



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

Μοντελοποίηση Υβριδικών Δικτύων Μέσης Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Θ. Θωμάς

Επιβλέπων : Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2025



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

Μοντελοποίηση Υβριδικών Δικτύων Μέσης Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Θ. Θωμάς

Επιβλέπων : Χρήστος Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 04/7/2025 .

.....
Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Βασιλική Θ. Κονταργύρη
Επίκουρη Καθηγήτρια ΠΑΔΑ

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....
Γεώργιος Θ. Θωμάς

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

Copyright © Γεώργιος Θωμάς, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Copying, saving and distributing this work, in whole or in part, for commercial purposes is prohibited. Reproduction, saving and distribution for a non-profit, educational or research purpose is permitted, provided that the source is acknowledged and this message is preserved. Questions regarding the commercial use of the work should be directed to the author.

The opinions and conclusions contained in this document are those of the author and should not be interpreted as representing the official positions of the National Technical University of Athens.

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για ηλεκτρική ενέργεια και η εισαγωγή στοχαστικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελούν μείζονα προβλήματα για τους διαχειριστές των ηλεκτρικών δικτύων, καθώς καλούνται να διαχειριστούν αμφίδρομες ροές ηλεκτρικών φορτίων και να επιτύχουν την ελαχιστοποίηση των απωλειών και φόρτισης των υπαρχουσών γραμμών, ενώ οι δομικές εγκαταστάσεις των δικτύων δέχονται ελάχιστες έως και μηδαμινές αναβαθμίσεις. Στην παρούσα διπλωματική θα εξεταστούν κάποιες τοπολογίες δικτύων μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος (MV-DC), οι οποίες δύναται να εφαρμοστούν στα ήδη υπάρχοντα αντίστοιχα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος (MV-AC), έχοντας ως στόχο πρωταρχικά την μείωση των απωλειών και την φόρτιση των γραμμών προσφέροντας έτσι λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Αρχικά, στα κεφάλαια που ακολουθούν, θα παρουσιαστεί ένα πρότυπο δίκτυο μέσης εναλλασσόμενης τάσης, στο οποίο έπειτα θα μετατραπεί τμήμα του, σε μέση συνεχή τάση. Η μετατροπή αυτή θα γίνει βάση των δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων τοπολογιών, οι οποίες είναι με χρήση των Line Commutated Converters (LCCs) και με χρήση των Voltage Source Converters (VSCs). Η μοντελοποίηση και η εκτέλεση των διάφορων προσομοιώσεων θα υλοποιηθούν στο πρόγραμμα Power Factory της Digsilent από το οποίο θα εξαχθούν και τα αποτελέσματα με βάση των οποίων θα γίνει η σύγκριση των τριών πλέον διαφορετικών δικτύων. Βασικοί πυλώνες σύγκρισης των ανωτέρω δικτύων θα αποτελέσουν η πτώση/ ανύψωση τάσης των ζυγών, η φόρτιση γραμμών και οι απώλειές τους ανάλογα με την εκάστοτε απαιτούμενη ροή φορτίου, υλοποιώντας διάφορα σενάρια παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος. Επιπρόσθετα, θα συγκριθεί η πτώση τάσης των ζυγών σε περιπτώσεις σφαλμάτων και το μέγεθος των ρευμάτων βραχυκύκλωσης κατά την διεξαγωγή βραχυκυκλωμάτων σε σημεία του δικτύου. Τέλος, θα εξεταστεί και θα συγκριθεί η απόκριση γεννητριών σε μεταβατικά φαινόμενα και ο χρόνος που απαιτείται ώστε το δίκτυο να επανέλθει σε ισορροπία κατόπιν ύπαρξης βραχυκυκλώματος σε τμήμα του δικτύου, ώστε να εξεταστεί σε ποια τοπολογία έχουμε την ταχύτερη αποκατάσταση. Έχοντας όλα τα ανωτέρω δεδομένα πλέον διαθέσιμα, στο τέλος της εργασίας, καταλήγουμε στο ποια τοπολογία προσφέρει τα περισσότερα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων, ποια είναι πιο εύκολη στην υλοποίηση καθώς και ποια επιτρέπει στον διαχειριστή του δικτύου τον μεγαλύτερο έλεγχο της ροής φορτίου.

Λέξεις Κλειδιά:

Δίκτυο, μέση τάση, εναλλασσόμενο ρεύμα, συνεχές ρεύμα, line commutated converter, LCC, voltage source converter, VSC, Power Factory, Digsilent, ροή φορτίου, απώλειες, βραχυκύκλωμα, μεταβατική απόκριση

Abstract

The constantly increasing demand for electrical power and the input of stochastic renewable energy sources, constitute major problems for the electrical grid's managers, as they are called to manage two-way power flows and to achieve the minimization of losses and the loading of the existing lines, while the structural installations of the grid accept minimal to even none upgrades. In this thesis, different topologies of medium voltage direct current (MV-DC) will be examined, which can be applied directly to the already existing alternating current grids (MV-AC), having as primary objective the minimization of losses and the loading of the lines, offering thus a solution to the above problem. Firstly, in the following chapters, a model of a medium alternating voltage will be presented, a part of which is going to be converted to medium direct voltage. This conversion will be based on the two most widely used topologies, the one which uses Line Commutated Converters (LCCs) and the one which uses Voltage Source Converters (VSCs). The modelling and the execution of the various simulations, will be implemented in Digsilent's Power Factory program, from which the results will be extracted, based on those results the three different grids will be compared. The main pillars of comparison of the above grids will be the voltage drop/rise of each busbar, the line loading and their losses, according to the required power flow at any given time, implementing various power generation and consumption scenarios. In addition, the voltage drop of each busbar in case of a fault and the magnitude of the short – circuit line currents when conducting short-circuit simulations at various points of the grid will be compared. Finally, the response of the grid's generators to transients and the required time for the grid to return to balance after a short-circuit in a part of it, will be compared, in order to examine in which topology, we have the fastest recovery. With all the above data now available, at the end of the thesis, we will conclude in which topology offers the most advantages over the others, which one is easier to implement and which one offers the grid's manager the most control over the load flow.

Key Words

Grid, medium voltage, alternating current, direct current, line commutated converters, LCC, voltage source converter, VSC, Power Factory, Digsilent, load flow, losses, short circuit, transient response

Ευχαριστίες

1. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Βασιλική Κονταργύρη, τον κύριο Γεώργιο Πουλημένο και τον κύριο Χρήστο Χριστοδούλου για τη συνεργασία μας, οι οποίοι με την καθοδήγησή τους και τα σχόλιά τους βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
2. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, τους κοντινούς μου ανθρώπους, χωρίς τη στήριξη των οποίων, δεν θα είχε γίνει πραγματικότητα το όνειρό μου να ξεκινήσω και να ολοκληρώσω την φοίτησή μου στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	13
Κατάλογος Διαγραμμάτων	14
Κατάλογος Γραφημάτων	14
Κατάλογος Εικόνων	15
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή – Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	19
1.1 Εισαγωγή	19
1.2 Σύντομο Ιστορικό Ηλεκτρικού Δικτύου	19
1.3 Δίκτυο διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	21
1.5 Μετατροπείς	26
1.5.1 AC/DC (Ανορθωτές)	26
1.5.2 DC/AC (Αντιστροφείς)	28
1.5.2 DC/DC Μετατροπείς.....	31
1.6 Σύγχρονα προβλήματα ηλεκτρικών δικτύων	32
1.7 Εφαρμογές Συνεχούς Ρεύματος και πλεονεκτήματα στην Μέση Τάση (MVDC).....	34
1.8 Σκοπός παρούσας διπλωματικής.....	37
Κεφάλαιο 2^ο: Υβριδικά Δίκτυα Μέσης Τάσης – Σχεδιασμός και Λειτουργία.....	38
2.1 Αρχιτεκτονική υβριδικών δικτύων μέσης τάσης	38
2.2 Σκοποί σχεδιασμού υβριδικών δικτύων	40
2.3 Οικονομική σκοπιά δικτύων μέσης συνεχούς τάσης.....	41
2.4 Λειτουργία υβριδικών δικτύων μέσης τάσης.....	43
2.5 Διασύνδεση διεσπαρμένων πηγών ενέργειας και φορτίων στα δίκτυα μέσης συνεχούς τάσης.....	45
2.6 Διαχείριση ροής φορτίου στα δίκτυα μέσης συνεχούς τάσης.....	47
2.7 Διαχείριση τάσης ζυγών στα δίκτυα μέσης συνεχούς τάσης.....	49
2.8 Λειτουργία και έλεγχος πολυτεμαχικού δικτύου MVDC.....	51
2.9 Έλεγχος Μετατροπέων	53
2.9.1 Έλεγχος σταθερής ισχύος	53
2.9.2 Έλεγχος σταθερής τάσης	54
2.11 Έργα ορόσημα και εφαρμογές δικτύων μέσης συνεχούς τάσης.....	54
2.12 Εφαρμογές και προσομοιώσεις υβριδικών δικτύων – Βιβλιογραφική ανασκόπηση	60
Κεφάλαιο 3^ο: Παρουσίαση προγράμματος προσομοίωσης – PowerFactory.....	64
3.1 Γενικά στοιχεία για το PowerFactory	64
3.2 Δομή βάσης δεδομένων PowerFactory.....	65
3.3 Περιβάλλον του PowerFactory.....	67
3.4 Βιβλιοθήκες, μονογραμμικά διαγράμματα και δεδομένα δικτύου υπό μελέτη.....	68
3.5 Δομή Έργου.....	70
3.6 Διεπαφή Χρήστη	72
3.7 Εργαλεία ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία	75
3.7.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου (Load Flow Analysis)	75
3.7.2 Ανάλυση Βραχυκυκλώματος (Short-Circuit Analysis)	78
3.7.3 Ανάλυση ευστάθειας (RMS Analysis)	83
3.7.3.1 Συμμετρική προσομοίωση RMS	84
3.7.3.1 Τριφασική προσομοίωση RMS (Three-Phase RMS Simulation).....	85
Κεφάλαιο 4^ο: Μοντελοποίηση Δικτύων Μέσης Εναλλασσόμενης Τάσης και εξέταση συμπεριφοράς τους υπό διάφορα σενάρια φόρτισης και λειτουργίας	86
4.1 Υλοποίηση δικτύου εννέα ζυγών.....	86
4.2 Υπολογισμός ροής φορτίου σε δίκτυο εννέα ζυγών υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας..	91
4.2.1 Υπολογισμός ροής φορτίου σε δίκτυο εννέα ζυγών σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)	92

4.2.2 Υπολογισμός ροής φορτίου σε δίκτυο εννέα ζυγών με μειωμένη κατανάλωση.	94
4.2.3 Υπολογισμός ροής φορτίου σε δίκτυο εννέα ζυγών με μειωμένη παραγωγή ισχύος.	95
4.3 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυο εννέα ζυγών.....	98
4.3.1 Υπολογισμός σφαλμάτων σε σύνολο ζυγών δικτύου AC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete.....	99
4.3.2 Υπολογισμός σφαλμάτων σε γραμμή No10 δικτύου AC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete	100
4.4 Εκτέλεση RMS Αξιολόγησης σε δίκτυο AC εννέα ζυγών	102
Κεφάλαιο 5ο: Μετατροπή Δικτύων Μέσης Εναλλασσόμενης Τάσης σε υβριδικά δίκτυα με τμήματα Συνεχούς Τάσης και εξέταση συμπεριφοράς τους υπό διάφορα σενάρια φόρτισης και λειτουργίας	111
5.1 Μετατροπή Δικτύων Μέσης Εναλλασσόμενης Τάσης σε Συνεχούς Τάσης με χρήση LCC	113
5.1.2 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.	116
5.1.2.1 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario).	117
5.1.2.2 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC με μειωμένη κατανάλωση.	119
5.1.2.3 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC με μειωμένη παραγωγή ισχύος.....	121
5.1.3 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυο εννέα ζυγών τοπολογίας LCC.....	123
5.1.3.1 Υπολογισμός σφαλμάτων σε σύνολο ζυγών δικτύου τοπολογίας LCC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete	123
5.1.3.2 Υπολογισμός σφαλμάτων σε γραμμή No10 δικτύου τοπολογίας LCC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete	125
5.1.4 Εκτέλεση RMS Αξιολόγησης σε δίκτυο εννέα ζυγών τοπολογίας LCC	127
5.2 Μετατροπή Δικτύων Μέσης Εναλλασσόμενης Τάσης σε Συνεχούς Τάσης με χρήση VSC	131
5.2.2 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.	135
5.2.2.1 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC υπό τυπική φόρτιση (base scenario).	135
5.2.2.2 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC με μειωμένη κατανάλωση.	137
5.2.2.3 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC με μειωμένη παραγωγή ισχύος.....	139
5.2.3 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυο εννέα ζυγών τοπολογίας VSC.....	140
5.2.3.1 Υπολογισμός σφαλμάτων σε σύνολο ζυγών δικτύου τοπολογίας VSC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete	141
5.2.3.2 Υπολογισμός σφαλμάτων σε γραμμή No10 δικτύου τοπολογίας VSC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete	142
5.2.4 Εκτέλεση RMS Αξιολόγησης σε δίκτυο εννέα ζυγών τοπολογίας VSC.....	144
Κεφάλαιο 6ο: Σύγκριση - Ανάλυση Αποτελεσμάτων	149
6.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων ροής φορτίου των τριών διαφορετικών σεναρίων.....	149
6.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων σφαλμάτων των τριών διαφορετικών τοπολογιών	162
6.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων RMS αξιολόγησης	170
7. Γενικά Συμπεράσματα	176
Βιβλιογραφία.....	182

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Στοιχείων Δικτύου 9 Ζυγών.....	86
Πίνακας 2: Μήκη γραμμών μεταφοράς σύνδεσης Ζυγών.....	88
Πίνακας 3: Αποτελέσματα υπολογισμού ροής φορτίου στο δίκτυο των εννέα ζυγών	93
Πίνακας 4: Αλλαγές δικτύου για μειωμένη κατανάλωση	94
Πίνακας 5: Αποτελέσματα ροής φορτίου για AC δίκτυο με μειωμένη κατανάλωση	95
Πίνακας 6: Αλλαγές δικτύου για μειωμένη παραγωγή ισχύος.....	96
Πίνακας 7: Αποτελέσματα ροής φορτίου για AC δίκτυο με μειωμένη παραγωγή ισχύος....	97
Πίνακας 8: Αποτελέσματα υλοποίησης βραχυκυκλωμάτων κατά Complete στο σύνολο των ζυγών	100
Πίνακας 9: Αποτελέσματα σφαλμάτων στην γραμμή Νο10.....	101
Πίνακας 10: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα RMS αξιολόγησης.....	109
Πίνακας 11: Τροποποιημένα στοιχεία δικτύου τοπολογίας LCC	113
Πίνακας 12: Μέγεθος αντιστάσεων για τον εκάστοτε Converter	115
Πίνακας 13: Αποτελέσματα ροής φορτίου υβριδικού δικτύου, τοπολογίας LCC	118
Πίνακας 14: Αλλαγές δικτύου για μειωμένη κατανάλωση	119
Πίνακας 15: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας LCC, με μειωμένη κατανάλωση	120
Πίνακας 16: Αλλαγές δικτύου για μειωμένη παραγωγή ισχύος.....	121
Πίνακας 17: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας LCC, με μειωμένη κατανάλωση	122
Πίνακας 18: Αποτελέσματα υλοποίησης βραχυκυκλωμάτων με τη μέθοδο Complete στο σύνολο των ζυγών δικτύου τοπολογίας LCC.....	124
Πίνακας 19: Αποτελέσματα σφαλμάτων στο 50% του μήκους της γραμμής Νο10	126
Πίνακας 20: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα RMS αξιολόγησης δικτύου με LCCs.....	130
Πίνακας 21: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας VSC σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)	136
Πίνακας 22: Αλλαγές δικτύου τοπολογίας VSC για μειωμένη κατανάλωση	137
Πίνακας 23: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας VSC με μειωμένη κατανάλωση	138
Πίνακας 24: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας VSC, με μειωμένη παραγωγή φ/β μονάδων	140
Πίνακας 25: Αποτελέσματα υλοποίησης βραχυκυκλωμάτων με τη μέθοδο Complete στο σύνολο των ζυγών δικτύου τοπολογίας VSC.....	142
Πίνακας 26: Αποτελέσματα σφαλμάτων στο 50% του μήκους της γραμμής Νο10	143
Πίνακας 27: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα RMS αξιολόγησης δικτύου με VSCs.....	148
Πίνακας 28: Απώλειες γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario) ..	149
Πίνακας 29: Απώλειες γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario), σε ποσοστό επί τοις εκατό της μεταφερόμενης ισχύος.....	150
Πίνακας 30: Φόρτιση γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)	150
Πίνακας 31: Συνολικές Απώλειες Δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario) ..	152
Πίνακας 32: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύου σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)	153
Πίνακας 33: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση.....	154
Πίνακας 34: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση, σε ποσοστό επί τοις εκατό της μεταφερόμενης ισχύος.....	155
Πίνακας 35: Φόρτιση γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση	156
Πίνακας 36: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση	157
Πίνακας 37: Συνολικές Απώλειες Δικτύων με μειωμένη κατανάλωση	157
Πίνακας 38: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή.....	158

Πίνακας 39: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή, σε ποσοστό επί τοις εκατό της μεταφερόμενης ισχύος.....	159
Πίνακας 40: Φόρτιση γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή	160
Πίνακας 41: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύων με μειωμένη παραγωγή	161
Πίνακας 42: Συνολικές Απώλειες Δικτύων με μειωμένη παραγωγή	161
Πίνακας 43: Αποτελέσματα Σφαλμάτων σε σύνολο ζυγών δικτύων.....	163
Πίνακας 44: Αποτελέσματα τριφασικού βραχυκυκλώματος συμφώνως μεθόδου “Complete” στα 50% του μήκους της γραμμής Νο10	168
Πίνακας 45: Αποτελέσματα διφασικού και μονοφασικού βραχυκυκλώματος συμφώνως μεθόδου “Complete” στα 50% του μήκους της γραμμής Νο10.....	168
Πίνακας 46: Τάση ζυγών AC των τριών τοπολογιών μετά από τριφασικό σφάλμα στη γραμμή Νο10.....	168
Πίνακας 47: Τάσεις ζυγών AC των τριών δικτύων μετά από διφασικό και μονοφασικό σφάλμα στη γραμμή Νο10	169
Πίνακας 48: Πίνακας αποτελεσμάτων RMS αξιολογήσεων AC δικτύου.....	170
Πίνακας 49: Πίνακας αποτελεσμάτων RMS αξιολογήσεων Υβριδικού δικτύου τοπολογίας LCC	171
Πίνακας 50: Πίνακας αποτελεσμάτων RMS αξιολογήσεων Υβριδικού δικτύου τοπολογίας VSC	171

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Παραγόμενη Ενεργός Ισχύς σύγχρονης γεννήτριας Νο2.....	107
Διάγραμμα 2: Γωνία ρότορα σύγχρονης γεννήτριας Νο2.....	107
Διάγραμμα 3: Συχνότητα γεννήτριας Νο2	108
Διάγραμμα 4: Ενεργός ισχύς που διοχετεύεται στην γραμμή 10	108
Διάγραμμα 5: Απόκριση Gen Νο2, με απενεργοποιημένο ελεγκτή φ/β πάρκου	110
Διάγραμμα 6: Παραγόμενη Ενεργός Ισχύς γεννήτριας Νο2 δικτύου με LCCs	127
Διάγραμμα 7: Γωνία ρότορα γεννήτριας Νο2 δικτύου με LCCs	128
Διάγραμμα 8: Συχνότητα γεννήτριας Νο2 δικτύου με LCCs.....	128
Διάγραμμα 9: Συνολική μεταφερόμενη ενεργός ισχύς μέσω της γραμμής Νο10.....	129
Διάγραμμα 10: Ενεργός ισχύς γεννήτριας Νο2 δικτύου τοπολογίας VSC	145
Διάγραμμα 11: Γωνία ρότορα γεννήτριας Νο2 δικτύου τοπολογίας VSC	146
Διάγραμμα 12: Συχνότητα γεννήτριας Νο2 δικτύου τοπολογίας VSC.....	146
Διάγραμμα 13: Συνολική μεταφερόμενη ενεργός ισχύς μέσω της γραμμής Νο10 τοπολογίας VSC	147

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1: Απώλειες γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)...	151
Γράφημα 2: Φόρτιση γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)	151
Γράφημα 3: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύου σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario).....	153
Γράφημα 4: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση	155
Γράφημα 5: Φόρτιση γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση.....	156
Γράφημα 6: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση.....	157
Γράφημα 7: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή	159
Γράφημα 8: Φόρτιση γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή.....	160
Γράφημα 9: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύων με μειωμένη παραγωγή.....	161
Γράφημα 10: Ισχύς βραχυκύκλωσης ζυγών σε τριφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες	164

Γράφημα 11: Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε τριφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες	164
Γράφημα 12: Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε τριφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες	164
Γράφημα 13: Ισχύς βραχυκύκλωσης ζυγών σε διφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες.....	165
Γράφημα 14: Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε διφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες	165
Γράφημα 15: Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε διφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες	165
Γράφημα 16: Ισχύς βραχυκύκλωσης ζυγών σε μονοφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες	166
Γράφημα 17: Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε μονοφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες	166
Γράφημα 18: Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε μονοφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες	166

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Μία από τις πρώτες Ατμογεννήτριες	19
Εικόνα 2: Συνοπτική παρουσίαση ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [2].	22
Εικόνα 3: Πρωτεύον δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [2].....	23
Εικόνα 4: Μετατροπείς AC/DC	26
Εικόνα 5: Τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής γέφυρας (6 στοιχείων) [5]	27
Εικόνα 6: Απεικόνιση πλήρους τριφασικής ανόρθωσης [5]	27
Εικόνα 7: Τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής γέφυρας (12 στοιχείων) [5]	28
Εικόνα 8 Τροποποιημένη ημιτονοειδή και ημιτονοειδή κυματομορφή.....	29
Εικόνα 9: Απλοποιημένο κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα	30
Εικόνα 10: DC/DC Μετατροπείς υποβιβασμού τάσεως	31
Εικόνα 11: DC/DC Μετατροπείς ανύψωσης τάσεως.....	32
Εικόνα 12: Ανεμογεννήτριες και Φωτοβολταϊκά Πάνελ	33
Εικόνα 13: Διατάξεις συνδεσμολογίας συστημάτων MVDC [10].....	38
Εικόνα 14: Διατάξεις γραμμών μεταφοράς συστημάτων MVDC [10]	39
Εικόνα 15: Παράδειγμα διασύνδεσης διεσπαρμένης παραγωγής με χρήση MVDC διασύνδεσης [10].....	45
Εικόνα 16: Παράδειγμα διασύνδεσης υβριδικών δικτύων [10]	46
Εικόνα 17: Ελεγχόμενη ροή φορτίου μεταξύ δικτύων με χρήση συνεχούς ρεύματος [10] ..	47
Εικόνα 18: Αναπαράσταση μετατροπείων ως πηγές τάσεως [10]	49
Εικόνα 19: Πολυτεματικά δίκτυα MVAC και MVDC [10].....	51
Εικόνα 20: Απεικόνιση ελέγχου ισχύος στο επίπεδο τάσης - ισχύος.....	54
Εικόνα 21: Απεικόνιση ελέγχου τάσεως στο επίπεδο τάσης - ισχύος.....	54
Εικόνα 22: Σχέδιο δικτύου διανομής MVDC στο Zhuhai, Κίνα [18].....	58
Εικόνα 23: Δίκτυο σύνδεσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας MVDC Κορέας [19]	60
Εικόνα 24: Γραφικό Περιβάλλον Προγράμματος PowerFactory	67
Εικόνα 25: Παράθυρο του Data Manager του PowerFactory	68
Εικόνα 26: Δομή «δένδρου» Power Factory	70
Εικόνα 27: Κύριο παράθυρο προγράμματος PowerFactory.....	72
Εικόνα 28: Παράθυρο Εξόδου PowerFactory	74
Εικόνα 29: Παράδειγμα γραφήματος τάσεων ζυγών στο α.μ. σύστημα	74
Εικόνα 30: Μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση βραχυκυκλώματος [24]	80
Εικόνα 31: Διαδικασία μεθόδου υπέρθεσης [24]	83
Εικόνα 32: Ορισμός Χαρακτηριστικών Καλωδίου Γραμμής Μεταφοράς.....	87

