του δικτύου
- οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων στο δίκτυο

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων υπολογίζουμε με βάση τα μαθηματικά μοντέλα κάθε συστήματος, όπως αναλύθηκε παραπάνω, τις εξισώσεις για κάθε σύστημα.

Έτσι έχουμε προσδιορίσει τα ρεύματα στους ζυγούς μέσω της εξίσωσης

$$J_i = J_{SS,i} - J_{TR,i} \quad (3.19)$$

Με βάση τις τιμές των στοιχείων υπολογίζουμε τις μήτρες αγωγιμότητας του κάθε συστήματος. Συνεπώς μπορούμε πλέον μπορούμε να υπολογίσουμε και την συνολική μήτρα αγωγιμότητας του δικτύου. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο επίλυσης ροής ισχύος sequential linear που αναλύθηκε στην ενότητα 3.5.3., αρχικοποιούμε λοιπόν τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς και υπολογίζουμε τα ρεύματα στον υποσταθμό και στα φορτία. Για την εύρεση της νέας τάσης θα πρέπει να υπολογίσουμε τον πίνακα αντιστάσεων που είναι ο αντίστροφος της μήτρας αγωγιμότητας

$$Z = Y^{-1}$$

Με βάση τις συνθήκες ελέγχου η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια σύγκλισης τα οποία αναλύονται διεξοδικά παρακάτω.

Συνθήκες ελέγχου:

Η συνθήκη ελέγχου υλοποιείται μέσω της απλής εντολής matlab while. Ως κριτήριο σύγκλισης έχουμε θέσει τη διαφορά μεταξύ των νέων και των παλιών τάσεων να είναι μικρότερη από μια πολύ μικρή ποσότητα, που έχουμε ορίσει ως ϵ και θέσει ίση με $10^{(-5)}$. Απαιτούμε η διαφορά αυτή να είναι μικρότερη για όλους τους ζυγούς και όλους τους αγωγούς

Υπό τη μορφή εξίσωσης έχουμε:

$$\text{for } k=1:3 \quad V_{new}(i)^{(k)} - V_{old}(i)^{(k)} < \epsilon \quad (3.20), \text{ όπου } k \text{ είναι η αρίθμηση των αγωγών με}$$

$k=1$ για C, με $k=2$ για R και $k=3$ για F και i για κάθε ζυγό.

Με βάση την επιστημονική εργασία [12] η μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι συγκλίνει.

Αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία πλέον γνωρίζουμε τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα ρεύματα σε όλες τις γραμμές. Τέλος υπολογίζουμε σε όλους τους ζυγούς τις εισερχόμενες και εξερχόμενες ισχύεις, ενεργές και άεργες μέσω των εξισώσεων:

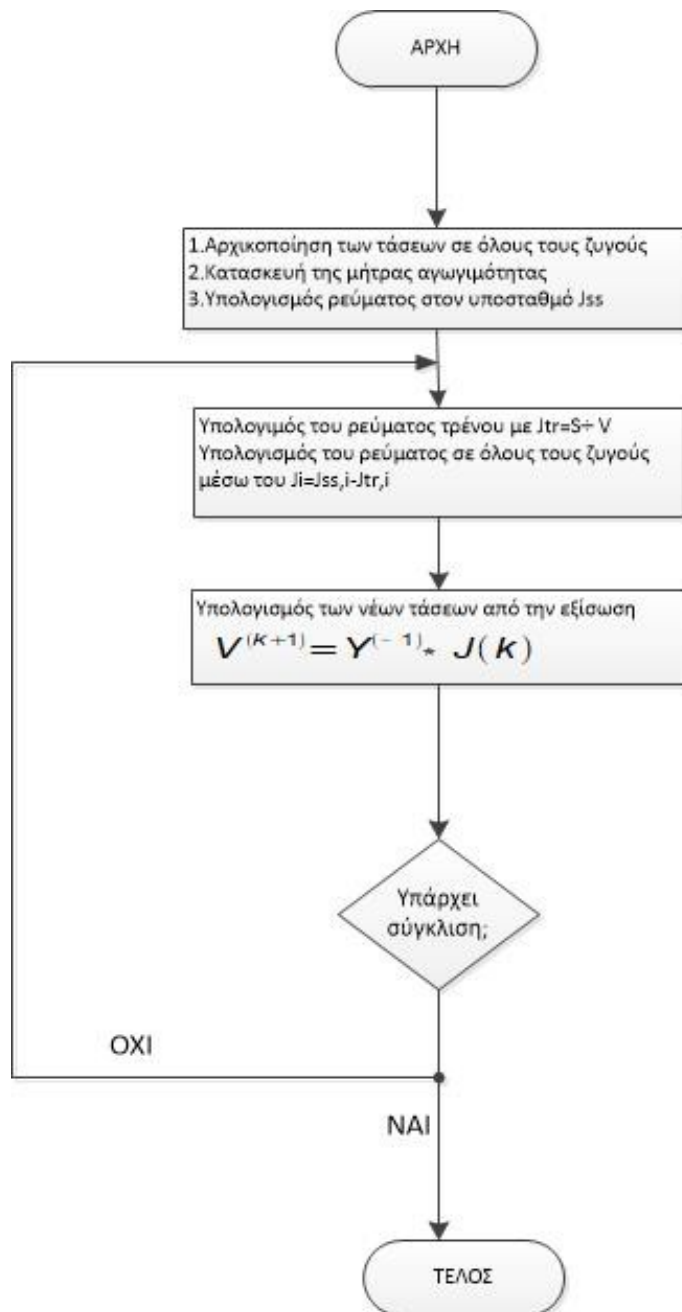
$$S = V * I^* = P + j * Q \quad \text{και} \quad P = \text{real}(S) \quad \text{και} \quad Q = \text{imag}(S) \quad (3.21)$$

Δεδομένα εξόδου:

- οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς

- τα ρεύματα σε όλους τους ζυγούς και τα ρεύματα γραμμών
- η ενεργός και άεργος ισχύς στους ζυγούς και στις γραμμές
- 2: Ονομαστικές τιμές στοιχείων αριθμός επανάληψεων της επαναληπτικής διαδικασίας

Παραθέτουμε παρακάτω ένα διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που υλοποιήσαμε για να γίνει πιο κατανοητός.



Σχήμα 22: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου

4 Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα που εκτελέσαμε. Οι προσομοιώσεις έχουν εκτελεστεί σε Matlab και Matlab-Simulink. Στην πρώτη ενότητα παρατίθενται οι τιμές των στοιχείων που προκύπτουν από τον προσδιορισμό παραμέτρων που έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3. Αφού έχουμε προσδιορίσει τις τιμές όλων των στοιχείων, παρουσιάζουμε τα σενάρια που έχουμε εκτελέσει για αυτές τις περιπτώσεις. Οι πλατφόρμες που έχουμε εργαστεί για την παραγωγή των προσομοιώσεων και των αποτελεσμάτων είναι το MATLAB/R2016b και το SIMULINK.

Πέντε είναι οι περιπτώσεις που έχουμε εξετάσει, και αφορούν και οι τέσσερις την κατάσταση του τρένου. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις ο συντελεστής ισχύος για το φορτίο του τρένου έχει οριστεί ίση με τη μονάδα. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζουμε το τρένο να επιταχύνει και συνεπώς η ενεργός ισχύς να είναι θετική. Στην δεύτερη περίπτωση εξετάζουμε το τρένο να σταματάει και συνεπώς η ενεργός ισχύς να είναι αρνητική. Στις επόμενες δύο περιπτώσεις ο συντελεστής ισχύος του τρένου έχει οριστεί ίσος με 0.9. Αντίστοιχα στην τρίτη περίπτωση το τρένο επιταχύνει και στην τέταρτη περίπτωση το τρένο σταματάει. Τέλος στην πέμπτη περίπτωση εξετάζουμε δύο τρένα με τον ίδιο συντελεστή ισχύος ίσο με μονάδα. Το πρώτο βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, και η ισχύς του είναι αρνητική, και το δεύτερο εκείνη την στιγμή επιταχύνει, και η ισχύς του αντίστοιχα είναι θετική.