Εικόνα 33: Ορισμός Χαρακτηριστικών Γεννητριών.....	89
Εικόνα 34: Ορισμός Χαρακτηριστικών Φορτίου.....	89
Εικόνα 35: Ορισμός Χαρακτηριστικών Φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	90
Εικόνα 36: Ορισμός συστοιχίας πυκνωτών.....	90
Εικόνα 37: Δίκτυο εννέα ζυγών	91
Εικόνα 38: Αποτέλεσμα ροής φορτίου δικτύου σε λειτουργία σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario).....	92
Εικόνα 39: Αποτέλεσμα ροής φορτίου δικτύου με μειωμένη κατανάλωση	94
Εικόνα 40: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου με μειωμένη παραγωγή ισχύος	96
Εικόνα 41: Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος σύμφωνα με τη μέθοδο Complete στο σύνολο των ζυγών	99
Εικόνα 42: Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος σύμφωνα με την μέθοδο Complete στο 50% του συνολικού μήκους της γραμμής Νο10	101
Εικόνα 43: Ορισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος για την εκτέλεση αξιολόγησης RMS.....	103
Εικόνα 44: Ορισμός χρόνου αποκατάστασης σφάλματος.....	103
Εικόνα 45: Ορισμός μεταβλητών γεννήτριας Νο2 για την αξιολόγηση RMS.....	104
Εικόνα 46: Block diagram του SYM Frame	105
Εικόνα 47: Συμπληρωμένο Composite Model γεννήτριας Νο2.....	105
Εικόνα 48: Αρχικές συνθήκες εκτέλεσης αξιολόγησης RMS.....	106
Εικόνα 49: Δίκτυο μετά την αποκατάσταση σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς Νο10....	109
Εικόνα 50: Ορισμός χαρακτηριστικών DC γραμμής μεταφοράς.....	112
Εικόνα 51: Απλοποιημένο μοντέλο απωλειών για το στοιχείο Rectifier/Inverter του PowerFactory.....	115
Εικόνα 52: Δίκτυο εννέα Ζυγών με τοπολογία LCC	115
Εικόνα 53 Επίλυση Ροής φορτίου σε δίκτυο LCC με έλεγχο της ενεργούς ισχύος σε όλους τους μετατροπείς (Αδυναμία επίλυσης ροή φορτίου)	116
Εικόνα 54: Επίλυση Ροής φορτίου σε δίκτυο LCC με έλεγχο της τάσης DC ζυγού σε όλους τους μετατροπείς (Αύξηση απωλειών δικτύου κατά 1,37MW σε σύγκριση με την αρχική μεθόδευση)	117
Εικόνα 55: Αποτέλεσμα υπολογισμού ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας LCC υπό λειτουργία τυπικής φόρτισης (base scenario).....	118
Εικόνα 56: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC με μειωμένη κατανάλωση	120
Εικόνα 57: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC με μειωμένη παραγωγή ισχύος.....	122
Εικόνα 58: Αποτέλεσμα υλοποίησης τριφασικού βραχυκυκλώματος με βάση της μεθόδου Complete στο σύνολο των ζυγών δικτύου τοπολογίας LCC.....	124
Εικόνα 59: Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος σύμφωνα με τη μέθοδο Complete στο 50% του συνολικού μήκους της γραμμής Νο10.....	125
Εικόνα 60: Ροή φορτίου στο δίκτυο με LCCs, μετά την ολοκλήρωση RMS μελέτης.....	129
Εικόνα 61: PWM – Converter με ισοδύναμη αντίσταση που αναπαριστά τις διακοπτικές απώλειες	131
Εικόνα 62: Επιλογές ρύθμισης ροής φορτίου σε PWM Converter	132
Εικόνα 63: Επίλυση ροής φορτίου σε δίκτυο τοπολογίας VSC, με εφαρμογή ελέγχου Vdc και άεργου ισχύος.....	133
Εικόνα 64: Ορισμός PWM – Converter	134
Εικόνα 65 Ρύθμιση ροής φορτίου PWM – Converter	134
Εικόνα 66: Δίκτυο εννέα Ζυγών με τοπολογία VSC	135
Εικόνα 67: Αποτέλεσμα υπολογισμού ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας VSC σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario).....	136

Εικόνα 68: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC με μειωμένη κατανάλωση	138
Εικόνα 69: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC με μειωμένη παραγωγή φ/β μονάδων	139
Εικόνα 70: Αποτέλεσμα υλοποίησης τριφασικού βραχυκυκλώματος με βάση της μεθόδου Complete στο σύνολο των ζυγών δικτύου τοπολογίας VSC.....	141
Εικόνα 71: Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος σύμφωνα με τη μέθοδο Complete στο 50% του συνολικού μήκους της γραμμής Νο10 τοπολογίας VSC.....	143
Εικόνα 72: Αποτέλεσμα ροής φορτίου μετά την ολοκλήρωση RMS μελέτης δικτύου με VSCs.....	147
Εικόνα 73: Παράθυρο εξόδου κατά την αξιολόγηση RMS στο δίκτυο τοπολογίας LCC ..	172
Εικόνα 74: Κυματομορφή τάσης εισόδου αντιστροφέα κατά την εκτέλεση μονοφασικού βραχυκυκλώματος με τη γη.....	173
Εικόνα 75: Κυματομορφή DC ρεύματος εξόδου αντιστροφέα όπου εμφανίζεται το φαινόμενο αδυναμίας μεταγωγής.....	174
Εικόνα 76: Ισχύς εξόδου αντιστροφέα όπου εμφανίζεται το φαινόμενο της αδυναμίας μεταγωγής.....	174

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή – Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

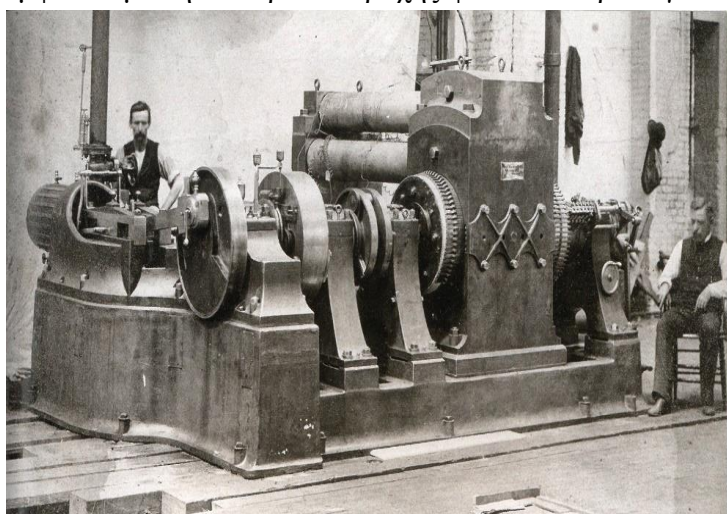
1.1 Εισαγωγή

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής (βελτιωμένο βιοτικό επίπεδο, μεγάλα ποσοστά παραγωγικότητας, παγκοσμιοποίηση), η συνεχώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία (κβαντικοί υπολογιστές, ηλεκτροκίνηση και ηλεκτροπρόωση, τεχνητή νοημοσύνη) και η περιβαλλοντική κρίση (φαινόμενο του θερμοκηπίου, μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα και του αέρα) ωθούν ολοένα και περισσότερο τον άνθρωπο, στην αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας ως ένα μέσο για την κάλυψη των αναγκών του με έναν φιλικότερο προς το περιβάλλον τρόπο, συγκριτικά με τις μέχρι τώρα συμβατικές μεθόδους.

Η ηλεκτρική ενέργεια προσφέρει μια πληθώρα δυνατοτήτων όσον αφορά την παραγωγή της, την αποθήκευσή της αλλά κυρίως τους τρόπους εκμετάλλευσής της και μετατροπής της σε άλλες, εξίσου σημαντικές, μορφές ενέργειας. Ωστόσο, τίποτα από τα παραπάνω δεν θα ήταν εφικτό, αν δεν είχε αναπτυχθεί ένα καλά μελετημένο και δομημένο δίκτυο για την μεταφορά της [1].

1.2 Σύντομο Ιστορικό Ηλεκτρικού Δικτύου

Η πρώτη δομή ηλεκτρικού δικτύου παρουσιάστηκε στην Αγγλία, το 1881, όταν μία πόλη (Godalming) δεν κατέληξε σε συμφωνία με την εταιρεία παροχής φυσικού αερίου για την τροφοδότηση λαμπτήρων στους κεντρικούς δρόμους της και έτσι στράφηκε στην υδροηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, λόγω του πρώιμου σταδίου της τεχνολογίας, το συγκεκριμένο σχέδιο δεν είχε εμπορική επιτυχία και έτσι η πόλη επέστρεψε στην αρχική χρήση του φυσικού αερίου. Η προσπάθεια αυτή ωστόσο, ήταν σπουδαίο επίτευγμα



Εικόνα 1: Μία από τις πρώτες Ατμογεννήτριες

για την εποχή και έδωσε την ώθηση σε πολλούς άλλους ειδικούς στο αντικείμενο αυτό, να συμβάλουν στην ανάπτυξη του ηλεκτρικού δικτύου έτσι όπως το γνωρίζουμε σήμερα.

Έναν χρόνο αργότερα, το 1882, αυτήν την φορά στην Αμερική, δημιουργήθηκε το πρώτο δίκτυο διανομής στο Μανχάταν και στο Νιου Τζέρσεϊ, από τον Thomas Edison, το οποίο ήταν το πρώτο λειτουργικό δίκτυο της εποχής, το οποίο χρησιμοποιούσε μάλιστα συνεχές ρεύμα. Επειδή ωστόσο η παραγωγή βασιζόταν σε ατμογεννήτριες που έκαιγαν κάρβουνο για να λειτουργήσουν, το οποίο ήταν ακριβό, τα συγκεκριμένα δίκτυα ήταν πολύ κοστοβόρα.

Επομένως, ο ηλεκτρισμός αποτελούσε μία πολυτέλεια που μόνο επιχειρήσεις και ξενοδοχεία μπορούσαν να έχουν. Σε σύντομο χρονικό διάστημα, το δίκτυο του Έντισον, τροφοδοτούσε διακόσιες είκοσι πέντε κατοικίες στην περιοχή (δηλαδή 5000 λάμπες), ωστόσο μόνο μέσα σε μία ακτίνα του μισού μιλίου (περίπου 800 μέτρα) [1].

Λίγα χρόνια αργότερα, ως επιχειρησιακός αντίπαλος του Edison, εμφανίστηκε ο George Westinghouse, ο οποίος υποστήριζε την τεχνολογία δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος, τα οποία είχαν το σημαντικό πλεονέκτημα της μεταφοράς ισχύος σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, ήταν φθηνότερα στην κατασκευή και καθιστούσαν ευκολότερη την ανύψωση και τον υποβιβασμό της τάσης.

Σιγά σιγά οι άνθρωποι εξοικειώθηκαν με τον ηλεκτρισμό και με την μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις και έτσι προέκυψε το τεχνοοικονομικό πρόβλημα της κλιμάκωσης. Έγινε γρήγορα προφανές ότι για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ένα μεγάλο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν πιο αποδοτικό συγκριτικά με την λειτουργία μικρότερων διασκορπισμένων στην ευρύτερη περιοχή που κάλυπτε το δίκτυο. Το 1896 ο Westinghouse και ο Nikola Tesla, κατασκεύασαν το πρώτο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο στους καταρράκτες του Νιαγάρα, και το σύνδεσαν μέσω δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος με την πόλη του Μπάφαλο, που βρισκόταν περίπου τριάντα χιλιόμετρα μακριά. Με αυτό το επίτευγμα, η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος κυριάρχησε έναντι του συνεχούς.

Το 1900, λόγω ανταγωνισμού, υπήρξε ραγδαία ανάπτυξη πολλών ανεξέλεγκτων νομικά εταιρειών που λειτουργούσαν ως πάροχοι ηλεκτρισμού. Η ανάπτυξη αυτή ωστόσο διακόπηκε από την παγκόσμια οικονομική ύφεση που ξεκίνησε το 1929, έχοντας ως αποτέλεσμα, από το 1935 και μετά, οι εταιρείες αυτές να ελέγχονται από τον νόμο, εξασφαλίζοντας έτσι ότι πρώτον υπήρχε η απαιτούμενη εμπειρία για την παροχή ηλεκτρισμού και κατά δεύτερον, δεν γινόταν κατάχρηση του μονοπωλίου. Από το 1960 και μετά, η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος μειώθηκε και με την πάροδο του χρόνου, το δίκτυο εξελίχθηκε σε αυτό που γνωρίζουμε σήμερα [1].

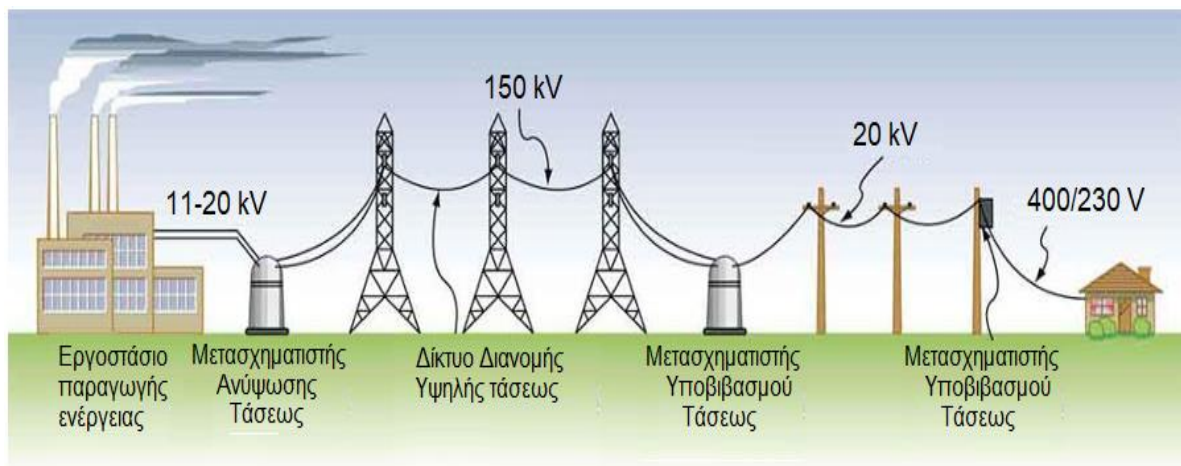
Το σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο, είναι ένα περίπλοκο, διασυνδεδεμένο σύστημα, σχεδιασμένο για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας με τρόπο

αποδοτικό και αξιόπιστο. Περιέχει τις διάφορες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μεταβλητότητα και η βιωσιμότητά του, και τις οποίες συνδυάζει με τέτοιον τρόπο ώστε ανά πάσα στιγμή να ικανοποιείται η ζήτηση του φορτίου. Έπειτα, μέσω γραμμών μεταφοράς (Υπερυψηλής τάσης (1100 kV), Υψηλής τάσης (από 138 kV έως και 765 kV), Μέσης τάσης (από 2,4kV έως 69 kV) και Χαμηλής Τάσης (από 240 V έως 600 V)), γίνεται η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Σημαντικό κομμάτι του δικτύου αποτελούν οι διατάξεις ελέγχου από όπου γίνεται η εποπτεία της ροής φορτίου και του δικτύου γενικότερα, μέσω συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, υπεύθυνες για την έγκαιρη λήψη διορθωτικών μέτρων ή την άμεση ενημέρωση σε περίπτωση απαίτησης ανθρώπινης παρέμβασης. Επιπλέον, οι διατάξεις ασφαλείας, είναι υπεύθυνες για τον έγκαιρο εντοπισμό και απομόνωση τυχόν σφαλμάτων, όπως κάποιο βραχυκύκλωμα ή υπέρταση και δύναται να ανταλλάσσουν πληροφορίες με τα υπόλοιπα κύρια εξαρτήματα του δικτύου μέσω επικοινωνιακών διαύλων εξελίσσοντας πλέον την εγκατάσταση σε ένα "έξυπνο" δίκτυο (smart grid). Για την επίτευξη της αξιοπιστίας, έχουν ενσωματωθεί επιπρόσθετες οδεύσεις για την τροφοδότηση των βασικών κόμβων και όσο το δίκτυο ψηφιοποιείται, έχει εισαχθεί ένα νέο είδος προστασίας, αυτό της κυβερνοασφάλειας. Η διασφάλιση της προστασίας έναντι κυβερνοεπιθέσεων, είναι πολύ σημαντική για την αποτροπή πρόσβασης σε μη εξουσιοδοτημένο προσωπικό το οποίο έχει ως στόχο, την διατάραξη ομαλής λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου.

Συνοπτικά, το σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα δυναμικό και εξελισσόμενο σύστημα, όπου γίνονται συνεχώς προσπάθειες για να αυξηθεί η αξιοπιστία, η αποδοτικότητά και να εξασφαλιστεί η βέλτιστη λειτουργία του, μέσω της ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.3 Δίκτυο διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Αρχικά, για να κατανοήσουμε τη σημασία των δικτύων διανομής, θα πρέπει να καταλάβουμε πώς λειτουργεί το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας γενικά. Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελείται από όλες τις διαδικασίες, τα δίκτυα και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, από το αρχικό στάδιο της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας έως την μεταφορά της στον καταναλωτή.



Εικόνα 2: Συνοπτική παρουσίαση ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [2]

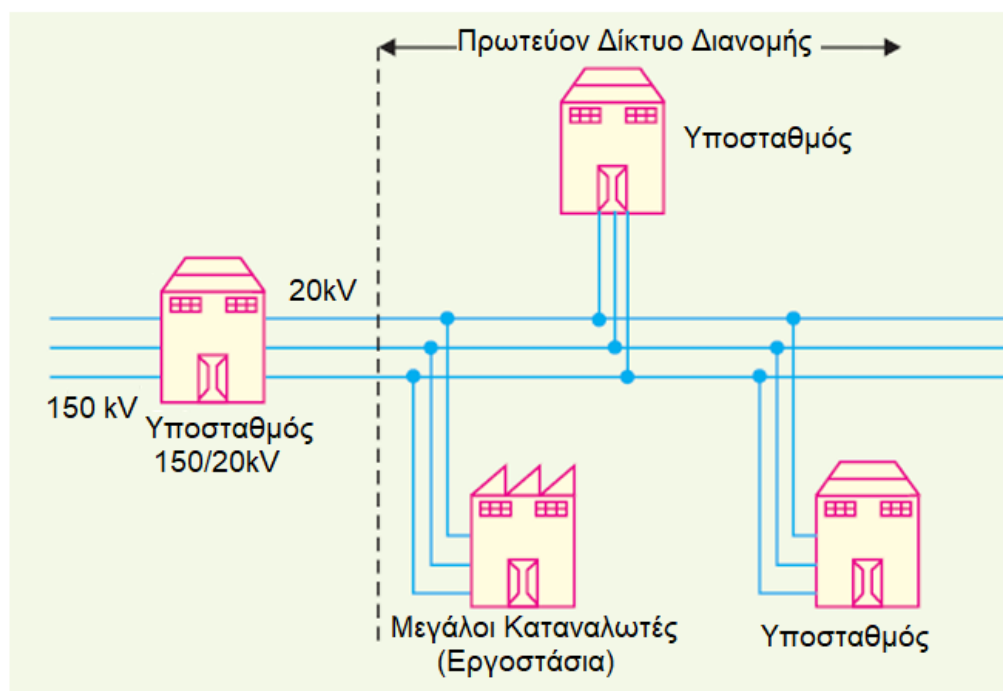
Στην εικόνα 2, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, από την μονάδα παραγωγής έως τον καταναλωτή, όπως προαναφέρθηκε. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τροφοδοτεί το δίκτυο με κάποια τάση (στην περίπτωση μας από 11kV έως 20kV). Αυτή η τάση έπειτα, μέσω του μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης (Step-up transformer), ανυψώνεται συνήθως σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από εκείνα όπου παράγεται (για παράδειγμα στα 150 kV). Αυτή η ανύψωση γίνεται, διότι στις μεγάλες αποστάσεις, οι γραμμές μεταφοράς έχουν λιγότερες απώλειες στην υψηλότερη τάση. Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, στην πραγματικότητα έχουν πολύ μεγαλύτερο μήκος από αυτό που φαίνεται στην εικόνα και μπορούν να χαρακτηριστούν ανάλογα με την απόσταση που διανύουν ως μικρής, μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας γραμμές μεταφοράς. Εκείνες της μικρής εμβέλειας έχουν συνήθως μήκος 50 km, ή λιγότερο, οι μεσαίας εμβέλειας έχουν μήκος μεταξύ των 50km και των 150km και τέλος της μεγάλης εμβέλειας έχουν μήκος πάνω από 150km.

Όταν πλέον η ισχύς έχει μεταφερθεί από τις γραμμές μεταφοράς, πριν τροφοδοτήσει το δίκτυο διανομής, η τάση θα πρέπει να υποβιβαστεί. Αυτό γίνεται με την χρήση ενός υποσταθμού διανομής, όπου ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσεως, μετατρέπει την τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Το επόμενο στάδιο, περιλαμβάνει την διανομή αυτής της ισχύος μέσω του δικτύου διανομής. Αυτή είναι και η διαδικασία κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται και φτάνει τον καταναλωτή.

Το δίκτυο διανομής επομένως, αποτελεί το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από την μονάδα παραγωγής προς τον καταναλωτή. Ο στόχος του δικτύου διανομής είναι συνεχόμενη τροφοδότηση των φορτίων με ηλεκτρική ισχύ. Το πρώτο βήμα για την επίτευξη αυτού του στόχου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,

είναι ο υποβιβασμός της τάσης από υψηλή, σε μία τάση κατάλληλη για το δίκτυο διανομής. Αυτός ο υποβιβασμός γίνεται μέσω ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης. Για περαιτέρω κατανομή της ισχύος, συνήθως χρησιμοποιούνται πολλαπλοί μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσεως, διότι υπάρχουν καταναλώσεις με διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος. Αυτό, μεταβάλλεται συναρτήσει τον αριθμό κατοικιών, κτηρίων αλλά και βιομηχανικών καταναλωτών που συνδέονται στα διάφορα τμήματα του δικτύου διανομής [3].

Ακολουθώντας, θα αναφερθούμε στους όρους του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δικτύου διανομής. Το πρωτεύον δίκτυο διανομής, περιλαμβάνει καταναλωτές που χρησιμοποιούν υψηλότερα επίπεδα τάσης και έχουν μεγαλύτερη απορρόφηση ισχύος, συγκριτικά με έναν καταναλωτή που λειτουργεί στα χαμηλότερα επίπεδα τάσης. Η τάση που χρησιμοποιείται στα πρωτεύοντα δίκτυα διανομής, εξαρτάται από την απαιτούμενη ισχύ που πρέπει να μεταφερθεί και την απόσταση που θα πρέπει να διανύσει. Αυτά τα επίπεδα τάσης, μπορεί να διαφέρουν, αλλά όλα θεωρούνται ως μέση τάση. Στην εικόνα που ακολουθεί, βλέπουμε μια σύνοψη ενός πρωτεύοντος δικτύου διανομής, όπου οι υποσταθμοί συνδέονται κατευθείαν στις γραμμές μεταφοράς.



Εικόνα 3: Πρωτεύον δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [2]

Το δευτερεύον δίκτυο διανομής, αναφέρεται στην διανομή της ισχύος σε χαμηλή τάση και χρησιμοποιείται από τους σύνηθες καταναλωτές. Η τάση του συστήματος είναι τα 230V (ή τα 400V, ανάλογα με την περιοχή). Η τάση υποβιβάζεται από το επίπεδο τάσης του

πρωτεύοντος δικτύου διανομής. Αυτοί οι μετασχηματιστές που υποβιβάζουν την τάση στα κατάλληλα επίπεδα για τους καταναλωτές, συνήθως τοποθετούνται κοντά σε σπίτια, ώστε οι γραμμές μεταφοράς της χαμηλής τάσης, να μην διανύουν μεγάλες αποστάσεις [3].

Όπως αναφέραμε νωρίτερα, όταν ο N. Tesla κέρδισε τον πόλεμο ρευμάτων, το εναλλασσόμενο ρεύμα ήταν κυρίαρχο για πολλά χρόνια όσον αφορά την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος είναι ότι το εναλλασσόμενο ρεύμα ήταν, και ακόμα είναι, πολύ εύκολο να μετασχηματιστεί και επομένως εύκολα αυξάνουμε ή υποβιβάζουμε την τάση του. Επιπρόσθετα, αποτελεί τον ευκολότερο τρόπο για να αλλάζουμε τα επίπεδα της τάσης στις γραμμές μεταφοράς και να την προσαρμόζουμε κατάλληλα στις ανάγκες του κάθε καταναλωτή.

Οι μετασχηματιστές, συγκριτικά με άλλες διατάξεις που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος, αποτελούν μια οικονομική λύση για τον μετασχηματισμό και τον έλεγχο της τάσης. Ο έλεγχος της τάσης επιτυγχάνεται με την χρήση μεταγωγέων τάσης, οι οποίοι ελέγχουν τον αριθμό των τυλιγμάτων που χρησιμοποιούνται από την πλευρά του πρωτεύοντος ή από την πλευρά του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Επιπρόσθετα, υπάρχουν δύο κατηγορίες μεταγωγέων τάσης, αυτοί που λειτουργούν έμφορτοι, και αυτοί που λειτουργού άφορτοι.

Η διαφορά τους έγκειται στο ότι ο έμφορτος μεταγωγέας τάσης, μπορεί να αλλάξει τον αριθμό των τυλιγμάτων που χρησιμοποιούνται τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον του μετασχηματιστή (ανάλογα με το που έχει τοποθετηθεί). Αυτό σημαίνει ότι ο μετασχηματιστής, μπορεί να αλλάξει την τάση εξόδου του ενώ είναι συνδεδεμένος στο φορτίο. Σταθμοί παραγωγής, υποσταθμοί και υποσταθμοί διανομής με μετασχηματιστή ισχύος, συνήθως έχουν έμφορτο μεταγωγέα τάσης. Ο άφορτος μεταγωγέας τάσης, μπορεί να αλλάξει τον αριθμό τυλιγμάτων μόνο όταν είναι αποσυνδεδεμένος ο μετασχηματιστής από τα φορτία. Η ικανότητα αυτή, του εύκολου ελέγχου της τάσης δηλαδή, έκανε το εναλλασσόμενο ρεύμα την προτιμητέα επιλογή μεταξύ εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος για χρήση στα δίκτυα διανομής [4].

Η τεχνολογία του εναλλασσόμενου ρεύματος υπάρχει εδώ και πολλά χρόνια, και ως αποτέλεσμα, η δομή όλης της κοινωνίας είναι βασισμένη σε αυτό. Με άλλα λόγια, το ηλεκτρικό δίκτυο σε όλον τον κόσμο είναι βασισμένο στο εναλλασσόμενο ρεύμα, του οποίου, με την πάροδο του χρόνου, η τεχνολογία αναπτύχθηκε, με αποτέλεσμα η χρήση του να τυποποιηθεί. Αυτό φυσικά επηρεάζει το κόστος του εξοπλισμού που λειτουργεί με AC ρεύμα έναντι του εξοπλισμού που λειτουργεί με DC ρεύμα. Τέτοιος εξοπλισμός περιλαμβάνει για παράδειγμα τους αποζεύκτες που χρησιμοποιούνται αντίστοιχα σε AC και DC συστήματα. Οι διακόπτες των AC συστημάτων, είναι πολύ φθηνότεροι από ότι οι διακόπτες των DC

συστημάτων, λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς του εναλλασσόμενου και του συνεχούς ρεύματος, καθώς επίσης και της διαφοράς στην κλίμακα παραγωγής και του τυπικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σήμερα.

Το εναλλασσόμενο ρεύμα, αν και γενικά έχει αρκετά πλεονεκτήματα, έχει εξίσου αρκετά μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα του εναλλασσόμενου ρεύματος, είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρολογικών εξοπλισμών, χρειάζονται συνεχές ρεύμα για να λειτουργήσουν. Δηλαδή, κάθε σχεδόν οικιακή συσκευή, χρειάζεται έναν ανορθωτή που να μετατρέπει το AC σε DC. Αυτή η μετατροπή εφαρμόζεται και σε πληθώρα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως είναι τα φωτοβολταϊκά. Τα φωτοβολταϊκά στις μέρες μας, παράγουν τάση συνεχούς ρεύματος, η οποία πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα ώστε να τροφοδοτηθεί στο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά, πρέπει πρώτα να μετατραπεί από DC σε AC, και σε πολλές περιπτώσεις να μετατραπεί πάλι σε DC για να τροφοδοτήσει τις διάφορες συσκευές.

Το ίδιο ισχύει και για τις γραμμές μεταφοράς που λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση. Αν και χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα, έχουν και αυτές αρκετά μειονεκτήματα. Οι γραμμές μεταφοράς που μεταφέρουν ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις, λειτουργούν υπό υψηλές τάσεις. Λόγω των υψηλών τάσεων, παρατηρείται το φαινόμενο Corona, και διηλεκτρικές απώλειες. Το φαινόμενο Corona πρακτικά αναφέρεται στις ηλεκτρικές εκκενώσεις οι οποίες προκαλούνται από τον ιοντισμό της ατμόσφαιρας που περιβάλλει τα καλώδια. Αυτές οι ηλεκτρικές εκκενώσεις αποτελούν απώλειες ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Οι διηλεκτρικές απώλειες, είναι οι απώλειες που παρατηρούνται σε συγκεκριμένες περιοχές των αγωγών λόγω της θέρμανσής τους. Άλλο ένα πρόβλημα με τις γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος είναι το μέγεθος των καλωδίων, το οποίο επηρεάζεται από το επιδερμικό φαινόμενο. Το επιδερμικό φαινόμενο αποτρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα να διαρρέει δια μέσου όλης της διατομής του καλωδίου, με αποτέλεσμα να διέρχεται μόνο από την περιοχή της περιμέτρου του. Το αποτέλεσμα αυτού, είναι πως οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης έχουν χαμηλή σχετικά χωρητικότητα για την μεταφορά ισχύος.

Όταν λαμβάνει μέρος η μεταφορά ισχύος από τις γραμμές μεταφοράς στο τοπικό δίκτυο διανομής, θα πρέπει να βεβαιωθούμε ότι η συχνότητα μεταξύ αυτών των δύο δικτύων είναι ίδια. Αυτό σημαίνει ότι η γραμμή μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος θα πρέπει να είναι συγχρονισμένη με το νέο δίκτυο που συνδέεται [2].

1.5 Μετατροπείς

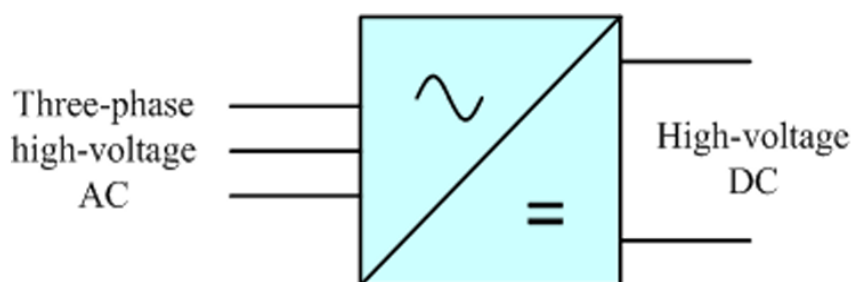
Στα σημερινά δίκτυα μεταφοράς, δίκτυα διανομής και στα νοικοκυριά, υπάρχουν διάφοροι μετατροπείς που εξυπηρετούν μια πληθώρα αναγκών. Οι μετατροπείς αυτοί, ανάλογα με τον σκοπό που εξυπηρετούν, χωρίζονται σε κατηγορίες. Για παράδειγμα, στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα λόγω των μειωμένων απωλειών, υπάρχουν μετατροπείς στα δύο άκρα τους. Γενικά, οι τρεις μέθοδοι μετασχηματισμού ισχύος είναι οι κάτωθι:

- AC σε DC (ανορθωτής)
- DC σε AC (αντιστροφέας)
- DC σε DC (μετατροπέας)

Η κάθε μετατροπή γίνεται με κάποιον συγκεκριμένο τρόπο. Παρακάτω θα αναλύσουμε σύντομα τη λειτουργία του κάθε είδους μετατροπέα.

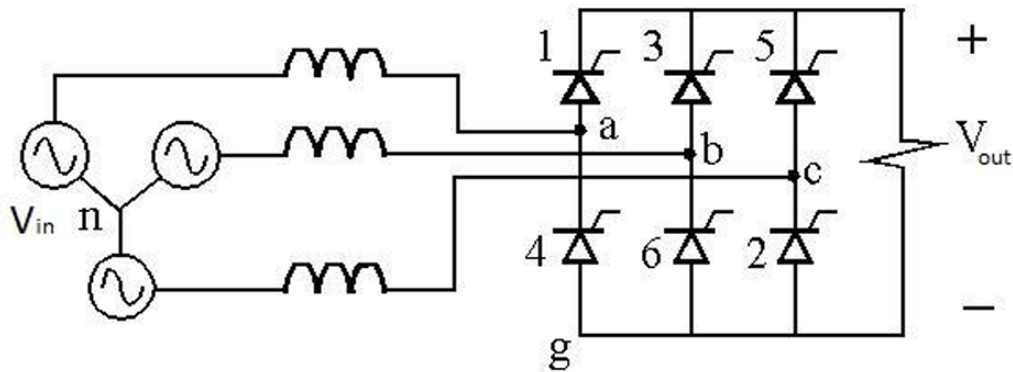
1.5.1 AC/DC (Ανορθωτές)

Πρόκειται να περιγράψουμε τον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτείται ένα νοικοκυριό με ισχύ, μέσω της γραμμής εναλλασσομένου ρεύματος από το δίκτυο μεταφοράς. Ενώ πολλές οικιακές συσκευές συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο AC, πρακτικά χρειάζονται το συνεχές ρεύμα για να λειτουργήσουν. Ο σκοπός του ανορθωτή, είναι να μετατρέψει το εναλλασσόμενο ρεύμα που δέχεται σαν είσοδο, σε συνεχές, το οποίο θα παράγει στην έξοδό του. Αυτήν την διαδικασία την ονομάζουμε ανόρθωση. Αν και τέτοιοι μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές διεργασίες, συνήθως εντοπίζονται σαν εξαρτήματα των οικιακών συσκευών και στα συστήματα μεταφοράς ισχύος υψηλής τάσης με συνεχές ρεύμα.

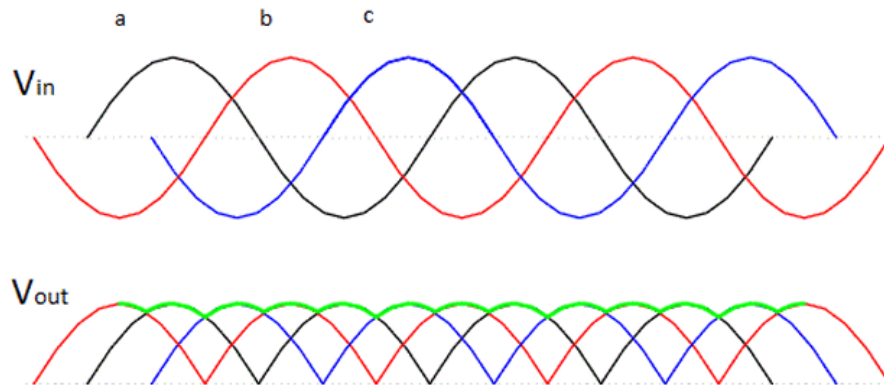


Εικόνα 4: Μετατροπέας AC/DC

Στα συστήματα υψηλής τάσης, υπάρχουν διάφοροι τρόποι να μετατρέψουμε το AC σε DC. Ένας απλός τρόπος επεξήγησης, του πώς γίνεται αυτή η μετατροπή, είναι με τη χρήση της ελεγχόμενης τριφασικής πλήρης ανόρθωσης με θυρίστορ.



Εικόνα 5: Τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής γέφυρας (6 στοιχείων) [5]

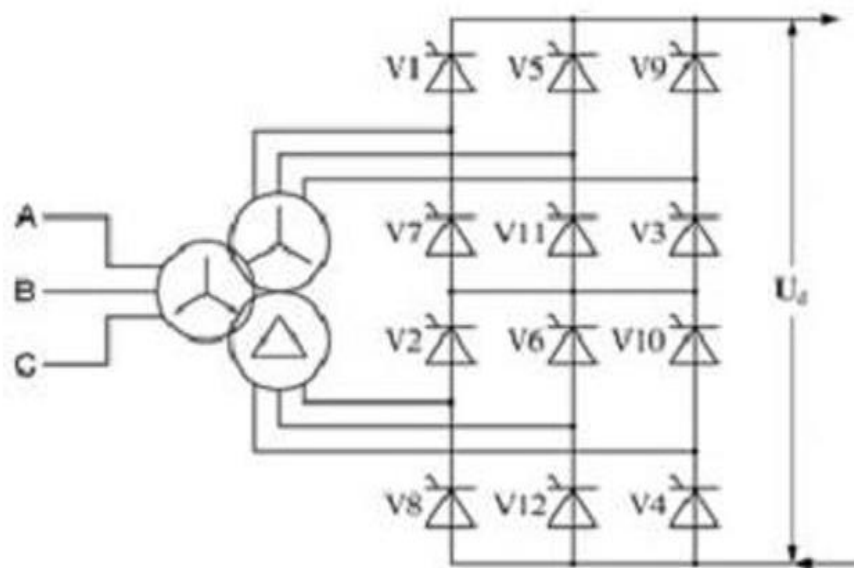


Εικόνα 6: Απεικόνιση πλήρους τριφασικής ανόρθωσης [5]

Ο τρόπος με τον οποίο ο ανορθωτής μετατρέπει την AC σε DC τάση, είναι μέσω της αγωγής κάθε φάσης ξεχωριστά, διαμέσου των στοιχείων ελέγχου (θυρίστορ, στοιχεία 1 – 6, στην εικόνα Νο7). Αρχικά η φάση a διέρχεται από το θυρίστορ νο1 και οδηγείται στην έξοδο, ακολουθεί η αγωγή της φάσης c μέσα από το στοιχείο 2 προς την έξοδο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να διέλθουν όλες οι φάσεις τόσο κατά την θετική όσο και κατά την αρνητική ημιπερίοδο. Η εναλλαγή αυτή μεταξύ των διακοπτικών στοιχείων και των φάσεων μας δίνει στην έξοδο το επιθυμητό συνεχές ρεύμα.

Στα συστήματα υψηλής ισχύος, χρησιμοποιείται κυρίως ο ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής γέφυρας με 12 στοιχεία (και όχι με 6 όπως πριν). Αυτό γίνεται διότι στον ανορθωτή γέφυρας με τα 6 στοιχεία, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να συμβούν αρμονικές παραμορφώσεις. Αυτές οι παραμορφώσεις αποτελούν μόλυνση στο σύστημά μας και μπορούν να προκαλέσουν ανωμαλίες ή και βλάβες, εάν υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο.

Ένα παράδειγμα τέτοιων επιπτώσεων είναι η υπερθέρμανση καλωδίων και η ζημιά σε εξοπλισμό λόγω των ανωμαλιών στα επίπεδα της τάσης τροφοδοσίας.



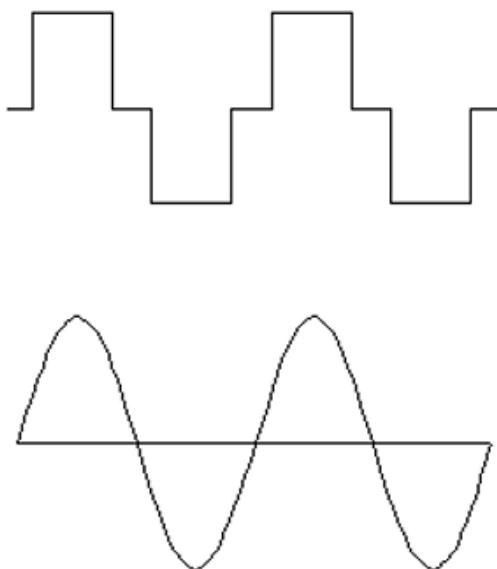
Εικόνα 7: Τριφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής γέφυρας (12 στοιχείων) [5]

Ο τρόπος που συνδέεται ένας ανορθωτής με 12 διακοπτικά στοιχεία είναι έχοντας δύο ανορθωτές των 6 στοιχείων συνδεδεμένους παράλληλα, με μια διαφορά φάσης μεταξύ τους κατά 30° . Αυτή η διαφορά φάσης επιτυγχάνεται με χρήση μετασχηματιστή τριών τυλίγμάτων πριν τον μετατροπέα. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, αυτός ο μετασχηματιστής έχει δύο δευτερεύοντα τυλίγματα, το ένα συνδεδεμένο κατά αστέρα ενώ το άλλο κατά τρίγωνο. Σε αυτά τα τυλίγματα συνδέουμε τον κάθε ανορθωτή 6 στοιχείων, με αποτέλεσμα η έξοδός τους να είναι η μισή από ότι θα ήταν αν είχαμε μόνο έναν ανορθωτή όπως πριν, και η κάθε κορυφή να έχει διαφορά φάσης 30° από την προηγούμενη. Αυτό, από την πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή θα δώσει μικρότερα καρφιά τάσης ανά φάση και λιγότερες πιθανότητες εμφάνισης αρμονικών παραμορφώσεων [5].

1.5.2 DC/AC (Αντιστροφείς)

Οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται και αυτοί σε πληθώρα εφαρμογών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου, σε δίκτυο διανομής το οποίο να λειτουργεί σε συνεχές ρεύμα. Παραδείγματα χρήσης των αντιστροφέων συναντάμε σε συσκευές τροφοδοσίας (μπαταρίες), σε διατάξεις ελέγχου στροφών ηλεκτρικών κινητήρων και στο δίκτυο ισχύος. Το να

γνωρίζουμε πως λειτουργεί ένας αντιστροφείας κρίνεται απαραίτητο για την κατανόηση της παρούσας διπλωματικής. Υπάρχουν πολλοί αντιστροφείς [6], οι οποίοι παράγουν και διαφορετικές κυματομορφές εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι πιο διαδεδομένες μορφές είναι οι ημιτονοειδής και οι τροποποιημένες ημιτονοειδής κυματομορφές.

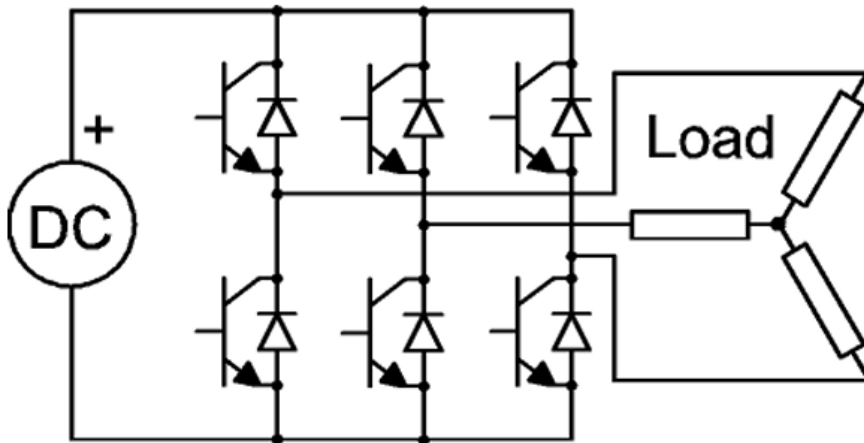


Εικόνα 8 Τροποποιημένη ημιτονοειδή και ημιτονοειδή κυματομορφή

Στην εικόνα 10 φαίνονται οι δύο κυματομορφές που αναφέραμε. Η διαφορά των δύο αυτών μορφών είναι πως χρειάζεται να κάνουμε μια παραπάνω διεργασία για να μεταβούμε από την τροποποιημένη ημιτονοειδή στην ημιτονοειδή μορφή. Στην τροποποιημένη ημιτονοειδή μορφή, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι έχουμε τρία διακριτά επίπεδα τάσης (θετική ακμή, μηδενική τάση και αρνητική ακμή). Η καθαρή ημιτονοειδής μορφή όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα, πρακτικά δεν θα επιτευχθεί ποτέ. Στην πραγματικότητα θα υπάρχουν κάποιες αιχμές αλλά και πάλι οι αρμονικές παραμορφώσεις θα είναι πολύ λιγότερες σε σχέση με την αρχική μορφή.

Μια βασική διάταξη αντιστροφής, αποτελείται από έναν αντιστροφέα που συνδέεται σε μια πηγή συνεχούς ρεύματος, σε έναν μετασχηματιστή και έναν διακόπτη να μεταβαίνει γρήγορα από την μία θέση λειτουργίας σε μία άλλη. Το συνεχές ρεύμα της πηγής, όπως διέρχεται από τον διακόπτη, καταλήγει στο πρωτεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα να παράγεται εναλλασσόμενο ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα. Ο λόγος που το συνεχές ρεύμα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο, είναι επειδή η εναλλαγή της τροφοδοσίας του πρωτεύοντος τυλίγματος προκαλεί μεταβολή του μαγνητικού του πεδίου, με αποτέλεσμα αυτή η μεταβολή να μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αντιστροφέων, αλλά για ένα τριφασικό σύστημα, χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε έναν ειδικά κατασκευασμένο για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Τέτοιοι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται και για την μεταφορά υψηλής ισχύος σε DC συστήματα [6].