Οι προσομοιώσεις που έχουμε κάνει αναπαριστούν στιγμιότυπα της κίνησης του τρένου σε συγκεκριμένες θέσεις και καταστάσεις, και δεν μελετούμε την κίνηση του τρένου. Αρχικά γίνεται η εκτέλεση για τις τέσσερις περιπτώσεις σε ένα δίκτυο αποτελούμενο από τρεις ζυγούς. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση δύο δικτύων για τις πέντε περιπτώσεις. Και τα δύο δίκτυα αποτελούνται από πέντε ζυγούς. Στο πρώτο χρησιμοποιείται ως τρόπος τροφοδότησης αυτός με τους αυτομετασχηματιστές (AT-fed) και στο δεύτερο αυτός με την απευθείας σύνδεση (direct feeder) και χωρίς αγωγό επιστροφής. Τέλος γίνεται συνοπτική παρουσίαση του αλγορίθμου που αναπτύξαμε σε

Matlab και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε Simulink, στην δεύτερη και τέταρτη περίπτωση.

4.1 Προσδιορισμός παραμέτρων

Έχοντας αναλύσει στο κεφάλαιο 3 τη μαθηματική μοντελοποίηση όλων των στοιχείων που χρησιμοποιούμε στο δίκτυο μας, θα προχωρήσουμε στον αριθμητικό ορισμό τους. Βασιζόμενοι στο έχουμε τις ονομαστικές τιμές των στοιχείων. Ακόμη έχουμε τις απαραίτητες πειραματικές τιμές για την δοκιμή βραχυκυκλώματος και ανοιχτού κυκλώματος, που προκύπτουν με αυτές τις ονομαστικές τιμές. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι απαραίτητες τιμές για τον υποσταθμό, τον αυτομετασχηματιστή και το τρένο. Οι τιμές βασίζονται στις επιστημονικές μελέτες [13,14].

Πίνακας 2: Ονομαστικές τιμές στοιχείων

Υποσταθμός	
Ισχύς βραχυκυκλώματος	10GVA
Ονομαστική Τάση	220/2*27.7kV
Ονομαστική Ισχύς	15MVA
Τάση βραχυκυκλώματος	10.50%
Ισχύς βραχυκυκλώματος	79.108kW
Ρεύμα ανοιχτού κυκλώματος	0.18%
Ισχύς ανοιχτού κυκλώματος	35.435kW
Αυτομετασχηματιστής	
Ονομαστική Τάση	55/27.5kV
Ονομαστική Ισχύς	10MVA
Τάση βραχυκυκλώματος	1.30%
Ισχύς βραχυκυκλώματος	34.813kW
Ρεύμα ανοιχτού κυκλώματος	0.08%
Ισχύς ανοιχτού κυκλώματος	11.293kW
Ισχύς τρένου	1.2MW

Με βάση τις τιμές που έχουμε από τον παραπάνω πίνακα προχωρούμε με βάση τις μαθηματικές εξισώσεις όπως αυτές διατυπώθηκαν στο 3ο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα:

Για τον υποσταθμό:

- η τάση του πρωτεύοντος του κυκλώματος είναι 220 kV.
- η συχνότητα που λειτουργεί το δίκτυο είναι 50 Hz.
- η τάση του δευτερεύοντος κυκλώματος είναι 55 kV με 27.5 kV σε κάθε ένα από τα δύο τυλίγματα.
- από τις εξισώσεις (3.1-3.2) έχουμε $Z_1 = Z_2 = \frac{Z_{eq2}}{2} + a^2 * \frac{Z_{eq2}}{2} = 0.4068 + j53.9947$ (Ω)
- από τις εξισώσεις (3.3-3.4) έχουμε $Z_m = 1.3569 * 10^6 + j2.7426 * 10^5$ (Ω)
- Ακόμη έχουμε $Z_e = 0.1$ (Ω)

Αποδεικνύεται και αριθμητικά το ότι ο κλάδος μαγνήτισης έχοντας μεγάλη σύνθετη αντίσταση δημιουργεί ανεπαίσθητο ρεύμα διέγερσης και επομένως μπορεί να παραληφθεί, χωρίς να αλλάξει το αποτέλεσμα σημαντικά.

Για τον αυτομετασχηματιστή:

- από τις εξισώσεις έχουμε $Z_g = 0.1692 + j0.7371$ (Ω)
- από τις εξισώσεις έχουμε $Z_m = 2.6787 * 10^6 + j6.7084 * 10^5$ (Ω)

Αποδεικνύεται το ίδιο για το κλάδο μαγνήτισης, όπως και στον μετασχηματιστή

Για τις γραμμές μεταφοράς έχουμε:

- Για τις ίδιες σύνθετες αντιστάσεις:
 - $Z_{cc} = 0.165 + j0.7522$ ($\frac{\Omega}{km}$) η σύνθετη αντίσταση του αγωγού C
 - $Z_{rr} = 0.1566 + j0.6709$ ($\frac{\Omega}{km}$) η σύνθετη αντίσταση του αγωγού R
 - $Z_{ff} = 0.1135 + j0.8847$ ($\frac{\Omega}{km}$) η σύνθετη αντίσταση του αγωγού F
- Για τις αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις :
 - $Z_{cf} = 0.048 + j0.3401$ ($\frac{\Omega}{km}$) η σύνθετη αντίσταση μεταξύ C και F
 - $Z_{cr} = 0.0491 + j0.3222$ ($\frac{\Omega}{km}$) η σύνθετη αντίσταση μεταξύ C και R
 - $Z_{fr} = 0.0488 + j0.2988$ ($\frac{\Omega}{km}$) η σύνθετη αντίσταση μεταξύ F και R

4.2 Προσομοιώσεις

Οι προσομοιώσεις που έχουμε εκτελέσει είναι όλες στο simulink και παράλληλα στο matlab μέσω του αλγορίθμου που έχουμε αναπτύξει. Παρουσιάζουμε τις μετρήσεις για κάθε ζυγό για την τάση, μέτρο σε V και γωνία σε deg, και την ισχύ, ενεργό σε kW και άεργο σε kVAR. Ακόμη μέσω σχημάτων παρουσιάζονται οι τοπολογίες των δικτύων που υλοποιήσαμε στο simulink. Στις περιπτώσεις που ο συντελεστής ισχύος του φορτίου είναι 0.9 έχουμε $P=1.08\text{MW}$ και $Q=0.12\text{MVar}$. Οι υπόλοιπες τιμές για τα στοιχεία που χρησιμοποιούμε είναι αυτές που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.1. Η τοποθέτηση του κάθε στοιχείου σε όλα τα δίκτυα που παραθέτουμε γίνεται ανά 5km.

Η μοντελοποίηση των μετασχηματιστών και του αυτομετασχηματιστή στο Simulink φαίνονται στα σχήματα 24,25. Τέλος η μοντελοποίηση του τρένου στο Simulink έγιναν με την χρήση του μοντέλου three phase dynamic load και μέσω κατάλληλης συνδεσμολογίας (σύνδεση της φάσης b με την c) χρησιμοποιήθηκε ως μονοφασικό δυναμικό φορτίο.

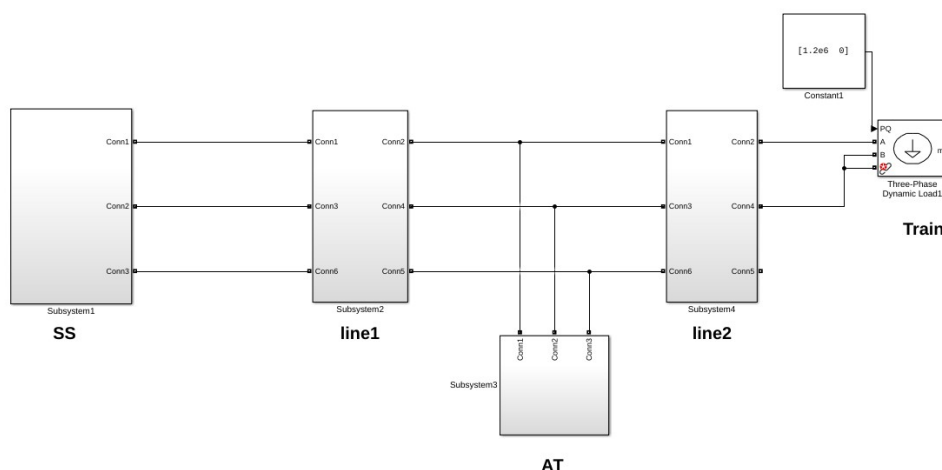
Σε όλες τις περιπτώσεις οι ισχείς στους ζυγούς υπολογίζεται ως

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \text{ , όπου } S_{Gi} \text{ η ισχύς που παράγεται σε κάθε ζυγό}$$

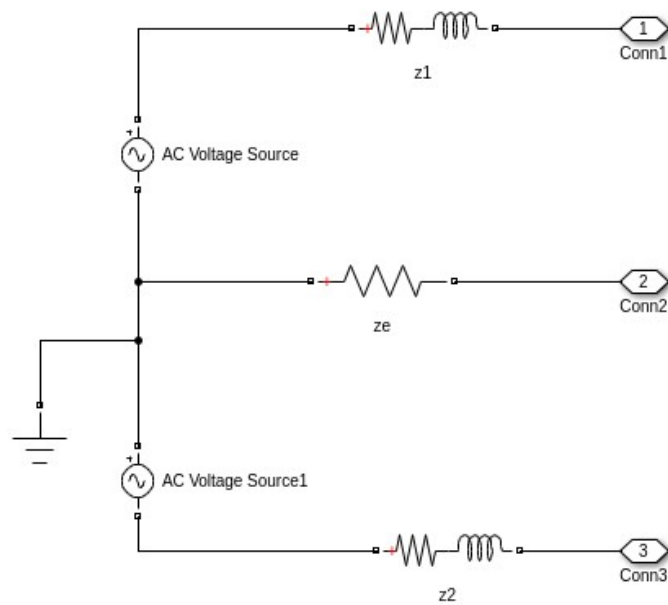
και S_{Di} η ισχύς που καταναλώνεται σε κάθε ζυγό

4.2.1 Δίκτυο AT-fed με 3 ζυγούς

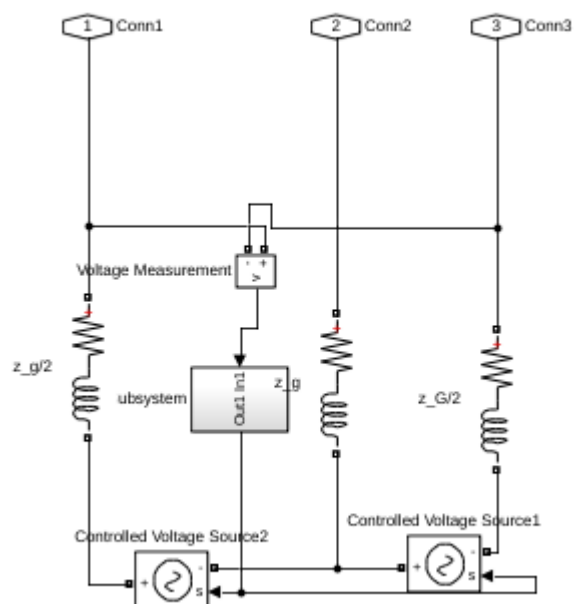
Στην πρώτη προσομοίωση έχουμε ένα δίκτυο με 3 ζυγούς. Το δίκτυο αποτελείται από έναν υποσταθμό, έναν αυτομετασχηματιστή και ένα τρένο. Προφανώς μεταξύ των στοιχείων τοποθετούνται γραμμές μεταφοράς, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Στο παρακάτω σχήμα δείχνουμε πως είναι συνδεδεμένα τα στοιχεία στο simulink.



Σχήμα 23 : Δίκτυο με 3 ζυγούς



Σχήμα 24: Ο μετασχηματιστής του υποσταθμού ,όπως είναι κατασκευασμένος στο Simulink



Σχήμα 25:Ο αυτομετασχηματιστής ,όπως είναι κατασκευασμένος στο Simulink

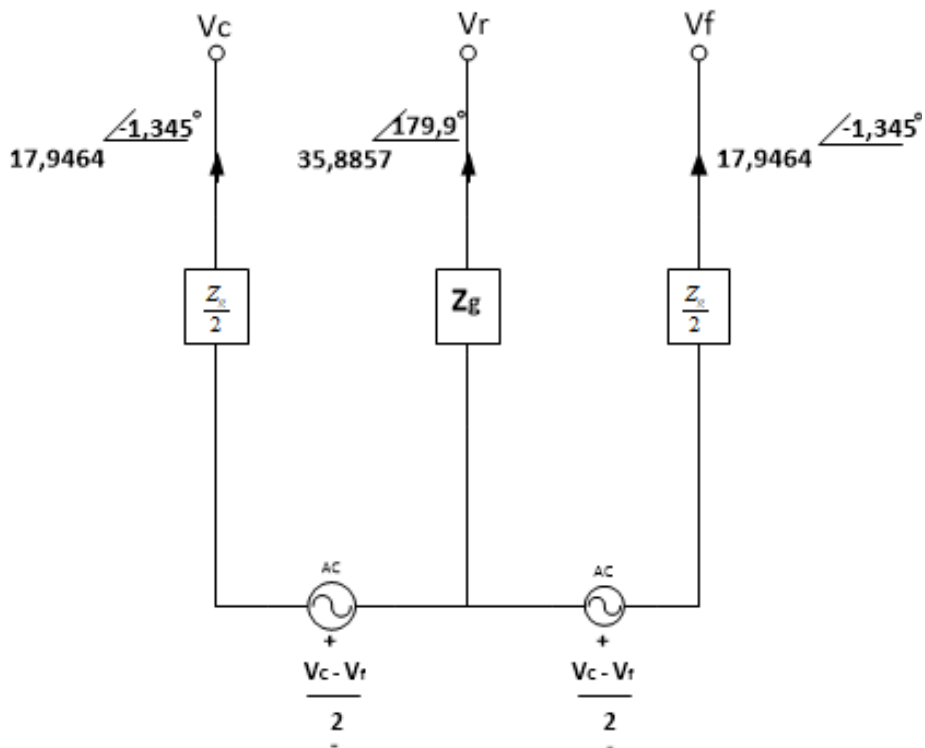
1η περίπτωση($P>0$, $PF=1$)

Στην πρώτη περίπτωση εξετάζουμε το δίκτυο με το τρένο να επιταχύνει και ο συντελεστής ισχύος του να είναι ίσο με μονάδα.