Εικόνα 9: Απλοποιημένο κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα

Ένας τριφασικός αντιστροφέας είναι θεωρητικά μια ομάδα τριών μονοφασικών αντιστροφέων, συνδεδεμένοι σε έναν από τους τρεις ακροδέκτες της εξόδου. Οι διακόπτες των αντιστροφέων ελέγχονται ώστε στην έξοδο να παράγεται μια τριφασική εναλλασσόμενη τάση. Ο έλεγχος γίνεται με τέτοιον τρόπο ώστε δύο κάθε φορά στοιχεία να άγουν (δηλαδή δημιουργούνται ζευγάρια αγωγής), τα οποία να άγουν για το ένα τρίτο της περιόδου του κύματος που θέλουμε να παράξουμε.

Όπως είδαμε προηγουμένως, υπάρχει σαφής διαφορά μεταξύ του τροποποιημένου και του καθαρού ημιτονοειδούς σήματος, κάτι το οποίο καθορίζει και την χρησιμότητα της κάθε κυματομορφής. Ενώ οι περισσότερες οικιακές συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν με τροποποιημένο ημίτονο σαν είσοδο, ένας πιο ευαίσθητος ηλεκτρονικός εξοπλισμός μπορεί να απαιτεί μια πιο σταθερή τροφοδοσία.

Άλλη μια διαφορά μεταξύ αυτών των δύο κυματομορφών είναι η αρμονική παραμόρφωση, η οποία σαφώς είναι εντονότερη στους αντιστροφείς με τροποποιημένο ημίτονο ως έξοδο. Αυτή η παραμόρφωση, αν και μικρότερη, υπάρχει και στους αντιστροφείς που παράγουν ημιτονοειδή έξοδο, και αναγράφεται στα στοιχεία του κατασκευαστή. Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί και η επίδραση στον βαθμό απόδοσης των συσκευών που τροφοδοτούνται από τις δύο αυτές κυματομορφές. Ένας αντιστροφέας με τροποποιημένο ημίτονο, μειώνει την απόδοση των μετασχηματιστών και των κινητήρων κατά 10%-20%.

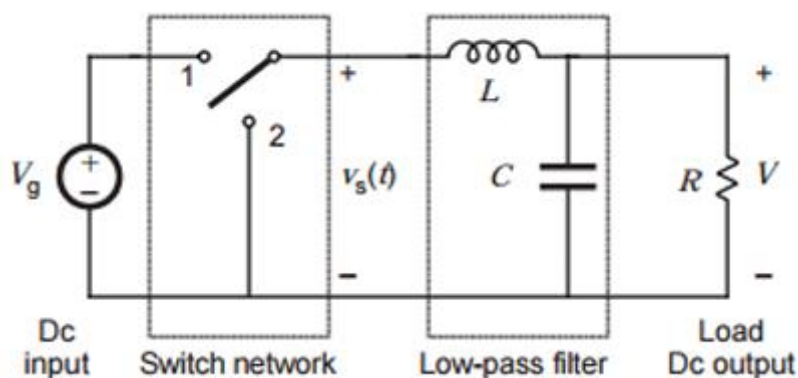
Αυτές οι απώλειες, είναι συνήθως απώλειες σε θερμότητα που μακροπρόθεσμα προκαλούν ζημιά στον εξοπλισμό.

1.5.2 DC/DC Μετατροπείς

Η τελευταία μορφή μετατροπέων που θα αναλύσουμε είναι οι μετατροπείς DC/DC. Αυτό το είδος μετατροπέων, χρησιμοποιείται ευρύτατα στις εφαρμογές τροφοδότησης DC ισχύος και στον έλεγχο DC κινητήρων. Η είσοδος αυτών των μετατροπέων είναι συνήθως από μία ανορθωμένη γραμμή τάσης, η οποία δεν έχει ρυθμιστεί, και για αυτό συνήθως οι DC/DC μετατροπείς, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που θέλουμε να ρυθμίσουμε την παραγόμενη, από έναν ανορθωτή, DC τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, και εδώ έχουμε διάφορες κατηγορίες DC/DC μετατροπέων, αλλά οι πιο σύνθετες τοπολογίες βασίζονται στους κάτωθι τύπους:

- Μετατροπείς υποβιβασμού τάσης (Step- Down / Buck Converters)
- Μετατροπείς ανύψωσης τάσεως (Step- Up / Boost Converters)
- Μετατροπείς ανύψωσης/υποβιβασμού τάσεως (Step-Up Step-Down / Bulk-Boost Converters)

Οι μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης είναι απλοί όσον αφορά την τοπολογία τους, ενώ ο ανύψωσης/υποβιβασμού τάσεως είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των άλλων δύο.



Εικόνα 10: DC/DC Μετατροπέας υποβιβασμού τάσεως

Στην εικόνα 12, βλέπουμε το κύκλωμα ενός μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού τάσεως. Έχει ως τάση εξόδου ίση με V_g όταν ο διακόπτης είναι στη θέση 1, και 0 όταν ο διακόπτης είναι στη θέση 2. Το αποτέλεσμα της εναλλαγής μεταξύ των θέσεων 1 και 2 είναι

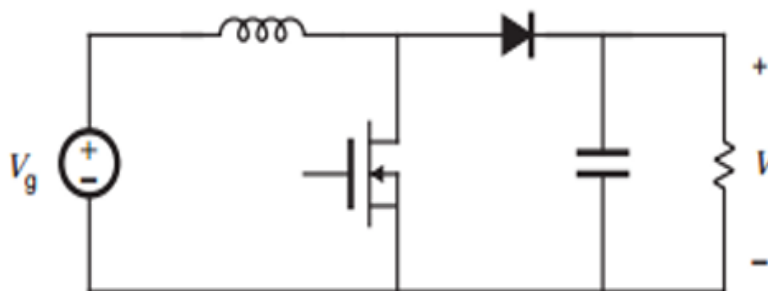
ένας τετραγωνικός παλμός με περίοδο T και κύκλο λειτουργίας D . Η διακοπτική συχνότητα ισούται με $1/T$, και συνήθως είναι της τάξεως των $1\text{kHz} - 1\text{MHz}$, και στον ρόλο του διακόπτη έχουμε ένα ημιαγωγικό στοιχείο.

Επιπρόσθετα, έχουμε ένα βαθυπερατό φίλτρο το οποίο είναι συνδεδεμένο στο κύκλωμα. Αυτό διότι λόγω της διακοπτικής συχνότητας, προκαλούνται αρμονικές, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες. Έτσι, μέσω του φίλτρου, το οποίο έχει συχνότητα αποκοπής ίση με:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

απαλείφουμε τις αρμονικές. Η συχνότητα αποκοπής, θα πρέπει να επιλεγεί ώστε να είναι μικρότερη από της διακοπτικής συχνότητας, ώστε το φίλτρο να μην επιτρέπει να περάσει καμία άλλη συχνότητα εκτός της DC συνιστώσας της τάσης εξόδου.

Ο DC/DC μετατροπέας ανόρθωσης τάσης, λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, αν και η τοπολογία του είναι λίγο διαφορετική. Για να πετύχουμε την ανύψωση τάσης, το πηνίο τοποθετείται πριν την διόδο, ώστε όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, να διέρχεται το ρεύμα από αυτό και να αποθηκεύει ενέργεια μέσω της δημιουργίας μαγνητικού πεδίου. Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, η ενέργεια που έχει αποθηκεύσει το πηνίο και η ενέργεια της πηγής που είναι σε σειρά, προστίθενται, ανυψώνοντας την τάση και φορτίζεται ο πυκνωτής μέσω της διόδου. Η τοπολογία ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσεως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. [7]



Εικόνα 11: DC/DC Μετατροπέας ανύψωσης τάσεως

1.6 Σύγχρονα προβλήματα ηλεκτρικών δικτύων

Όπως προαναφέρθηκε, η απαίτηση για ηλεκτρική ενέργεια ολοένα και αυξάνεται, οδηγώντας έτσι τα δίκτυα διανομής στα λειτουργικά τους όρια. Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που καλούνται να διαχειριστούν οι διαχειριστές των δικτύων είναι η διεσπαρμένη παραγωγή. Ουσιαστικά πρόκειται για την αυξανόμενη ανάγκη ενσωμάτωσης ανανεώσιμων

πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), ως λύση στις απαιτήσεις των ενεργειακών πολιτικών που θεσπίζονται από τα κράτη. Οι ΑΠΕ, οι οποίες κυρίως απαρτίζονται από αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκά, χαρακτηρίζονται από την μεταβαλλόμενη χρονικά και δύσκολα προβλέψιμη παραγωγή ενέργειας, με αποτέλεσμα να



Εικόνα 12: Ανεμογεννήτριες και Φωτοβολταϊκά Πάνελ

δυσχεραίνουν την αντιστοίχιση της παραγωγής με την ζήτηση φορτίου ανά πάσα χρονική στιγμή. Επιπρόσθετα, εκτός του ότι η ενσωμάτωση αυτών των στοχαστικών πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, σε κάποιες περιπτώσεις οδηγεί και στην απαίτηση περισσότερων εφεδρειών, η διασύνδεση των γεωγραφικών περιοχών που προσφέρονται για ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, απαιτεί γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους καθώς συνήθως αυτές βρίσκονται μακριά από τα κέντρα κατανάλωσης φορτίου. Όλη αυτή η επιπρόσθετη πολυπλοκότητα, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά το πρόβλημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, ισχύει ότι η ολοένα και αυξανόμενη χρήση των ανανεώσιμων πηγών, οδηγεί στην απαίτηση για γραμμές μεταφοράς μεγαλύτερου μήκους και χωρητικότητας. Ωστόσο, λόγω των τεχνικών, λειτουργικών και οικονομικών περιορισμών (επίδραση επιδερμικού φαινομένου, διάφορα κόστη τοποθέτησης και λειτουργίας), το μέγιστο μήκος μεταφοράς και η απόδοση των γραμμών εναλλασσόμενου ρεύματος είναι περιορισμένα. Έτσι, η χρήση υψηλής συνεχούς τάσης (HVDC) για την μεταφορά ισχύος, γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη, κυρίως στην Ευρώπη και στην Ασία. Συγκεκριμένα, η χρήση υψηλής συνεχούς τάσης, διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην υποθαλάσσια μεταφορά ισχύος (για παράδειγμα στις υποθαλάσσιες συνδέσεις δικτύων ή κάποιου πλωτού πάρκου ανεμογεννητριών ή φωτοβολταϊκών με την ενδοχώρα), καθώς προσφέρει χαμηλότερες απώλειες και υψηλότερη αξιοπιστία. Τέλος, η ανάπτυξη στην χρήση του συνεχούς ρεύματος στην υψηλή τάση, έχει οδηγήσει στην έρευνα και την χρήση του συνεχούς ρεύματος και στην μέση τάση, καθώς οι ήδη υπάρχουσες υποδομές (καλωδιώσεις), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μεταφορά τέτοιου ρεύματος με ελάχιστες μετατροπές ή να τοποθετηθούν στο ήδη υπάρχον δίκτυο, νέα καλώδια μεταφοράς συνεχούς ρεύματος μέσης τάσης.

Τέλος, αναπτύσσονται και προστίθενται στο δίκτυο τεχνολογίες που χρησιμοποιούν για την λειτουργία τους συνεχές ρεύμα. Για παράδειγμα, όπως είναι γνωστό, τα φωτοβολταϊκά, παράγουν συνεχής τάση, οι νέοι σιδηρόδρομοι χρησιμοποιούν συνεχής τάση για την λειτουργία τους, όπως και πολλά άλλα μέσα μεταφοράς όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και πιο σπάνια, κάποια πλοία για την πρόωσή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση για χρήση επιπλέον ηλεκτρονικών διατάξεων στο δίκτυο, ικανές ώστε να μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχής (ή το ανάποδο) για να τροφοδοτήσουν τα εν λόγω φορτία, δημιουργώντας άλλον έναν παράγοντα που αυξάνει το επίπεδο σύνθεσής τους. [8]

1.7 Εφαρμογές Συνεχούς Ρεύματος και πλεονεκτήματα στην Μέση Τάση (MVDC)

Η εφαρμογή συνεχούς ρεύματος στα δίκτυα διανομής μέσης τάσης γίνεται πραγματικότητα στις μέρες μας κυρίως σε πρωτοποριακά έργα. Ένα τέτοιο παράδειγμα, είναι η τοποθέτηση ενός back-to-back μετατροπέα MVDC (ουσιαστικά μετατροπέα AC-DC-AC), στο δίκτυο διανομής του Ηνωμένου Βασιλείου, με σκοπό την διασύνδεση δύο γειτονικών δικτύων μεταξύ της Αγγλίας και της Ουαλίας. Σε άλλες περιπτώσεις όπου τα φορτία μας λειτουργούν με συνεχές ρεύμα (όπως έχουν ήδη προαναφερθεί), η μετατροπή από και σε εναλλασσόμενη τάση απαιτεί μία επιπλέον διεργασία, η οποία μπορεί να αποφευχθεί εάν τα δίκτυα διανομής λειτουργούσαν σε συνεχής τάση, μειώνοντας έτσι τις απώλειες που προκύπτουν. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται κάποιες εφαρμογές όπου η χρήση τέτοιων μετατροπέων και κατά επέκταση συνεχούς τάσης θα προσέφερε πολλά οφέλη:

1. Απευθείας Σύνδεση Τμημάτων Δικτύων - Υποσταθμών

Στο δίκτυο διανομής υπάρχουν συχνά τμήματα τα οποία δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας το ένα με το άλλο λόγω διαφορετικής γωνίας φάσης, διαφορετικής συχνότητας, παρουσίας υπερβολικών αρμονικών σε κάποιο από τα δύο τμήματα, διαφορετική συνδεσμολογία ουδετέρου ή/και γείωσης και τέλος, μπορεί λόγω της σύνδεσης, το ρεύμα που θα προκύψει σε κάποιο σφάλμα βραχυκύκλωσης να ξεπεράσει το μέγιστο επιτρεπτό. Ωστόσο, για πληθώρα λόγων, μπορεί να είναι απαραίτητη η σύνδεση των ανωτέρω τμημάτων ώστε να ξεπεραστεί για παράδειγμα, ο περιορισμός χωρητικότητας ισχύος λόγω της αυξανόμενης ανάπτυξης της διεσπαρμένης παραγωγής, μπορεί να απαιτείται η συνένωση στο πλαίσιο

ελέγχου ροής του φορτίου στους συγκεκριμένους τομείς και τέλος, πιθανόν να απαιτείται ο δυναμικός έλεγχος της τάσης και άεργου ισχύος, είτε στο ένα δίκτυο είτε στο άλλο. Όλα τα ανωτέρω μπορούν να επιτευχθούν, υπερνικώντας τους περιορισμούς, εάν η σύνδεση γίνει μέσω ενός μετατροπέα MVDC.

2. Μετατροπή τάσης δικτύου διανομής από εναλλασσόμενη σε συνεχή

Η μετατροπή των υπάρχουσών γραμμών εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την χωρητικότητα ισχύος του δικτύου. Για πολλαπλές μακριές γραμμές μεταφοράς οι οποίες είναι συνωστισμένες, η μετατροπή τους σε γραμμές συνεχούς ρεύματος, αποτελεί έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο για την αύξηση του συντελεστή ισχύος τους. Επιπρόσθετα, με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η σταθερότητα του δικτύου αφού πλέον δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης στατών αντισταθμιστών (STATCOM = Static Synchronous Compensator) και στα δύο άκρα του δικτύου για έλεγχο της άεργου ισχύος, και επομένως της τάσης στα σημεία σύνδεσής του με το υπόλοιπο δίκτυο. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι ότι επαναχρησιμοποιούνται οι υπάρχουσες γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος όπως προαναφέρθηκε, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης και επιτυγχάνεται μεγάλη σταθερότητα δικτύου.

3. Σύνδεση μεγάλων φορτίων εντός κατοικημένων περιοχών

Η προσθήκη επιπλέον χωρητικότητας ισχύος, μέσω της τοποθέτησης επιπλέον γραμμών σε αστικά κέντρα, είναι κοστοβόρα και σε πολλές περιπτώσεις η απόκτηση άδειας για την υλοποίηση τέτοιων έργων είναι δύσκολη. Ένα καλώδιο συνεχής τάσης, χρειάζεται λιγότερο χώρο από το αντίστοιχο εναέριο εναλλασσόμενης τάσης, μεταφέροντας παραπάνω ισχύ, και έτσι αποτελεί την μόνη λύση σε περίπτωση απαίτησης επιπρόσθετης ισχύος. Επίσης, η υπογειοποίηση των ηλεκτροφόρων καλωδίων που γίνεται σταδιακά στις μεγάλες πόλεις, ευνοεί την χρησιμοποίηση τέτοιων καλωδίων, αφού δεν προκαλεί προβλήματα χωρητικών ρευμάτων.

4. Σύνδεση απομονωμένων περιοχών

Όπως προαναφέρθηκε, σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν περιοχές (για παράδειγμα νησιά), οι οποίες βασίζονται αυστηρά και μόνο, σε πολυδάπανες τοπικές μονάδες παραγωγής (πχ

βενζινοκίνητες γεννήτριες) για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό, μπορεί να αντιμετωπισθεί με την χρήση φθηνού, εξωθημένου καλωδίου μέσης συνεχούς τάσης το οποίο θα τροφοδοτεί τις περιοχές αυτές, με φθηνή ηλεκτρική ενέργεια από το κύριο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται επιπρόσθετο οικονομικό όφελος, από την παύση της ανάγκης για μεταφορά-αποθήκευση καυσίμου και συντήρηση της τοπικής μονάδας παραγωγής.

5. Σύνδεση συνεχούς ρεύματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα μεσαίου μεγέθους (δηλαδή με παραγωγή ισχύος μεγαλύτερη από 10-20MW), συνήθως συνδέονται απευθείας σε δίκτυο μεγαλύτερο των 100kVac, ή σε υποσταθμό μετασχηματισμού μέσης σε υψηλής εναλλασσόμενης τάσης, από την πλευρά της μέσης τάσης. Για να αποφευχθεί η επέκταση του δικτύου διανομής, η μέση τάση συνεχούς ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διασύνδεση των νέων διασκορπισμένων εγκαταστάσεων παραγωγής στους ήδη υπάρχοντες υποσταθμούς που βρίσκονται σε μακρινές αποστάσεις. Αυτό πρακτικά θα είχε και το πλεονέκτημα εξοικονόμησης εσωτερικού χώρου όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες, αφού πλέον θα χρειάζεται ένας ανορθωτής, τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα συνδέονται απευθείας στους αντιστροφείς, και γενικά θα υπάρχουν λιγότερες απώλειες καθώς θα μειωθούν τα βήματα μετατροπής της τάσης.

6. Εσωτερικές διασυνδέσεις σε βιομηχανικά δίκτυα

Υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις όπου χρειάζεται η μεταφορά ισχύος μεταξύ δύο δικτύων, τα οποία λειτουργούν υπό διαφορετικές συχνότητες, ειδικά όταν υπάρχει ανισορροπία φορτίων. Σε αυτές τις καταστάσεις, ένα εσωτερικό σύστημα συνεχούς ρεύματος που θα κάνει την διασύνδεση, θα προσφέρει ομαλή μεταφορά ισχύος, θα περιορίζει τις αρμονικές στην μία από τις δύο πλευρές του δικτύου και θα προσέφερε την απαιτούμενη άεργο ισχύς το σύστημα ώστε να ισορροπήσει τις τάσεις των φορτίων. Σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί μια μονάδα παραγωγής που λειτουργεί στα 50Hz να μεταφερθεί σε ένα δίκτυο των 60Hz (ή και το ανάποδο), και σε αυτήν την περίπτωση, ένα σύστημα συνεχούς τάσης, μπορεί να δώσει λύση για την διασύνδεση της μονάδας σε οποιοδήποτε συχνότητα δικτύου. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το σύστημα στατών αντισταθμιστών ισχύος 1250kVA που εγκαταστάθηκε σε μία γραμμή παραγωγής στο Μεξικό, ώστε να γίνει δυνατή η μεταφορά μιας άλλης γραμμής

παραγωγής που λειτουργούσε στην Ιταλία, χωρίς την αλλαγή ή την τροποποίηση του εξοπλισμού της [9].

1.8 Σκοπός παρούσας διπλωματικής

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση συνεχούς ρεύματος στις υψηλές τάσεις, έχει ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία σε πληθώρα εφαρμογών και σταδιακά έχει αρχίσει η χρήση του και στην μέση τάση. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να μελετήσουμε ένα τέτοιο δίκτυο μέσης τάσης και πώς αυτό συμπεριφέρεται σε διάφορες καταστάσεις. Για να επιτευχθεί αυτό, θα δημιουργηθεί ένα δίκτυο μέσης τάσεως που λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο θα μετατραπεί με τις κατάλληλες τροποποιήσεις σε ένα υβριδικό δίκτυο με τμήματα συνεχούς ρεύματος αντίστοιχης τάσης. Έτσι, θα μπορέσουμε να αποκτήσουμε πλήρη εικόνα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προσφέρει η κάθε τοπολογία έναντι της άλλης και να γίνει μια σωστή σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών τρόπων μεταφοράς ισχύος.

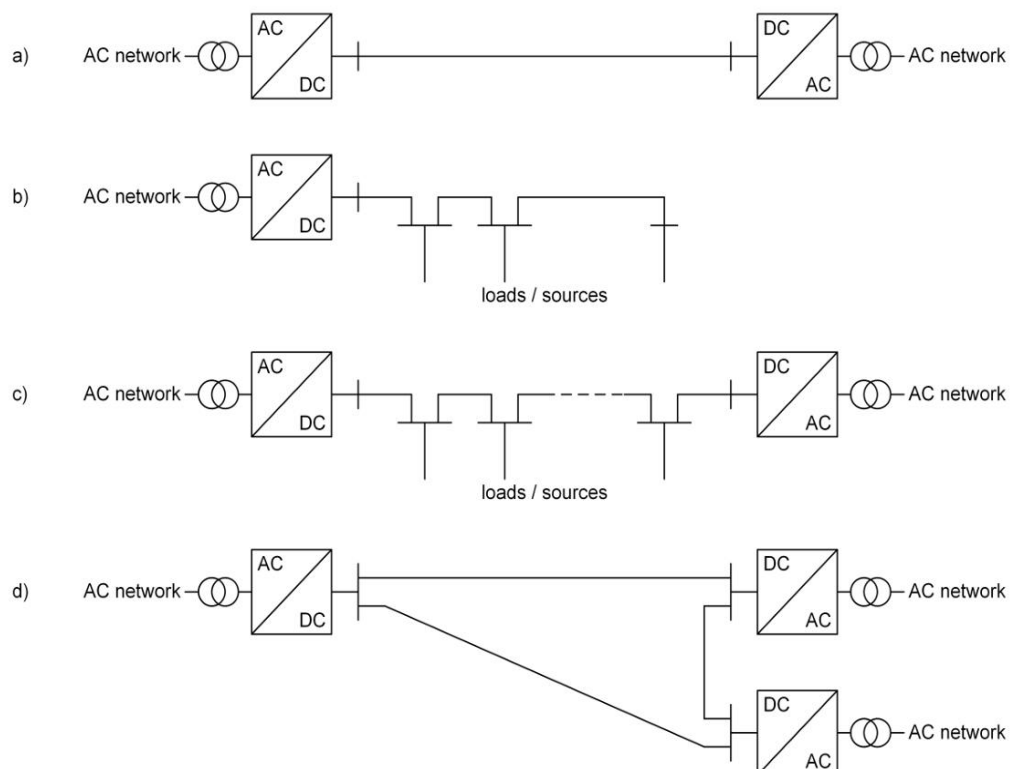
Στην παρούσα διπλωματική, θα μοντελοποιηθεί με χρήση του προγράμματος PowerFactory της DigSilent, ένα τμήμα δικτύου μέσης τάσης το οποίο συνδέεται σε κάποιο εξωτερικό δίκτυο, περιέχει φορτία και διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και θα εξεταστεί η συμπεριφορά του, τόσο στην φυσιολογική του λειτουργία (δηλαδή θα υπολογιστούν οι τάσεις ζυγών, η ροή φορτίου) όσο και υπό συνθήκες σφάλματος (δηλαδή στην παρουσία διάφορων βραχυκυκλωμάτων). Έπειτα, θα γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές ώστε πλέον τμήματά του να αποτελούνται από γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος μέσης τάσης, και πλέον το νέο υβριδικό δίκτυο που θα δημιουργήσουμε, θα μελετηθεί υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας (είτε σε φυσιολογική λειτουργία, είτε υπό σφάλμα).

Κεφάλαιο 2^ο: Υβριδικά Δίκτυα Μέσης Τάσης – Σχεδιασμός και Λειτουργία

2.1 Αρχιτεκτονική υβριδικών δικτύων μέσης τάσης

Υπάρχει μια πληθώρα από κατάλληλες διατάξεις και συνδεσμολογίες οι οποίες μπορούν να επιλεγούν κατά την σχεδίαση και να εφαρμοστούν για την υλοποίηση ενός συστήματος MVDC. Οι πιο διαδεδομένες από αυτές είναι οι κάτωθι:

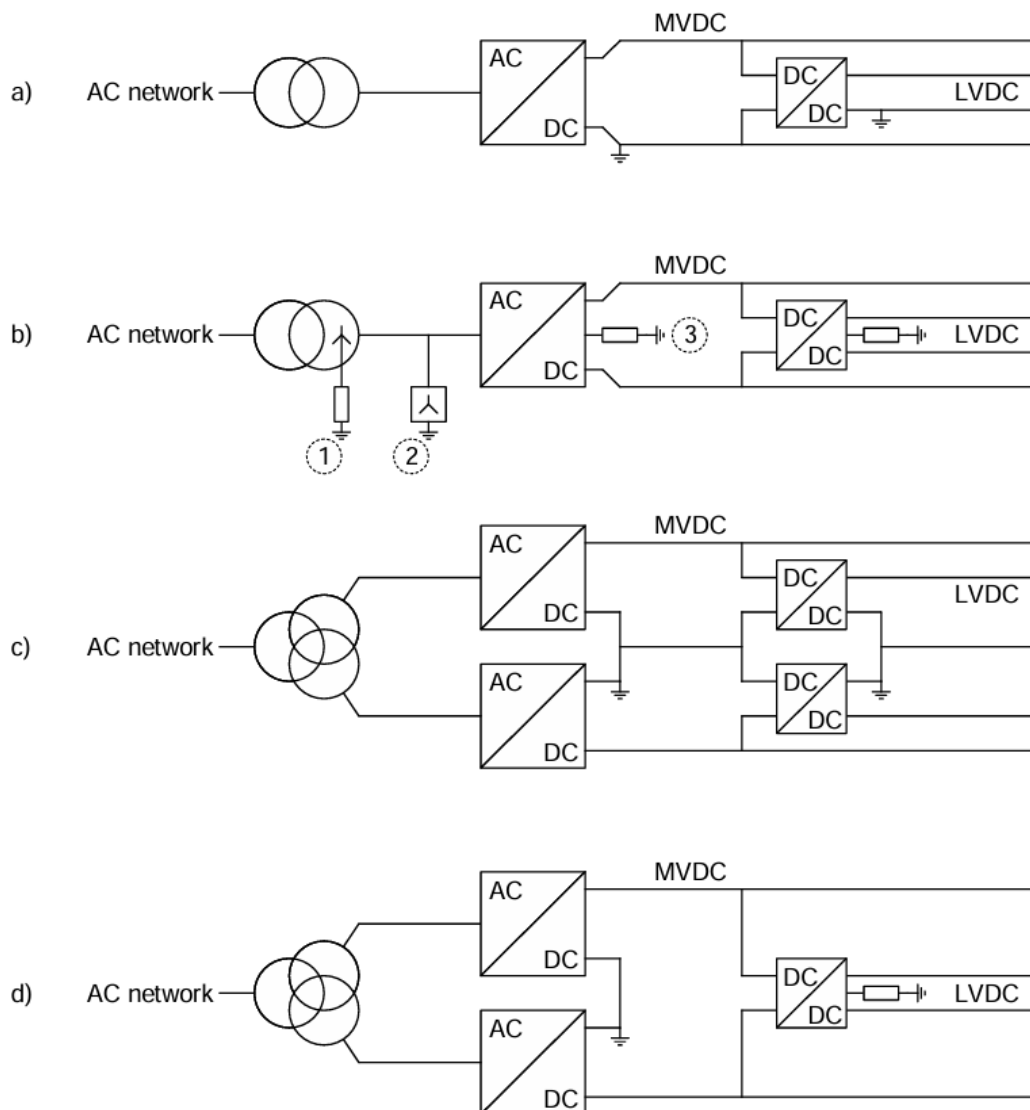
- Μεταφορά ισχύος από σημείο σε σημείο (Point to Point transmission) (Σχήμα (a) Εικόνα 3)
- Ακτινικό Δίκτυο (Σχήμα (b) Εικόνα 3)
- Δίκτυο δακτυλίου (Σχήμα (c) Εικόνα 3)
- Δικτυωτό δίκτυο (Σχήμα (d) Εικόνα 3)



Εικόνα 13: Διατάξεις συνδεσμολογίας συστημάτων MVDC [10]

Η μεταφορά ισχύος από σημείο σε σημείο, αποτελεί μια υποπερίπτωση του ακτινικού δικτύου, ωστόσο αναφέρεται ως ξεχωριστή διάταξη εδώ γιατί αποτελεί την πιο συχνή τοπολογία δικτύου στα συστήματα συνεχούς ρεύματος, και συγκεκριμένα στα συστήματα HVDC. Για αυτόν τον λόγο, εκτενής μελέτη έχει γίνει για την διαρρύθμιση των γραμμών μεταφοράς στην συγκεκριμένη τοπολογία. Οι πιθανές διατάξεις των γραμμών μεταφοράς είναι:

- Ασύμμετρη μονοπολική διάταξη (Σχήμα (a) Εικόνα 4)
- Συμμετρική μονοπολική διάταξη (Σχήμα (b) Εικόνα 4)
- Διπολική διάταξη (Σχήμα (c) Εικόνα 4)
- Υβριδική (διπολική / μονοπολική διάταξη) (Σχήμα (d) Εικόνα 4)



Εικόνα 14: Διατάξεις γραμμών μεταφοράς συστημάτων MVDC [10]

Όσον αφορά την επιλογή του τρόπου γείωσης, και πάλι έχουμε διαφορετικές επιλογές υλοποίησής της. Στην ασύμμετρη μονοπολική διάταξη, η γείωση επιτυγχάνεται με ένα απευθείας γειωμένο μεταλλικό καλώδιο επιστροφής (Εικόνα 4, σχήμα (a)). Για τη συμμετρική μονοπολική διάταξη υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι:

1. Γείωση από την πλευρά της εναλλασσόμενης τάσης, με χρήση της συνδεσμολογίας αστέρα του μετασχηματιστή, η οποία αποτελεί και την προτεινόμενη λύση εάν είναι διαθέσιμη η συνδεσμολογία του αστέρα από την πλευρά του μετατροπέα μας. (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, σχήμα (b), σημείο (1)).
2. Γείωση από την πλευρά της εναλλασσόμενης τάσης, με χρήση μιας συνδεσμολογίας πηνίων σε σύνδεση κατά αστέρα, εφόσον δεν είναι εφικτή η πρώτη επιλογή (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, σχήμα (b), σημείο (2)).
3. Γείωση από την πλευρά του συνεχούς ρεύματος, εφόσον κανένας από τους δύο ανωτέρω τρόπους είναι εφικτός ή εφόσον η γείωση υπάρχει εκ κατασκευής στον μετατροπέα (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, σχήμα (b), σημείο (3)).

Τέλος, για την διπολική διάταξη, και πάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αγωγός επιστροφής ή ένας γειωμένος αγωγός επιστροφής, αν και η τελευταία μέθοδος αποφεύγεται συνήθως λόγω ύπαρξης διαβρωτικών ρευμάτων εδάφους.

2.2 Σκοποί σχεδιασμού υβριδικών δικτύων

Κατά τον σχεδιασμό ενός υπο-δικτύου συνεχούς ρεύματος, ένας από τους βασικούς παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η υλοποίηση του να γίνει με τέτοιον τρόπο που να λειτουργεί αποδοτικά και οικονομικά τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Με άλλα λόγια, για να επιτευχθεί η οικονομική λειτουργία, η αρχική επένδυση και τα κόστη λειτουργίας θα πρέπει να περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατό. Μια σημαντική και απορρέουσα ιδιότητα των υπο-δικτύων είναι ότι ενισχύουν την αξιοπιστία του δικτύου, μέσω της ικανότητάς τους για νησιδοποίηση. Αυτό επιτρέπει στα δίκτυα συνεχούς ρεύματος να αποσυνδέονται από τα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος ένα απαιτηθεί, όπως στην περίπτωση κάποιου σφάλματος, διαταραχής του δικτύου ή διακυμάνσεων της τάσης. Ωστόσο, ο βαθμός της προσαρμοστικότητας των DC δικτύων μετά την αποσύνδεση από το υπόλοιπο δίκτυο, θα πρέπει να έχει συμπεριληφθεί κατά το αρχικό στάδιο της σχεδιάσής τους.

Επομένως, το υπο-δίκτυο θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να δεχτεί τα σφάλματα ή τις διαταράξεις των κεντρικών δικτύων, κάτι το οποίο θα αυξήσει την αξιοπιστία προς τον πελάτη και την ανθεκτικότητα του δικτύου γενικότερα. Με λίγα λόγια, θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να εξασφαλίζει την παροχή ισχύος αντιμετωπίζοντας τα πιθανά σφάλματα που μπορεί να προκύψουν.

Το μοντέλο σχεδιασμού, το οποίο έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους υλοποίησης των υπο-δικτύων, θα πρέπει να συμπεριλάβει τα ακόλουθα: θα πρέπει να εντοπιστεί ο βέλτιστος συνδυασμός διεσπαρμένων πηγών ενέργειας και συμβατικών μονάδων παραγωγής ενέργειας, το σημείο διασύνδεσης αυτών των διεσπαρμένων μονάδων και το βέλτιστο μέγεθος των διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας. Το συνολικό κόστος σχεδιασμού αποτελείται από τρία μέρη: το κόστος επένδυσης, το λειτουργικό κόστος και το κόστος αξιοπιστίας. Το κόστος επένδυσης είναι μακροπρόθεσμο και υπολογίζεται ετησίως ενώ τα λειτουργικό και το κόστος αξιοπιστίας είναι βραχυπρόθεσμα και θα πρέπει να υπολογίζονται ωριαία για κάθε μέρα του ορίζοντα σχεδισμού.

2.3 Οικονομική σκοπιά δικτύων μέσης συνεχούς τάσης

Η τεχνολογία συνεχούς ρεύματος, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως στην μεταφορά ισχύος σε υψηλές τάσεις και υπάρχουν και μερικά παραδείγματα από συστήματα που λειτουργούν σε επίπεδα της μέσης τάσης. Επιπρόσθετα, υπάρχουν και κάποιες εφαρμογές με συνεχές ρεύμα, οι οποίες είναι κυρίως τοπολογίες Back – to – Back και διασύνδεσης σημείου με σημείο ή εξειδικευμένα έργα όπως η τροφοδότηση υπεράκτιων εγκαταστάσεων εξόρυξης πετρελαίου ή φυσικού αερίου, όπως είναι τα έργα ANGLE-DC και Wenchang. Μέχρι σήμερα, υπάρχουν μόνο μερικές εφαρμογές διασυνδέσεων MVDC σε δίκτυα διανομής ισχύος. Η χρήση ωστόσο του συνεχούς ρεύματος, μπορεί να προσφέρει μια πληθώρα πλεονεκτημάτων στο κομμάτι του χειρισμού του δικτύου μέσης τάσης και επομένως προς τον καταναλωτή. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Βελτιωμένη χωρητικότητα ισχύος και βελτιωμένη διαχείριση αυτής σε ένα υπάρχον δίκτυο
- Πιο ακριβής έλεγχος της ροής ισχύος στο δίκτυο διανομής
- Απαλοιφή του κινδύνου υπερφόρτισης του δικτύου
- Έλεγχος των εναλλασσομένων τάσεων στα άκρα του δικτύου διανομής

- Έλεγχος της ροής άεργου ισχύος και στα δύο άκρα του δικτύου διανομής
- Χαμηλότερες απώλειες στο ευρύτερο δίκτυο διανομής λόγω του βελτιωμένου ελέγχου τάσης των ζυγών
- Ταχύτερη υποβοήθηση προς στην τάση του συστήματος κατά τα σφάλματα
- Δυνατότητα απομόνωσης σφαλμάτων μεταξύ δικτύων διανομής
- Διευκόλυνση στην ταχύτερη πρόσβαση και ένταξη στο δίκτυο, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Συγκεκριμένα, όσον αφορά το έργο ANGLE-DC, στην Μεγάλη Βρετανία, η χρήση του συνεχούς ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη αξιοποίηση του αγωγού από ότι το εναλλασσόμενο, καθώς το πρώτο επιτρέπει την μεταφορά περισσότερου ρεύματος, αυξάνοντας την μεταφερόμενη ισχύ, με υψηλότερη συνεχή τάση. Το συγκεκριμένο έργο βελτιστοποιεί τον θερμικό βαθμό του ήδη υπάρχοντος δικτύου κατά περίπου 23%, από τα αρχικά 24,8 MVA που μπορούσε να μεταφέρει στους 65°C λειτουργώντας με εναλλασσόμενο ρεύμα, πλέον μεταφέρει 30,5 MVA στους 50 °C λειτουργώντας με συνεχές ρεύμα [11].

Για την υλοποίηση μιας επένδυσης σε ένα δίκτυο MVDC θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα υλοποίησης ενός διαδρόμου μεταφοράς ισχύος, ο οποίος να διασυνδέει δύο συστήματα διανομής, κάτι το οποίο μπορεί να μην είναι εφικτό με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος, λόγω της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο δικτύων, επιτρέποντας έτσι την μεταφορά ισχύος χαμηλού αποτυπώματος άνθρακα (για παράδειγμα ισχύ από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) μεταξύ των δύο συστημάτων διανομής. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται και η επένδυση που θα απαιτούνταν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του εκάστοτε δικτύου.
- Προσφέρει επιπλέον θερμική χωρητικότητα στην υπάρχουσα υποδομή με αποτέλεσμα την αποφυγή/αποτροπή περαιτέρω επένδυσης για την αναβάθμιση του δικτύου.
- Βελτιστοποιεί τον έλεγχο τάσης και ροής άεργου ισχύος και στα δύο άκρα της σύνδεσης MVDC, και συνεπώς συμβάλει στην μείωση των απωλειών.

Άλλος ένας παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για τις εφαρμογές τέτοιων συστημάτων, ο οποίος ωστόσο αποτελεί μειονέκτημά τους, είναι η μειωμένη διάρκεια ζωής

των απαιτούμενων μετατροπών συγκριτικά με τους μετασχηματιστές εναλλασσόμενης τάσης που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε στις περιπτώσεις όπου η επιλογή μιας AC σύνδεσης είναι εφικτή. Συγκεκριμένα ο εξοπλισμός ενός συστήματος MVDC έχει διάρκεια ζωής περίπου ίση με 15-25 χρόνια, ενώ ένας μετασχηματιστής λειτουργεί για 30-40 χρόνια. Οι μετατροπείς, θα υποβάλλονται σε συχνή προγραμματισμένη συντήρηση, για να εξασφαλιστεί η σωστή τους λειτουργία μακροπρόθεσμα, κάτι το οποίο ωστόσο θα οδηγήσει σε υψηλότερα κόστη αντικατάστασης. Επίσης, οι απώλειες στους μετατροπείς μπορεί να είναι υψηλότερες από την αντίστοιχη λύση του εναλλασσόμενου ρεύματος και για αυτό θα πρέπει να ληφθούν υπόψη συγκεντρωτικά οι απώλειες ισχύος με βάση το συνολικό δίκτυο.

Τέλος, μετατρέποντας τις υπάρχουσες γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος με κατάλληλο τρόπο ώστε να λειτουργήσουν στο σύστημα MVDC, μειώνεται ένα τεράστιο κόστος το οποίο θα απαιτούνταν για την κατασκευή νέων γραμμών AC. Σημαντικότερα, η κατασκευή νέων γραμμών μπορεί να είναι ανέφικτο σε κάποιες περιοχές, λόγω πολύ περιορισμένου χώρου και ενώ η υλοποίησή τους αυξάνει την χωρητικότητα του δικτύου, υπάρχει πιθανότητα να μην μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε στο έπακρο λόγω της έλλειψης ευέλικτου ελέγχου [10].

2.4 Λειτουργία υβριδικών δικτύων μέσης τάσης

Σε τρέχουσες εγκαταστάσεις, οι διασυνδέσεις MVDC, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ροής ως ζεύκτες ή σύνδεσμοι μέσα σε πλέγματα δικτύων MVAC. Με αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα MVDC συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο που συμπεριφέρονται τα συστήματα HVDC στα δίκτυα μεταφοράς ισχύος, απλά σε μικρότερη κλίμακα και σε μικρότερες συγκριτικά αποστάσεις. Όσον αφορά το κομμάτι της λειτουργίας και της ασφάλειας, πρακτικά αντιπροσωπεύουν συνδέσεις από σημείο σε σημείο, παρέχοντας μεταφορά ισχύος. Τέτοια συστήματα MVDC, επιτρέπουν πολύ πιο ευέλικτους τρόπους λειτουργίας των δικτύων, πέρα από την οπτική του συμβατικού ελέγχου δικτύων εναλλασσόμενης τάσης, μέσω του ελέγχου ροής ισχύος και έτσι παρέχουν έναν πιο αποδοτικό τρόπο εκμετάλλευσης των πόρων του δικτύου.

Όπως προαναφέρθηκε, ο ρόλος και οι λειτουργίες των συστημάτων MVDC, όντας τοποθετημένα στα δίκτυα διανομής ισχύος, αναμένονται να αναπτυχθούν λόγω των συνεχώς αυξανόμενων διεσπαρμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες επί των πλείστων αποτελούν πηγές συνεχούς ρεύματος καθώς και λόγω των αυξανόμενων φορτίων συνεχούς

ρεύματος. Τα συστήματα αυτά επομένως, στο προσεχές μέλλον, θα χρησιμοποιούνται για να συλλέγουν την ισχύ που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα) και για να την διανέμουν σε φορτία συνεχούς ρεύματος όπως είναι οι σταθμοί φόρτισης υψηλής ισχύος και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Προς το παρόν, η μετατροπή από DC σε AC και επομένως το τμήμα διασύνδεσης με το δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης, εντοπίζεται κατά κύριο λόγο σε χαμηλές τάσεις. Λόγω του αυξανόμενου αριθμού των εγκαταστάσεων τέτοιων συστημάτων και λόγω της αυξανόμενης απαίτησης για ενέργεια, αναμένεται ότι το σημείο διασύνδεσης μεταξύ των δύο δικτύων θα μετακινηθεί προς τις υψηλότερες τάσεις.

Το σημείο διασύνδεσης των MVDC συστημάτων μπορεί να εντοπίζεται στο δίκτυο διανομής ή το σύστημα μπορεί επίσης να συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μεταφοράς με έναν συμβατό μετασχηματιστή εναλλασσόμενης τάσης. Αυτό το σενάριο οδηγεί σε ένα διανεμημένο δίκτυο MVDC με πολλαπλά επίπεδα τάσης. Όσον αφορά το κομμάτι της λειτουργίας και του ελέγχου, αυτά τα συστήματα θα πρέπει να καλύπτουν λειτουργίες που επί του παρόντος ξεφεύγουν από αυτές των συστημάτων HVDC, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για μεταφορά ισχύος από σημείο σε σημείο. Στο σύνολο λειτουργιών των συστημάτων MVDC, θα πρέπει να περιλαμβάνονται: η μεταφορά ισχύος προς άλλα δίκτυα, η διαμόρφωση δικτύου μεταξύ πηγών και φορτίων, η συνδεσιμότητα με πολλαπλούς ζυγούς καθώς και η διαμόρφωση ενός δικτύου, εντός των άλλων δικτύων.

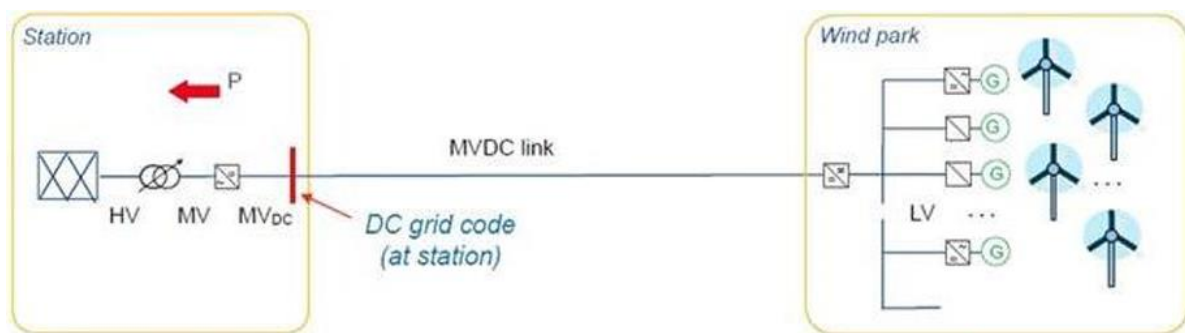
Συγκριτικά με τα συμβατικά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος, τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος αποτελούν ενεργά συστήματα, τα οποία μας επιτρέπουν νέους τρόπους αναγνώρισης και αντιμετώπισης τυχόν σφαλμάτων. Αναμένεται ότι οι νέες ικανότητες που θα επιτρέπουν έναν πιο ευέλικτο τρόπο λειτουργίας και έναν μια αποδοτικότερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου, θα είναι οι σημαντικότερες διαφοροποιήσεις, υπέρ των δικτύων συνεχούς ρεύματος.