Πίνακας 3:Αποτελέσματα *simulink* για δίκτυο με 3 ζυγούς στην 1η περίπτωση

Αριθμός ζυγού	Αγωγός	Μέτρο τάσης rms (V)	Γωνία τάσης(deg)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1				1204	12.19
	C	27490	-0.7249		
	R	0.7777	-4.59		
	F	27500	179.5		
2				-0.55	-2.39
	C	27470	-0.8365		
	R	12.53	61.49		
	F	27490	179.4		
3				-1201	0
	C	27450	-1.033		
	R	92.26	70.28		
	F	27490	179.4		

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα μπορούμε να δούμε την διαφορά στην πτώση τάσης μεταξύ των δύο αγωγών, του αγωγού επαφής C και του παράλληλου τροφοδότη F. Η πτώση τάσης είναι λογικά μεγαλύτερη στον C καθώς είναι αυτός που έρχεται σε επαφή με το τρένο. Ακόμα παρατηρούμε ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στο κύκλωμα επιστροφής στον αγωγό R είναι μικρές ποσότητες. Αυτό είναι και από τους στόχους του δικτύου καθώς μεγαλύτερη τάση θα μπορούσε να προκαλέσει παρεμβολές με τα άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που υπάρχουν κοντά στον σιδηρόδρομο. Ειδικά στον δεύτερο ζυγό που είναι εγκάρσια τοποθετημένος ο αυτομετασχηματιστής μπορούμε να δούμε πως η τάση και στους τρεις αγωγούς είναι ανορθωμένη. Για αυτό το λόγο παραθέτουμε εικόνα από τον αυτομετασχηματιστή σε εκείνη περίπτωση στο σχήμα. Τέλος, σχετικά με την ισχύ που βλέπουμε πρέπει να σημειώσουμε ότι η άεργος ισχύς που παράγεται είναι λόγω των επαγωγικών αντιστάσεων που υπάρχουν στις γραμμές μεταφοράς κυρίως.



Σχήμα 26: Τα ρεύματα που αναπτύσσονται στον αυτομετασχηματιστή στην 1η περίπτωση

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο αυτομετασχηματιστής μέσω του αγωγού R απορροφά ένα ρεύμα από το δίκτυο, το οποίο είναι διπλάσιο από αυτό που αναπτύσσεται στους αγωγούς C και F. Μπορούμε να καταλάβουμε λοιπόν ότι το ρεύμα που γυρνάει μέσω του κυκλώματος επιστροφής, ξαναεπιστρέφει στο δίκτυο μέσω του αγωγού επαφής και του παράλληλου τροφοδότη. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται το ρεύμα που αναπτύσσεται στο R και επίσης επιχειρείται η ακύρωση της ασυμμετρίας που τείνει να δημιουργηθεί μεταξύ των ζυγών. Αυτό φαίνεται και από τον τρόπο που είναι κατανομημένα τα ρεύματα στους αγωγούς, αλλά και από τον τρόπο που είδαμε στον παραπάνω πίνακα να "κρατιέται" η τάση.

2η περίπτωση ($P > 0, PF = 0.9$)

Στην δεύτερη περίπτωση εξετάζουμε το δίκτυο με το τρένο να επιταχύνει και ο συντελεστής ισχύος του να είναι ίσο με 0.9.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα simulink για δίκτυο με 3 ζυγούς στην 2η περίπτωση

Αριθμός ζυγού	Αγωγός	Μέτρο τάσης rms (V)	Γωνία τάσης(deg)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1				1083	130
	C	27460	-0.6519		
	R	0.7055	-10.79		
2	F	27470	179.5		
				-0.45	-1.97
	C	27440	-0.7494		
3	R	11.37	55.29		
	F	27460	179.5		
				-1081	-120
	C	27400	-0.9212		
	R	83.7	64.08		
	F	27460	179.5		

Στην συγκεκριμένη περίπτωση και λόγω του συντελεστή ισχύος που ισούται με 0.9 είναι λογικό να έχουμε αυξημένη άεργο ισχύ. Η παρουσία της οφείλεται και για την μεγαλύτερη πτώση τάσης που παρατηρούμε σε όλους τους αγωγούς σε σχέση με την 1η περίπτωση.

3η περίπτωση($P < 0, PF = 1$)

Σε αυτή την περίπτωση καταγράφουμε τα αποτελέσματα στην κατάσταση που το τρένο σταματάει και με συντελεστή ισχύος 0.9. Χρησιμοποιώντας την αναγεννητική πέδηση το τρένο από φορτίο που ήταν και καταναλώνει ενέργεια, τώρα λειτουργεί ως γεννήτρια δίνοντας ενέργεια στο σύστημα. Όπως φαίνεται και στον πίνακα παρακάτω δημιουργείται υπέρταση στο δίκτυο, κάτι που ήταν αναμενόμενο. Ήταν αναμενόμενο καθώς για να μπορέσει το τρένο να στείλει "πίσω" στον υποσταθμό την ενέργεια θα πρέπει να βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό σε σχέση με τον υποσταθμό που είναι η πηγή τάσης.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα *simulink* για δίκτυο με 3 ζυγούς στην 3η περίπτωση

Αριθμός ζυγού	Αγωγός	Μέτρο τάσης rms (V)	Γωνία τάσης(deg)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1				-1196	12.03
	C	27500	0.7202		
	R	0.7724	177.8		
2	F	27490	-179.5		
				-0.54	-2.360
	C	27520	0.8315		
3	R	12.45	-116.1		
	F	27500	-179.4		
				1199	0
	C	27540	1.026		
	R	91.64	-107.3		
	F	27500	-179.4		

Ακόμα παρατηρείται η κατεύθυνση της ισχύς να είναι αρνητική στον υποσταθμό που είναι λογικό καθώς πλέον το τρένο στέλνει την ενεργό ισχύ που δεν καταναλώνει, λόγω της πέδησης, στον υποσταθμό.

4η περίπτωση($P < 0, PF = 0.9$)

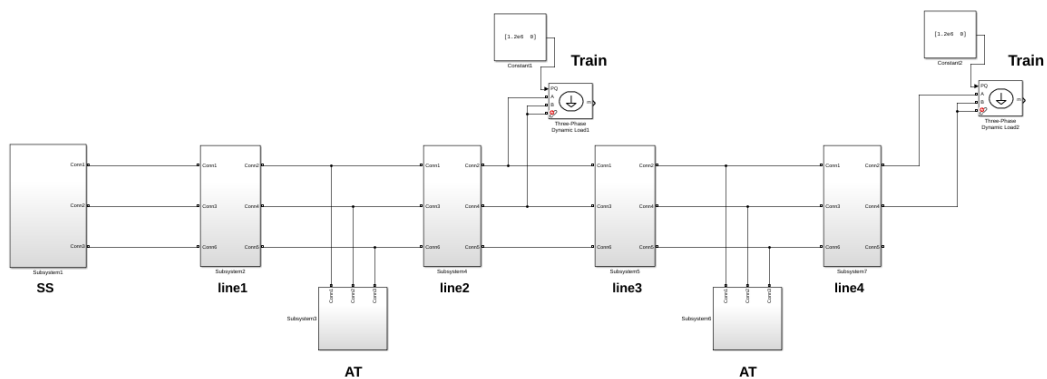
Σε αυτή την περίπτωση εξετάζουμε το δίκτυο με το τρένο να σταματάει και τον συντελεστή ισχύος του να είναι 0.9. Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση παρατηρείται αύξηση της τάσης. Αν και παρατηρείται το ίδιο μέγεθος αύξησης της τάσης σε σχέση με πριν μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η τάση βρίσκεται σε μεγαλύτερα επίπεδα. Το τελευταίο οφείλεται στην ύπαρξη άεργου ισχύος.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα simulink για δίκτυο με 3 ζυγούς στην 4η περίπτωση