Συμπερασματικά, η εγκατάσταση των MVDC συστημάτων στα δημόσια δίκτυα έχει μόλις ξεκινήσει να πραγματοποιείται. Για την υλοποίησή τους, αν και υπάρχουν συστήματα, σε άλλα πεδία εφαρμογής, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναφορά (όπως υπερωκεάνιες διασυνδέσεις ή δίκτυα τροφοδοτήσεως σιδηροδρόμων), θα πρέπει να αναλυθεί σε βαθύτερο βαθμό η συμπεριφορά τους, μέσω προσομοιώσεων και δοκιμαστικών εγκαταστάσεων [10].

2.5 Διασύνδεση διεσπαρμένων πηγών ενέργειας και φορτίων στα δίκτυα μέσης συνεχούς τάσης

Τα δίκτυα MVDC μπορεί να αποτελέσουν έναν βολικό τρόπο ενσωμάτωσης των ολοένα και αυξανόμενων διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, φορτίων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Οι μετατροπείς του δικτύου μπορούν να θεωρηθούν ως πόροι του συστήματος με τον ίδιο τρόπο που θεωρούνται οι αντίστοιχοι στα δίκτυα HVDC ή ακόμα και οι μετασχηματιστές στα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος, υποστηρίζοντας την λειτουργία του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο η διεπαφή του δικτύου μετατρέπεται σε DC, αντί της AC που χρησιμοποιούνταν προηγουμένως.

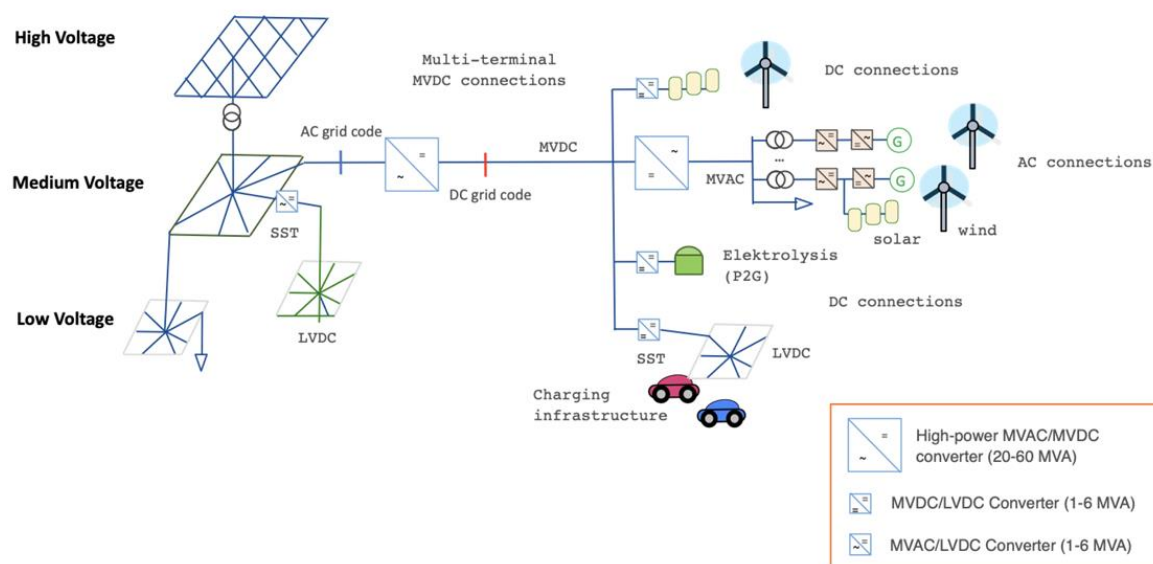
Ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου, μπορεί να τοποθετηθεί πολύ πιο κοντά και μέσα στο δίκτυο διανομής ισχύος και να λάβει τον ρόλο των συμβατικών εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής. Από την άλλη πλευρά, ο μετατροπέας από την πλευρά των διεσπαρμένων μονάδων, μπορεί να αντικαταστήσει την παρούσα μη αποδοτική αλυσίδα που αποτελείται από τον μετατροπέα DC- AC χαμηλής τάσης, τον μετασχηματιστή χαμηλής σε μέση τάση και τον μετατροπέα AC-DC μέσης τάσης, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις απώλειες.



Εικόνα 15: Παράδειγμα διασύνδεσης διεσπαρμένης παραγωγής με χρήση MVDC διασύνδεσης [10]

Μέχρι και σήμερα, οι περισσότερες διεσπαρμένες πηγές και φορτία, όπως είναι οι υποδομές φόρτισης, οι διατάξεις ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου, καθώς και η αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες, αποτελούν πηγές ή καταναλώσεις συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, και πάλι συνδέονται μέσω μετατροπών DC/AC στο δίκτυο της εναλλασσόμενης τάσης. Για ισχύς μεγαλύτερες του 1MVA, χρησιμοποιείται και μετασχηματιστής για να γίνει η διασύνδεση στο δίκτυο μέσης τάσης.

Όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, χρησιμοποιείται ένα δίκτυο MVDC για να συνδέσει τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής και τα φορτία, η οποία αποτελείται από έναν μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (αριστερά) και από έναν μετατροπέα από την πλευρά του συστήματος (δεξιά). Επίσης, χρησιμοποιούνται και μικρότεροι μετατροπείς DC-DC για να τροφοδοτήσουν τα επιμέρους φορτία στην χαμηλή τάση.



Εικόνα 16: Παράδειγμα διασύνδεσης υβριδικών δικτύων [10]

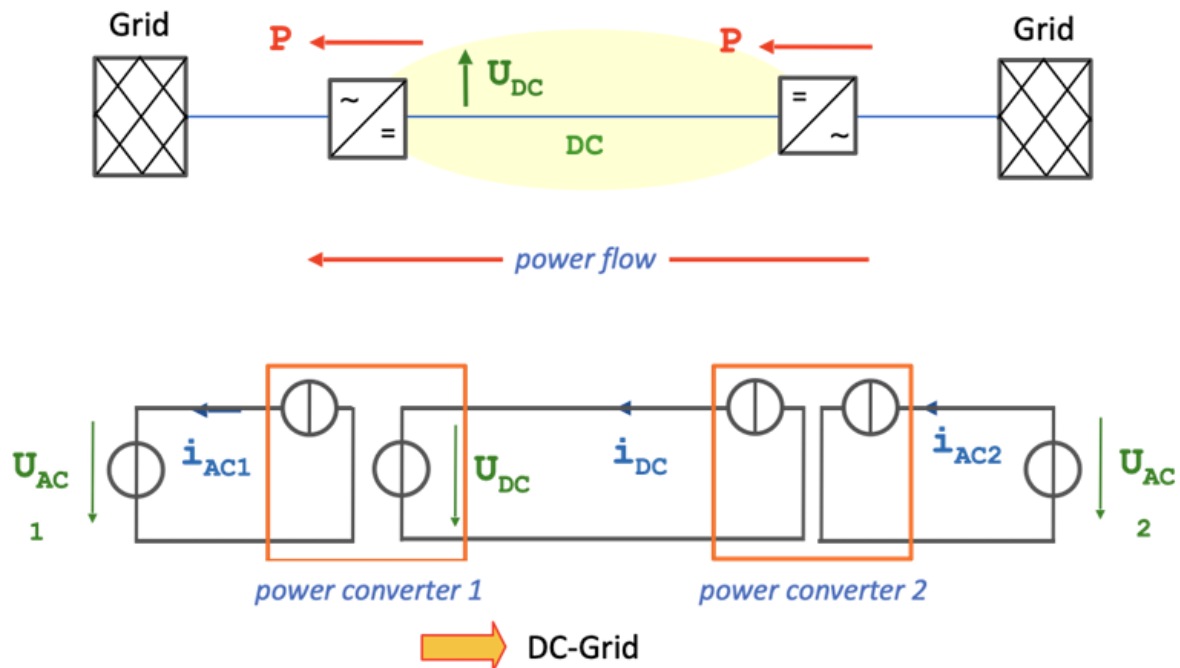
Ο ολοένα και αυξανόμενος αριθμός διεσπαρμένων πηγών και η απαίτηση για φορτία μηδενικών εκπομπών μπορεί να οδηγήσουν στις ακόλουθες εξελίξεις:

1. Ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου, θα γίνει κομμάτι του ίδιου του δικτύου και θα σχετίζεται στενά με την λειτουργία του. Θα απαιτείται να εκτελεί περισσότερες από μία λειτουργίες όσον αφορά την υποστήριξη μέσω ελέγχου του ρεύματος που απαιτείται από τους ζυγούς του δικτύου εναλλασσόμενης τάσης, όπως είναι ο έλεγχος ενεργούς ισχύος συναρτήσει της συχνότητας, της άεργου ισχύος συναρτήσει της ενεργούς ισχύος, της άεργου ισχύος συναρτήσει της τάσης καθώς και τον έλεγχο και περιορισμό των αρμονικών παραμορφώσεων. Με τους ανωτέρω τρόπους θα επιτευχθεί υψηλότερη χρησιμοποίηση του συνόλου του δικτύου.
2. Από την άλλη πλευρά, ο μετατροπέας που βρίσκεται πλησίον στις AC διασυνδέσεις, θα ακολουθήσει την νοοτροπία ελέγχου ρεύματος που ακολουθείται στις διασυνδέσεις HVDC. Θα συλλέγει δηλαδή τις AC πηγές και τα AC φορτία σε ένα συγκεντρωμένο MVAC δίκτυο.

3. Ο μετατροπέας που βρίσκεται δίπλα σε DC φορτία και πηγές, θα αποτελεί ένα σύστημα στατών μετασχηματιστών εφαρμόζοντας έναν συνδυασμό από MVDC/MVAC μετατροπέα, έναν μετασχηματιστή και έναν LVAC/LVDC μετατροπέα στο ίδιο σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο, όλες οι μονάδες παραγωγής και τα φορτία θα ομαδοποιηθούν μέσα σε ένα δίκτυο MVDC με τον ίδιο τρόπο που ομαδοποιήθηκαν και τα φορτία AC, αλλάζοντας μόνο τις διατάξεις ασφαλείας.

2.6 Διαχείριση ροής φορτίου στα δίκτυα μέσης συνεχούς τάσης

Τα συμβατικά δίκτυα μεταφοράς ισχύος συνεχούς ρεύματος που λειτουργούν στην υψηλή ή μέση τάση, παρέχουν ελεγχόμενη ροή ισχύος μεταξύ των δικτύων ή εσωτερικά των πλεγμάτων ενός δικτύου.



Εικόνα 17: Ελεγχόμενη ροή φορτίου μεταξύ δικτύων με χρήση συνεχούς ρεύματος [10]

Σε τέτοιες διατάξεις, ο DC σύνδεσμος, διαχειρίζεται την ροή ισχύος μεταξύ των δύο δικτύων λειτουργώντας ως πηγή ρεύματος για το εκάστοτε δίκτυο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 7. Η ροή φορτίου είναι αμφίδρομη και στην συνδεσμολογία των μετατροπέων, ο ένας από τους δύο ελέγχει το επίπεδο της συνεχούς τάσης, διατηρώντας την στα επιθυμητά επίπεδα. Ο αυξανόμενος αριθμός των διεσπαρμένων πηγών συγκριτικά με τα συμβατικά

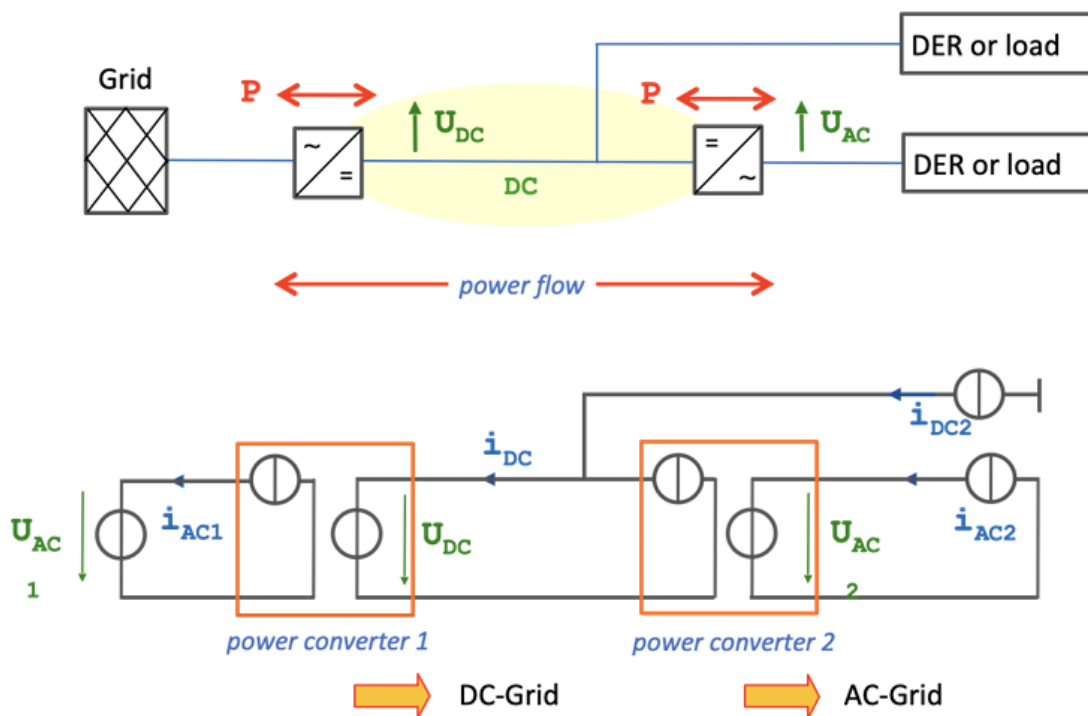
εργοστάσια παραγωγής ενέργειας , αναγκάζει τον μετατροπέα που θα βρίσκεται από την πλευρά του δικτύου να ικανοποιήσει τις κάτωθι μελλοντικές απαιτήσεις:

- Η προβλεπόμενη αύξηση των διεσπαρμένων πηγών με μετατροπείς που περιέχουν ηλεκτρονικά ισχύος και είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής, θα παρουσιάσουν και αυτές προκλήσεις προς τους διαχειριστές του δικτύου, όσον αφορά την μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και την αδράνεια του συστήματος, τα οποία είναι συνήθη μεγέθη για την εκτίμηση της σταθερότητας του δικτύου. Μελλοντικοί κανονισμοί, θα πρέπει να εξασφαλίζουν πως οι διεσπαρμένες πηγές δεν θα μειώνουν την σταθερότητα και την ασφάλεια του συνολικού δικτύου. Αυτοί οι κανονισμοί, θα απαιτούν παρόμοια χαρακτηριστικά και συμπεριφορά με τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ισχύος, όσον αφορά την αδράνεια σε αποκρίσεις του δικτύου, τα χαρακτηριστικά απόσβεσης των ταλαντώσεων ισχύος και την συμβολή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, ώστε να συμβάλουν στην σταθερότητα της τάσης του δικτύου και να διευκολύνουν την προστασία του. Έτσι, αυτές οι απαιτήσεις θα πρέπει τώρα να ικανοποιούνται και από τους μετατροπείς που συνδέουν το σύστημα MVDC στο δίκτυο της εναλλασσόμενης τάσης.
- Για την ενίσχυση της αδράνειας του συστήματος σε καταστάσεις με ανεπιθύμητες αλλαγές ή σφάλματα, μπορεί να απαιτηθούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στο σύστημα συνεχούς ρεύματος, ώστε να συμβάλουν στην μείωση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας του δικτύου AC. Οι απαιτήσεις όσον αφορά το μέγεθος, τον βαθμό αδράνειας και την σταθερά χρόνου αδράνειας (MWs/MVA), θα πρέπει να καθοριστούν για το εκάστοτε δεδομένο σύστημα.
- Θα πρέπει να καθοριστεί το όριο στη συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως (για το πλάτος, την φάση και την διάρκεια αυτού) από τους μετατροπείς AC/DC.
- Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, θα πρέπει οι μετατροπείς να παρουσιάζουν εικονικά τα χαρακτηριστικά μιας σύγχρονης γεννήτριας και να δρουν ως πραγματικές πηγές τάσεως, οι οποίες να είναι ικανές να ορίζουν και να ελέγχουν την τάση και την συχνότητα του δικτύου ανεξάρτητα από την κατάστασή του.
- Επιπρόσθετα, οι μειωμένοι λόγοι βραχυκύκλωσης κάποιων δικτύων εναλλασσόμενης τάσης, θέτουν και άλλους περιορισμούς όσον αφορά τον τρόπο ελέγχου των μετατροπών, ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα. Ο παραδοσιακός τρόπος ελέγχου των συστημάτων μέσω του κλειδώματος της φάσης (Phase Locked Loop – PLL),

θέτει προκλήσεις σταθερότητας, κυρίως σε αδύναμα δίκτυα με χαμηλούς λόγους βραχυκύκλωσης (πχ για SCR (Short Circuit Ratio) <1) [10].

2.7 Διαχείριση τάσης ζυγών στα δίκτυα μέσης συνεχούς τάσης

Η σύνδεση των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας και των διάφορων φορτίων, απαιτεί ένα διαφορετικό σετ λειτουργιών για τους μετατροπείς. Είναι πιο πιθανό, οι διεσπαρμένες πηγές και τα φορτία να ελέγχονται μέσω της παραγωγής/κατανάλωσης σταθερής ισχύος και έτσι είτε να εγχέουν ρεύμα προς το δίκτυο είτε να τραβάνε ρεύμα από αυτό. Επομένως, οι μετατροπείς που συνδέονται σε ένα αιολικό ή φωτοβολταϊκό πάρκο θα πρέπει να έχουν την ικανότητα να διαμορφώνουν αυτόνομο δίκτυο, να μπορούν να αναπαρασταθούν δηλαδή ως μια πηγή τάσεως. όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 18: Αναπαράσταση μετατροπέων ως πηγές τάσεως [10]

Στην παραπάνω τοπολογία, ο ένας μετατροπέας δημιουργεί το DC δίκτυο για την μεταφορά ισχύος και ο άλλος το AC δίκτυο για τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και τα φορτία.

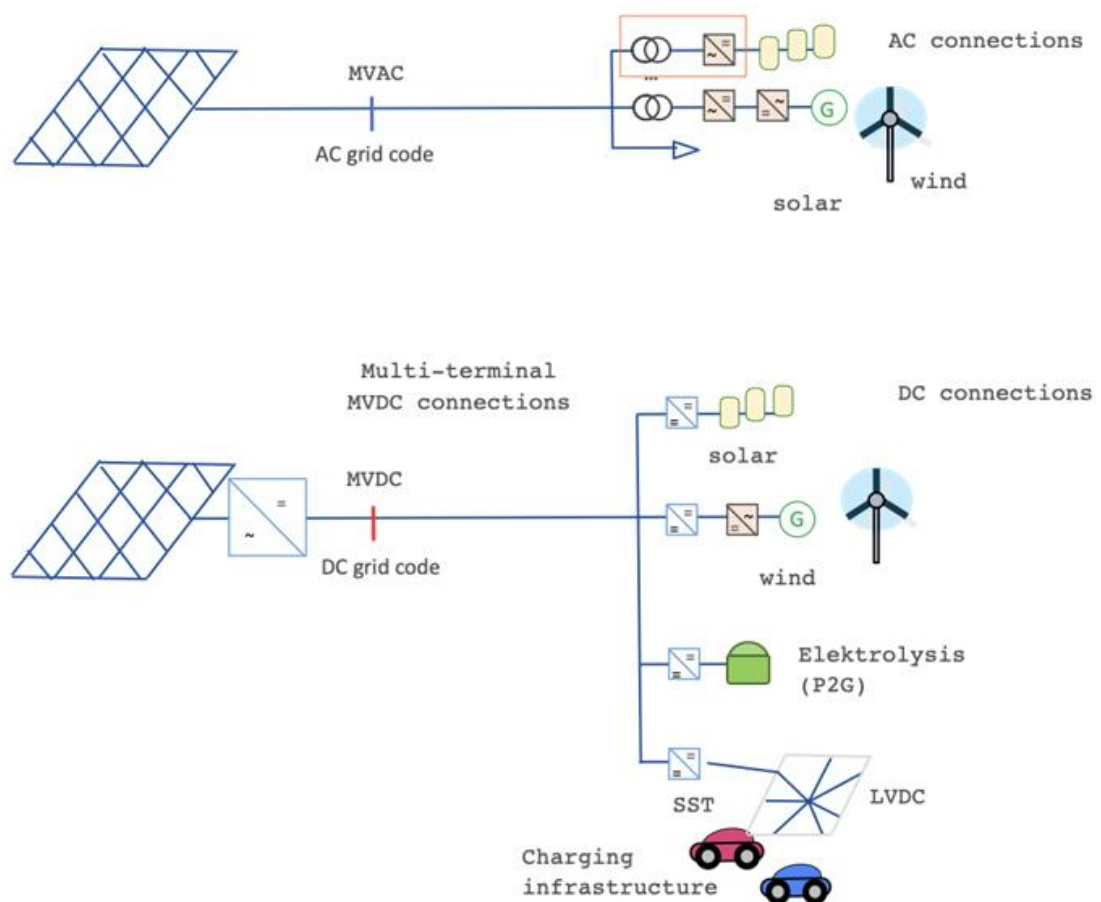
Μια ακόμα μεγάλη διαφορά στην σύνδεση των φορτίων και των διεσπαρμένων πηγών που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα, έγκειται στο γεγονός ότι οι DC συνδέσεις δεν είναι μια σύνδεση σημείου προς σημείο, αλλά αποτελούν στην πραγματικότητα ένα σύστημα με πολλαπλές απολήξεις, ακριβώς όπως και τα δίκτυα εναλλασσόμενης τάσης, και ο έλεγχος τάσης σε ένα δίκτυο με κατανεμημένες πηγές και φορτία είναι πιο δύσκολη.

Κάποια βασικά προαπαιτούμενα για τον έλεγχο συνδέσεων μεταξύ AC και DC δικτύων είναι:

- Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές συνδέσεις μεταξύ δικτύων AC, εκείνες των συστημάτων MVDC εκ κατασκευής επιτρέπουν τον έλεγχο ροής ισχύος, χάρη των ηλεκτρονικών ισχύος που περιέχουν. Οι απαιτήσεις για την ελεγκσιμότητα της ισχύος θα πρέπει να καθοριστούν, ώστε εξοπλισμοί από διαφορετικούς κατασκευαστές να μπορούν να είναι συμβατοί χωρίς να επηρεάζεται η σταθερότητα και η ασφάλεια του δικτύου.
- Τυποποιημένες τιμές τάσεως πρέπει εξίσου να καθοριστούν, ώστε να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η προμήθεια και οι προδιαγραφές του εξοπλισμού προς χρήση στα δίκτυα μέσης συνεχούς τάσης.
- Κοινά πρότυπα για την γείωση των συστημάτων, την γαλβανική προστασία και για διάφορα θέματα διάβρωσης θα πρέπει εξίσου να εδραιωθούν.
- Είναι αναγκαίος ο καθορισμός της ικανότητας περιορισμού του ρεύματος βραχυκυκλώσεως, η έκδοση τεχνικών οδηγιών και απαιτήσεων για τον συντονισμό προστασίας των δικτύων. Θα πρέπει να καθοριστούν στρατηγικές προστασίας έναντι σφαλμάτων με καθοδήγηση όσον αφορά την επιλεξιμότητα, την ταχύτητα, την ευαισθησία, και την ανεξαρτησία από τον έλεγχο του μετατροπέα.
- Θα πρέπει να εδραιωθούν πρωτόκολλα επικοινωνίας για τις έξυπνες συσκευές ελέγχου και προστασίας των δικτύων, οι οποίες εκτελούν την ανίχνευση σφαλμάτων και την απομόνωση αυτών.
- Είναι αναγκαία η δυνατότητα επαναφοράς και επανεκκίνησης των αναγκαίων τμημάτων του συστήματος μετά από γενική διακοπή ισχύος, ώστε να επανέλθει το δίκτυο από μόνο του στην πρότερη κατάσταση.
- Τέλος, απαιτούνται μέτρα για την αποτροπή και την αποκατάσταση λειτουργίας σε περίπτωση που αποτύχει λειτουργικά ένας μετατροπέας.