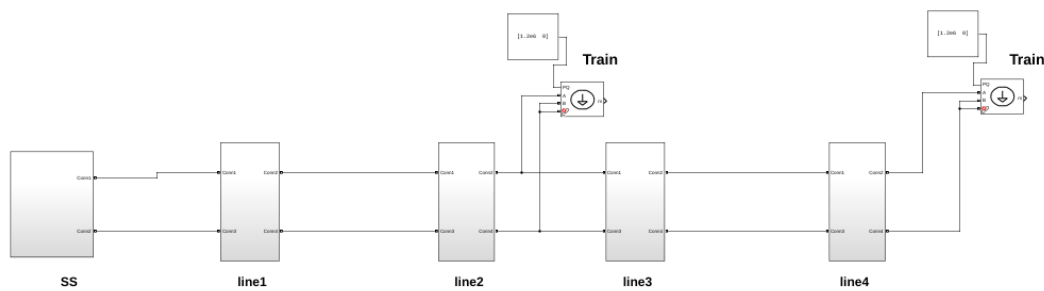
Αριθμός ζυγού	Αγωγός	Μέτρο τάσης rms (V)	Γωνία τάσης(deg)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1				-1077	-110.2
	C	27540	0.6462		
	R	0.6981	171.4		
2	F	27520	-179.5		
	C	27550	0.7429		
	R	11.25	-122.6		
3	F	27530	-179.5		
	C	27590	0.9125		
	R	82.82	-113.8		
	F	27530	-179.5		

4.2.2 Σύγκριση δικτύου με AT-fed και direct feeder

Στην δεύτερη προσομοίωση έχουμε ένα δίκτυο που αποτελείται από 5 ζυγούς, τη μια φορά τροφοδοτούμενο με μετασχηματιστές και την δεύτερη τροφοδοτούμενο απευθείας από την πηγή. Το δίκτυο μας αποτελείται από έναν υποσταθμό, δύο αυτομετασχηματιστές και δύο τρένα. Οι μετρήσεις έχουν γίνει μέσω simulink και δείχνουν σε κάθε ζυγό την τάση (το μέτρο και τη γωνία) και την εισερχόμενη ισχύ(ενεργό και άεργο). Στις γραμμές των πινάκων που αναγράφεται C-R έχουμε υπολογίσει την πτώση τάσης μεταξύ αγωγού C και αγωγού R στους ζυγούς των τρένων.



Σχήμα 27: Δίκτυο 5 ζυγών με τροφοδοσία AT-fed



Σχήμα 28: Δίκτυο 5 ζυγών με τροφοδοσία *direct feeder*

1η περίπτωση ($P > 0, PF = 1$)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα δύο τρένα να κινούνται στο δίκτυο επιταχύνοντας και με συντελεστή ισχύος 1.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα *simulink* τάσης για δίκτυα με *AT-fed* και *direct feeder* στην 1η περίπτωση

Δίκτυο		AT Fed		Direct Feeder	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27480	-1.332	27430	-2.486
	R	0.703	0.3793	8.843	-4.286
2	C	27450	-1.537	27370	-2.88
	R	8.631	61.3	164.1	65.64
3	C	27420	-1.805	27320	-3.276
	R	67.34	71.39	325.4	67.1
	C-R	27,352.76	-73	26960	-70.4
4	C	27410	-1.887	27290	-3.475
	R	46.29	74.04	406.2	67.32
5	C	27380	-2.074	27260	-1.309
	R	126.3	71.82	487.0	67.47
	C-R	27253.7	-73	26759	-68

Στον παραπάνω πίνακα ,όπως φαίνεται ,η τάση μειώνεται με μικρότερο βαθμό στο δίκτυο με *AT-fed* ενώ με αρκετά μεγαλύτερο βαθμό στο δίκτυο με *direct feeder*. Επίσης φαίνονται τα πλεονεκτήματα χρήσης της τροφοδότησης με αυτομετασχηματιστές καθώς

η πτώση τάσης συνολικότερα είναι μικρότερη. Για παράδειγμα η πτώση τάσης από τον πρώτο στον τελευταίο ζυγό στον αγωγό C είναι 120V για δίκτυο με AT-fed ενώ 240V για δίκτυο με direct feeder, δηλαδή διπλάσια.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα simulink ισχύος για δίκτυα με AT-fed και direct feeder στην 1η περίπτωση

Ζυγός	AT Fed		Direct Feeder	
	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1	2411	37.58	2423	76.17
2	-0.31	-1.34	0	0
3	-1200	0	-1200	0
4	-1.23	-5.34	0	0
5	-1201	0	-1201	0

2η περίπτωση($P > 0, PF = 0.9$)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα δύο τρένα να κινούνται στο δίκτυο επιταχύνοντας και με συντελεστή ισχύος 0.9 .

Πίνακας 9: Αποτελέσματα simulink τάσης για δίκτυα με AT-fed και direct feeder στην 2η περίπτωση

Δίκτυο		AT Fed		Direct Feeder	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27420	-1.201	27320	-2.243
	R	0.6386	-5.733	8.057	-10.160
2	C	27380	-1.380	27250	-2.59
	R	7.840	55.18	149.6	59.76
3	C	27340	-1.616	27180	-2.939
	R	61.18	65.27	296.5	61.22
	C-R	27,280.00	-67	26,984.5	-63
4	C	27330	-1.679	27150	-3.114
	R	42.06	67.95	370.1	61.45
5	C	27300	-1.853	27110	-3.290
	R	114.8	65.74	443.8	61.61
	C-R	27,185.2	-68	26,667.2	-64.9

Σε συνέχεια των όσων αναφέραμε στην πρώτη περίπτωση παρατηρούμε την διαφορά στο βαθμό πτώσης της τάσης με τους δύο διαφορετικούς τρόπους τροφοδότησης. Ακόμα παρατηρούμε την μεγάλη τιμή που αναπτύσσεται στο κύκλωμα επιστροφής στον αγωγό R. Επίσης φαίνεται πως επενεργούν οι αυτομετασχηματιστές. Παρατηρώντας τον ζυγό 4 μπορούμε να δούμε το "κράτημα" της τάσης ,που δημιουργεί η παρουσία του αυτομετασχηματιστή,σε σχέση με το δίκτυο με direct feeder.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα simulink ισχύος για δίκτυα με AT-fed και direct feeder στην 2η περίπτωση

Δίκτυο		AT Fed		Direct Feeder	
Ζυγός		Ενεργός ισχύς(W)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(W)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1		2169	271	2180	303.2
2		-0.25	-1.1	0	0
3		-1080	-120	-1080	-120
4		-1.01	-4.41	0	0
5		-1080	-120	-1080	-120

3η περίπτωση($P < 0, PF = 1$)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα δύο τρένα να κινούνται στο δίκτυο κατά την διάρκεια πέδησης και με συντελεστή ισχύος 1.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα *simulink* τάσης για δίκτυα με *AT-fed* και *direct feeder* στην 3η περίπτωση

Δίκτυο		AT Fed		Direct Feeder	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27490	1.321	27450	2.437
	R	0.6967	-175.500	8.663	-175.800
2	C	27510	1.524	27490	2.83
	R	8.559	-114.6	160.8	-105.9
3	C	27550	1.791	27540	3.218
	R	66.78	-104.5	318.8	-104.4
	C-R	27483.20	-106	27221.20	-107.6
4	C	27550	1.862	27560	3.412
	R	45.82	-101.5	397.6	-104.1
5	C	27580	2.056	27590	3.606
	R	125.0	-103.6	476.5	-103.8
	C-R	27,455.0	-106	27,113.5	-107

Τα συμπεράσματα που έχουμε μέχρι στιγμής φαίνονται και σε αυτή την περίπτωση. Σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση στην 1η προσομοίωση μπορούμε να δούμε πως με την τοποθέτηση επίπλεον τρένων και ζυγών υπάρχει μεγαλύτερη αύξηση της τάσης. Ακόμη σε αυτή την περίπτωση φαίνεται χαρακτηριστικά πόσο μεγαλύτερος βαθμός πτώσης τάσης υπάρχει στο δεύτερο σύστημα.

Πίνακας 12 :Αποτελέσματα simulink ισχύος για δίκτυα με AT-fed και direct feeder στην 3η περίπτωση

Δίκτυο	AT Fed		Direct Feeder	
	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1	-2390	36.88	-2378	73
2	-0.3	-1.31	0	0
3	1200	15.35	1201	0
4	-1.2	-5.24	0	0
5	1199	0	1199	0

4η περίπτωση($P>0,PF=0.9$)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα δύο τρένα στο δίκτυο να φρενάρουνε και ο συντελεστής ισχύος τους είναι 0.9.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα simulink τάσης για δίκτυα με AT-fed και direct feeder στην 4η περίπτωση

Δίκτυο		AT Fed		Direct Feeder	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27550	1.185	27580	2.183
	R	0.6288	177.900	7.791	-177.400
2	C	27590	1.362	27640	2.52
	R	7.725	-121.2	144.6	-112.7
3	C	27630	1.593	27700	2.857
	R	60.26	-111.1	286.7	-111.3
	C-R	27,570.70	-113	27,413.3	-114
4	C	27640	1.655	27730	3.025
	R	41.34	-108.1	357.6	-110.9
5	C	27670	1.824	27760	3.193
	R	112.8	-110.2	428.5	-110.7
	C-R	27,557.2	-113	27,331.5	-113

Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση βλέπουμε την μεγαλύτερη αύξηση τάσης στο δεύτερο δίκτυο

Πίνακας 14: Αποτελέσματα simulink ισχύος για δίκτυα με AT-fed και direct feeder στην 4η περίπτωση

Ζυγός	AT Fed		Direct Feeder	
	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1	-2151	-210	-2142	-181
2	-0.25	-1.07	0	0
3	1080	120	1081	121
4	-0.98	-4.27	0	0
5	1079	120	1079	120

5η περίπτωση($P1 < 0, P2 > 0, PF = 1$)

Σε αυτή τη περίπτωση τα δύο τρένα του δικτύου είναι στην ακριβώς αντίθετη κατάσταση, αν και ο συντελεστής ισχύος και των δύο είναι 1. Έτσι ενώ το πρώτο τρένο φρενάρει το δεύτερο επιταχύνει. Δημιουργείται λοιπόν μια κατάσταση που δεν επιστέφεται όλη η ενέργεια των φορτίων στον υποσταθμό, αλλά το επιβραδυνόμενο τροφοδοτεί το τρένο που επιταχύνει εκείνη τη στιγμή.

Πίνακας 15: Αποτελέσματα *simulink* τάσης για δίκτυα με *AT-fed* και *direct feeder* στην 5η περίπτωση

Δίκτυο		AT Fed		Direct Feeder	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27500	0.027	27490	-0.006
	R	0.2110	171.700	0.058	-68.830
2	C	27500	0.031	27490	-0.01
	R	4.056	-118.1	1.084	1.09
3	C	27500	0.062	27490	-0.006
	R	28.92	-110	2.149	2.56
	C-R	27,471.00	-110	27488.000	-2.56
4	C	27480	-0.103	27460	-0.202
	R	25.85	77.98	80.8	70.72
5	C	27460	-0.299	27440	-0.389
	R	105.6	73.73	160.7	71.44
	C-R	27,534.4	-74	27,279.0	-71

Αρχικά για το σύστημα με τους αυτομετασχηματιστές παρατηρούμε πως μέχρι τον ζυγό που υπάρχει το πρώτο τρένο που επιβραδύνει, η πτώση τάσης είναι μηδαμινή. Η πτώση τάσης εμφανίζεται μόνο μεταξύ των ζυγών από το πρώτο στο δεύτερο τρένο. Αυτό είναι κάτι λογικό, που είδαμε και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Καθώς το πρώτο τρένο τροφοδοτεί το δεύτερο θα πρέπει να είναι σε υψηλότερο δυναμικό, ώστε να κατευθυνθεί προς το δεύτερο τρένο το ρεύμα.

Ακόμα η λογική αυτή της τροφοδότησης του επιταχυνόμενου τρένου από το επιβραδυνόμενο βλέπουμε να λειτουργεί ικανοποιητικά και στο δεύτερο δίκτυο με *direct feeder*. Ωστόσο παρατηρείται και εδώ η μεγαλύτερη σε σχέση με το πρώτο δίκτυο τάση στο κύκλωμα επιστροφής. Βλέπουμε με το βαθμό που αυξάνει η τάση στον αγωγό R μεταξύ 2 ζυγών, λόγω της απουσίας των αυτομετασχηματιστών.

Πίνακας 16: Αποτελέσματα simulink ισχύος για δίκτυα με AT-fed και direct feeder στην 5η περίπτωση

Ζυγός	AT Fed		Direct Feeder	
	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1	0.52	1.32	0.58	1.5
2	-0.05	-0.23	0	0
3	1200	0	1202	0
4	-0.08	-0.33	0	0
5	-1200	0	-1201	0

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε τις κατευθύνσεις των ισχύων που αναπτύσσονται στην περίπτωση αυτή. Είναι χαρακτηριστικό ότι μέχρι τον ζυγό 3 το δίκτυο μέσω του υποσταθμού απαιτείται να παρέχει πολύ μικρές ποσότητες ενέργειας. Ουσιαστικά ολόκληρη η παροχή ενέργειας στο δεύτερο τρένο γίνεται από το πρώτο, και στις δύο περιπτώσεις.

4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων σε Matlab και Simulink

Ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε στην ενότητα 3.7 υλοποιήθηκε σε matlab. Η υλοποίηση του περιλαμβάνει ως

Δεδομένα εισόδου:

- τις τιμές όλων των στοιχείων, όπως προέκυψαν από την ενότητα 4.1
- την απόσταση μεταξύ των στοιχείων στο δίκτυο, όπως οριστικοποιήθηκε στο 4.1 $d=5\text{km}$
- την αρχικοποιημένη τάση για όλους τους ζυγούς $V_i = \begin{bmatrix} 2.75e4 \\ 0 \\ -2.75e4 \end{bmatrix}$
- την φαινόμενη ισχύ του τρένου και τον συντελεστή ισχύος του
- την τοπολογία του δικτύου

Ο αλγόριθμος μας είναι κατασκευασμένος για να:

- κατασκευάζει την μήτρα αγωγιμότητας για κάθε στοιχείο με βάση τις εξισώσεις που έχουν προκύψει από την μαθηματική μοντελοποίηση κάθε στοιχείου στο κεφάλαιο 3
- κατασκευάζει την συνολική μήτρα αγωγιμότητας με βάση την τοπολογία που του

δίνεται

- υλοποιεί την επαναληπτική διαδικασία όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.7.2
- υπολογίζει όλα τα σχετικά μεγέθη για έναν ζυγό:
 - την τάση, μέτρο και γωνία
 - το ρεύμα ,μέτρο και γωνία
 - την ισχύ ,ενεργό και άεργο
- υπολογίζει τις φορές επανάληψης της επαναληπτικής μεθόδου

Πιο συγκεκριμένα για την κατασκευή της μήτρας αγωγιμότητας, λόγω της πολυπλκότητας του δικτύου προκύπτει για το συγκεκριμένο δίκτυο ένας πίνακας 15x15 . Για να κάνουμε σαφές πως διατάσσονται τα στοιχεία στην μήτρα ακολουθούμε την διαδικασία που αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.7.1

Για καλύτερη κατανόηση παραθέτουμε το στοιχείο στη θέση 11 της συνολικής μήτρας αγωγιμότητας όπως προέκυψε από τον υπολογισμό στο matlab:

$$[Y11] = \begin{bmatrix} 0.0894 - i*0.4168 & -0.043 + i*0.1188 & -0.0192 + i*0.0916 \\ -0.043 + i*0.1188 & 10.099 - i*0.3725 & -0.0131 + i*0.0816 \\ -0.0192 + i*0.0916 & -0.0131 + i*0.0816 & -0.0395 - i*0.3597 \end{bmatrix}$$

Η σύγκριση των αποτελέσμων που προέκυψαν σε simulink και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον αλγόριθμο που υλοποιήσαμε σε matlab , γίνεται καθώς ο αλγόριθμος επίλυσης ροής ισχύος που υλοποιείται στο simulink δεν είναι ο ίδιος. Το Simulink υλοποιεί τον βέλτιστο αλγόριθμο για την τοπολογία που κατασκευάσαμε. Έτσι μπορεί να υλοποιεί μεθόδους όπως Newton-Raphson ή Backward-Forward. Συνεπώς έχει νοήμα να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα διαφορετικών μεθόδων, για την επιβεβαίωση της μεθόδου που αναπτύξαμε και υλοποιήσαμε σε matlab.