2.8 Λειτουργία και έλεγχος πολυτερματικού δικτύου MVDC

Σε αντίθεση με τα συστήματα HVDC, τα MVDC συστήματα δεν θα εφαρμόζονταν για συνδέσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων για παράδειγμα, όπου τα μήκη των καλωδίων που θα προέκυπταν θα ήταν σημαντικά εάν αποφασίζαμε να κάνουμε αυτού του είδους διασύνδεσης. Ο κύριος σκοπός των συστημάτων συνεχούς ρεύματος στην μέση τάση είναι η συγκέντρωση και η διασύνδεση των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας και των διάφορων φορτίων με έναν αποδοτικότερο τρόπο. Σε κάποιο σημείο, τα συστήματα αυτά θα πρέπει να μετατρέπονται σε ένα δίκτυο εναλλασσόμενη τάσης ώστε να αποτελέσουν τμήμα του συνολικού δικτύου. Μέσω των συστημάτων MVDC, αυτό το σημείο μεταφέρεται από την χαμηλή τάση στην μεσαία τάση, με αποτέλεσμα οι διασυνδέσεις πολλαπλών φορτίων και διεσπαρμένων πηγών ενέργειας να οδηγεί σε πολυτερματικά τέτοια δίκτυα.



Εικόνα 19: Πολυτερματικά δίκτυα MVAC και MVDC [10]

Το δίκτυο συνεχούς ρεύματος συνδέει τα διεσπαρμένα συστήματα με τον ίδιο τρόπο όπως γίνεται στο αντίστοιχο δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος. Η διαφορά έγκειται στο ότι οι συνδέσεις στο DC δίκτυο επιτρέπουν πιο απλοποιημένες δομές μετατροπών και τα πλεονεκτήματα της απουσίας άεργου ισχύος. Ωστόσο, νέες απώλειες υπεισέρχονται λόγω αυτών των μετατροπών. Πιο αναλυτικά και έχοντας ως βάση την εικόνα 9. Οι απώλειες αναλύονται ως ακολούθως:

- Καλώδιο γραμμής μεταφοράς: Υπό την προϋπόθεση της ίδιας τάσης V_{peak} , και υπό την ίδια τιμή ενεργού ρεύματος, μια σύνδεση MVDC χάνει περίπου τα 2/3 της αντίστοιχης ισχύος που θα έχανε η σύνδεση αν είχε γίνει σε MVAC, λειτουργώντας στην ίδια ισχύ (και χρησιμοποιώντας δύο καλώδια αντί των τριών). Οι συνολικές απώλειες εξαρτώνται από τον τύπο του καλωδίου-αγωγού αλλά και από την απόσταση.
- Αλυσίδα από μετατροπείς: Στο AC χρησιμοποιούνται ένας μετασχηματιστής και δύο μετατροπείς AC/DC χαμηλής τάσης. Στο DC αντίστοιχα, χρησιμοποιούνται ένας μετατροπέας AC/DC μέσης τάσης και δύο μετατροπείς υποβιβασμού τάσης, ώστε να μετατρέψουν την μέση DC τάση σε χαμηλή.

Σε μια τέτοια διάταξη, ένας μετατροπέας στο σημείο διασύνδεσης με το AC δίκτυο είναι αναπόφευκτος. Χρησιμοποιώντας έναν κεντρικό μετατροπέα μέσης τάσης, (όπως γίνεται στην περίπτωση MVDC) για την ίδια συνολική ισχύ, αναμένεται να παρέχει μια πιο αποδοτική λύση από την χρησιμοποίηση πολλαπλών μετασχηματιστών και μετατροπών (όπως γίνεται στην περίπτωση MVAC). Ωστόσο, στην πρώτη περίπτωση, χρειαζόμαστε έναν μετατροπέα MVDC/LVDC έναντι ενός απλού μετασχηματιστή μέσης σε χαμηλή τάση. Για αυτό και θα πρέπει να εξετάσουμε τα συνολικά κόστη, την αποδοτικότητα και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η λειτουργία του δικτύου με πιο ευέλικτο τρόπο. Επομένως, το βασικό πλεονέκτημα που προσφέρουν τα συστήματα MVDC έναντι των τυπικών MVAC συστημάτων είναι η καλύτερη λειτουργία και ο έλεγχος του δικτύου.

Συμπερασματικά, ένα πολυτεματικό δίκτυο MVDC, μπορεί να παρουσιάσει λιγότερες απώλειες από τα συμβατικά MVAC δίκτυα, εάν οι αποστάσεις των συστημάτων και του δικτύου είναι σημαντικές και αν λειτουργούν στα ίδια επίπεδα ισχύος και ρευμάτων. Όσον αφορά την χωρητικότητα, το MVDC δίκτυο παρέχει καλύτερη χρησιμοποίηση των καλωδίων και των αγωγών και άρα μεγαλύτερη χωρητικότητα μεταφερόμενη ισχύος όταν τεθεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες τάσεις. Ωστόσο, οι πολυτεματικές διατάξεις παρουσιάζουν συνήθως προβλήματα στο κομμάτι ελέγχου των μετατροπών [10].

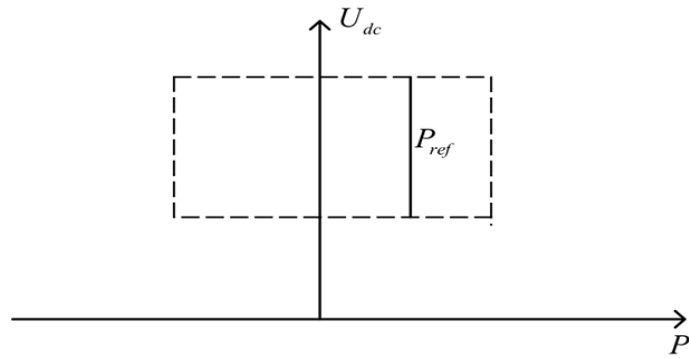
2.9 Έλεγχος Μετατροπών

Ο έλεγχος ενός πολυτερματικού δικτύου MVDC, μπορεί να υιοθετήσει τον παραδοσιακό τρόπο δομής πολλαπλών επιπέδων που χρησιμοποιείται στο HVDC, αλλά θα πρέπει να δοθεί περισσότερη προσοχή στην επεκτασιμότητα και την συμβατικότητα του, λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών που έχουν τα δίκτυα διανομής ισχύος. Συνήθως, περισσότερα χρονικά εξαρτόμενα φορτία και διεσπαρμένες πηγές συνδέονται στα δίκτυα διανομής. Η πολυεπίπεδη δομή ενός δικτύου συνεχούς ρεύματος περιλαμβάνει τρία επίπεδα τα οποία είναι: ο έλεγχος του συστήματος, ο έλεγχος του μετατροπέα και ο έλεγχος των διακοπτικών στοιχείων. Ο έλεγχος του συστήματος αναφέρεται στο κομμάτι των εντολών που δίνονται στον κάθε μετατροπέα του δικτύου θέτοντας τιμές αναφοράς όσον αφορά την τάση και την ισχύ συναρτήσει των λειτουργικών απαιτήσεων. Το κομμάτι του ελέγχου του μετατροπέα, αφορά τον μετριάσμό της διαφοράς μεταξύ των τιμών αναφοράς που δέχεται ο μετατροπέας από τον έλεγχο του συστήματος και τις μετρούμενες τιμές σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, ο έλεγχος των διακοπτικών στοιχείων, αφορά το κομμάτι που ρυθμίζει τους παλμούς για την κατάλληλη χρονικά ενεργοποίηση των εκάστοτε εν λόγω στοιχείων.

Ο έλεγχος των μετατροπών, λαμβάνει τις τιμές αναφοράς της τάσης και της ισχύος όπως προαναφέρθηκε από τον έλεγχο του συστήματος, και οι οποίες δίνονται για τον κάθε μετατροπέα ξεχωριστά. Με βάση τον αλγόριθμο ελέγχου, μειώνεται αυτή η διαφορά μεταξύ των τιμών αναφοράς και των μετρούμενων τιμών, και συνήθως οι μέθοδοι ελέγχου απεικονίζονται ως καμπύλες ισχύος-τάσεως. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναφερθούμε σε κάποιες βασικές μεθόδους ελέγχου των μετατροπών [12].

2.9.1 Έλεγχος σταθερής ισχύος

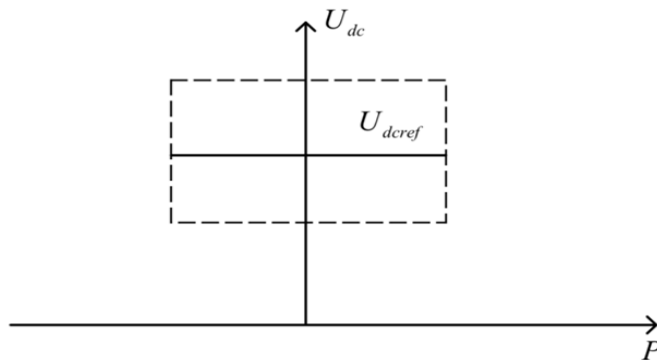
Ο έλεγχος σταθερής ισχύος, αναπαρίσταται ως μία κάθετη γραμμή στο επίπεδο ισχύος – τάσεως, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, με την P_{ref} να αποτελεί την τιμή αναφοράς για την ισχύ. Η κάθετη γραμμή που είναι εντός του διακεκομμένου ορθογωνίου, μας δείχνει το εύρος λειτουργίας του συγκεκριμένου μετατροπέα.



Εικόνα 20: Απεικόνιση ελέγχου ισχύος στο επίπεδο τάσης - ισχύος

2.9.2 Έλεγχος σταθερής τάσης

Όμοια, ο έλεγχος σταθερής τάσης, μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μια οριζόντια γραμμή στο διάγραμμα τάσεως – ισχύος, με την τιμή $U_{dc\text{ref}}$ να αποτελεί την τιμή αναφοράς. Και πάλι το διακεκομμένο ορθογώνιο μας δείχνει τα όρια λειτουργίας του μετατροπέα. Ο μετατροπέας με αυτού του είδους έλεγχο, επιλέγεται να είναι ο ζυγός αναφοράς όσον αφορά την τάση (Slack Bus), ώστε να ισορροπεί κάθε φορά την ενεργό ισχύ που ρέει στο DC δίκτυο.



Εικόνα 21: Απεικόνιση ελέγχου τάσεως στο επίπεδο τάσης - ισχύος

2.11 Έργα ορόσημα και εφαρμογές δικτύων μέσης συνεχούς τάσης

Όπως έχει προαναφερθεί, η τεχνολογία και τεχνογνωσία των δικτύων μέσης συνεχούς τάσης, βρίσκεται σε αρκετά πρώιμο στάδιο, με αποτέλεσμα να υπάρχουν λίγα έργα αυτού του είδους τα οποία έχουν υλοποιηθεί. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθούμε στα πιο σημαντικά από αυτά, τα οποία θεωρούνται και έργα ορόσημα για την ανάπτυξη των δικτύων συνεχούς ρεύματος, και μέσω των οποίων έγινε η βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας αυτών. Τέτοια παραδείγματα, συναντώνται κυρίως σε έργα διασύνδεσης απομακρυσμένων

μονάδων παραγωγής ενέργειας (όπως για παράδειγμα αιολικών πάρκων) με τα εγχώρια δίκτυα, σε έργα υπόγειας διασύνδεσης για μεταφορά ισχύος, σε έργα παροχής ενέργειας σε νησιά ή σε υπεράκτιες πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου ή φυσικού αερίου, σε έργα διασύνδεσης δικτύων τα οποία λειτουργούν σε διαφορετική συχνότητα και τέλος, σε έργα τροφοδότησης μεγάλων αστικών κέντρων. [13]

Αρχικά όσον αφορά τα παραδείγματα εφαρμογών μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος στη διασύνδεση απομακρυσμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας με το εγχώριο δίκτυο, το πρώτο έργο ορόσημο, αποτελεί η διασύνδεση των περιοχών Hällsjön και Grängesberg στην κεντρική Σουηδία, και αναπαριστά το ξεκίνημα μιας εντελώς καινούργιας τεχνολογίας στην μεταφορά ισχύος. Το συγκεκριμένο έργο αποσκοπούσε στην τροποποίηση μιας παρωχημένης γραμμής μεταφοράς ισχύος που λειτουργούσε σε εναλλασσόμενο ρεύμα, μήκους περί τα 10km, και η οποία τροφοδοτούσε το δίκτυο του Grängesberg, σε γραμμή που να λειτουργεί πλέον σε συνεχές ρεύμα και να τροφοδοτεί τα ίδια φορτία. Η απαιτούμενη ισχύς προς μεταφορά, ανέρχεται στα 3MW, και γίνεται πλέον με συνεχές ρεύμα τάσεως $\pm 10\text{kV}$, καθώς έγινε χρήση της τοπολογίας του συμμετρικού μονοπόλου, μέσω εναέριων γραμμών. Η μετατροπή αυτή έγινε με χρήση VSCs, τα οποία ελέγχουν το επίπεδο τάσης και την συχνότητα που παράγεται, με τις πρώτες δοκιμές να πραγματοποιούνται τον Μάρτιο του 1997. Κατά την διάρκεια των πρώτων χρόνων, έγιναν αρκετές δοκιμές με σκοπό να επιβεβαιώσουν την ιδέα της χρήσης συνεχούς ρεύματος στην μέση τάση, και γενικότερα αποτέλεσε το πεδίο δοκιμών για νέα εξαρτήματα και εξοπλισμό αυτής της τεχνολογίας. Κατόπιν των επιτυχημένων δοκιμών, έχουν υλοποιηθεί πολλοί σταθμοί μετατροπών, με την ίδια τεχνολογία, αποδεικνύοντας ότι η χρήση των VSCs, μπορεί να ενισχύσει αδύναμα δίκτυα και να σταθεροποιήσει την τάση τους, μέσω της έκχυσης και απορρόφησης άεργου ισχύος ως απαιτείται, με σκοπό τον ανεξάρτητο και ταυτόχρονο έλεγχο της τάσης και της ενεργούς ισχύος. [14]

Αντίστοιχο παράδειγμα υλοποίησης διασύνδεσης απομακρυσμένης μονάδας παραγωγής ενέργειας, είναι η υλοποίηση συστήματος μεταφοράς ισχύος στο χωριό Tjaereborg της Δανίας, με σκοπό την μεταφορά 6MW ισχύος που παράγει ένα αιολικό πάρκο εκεί, προς το υπόλοιπο εγχώριο δίκτυο. Το σύστημα σχεδιάστηκε για την συνολική μεταφορά 8MVA ισχύος, σε απόσταση 4,3km, υπό τάση $\pm 9\text{kV}$ με χρήση τοπολογίας του συμμετρικού μονοπόλου και VSCs, όπως και προηγουμένως, και τέθηκε σε λειτουργία τον Αύγουστο του 2000. Σκοπός του, ήταν να εξερευνηθεί, πώς η ελεγχσιμότητα που προσφέρουν τα VSCs, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βέλτιστη εκμετάλλευση της παραγωγής αιολικής ενέργειας, μέσω της χρήσης μετατροπών για την παροχή μιας συνολικής μεταβαλλόμενης

συχνότητας λειτουργίας των γεννητριών. Όπως έχει προαναφερθεί, αν και η αιολική ενέργεια είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, με αποτέλεσμα την πρόκληση αστάθειας της ισχύος του δικτύου, με την χρήση των VSCs, αυτή η μεταβλητότητα παύει να αποτελεί πρόβλημα, λόγω της δυνατότητας ελέγχου της ενεργούς και άεργου ισχύος που προσφέρουν. Κατόπιν υλοποίησης του συγκεκριμένου έργου, το αιολικό πάρκο πλέον, μπορεί να συνδεθεί είτε μόνο μέσω της γραμμής που λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα (αν η παραγωγή είναι κάτω από 500kW), είτε μόνο μέσω της γραμμής που λειτουργεί με συνεχές ρεύμα (αν η παραγωγή είναι πάνω από 700kW), είτε μέσω και των δύο γραμμών ταυτόχρονα αν απαιτηθεί, με την εκάστοτε επιλογή να γίνεται αυτόματα από το σύστημα ελέγχου. Στο συγκεκριμένο έργο θα βασίζονται τα συστήματα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων που προγραμματίζονται να υλοποιηθούν στην Δανία, τα οποία εκτιμάται ότι μέσα στα επόμενα 30 χρόνια, θα παράγουν συνολικά 4.000MW ισχύος. [15]

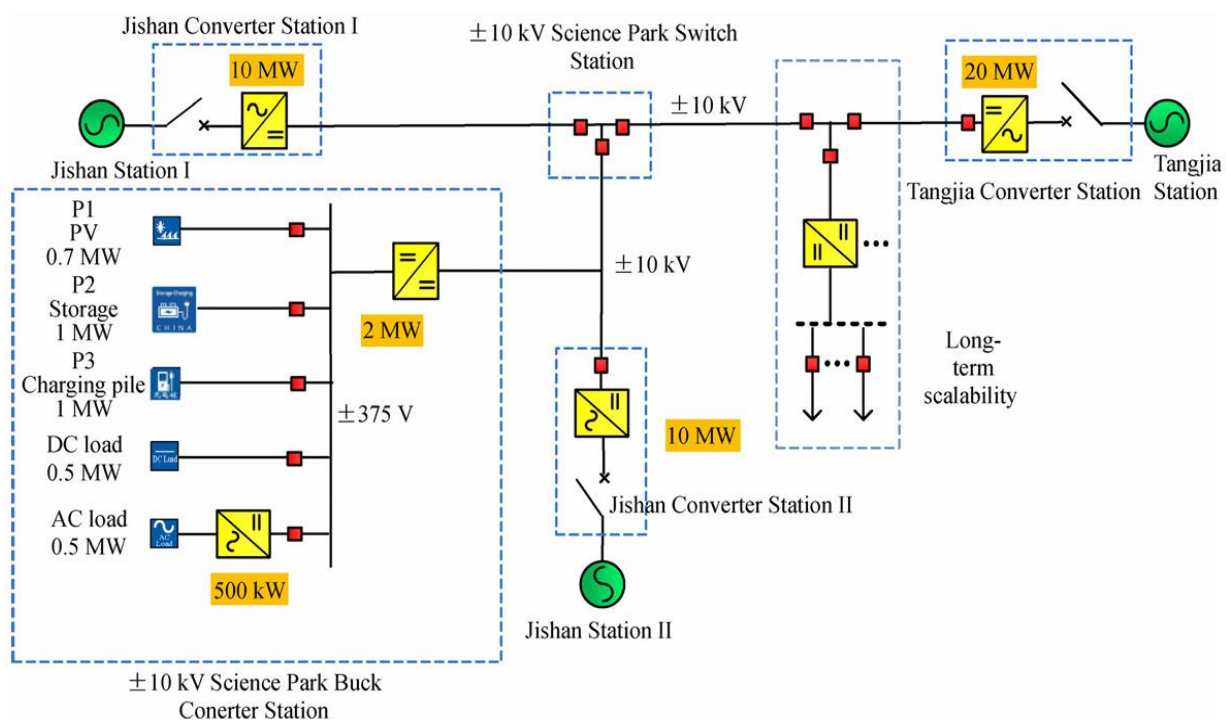
Το επόμενο έργο στο οποίο θα αναφερθούμε, αποτελεί το πρώτο σε είδος του, έργο που έλαβε χώρα στην Κίνα. Αφορά την καινοτόμο μετατροπή μιας ελαττωματικής γραμμής υποβρυχίου καλωδίου (XLPE) από τα 35kV εναλλασσόμενης τάσης, σε συνεχή τάση των $\pm 10\text{kV}$. Αποτελεί και αυτό ένα ορόσημο στην υλοποίηση συστημάτων MVDC. Το αρχικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης, που είχε σκοπό την τροφοδότηση της υπεράκτιας πλατφόρμας στην περιοχή άντλησης Wenchang, είχε υποστεί δύο μεγάλα σφάλματα. Το πρώτο, όπου αστόχησε η μία εκ των τριών φάσεων, έγινε μετά από μόλις 6 μήνες ενεργοποίησης της εγκατάστασης. Το δεύτερο σφάλμα, έγινε κατά την διάρκεια των δοκιμών που διεξήχθησαν μετά από την αποκατάσταση του πρώτου σφάλματος (η οποία διήρκησε σχεδόν δύο χρόνια), όπου αστόχησε το κύριο σώμα του καλωδίου. Μετά από έρευνα, διαπιστώθηκε ότι τα σφάλματα πιθανότατα να προήλθαν από μεγάλη μηχανική καταπόνηση και επομένως οι λύσεις που προέκυπταν ήταν είτε να γίνει τοπική επιδιόρθωση με την πιθανότητα να παρατηρηθεί αστοχία σε άλλο σημείο αργότερα, είτε να αντικατασταθεί εξολοκλήρου το ελαττωματικό καλώδιο με νέο, είτε να γίνει προληπτική αντικατάσταση και των τριών καλωδίων, ώστε το σύστημα να συνεχίσει να λειτουργεί στην εναλλασσόμενη τάση. Ωστόσο, δόθηκε και μία τέταρτη λύση, σύμφωνα με την οποία το σύστημα θα χρησιμοποιούσε πλέον συνεχές ρεύμα, θέτοντας τα δύο εναπομείναντα λειτουργικά καλώδια ως πόλους υψηλής τάσης και το ελαττωματικό καλώδιο ως γείωση. Μετά από μελέτη, αποφασίστηκε να ακολουθηθεί η τελευταία λύση. Έτσι, η αρχική γραμμή των 40km που μετέφερε 3MW, μετατράπηκε με χρήση της τοπολογίας διπόλου και με VSCs, σε γραμμή MVDC μεταφοράς ίδιας ισχύος, η οποία πλέον λειτουργεί υπό τάση $\pm 10\text{kV}$, η οποία επιλέχθηκε με γνώμονα την ασφάλεια του συστήματος, λόγω της έλλειψης τεχνογνωσίας

πάνω στην συγκεκριμένη μεθόδευση και το ιστορικό της ελλαττωματικής συμπεριφοράς των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν. Για να επιβεβαιωθεί η ασφάλεια και η λειτουργικότητα του νέου συστήματος, διεξάχθηκαν διάφορες δοκιμές ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του υπό θερμική, ηλεκτρική και μηχανική καταπόνηση καθώς δεν υπήρχαν στάνταρ για την συγκεκριμένη υλοποίηση συστήματος. Το σύστημα λειτουργεί αξιόπιστα εδώ και χρόνια, με ρεύμα εντάσεως 150A, για να διατηρηθεί η μεταφορά ισχύος στα 3MW, με βλέψεις να αυξηθεί η τάση λειτουργίας του στα $\pm 20\text{kV}$ και το ρεύμα στα 300A, ώστε πλέον η μεταφερόμενη ισχύς να τετραπλασιαστεί και άρα να φτάσει τα 12MW. Κλείνοντας, το συγκεκριμένο έργο όχι μόνο έκανε σαφή τα οικονομικά πλεονεκτήματα μιας τέτοιας μεθόδευσης, αλλά λειτούργησε και ως εφαλτήριο για την υλοποίηση και άλλων αντίστοιχων έργων ανά τον κόσμο [16].