1η περίπτωση (P>0, PF=1)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα δύο τρένα να κινούνται στο δίκτυο επιταχύνοντας και με συντελεστή ισχύος 1.

Πίνακας 17: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την τάση στην 1η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Πρόγραμμα		Simulink		Matlab	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27480	-1.332	27481	-1.3315
	R	0.703	0.3793	0.703	0.381
	F	27480	178.900	27479	178.8661
2	C	27450	-1.537	27452	-1.5358
	R	8.631	61.3	8.6255	61.3
	F	27,460.00	178.6	27464	178.64
3	C	27420	-1.805	27418	-1.804
	R	67.34	71.39	67.3024	71.39
	F	27450	178.500	27451	178.5
4	C	27410	-1.887	27409	-1.876
	R	46.29	74.04	46.2859	74.04
	F	27440	178.3	27439	178.35
5	C	27380	-2.074	27383	-2.073
	R	126.3	71.82	126.26	71.83
	F	27440	178.4	27439	178.37

Παρατηρούμε πόσο κοντά είναι τα αποτελέσματα για τα δύο προγράμματα. Επαληθεύεται λοιπόν για την 1η περίπτωση η ορθότητα του αλγορίθμου που έχουμε αναπτύξει και εκτελέσει.

Πίνακας 18: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την ισχύ στην 1η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Ζυγός	Δίκτυο	Matlab		Simulink	
		Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1		2411	37.58	2409	37.53
2		-0.31	-1.34	-0.31	-1.34
3		-1200	0	-1200.38	0
4		-1.23	-5.34	-1.2	-5.4
5		-1201	0	-1200	0

2η περίπτωση($P>0, PF=0.9$)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα δύο τρένα να κινούνται στο δίκτυο επιταχύνοντας και με συντελεστή ισχύος 0.9.

Πίνακας 19: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την τάση στην 2η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Πρόγραμμα		Simulink		Matlab	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27420	-1.201	27420.29	-1.200
	R	0.6386	-5.733	0.638	-5.736
	F	27430	179	27427.888	178.979
2	C	27380	-1.380	27384.85	-1.38
	R	7.840	55.18	7.8	55.18
	F	27400	178.8	27403.321	178.78
3	C	27340	-1.616	27340.84	-1.615
	R	61.18	65.27	61.1	65.27
	F	27390	178.700	27385.70	178.66
4	C	27330	-1.679	27329.6	-1.678
	R	42.06	67.95	42.0	67.95
	F	27370	178.5	27,367.4	178.52
5	C	27300	-1.853	27296.73	-1.851
	R	114.8	65.74	114.7	65.73
	F	27370	178.5	27,368.2	178.53

Πίνακας 20: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την ισχύ στην 2η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Πρόγραμμα	Simulink		Matlab	
Ζυγός	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1	2169	271	2167.4	270.98
2	-0.25	-1.1	-0.22	-1.1
3	-1080	-120	-1081	-120.25
4	1.01	-4.41	1.02	-4.41
5	-1080	-120	-1080	-120

3η περίπτωση($P < 0, PF = 1$)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα δύο τρένα να κινούνται στο δίκτυο επιβραδύνοντας και με συντελεστή ισχύος 1.

Πίνακας 21: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την τάση στην 3η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Πρόγραμμα		Simulink		Matlab	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27490	1.321	27487	1.3214
	R	0.6967	-175.500	0.6972	-175.4913
	F	27490	-178.9	27491	-178.8745
2	C	27510	1.524	27513	1.5252
	R	8.559	-114.6	8.5648	-114.63
	F	27500	-178.7	27503	-178.65
3	C	27550	1.791	27545	1792
	R	66.78	-104.5	66.8176	-104.5337
	F	27510	-178.5	27514	-178.5136
4	C	27550	1.862	27553	1.8629
	R	45.82	-101.5	45.8464	-101.494
	F	27520	-178.4	27524	-178.358
5	C	27580	2.056	27577	2.0574
	R	125.0	-103.6	125.0875	-103.6026
	F	27520	-178.4	27524	-178.3771

Παρατηρούμε και σε αυτή την περίπτωση τις τιμές σχεδόν να ταυτίζονται. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος που έχουμε αναπτύξει μπορεί να υπολογίσει την ροή ισχύος και στις δύο καταστάσεις είτε το τρένο επιταχύνει είτε φρενάρει.

Πίνακας 22: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την ισχύ στην 3η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Πρόγραμμα	Simulink		Matlab	
	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1	-2390	36.88	-2390	36.91
2	-0.3	-1.31	-0.39	-1.32
3	1200	15.35	1201	15.37
4	-1.2	-5.24	-1.2	-5.24
5	1199	0	1200	0

4η περίπτωση($P < 0, PF = 0.9$)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα δύο τρένα να κινούνται στο δίκτυο φρενάροντας και με συντελεστή ισχύος 0.9.

Πίνακας 23: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την τάση στην 4η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Δίκτυο		Simulink		Matlab	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27550	1.185	27552.98	1.186
	R	0.6288	177.900	0.629	177.935
	F	27550	179.000	27547.657	-178.990
2	C	27590	1.362	27586.13	1.36
	R	7.725	-121.2	7.7	-121.2
	F	27570	-178.8	27569.284	-178.79
3	C	27630	1.593	27628.04	1.595
	R	60.26	-111.1	60.3	-111.1
	F	27590	-178.800	27585.30	-178.67
4	C	27640	1.655	27638.39	1.657
	R	41.34	-108.1	41.4	-108.09
	F	27600	-178.5	27,602.1	-178.54
5	C	27670	1.824	27669.86	1.825
	R	112.8	-110.2	112.9	-110.2
	F	27600	-178.5	27,601.5	-178.55

Πίνακας 24: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την ισχύ στην 4η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Πρόγραμμα	Simulink		Matlab	
Ζυγός	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1	-2151	-210	-2153	-210
2	-0.25	-1.07	-.22	-1
3	1080	120	1080	121
4	-0.98	-4.27	-1	-4.3
5	1079	120	1080	120

5η περίπτωση($P1 < 0, P2 > 0, PF = 1$)

Στην περίπτωση αυτή τα δύο τρένα έχουν τον ίδιο συντελεστή ισχύος ωστόσο βρίσκονται σε εκ διαμέτρου αντίθετες καταστάσεις, με το πρώτο να σταματάει και το δεύτερο να επιταχύνει.

Πίνακας 25: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την τάση στην 5η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Δίκτυο		Simulink		Matlab	
Ζυγός	Αγωγός	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)	Τάση rms(V)	Γωνία τάσης(deg)
1	C	27500	0.027	27499	0.028
	R	0.2110	171.7	0.211	171.734
	F	27490	180	27495	179.969
2	C	27500	0.031	27499	0.03
	R	4.056	-118.1	4.0616	-118.07
	F	27490	180	27493	179.96
3	C	27500	0.062	27503	0.063
	R	28.92	-110	28.9597	-110
	F	27490	179.9	27490	179.96
4	C	27480	-0.103	27482	-0.102
	R	25.85	77.98	25.817	77.98
	F	27490	179.9	27486	179.89
5	C	27460	-0.299	27456	-0.298
	R	105.6	73.73	105.5457	73.73
	F	27490	179.9	27486	179.91

Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων μας δείχνει ότι ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε μπορεί να λειτουργήσει σε αυτή την ιδιόμορφη κατάσταση. Έτσι βλέπουμε το πρώτο τρένο να τροφοδοτεί εξ ολοκλήρου το δεύτερο, όπως γίνεται και στο Simulink.

Πίνακας 26: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την ισχύ στην 5η περίπτωση σε Simulink και σε Matlab

Ζυγός	Simulink		Matlab	
	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)	Ενεργός ισχύς(kW)	Άεργος ισχύς(kVAR)
1	0.52	1.32	-0.38	1.32
2	-0.05	-0.23	-0.04	-0.23
3	1200	0	1200	0
4	-0.08	-0.33	-0.08	-0.34
5	-1200	0	-1200	0

5 Συμπεράσματα και προοπτικές για μελλοντική μελέτη

Στο κεφάλαιο 4 συγκρίναμε για 5 περιπτώσεις το δίκτυο bi-voltage με αυτομετασχηματιστές έναντι δικτύου με direct-feeder. Από την σύγκριση αυτή μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα γύρω από τα δύο δίκτυα. Ακόμη μέσω της σύγκρισης του δικτύου σε Simulink με τον αλγόριθμο που αναπτύξαμε σε Matlab μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τον αλγόριθμο μας και τις προοπτικές βελτίωσης του.

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική, για την επίλυση ροής ισχύος σε ακτινικό bi-voltage δίκτυο αναπτύξαμε τον αλγόριθμο βασιζόμενοι στην μέθοδο Sequential Linear power flow[12]. Για την λειτουργία του αλγορίθμου απαιτούνταν η μαθηματική μοντελοποίηση κάθε στοιχείου όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Τα συμπεράσματα που μπορούμε να εξάγουμε αφορούν εν πρώτοις τον αλγόριθμο που αναπτύξαμε και, εν συνεχεία, το δίκτυο bi-voltage για την χρήση του σε σιδηροδρομικά δίκτυα σε σχέση με το direct feeder.

Για τον αλγοριθμό και τη μοντελοποίηση

Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ Simulink και Matlab ,όπως είδαμε στην ενότητα 4.2.3., δείχνει ότι ο αλγόριθμος που έχουμε αναπτύξει μπορεί και επιλύει την ροή ισχύος και βρίσκει την τάση στους ζυγούς με ακρίβεια όπως μπορεί να κάνει μια πλατφόρμα επιπέδου Simulink. Μπορούμε έτσι να επιβεβαιώσουμε την μαθηματική μοντελοποίηση που έχουμε αναπτύξει στο κεφάλαιο 3, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί

σε αντίστοιχες μελέτες. Ακόμα δείχνει ότι ο αλγόριθμος μας μπορεί να υπολογίσει όλα τα απαιτούμενα μεγέθη σε όλες τις πιθανές καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το τρένο κατά την κίνηση του. Συνεπώς μέσω του αλγορίθμου μπορούμε να καταλήξουμε σε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για το δίκτυο. Τέτοια είναι το ισοζύγιο ισχύος που αναπτύσσεται, ο αριθμός των φορτίων που μπορεί να τροφοδοτήσει το δίκτυο ,η μέγιστη διαδρομή ενός τμήματος του δικτύου.

Για το AC Bi-voltage δίκτυο

Μέσω της σύγκρισης που έγινε στην ενότητα 4.2.2. σχολιάσαμε τα αποτελέσματα μεταξύ των δικτύων bi-voltage και direct-feeder. Όπως είχαμε δει και θεωρητικά ένας από τους πιο βασικούς λόγους που το bi-voltage θεωρείται καλύτερο είναι η τάση και τα ρεύματα που αναπτύσσονται στο κύκλωμα επιστροφής. Όπως είδαμε στις ίδιες καταστάσεις η τάση στον αγωγό R στο direct-feeder μπορεί να φτάσει σε διπλάσια τιμή από την αντίστοιχη τάση σε bi-voltage. Αυτό μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές με τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που βρίσκονται δίπλα στις ράγες,δημιουργώντας μεγάλα προβλήματα στην εύρυθμη λειτουργία του δικτύου.

Ακόμα στο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό η ιδιότητα της αναγεννητικής πέδησης.Όπως είδαμε τα τρένα όταν φρενάρουν μπορούν να λειτουργούν ως τροφοδότες ενέργειας προς το δίκτυο ή προς άλλα τρένα που εκείνη την στιγμή λειτουργούν ως φορτία.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε προφανώς μπορεί να βελτιωθεί και να προστεθούν επιπλέον λειτουργίες για την ολοκληρωμένη μελέτη του δικτύου. Κάποια στοιχεία που μπορούν να προστεθούν είναι:

- λειτουργία του αλγορίθμου εισάγοντας την παράμετρο της κίνησης των τρένων μέσα στο δίκτυο,δίνοντας μας την δυναμική εικόνα του δικτύου
- τροποποίηση του αλγορίθμου ώστε να μπορεί να δέχεται διακλαδώσεις
- εύρεση της βέλτιστης μέγιστης διαδρομής ενός τμήματος τροφοδοτούμενο μόνο από έναν υποσταθμό

Βιβλιογραφία

- [1] Sheilah Frey (2012) Railway Electrification Systems and Engineering. Delhi: White word publication
- [2] Μιχαλός Μιχαήλ (2010) Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα Τρένων. Καβάλα, Ελλάδα
- [3] Χριστόδουλος Κωστάκης (2009) Εφαρμογή των Υψηλών Τάσεων στην Ηλεκτροκίνηση σιδηροδρομικών γραμμών ΟΣΕ. Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
- [4] R. J. Hill (1994) Electric Railway traction web. Power Engineering Journal
- [5] Χρήστος Νικολακάκος (2017) Μοντελοποίηση και επίλυση της ροής ισχύος σε σιδηροδρομικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος. Αθήνα, Ελλάδα
- [6] Plakhova M., Bassam M. και Arboleya P. (2015) Static Model of a 2x25kV AC Traction System. Gijon, Spain
- [7] Goonen Turan (1986) Electric Power distribution system engineering. New York, US: McGraw Hill
- [8] Chen Y., White R., Fella T., Hillmansen S. και Weston P. (2015) Multi-conductor model for AC railway simulation. Birmingham, UK
- [9] Gurkan F., Guangya Y. και Haider H. (2015) A comparative study of different transformer connections for railway power supply-mitigation of voltage unbalance. Denmark
- [10] Α. Καλτσούνης, Π. Βυθούλκας (2015) Σιδηροδρομικά συστήματα έλξης. Αθήνα, Ελλάδα
- [11] Jonathan Abraham Aviles Cedeno (2017) A three-phase Unbalanced load flow solver for Large-Scale distribution Power Systems. Delft, Netherlands
- [12] William Kersting (2002) Distribution System Model and Analysis. Las Cruces, New Mexico: CRC Press

- [13] Serrano J., Platero C., Lopez-Toledo M. και Granizo R. (2017) A New Method of Ground Fault Location in 2x25 kV Railway Power Supply Systems. Rome, Italy
Energies, MDPI
- [14] Zhengyou He (2013) Harmonic Resonance Assessment to Traction Power-Supply System considering Train Model in China High-Speed Railway. Chengdu, China
- [15] Kulworawanichpong, T. (2004). Optimising AC electric railway power flows with power electronic control (Doctoral dissertation, University of Birmingham).