Προχωρώντας σε πιο σύγχρονα έργα, θα αναφερθούμε στο ANGLE-DC, στο οποίο έγινε μια γρήγορη αναφορά στο κεφάλαιο με τα οικονομικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος. Το νησί Anglesey, στην Βόρεια Ουαλία, έχει μετατραπεί σε μια σημαντική τοποθεσία όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών όπως είναι αυτή μέσω της αξιοποίησης του αέρα, του ήλιου αλλά και της παλίρροιας, η οποία μετά το 2020 ανέρχεται σε επίπεδα πάνω από τα 160MW. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το νησί να παράγει περισσότερη ενέργεια από αυτήν που καταναλώνει και άρα δημιουργείται η απαίτηση μεταφοράς της περίσσειας ενέργειας στην ενδοχώρα. Ωστόσο, η συνδεσιμότητα του νησιού με το κεντρικό δίκτυο είναι περιορισμένη και η αύξηση στις διεσπαρμένες πηγές προκαλεί προβλήματα στο δίκτυο μέσης τάσης των 33kV, καθώς αυτό υπερφορτώνεται και φτάνει τα όρια της θερμικής του αντοχής και της τάσης λειτουργίας του. Η παραδοσιακή λύση του προβλήματος είναι η εγκατάσταση νέας ενεργειακής υποδομής, το οποίο ωστόσο είναι πολύ κοστοβόρο και επομένως καθίσταται η ανάγκη για μια νέα πιο πρωτοποριακή λύση. Η λύση αυτή είναι η μετατροπή του υπάρχοντος δικτύου AC, σε δίκτυο συνεχούς ρεύματος μέσης τάσης χρησιμοποιώντας VSCs. Αυτή η μεθόδευση δίνει λύση σε δύο προβλήματα ταυτόχρονα. Αρχικά λύνει το πρόβλημα της υπερφόρτωσης των γραμμών, καθώς πλέον η χωρητικότητα αυξήθηκε κατά 23% με χρήση του συνεχούς ρεύματος, αλλά και στο πρόβλημα διακυμάνσεων της τάσης και του ελέγχου της ροής ισχύος καθώς τα VSCs, δίνουν την δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της τάσης και της ισχύος του δικτύου. Η υλοποίηση έγινε χρησιμοποιώντας τις ίδιες γραμμές του δικτύου, αλλά μετατρέποντας την τάση τροφοδοσίας σε $\pm 27\text{kV DC}$. Η γραμμή που τροποποιήθηκε έχει μήκος 3km και ενώνει τους υποσταθμούς του Bangor με του Llanfair. Τέλος, μέσω του συγκεκριμένου έργου, για πρώτη φορά μελετιέται ο διαφορετικός τρόπος γήρανσης του καλωδίου που προκύπτει από

την φόρτιση με συνεχές και από την φόρτιση με εναλλασσόμενο ρεύμα, με σκοπό την απόκτηση σημαντικών γνώσεων ώστε να καθοριστεί εάν η μετατροπή των υφιστάμενων δικτύων AC στο DC είναι εφικτή. [17]

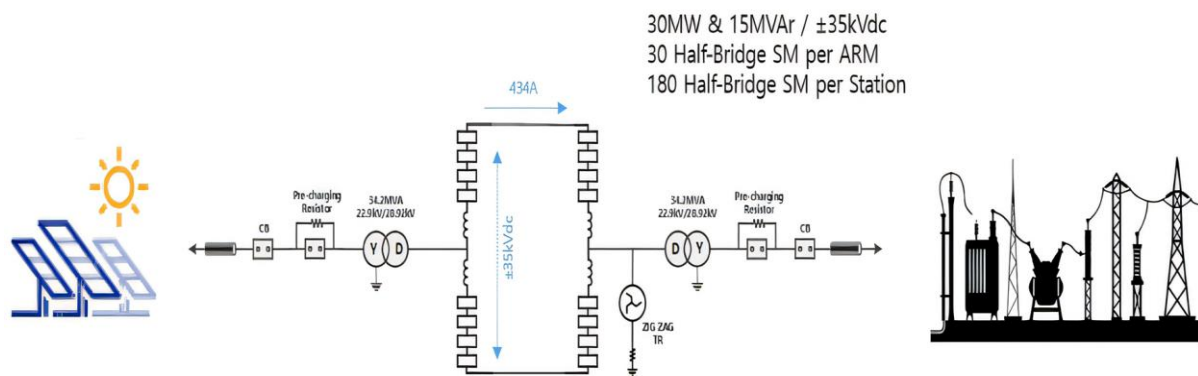
Το επόμενο έργο στο οποίο θα γίνει αναφορά, αποτελεί και αυτό το πρώτο στο είδος του, και αφορά την υλοποίηση ενός δικτύου διανομής MVDC στην Κίνα. Το συγκεκριμένο δίκτυο υλοποιήθηκε στο Zhuhai, με σκοπό την υποστήριξη της «City Energy Internet», η οποία αποτελεί μέρος του πρότζεκτ Smart Energy (Energy Internet). Το εν λόγω δίκτυο, διασυνδέει τους ζυγούς των υποσταθμών του Jishan και του Tangjia, οι οποίοι λειτουργούν στα 10kV, και επαυξάνει σημαντικά την χωρητικότητα του συνολικού δικτύου και βελτιώνει την αξιοπιστία και την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος της περιοχής. Τέθηκε σε λειτουργία το 2018 και αποτελεί υψίστης σημασίας στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ήδη υπάρχοντος δικτύου που λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα και συμβάλει στην περαιτέρω σταθεροποίησή του. Το έργο αυτό, χρησιμοποιεί τάση $\pm 10\text{kV}$ η οποία έπειτα υποβιβάζεται στα $\pm 375\text{V}$ στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Η διάταξή του είναι «αστέρας», με τρεις διαφορετικές πηγές που λειτουργούν σε AC, καθώς έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη διανομή ισχύος και επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αξιοπιστία. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται το σχέδιο του εν λόγω δικτύου:



Εικόνα 22: Σχέδιο δικτύου διανομής MVDC στο Zhuhai, Κίνα [18].

Η διασύνδεση των δικτύων του εναλλασσομένου ρεύματος με τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος επιτυγχάνεται με χρήση VSCs για την επίτευξη της βέλτιστης ποιότητας στην μεταφορά ισχύος. Εφόσον δεν υπήρχαν ακόμα καθορισμένες πρακτικές για την υλοποίηση δικτύων διανομής DC, καθώς και λόγω της έλλειψης προδιαγραφών, η σχεδίαση του συστήματος έγινε με βάση την σχεδιαστική διαδικασία που ακολουθείται για τα AC δίκτυα διανομής, λαμβάνοντας υπόψη την λειτουργία της μεταφοράς ενέργειας με συνεχές ρεύμα. Η λειτουργία του, υποστηρίζει μονή, διπλή ή και τριπλή τροφοδότηση (από τις τρεις διαφορετικές πηγές ισχύος) και υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης μετάβασης από τον έναν τρόπο στον άλλο. Η υλοποίησή του, καλύπτει το κενό μεταξύ της θεωρητικής και της πρακτικής εφαρμογής της μέσης συνεχούς τάσης και θα αποτελέσει και αυτό την βάση για την μελλοντική ανάπτυξη παρόμοιων έργων [18].

Τέλος, ένα ακόμα έργο που έχει ως σκοπό την ενσωμάτωση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και την επαύξηση της χωρητικότητας ισχύος των γραμμών μεταφοράς, υλοποιήθηκε από την KEPCO (Korea's Electric Power Corporation). Αφορά την διασύνδεση διεσπαρμένων πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα) με το δίκτυο διανομής της Κορέας, με σκοπό την αύξηση της επιτρεπόμενης ποσότητας ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί, από τα 20MW (όταν το δίκτυο λειτουργούσε στο AC) στα 30 MW (με την μετατροπή του δικτύου σε DC). Επίσης, το συγκεκριμένο έργο έχει ως στόχο την μείωση της αναγκαίας απόστασης μεταξύ των γραμμών μεταφοράς για σκοπούς μόνωσης από τα 20m που απαιτούνται στο AC, στα μόλις 6-7m που απαιτούνται στο DC. Ο τύπος σύνδεσης της γραμμής είναι η σύνδεση σημείου με σημείο, έχει τάση λειτουργίας $\pm 35\text{kV DC}$, με έναν σταθμό ανόρθωσης και έναν σταθμό αντιστροφes. Για την εφαρμογή του εν λόγω έργου επιλέχθηκε η επαρχία Jeon-Nam, η οποία είναι εφοδιασμένη με 4.5GW ανανεώσιμης ενέργειας και μέσω αυτού αναβαθμίστηκαν οι υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς βελτιώνοντας την αποδοτικότητά τους καθώς και την χωρητικότητά τους. Αυτή η αναβάθμιση, μπορεί να λύσει τόσο τους τεχνικούς όσο και τους χειριστικούς περιορισμούς που υφίστανται σε γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος, και προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα όπως έχει ήδη προαναφερθεί, καθώς τα σύγχρονα φορτία όπως σταθμοί φόρτισης, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και κέντρα δεδομένων, λειτουργούν με συνεχές ρεύμα. Η εγκατάσταση είναι εφοδιασμένη με εξοπλισμό απομόνωσης ασφαλμάτων και ελέγχου μεταβατικών φαινομένων, ο οποίος έχει τεθεί υπό δοκιμή μέσω προσομοιώσεων. Όπως και τα προηγούμενα έργα, έτσι και αυτό, προσφέρει πολύτιμη εμπειρία και δεδομένα για την περαιτέρω ανάπτυξη τέτοιων τεχνολογιών [19].



Εικόνα 23: Δίκτυο σύνδεσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας MVDC Κορέας [19]

2.12 Εφαρμογές και προσομοιώσεις υβριδικών δικτύων – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Για την εκπόνηση της εργασίας μελετήθηκε μια πληθώρα συγγραμμάτων και επιστημονικών άρθρων, τα οποία είτε αναφέρονται σε πραγματικές εφαρμογές είτε σε προσομοιώσεις υβριδικών δικτύων μέσης και υψηλής τάσης με σκοπό την εύρεση των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων των συγκεκριμένων δικτύων, έναντι των συμβατικών δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο Ying Xue [20], αναφέρεται αναλυτικά στην μοντελοποίηση και στον έλεγχο των υβριδικών δικτύων υψηλής τάσης χρησιμοποιώντας Line Commutated Converters (LCC) και στις τεχνικές απαιτήσεις που παρουσιάζει η συγκεκριμένη διάταξη για την μεταφορά μεγάλης ισχύος σε μακρινές αποστάσεις. Αν και τα συγκεκριμένα συστήματα χρησιμοποιούνται εδώ και 60 χρόνια, ακόμα και σήμερα ερχόμαστε αντιμέτωποι με σημαντικές προκλήσεις όπως είναι η αδυναμία μεταγωγής κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, μεγάλη απαίτηση σε άεργο ισχύ από τους μετατροπείς και δυσκολία επαναλειτουργίας του συστήματος που είναι συνδεδεμένο σε παθητικό δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης (δηλαδή σε δίκτυο στο οποίο να μην υπάρχουν μονάδες παραγωγής ενέργειας) μετά από ολική διακοπή. Προς αντιμετώπιση των ανωτέρω, ο συγγραφέας προτείνει ένα πρότυπο δυναμικό μοντέλο, κατά το οποίο προσθέτει κάποιους ελεγχόμενους πυκνωτές μεταξύ των διακοπτικών στοιχείων των μετατροπέων και της εξόδου τους με σκοπό τον περιορισμό των αδυναμιών μεταγωγής ακόμα και σε περίπτωση σφαλμάτων και την ελαχιστοποίηση της απαίτησης για άεργο ισχύ. Αναλυτικές προσομοιώσεις ολοκληρώθηκαν στο πρόγραμμα RTDS (Real Time Digital Simulator), αναδυνάμυντας την αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου μοντέλου, δίνοντας έτσι λύση στους περιορισμούς της χρήσης των LCC και στα δίκτυα μέσης τάσης και

οδηγώντας στην περαιτέρω ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας, αυξάνοντας την αξιοπιστία και την απόδοσή της.

Οι Osama Saadeh et al. [21], χρησιμοποιούν και αυτοί το PowerFactory για την εκτέλεση μιας προσομοίωσης στο δίκτυο υψηλής εναλλασσόμενης τάσης στην Ιορδανία. Συγκεκριμένα, μετατρέπουν την λειτουργία ενός από τους αγωγούς μεταφοράς από εναλλασσόμενη σε συνεχή υψηλή τάση, δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό δίκτυο, έχοντας ως σκοπό να μελετήσουν τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η νέα τοπολογία, στα πλαίσια ενσωμάτωσης των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας. Ενώ το εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται καιρό στις υψηλές τάσεις για τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, παρουσιάζει τα μειονεκτήματα που έχουν αναφερθεί (απώλειες λόγω άεργου ισχύος, περιορισμούς στην χωρητικότητα των γραμμών μεταφοράς και αστάθεια κυρίως λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας). Το νέο υβριδικό δίκτυο με ενσωματωμένο ένα δίκτυο HVDC, παρουσιάζει βελτιωμένη χωρητικότητα, μειωμένες απώλειες και βελτιώνει τη σταθερότητα του συνολικού δικτύου. Εκτελούνται προσομοιώσεις τόσο με χρήση της τοπολογίας LCCs όσο και με VSCs (Voltage Source Converters), με σκοπό τη σύγκριση των δύο αυτών συστημάτων, τόσο στη λειτουργία του δικτύου σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario), όσο και υπό την επίδραση σφαλμάτων. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η τοπολογία με VSCs, προσφέρει την υψηλότερη απόδοση και την καλύτερη ευελιξία, ειδικά σε περιοχές με μεγάλη παρουσία ανανεώσιμων πηγών, καθιστώντας την ιδανική για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Οι Lu Zhang et al. [8], εξερεύνησαν μεθόδους για την βελτίωση της χωρητικότητας των γραμμών μεταφοράς υπαρχόντων δικτύων μέσης τάσης τα οποία βρίσκονται εντός κατοικημένων περιοχών, μετατρέποντας τις γραμμές συνεχούς ρεύματος μέσης τάσης σε γραμμές συνεχούς ρεύματος. Με δεδομένη τη συνεχή ανάπτυξη των απαιτήσεων για ισχύ στις αστικές περιοχές καθώς και την αυξανόμενη παρουσία διεσπαρμένων πηγών, κρίνεται αναγκαία η επέκταση του δικτύου διανομής κάτι το οποίο αποτελεί πρόκληση ειδικά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές που ο χώρος για νέους υποσταθμούς και γραμμές μεταφοράς είναι ανεπαρκής. Μέσω της μελέτης τους, προτείνουν την δημιουργία υβριδικών δικτύων διανομής, όπου συγκεκριμένες γραμμές να μετατραπούν από AC σε DC, επιτρέποντας έτσι ευελιξία στην μεταφορά ισχύος μέσω της χρήσης VSCs. Μέσω αυτής της μετατροπής, μπορούμε να αυξήσουμε την χωρητικότητα των γραμμών, να βελτιώσουμε την τροφοδοσία των φορτίων και να προσαρτήσουμε περισσότερες διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής στο δίκτυο διανομής. Η μετατροπή αυτή, μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως αυτό αναφέρεται στην εν λόγω μελέτη, χωρίς να

απαιτείται η αντικατάσταση των γραμμών προσφέροντας έτσι μια οικονομική λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που προαναφέρθηκαν. Η μελέτη, καταλήγει στο αποτέλεσμα ότι η χρήση υβριδικών δικτύων AC/DC είναι ιδανική για τον χειρισμό αυξημένης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, οδηγώντας σε αύξηση της χωρητικότητας των γραμμών κατά 102%, βελτιώνοντας σημαντικά το περιθώριο για την ένταξη περαιτέρω τέτοιων μονάδων, επιτρέποντας καλύτερο χειρισμό ισχύος ειδικά σε περιοχές με περιορισμένο χώρο υποδομών.

Οι Sophie Coffey et al. [22], αναλύουν τις εφαρμογές των δικτύων MVDC και την απαιτούμενη τεχνολογία κυρίως όσον αφορά τους σιδηροδρόμους, τα συστήματα φόρτωσης-εκφόρτωσης πλοίων, τα δίκτυα διανομής και την τροφοδοσία υπεράκτιων κατασκευών. Επίσης, μελέτησαν τα επίπεδα τάσης και ισχύος των ανωτέρω δικτύων, την δομή τους, τις τοπολογίες των μετατροπών, τις διατάξεις ασφαλείας και ελέγχου για κάθε εφαρμογή. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα δίκτυα μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος, προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα όπως ευελιξία, ελεγχσιμότητα, αξιοπιστία και αυξημένη χωρητικότητα ειδικά για τα δίκτυα διανομής. Η απαιτούμενη τεχνολογία είναι διαθέσιμη και ήδη χρησιμοποιείται με επιτυχία στις ανωτέρω εφαρμογές, με αποτέλεσμα να εκτιμάται ότι τα συστήματα MVDC θα επικρατήσουν στην σκηνή της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, συνεχείς βελτιώσεις απαιτώνται στο πλαίσιο επάυξης του βαθμού απόδοσης των διακοπτικών στοιχείων και των αποζευκτών που χρησιμοποιούνται.

Οι Gen Li et al. [23], μελέτησαν την προστασία από σφάλματα και την αποκατάσταση λειτουργίας συστημάτων μετά από αυτά σε δίκτυα διανομής MVAC και MVDC. Επισιμένουν τις σημαντικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα συστήματα MVDC, κυρίως όσον αφορά την προστασία έναντι των σφαλμάτων, λόγω της απουσίας των ρευμάτων μηδενικού επιπέδου, η οποία περιπλέκει την διαδικασία διακοπής τους. Η μελέτη συγκρίνει δύο μεθόδους προστασίας, η μία περιλαμβάνει AC αποζεύκτες (οι οποίοι είναι πιο απλοί, και οικονομικοί) και η άλλη περιλαμβάνει DC αποζεύκτες οι οποίοι μπορούν να απομονώσουν κάποιο σφάλμα ταχύτερα αλλά είναι κοστοβόροι. Διεξάγονται διάφορες δοκιμές και προσομοιώσεις, μέσα από τις οποίες παρέχονται σημαντικές πληροφορίες για τον μελλοντικό σχεδιασμό υβριδικών δικτύων μέσης τάσης.

Ο Emir Taso [2], αναφέρεται στις σύγχρονες εξελίξεις και τις δυνατότητες των DC δικτύων διανομής έναντι των κυρίαρχων AC δικτύων. Αναφέρεται στις βελτιώσεις που έχουν γίνει ανά τα χρόνια στην τεχνολογία του συνεχούς ρεύματος, όπως είναι η βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης των μετατροπών καθώς και την ραγδαία ανάπτυξη των πηγών συνεχούς ρεύματος λόγω της εδραίωσης των ανανεώσιμων πηγών. Επισημαίνει την πρακτικότητα αυτών των συστημάτων σε διάφορες εφαρμογές, όπως είναι τα μεγάλα κέντρα

δεδόμενων, σταθμοί φόρτισης αυτοκινήτων και την δυνατότητα μετατροπής υπαρχόντων καλωδίων από λειτουργία AC σε DC. Επίσης, στην έρευνά του, περιλαμβάνει τους παράγοντες απόδοσης και των δύο συστημάτων, αξιολογώντας λύσεις για χαμηλές και μέσες τάσεις. Τέλος, υπογραμμίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων συνεχούς ρεύματος έναντι των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος, συμβάλλοντας στην ευρύτερη κατανόηση του ρόλου που πρόκειται να διαδραματίσουν στα μελλοντικά δίκτυα.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως έχουν εκτελεστεί αρκετές προσομοιώσεις και μελέτες πάνω στα δίκτυα διανομής που χρησιμοποιούν συστήματα συνεχούς ρεύματος, τόσο σε μέση όσο και στην υψηλή τάση, από τις οποίες προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα. Τόσο στις προσομοιώσεις όσο και στις πρακτικές υλοποιήσεις τέτοιων έργων, αποδεικνύεται ότι κατά τη φυσιολογική λειτουργία του δικτύου, τα συστήματα DC έχουν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σχετικά με τις απώλειες, την ελεγχιμότητα ισχύος, την χωρητικότητα των γραμμών μεταφοράς και εν γένη την ενσωμάτωση μεγαλύτερου αριθμού διεσπαρμένων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπισθούν (όπως η συμπεριφορά τους και η απόκρισή τους σε σφάλματα), κάτι το οποίο θα γίνει μέσω της περαιτέρω ανάπτυξης της τεχνολογίας στον συγκεκριμένο τομέα.

Κεφάλαιο 3^ο: Παρουσίαση προγράμματος προσομοίωσης – PowerFactory

3.1 Γενικά στοιχεία για το PowerFactory

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως ήδη προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PowerFactory της Digsilent (Digital Simulation of Electrical Networks). Το PowerFactory αποτελεί ένα λογισμικό που εν γένει χρησιμοποιείται για την ανάλυση και μελέτη της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορεί να καλύψει εξ' ολοκλήρου τον τρόπο λειτουργίας τόσο των πιο απλών εφαρμογών παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και των πιο σύνθετων, όπως για παράδειγμα ενός αιολικού πάρκου, της διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο οποιασδήποτε προσομοίωσης που έχουμε υλοποιήσει.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από προγραμματιστές και μηχανικούς με μεγάλη εμπειρία τόσο στον τομέα της ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας όσο και στον τομέα του προγραμματισμού. Αυτό οδήγησε στην ορθότητα και στην μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την χρήση του, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το πλήθος των εταιρειών και οργανισμών που το χρησιμοποιούν παγκοσμίως, οι οποίοι εξειδικεύονται στον τομέα της σχεδίασης και υλοποίησης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πλαίσιο της κάλυψης των συνολικών αναγκών που προκύπτουν από την μελέτη των συστημάτων ενέργειας, το PowerFactory σχεδιάστηκε σαν ένα ολοκληρωμένο εργαλείο ανάλυσης που συμπεριλαμβάνει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα κάτωθι:

- Πληθώρα βασικών συναρτήσεων για τον ορισμό, την τροποποίηση και οργάνωση των υποθέσεων/μελετών, υπολογιστικών μεθόδων και για την εξαγωγή και οργάνωση των αποτελεσμάτων.
- Δυνατότητα σχεδιασμού, ανάλυσης και μελέτης μονογραμμικών διαγραμμάτων.
- Ανάλυση και υπολογισμός μεγεθών των διάφορων στοιχείων του συστήματος μελέτης στο ανά μονάδα σύστημα.
- Ενσωματωμένες συναρτήσεις για τον υπολογισμό του τρόπου λειτουργίας των στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε κάθε μελέτη, με βάση τα δεδομένα που

εισάγονται από τον χρήστη (για παράδειγμα μπορούν να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά γεννητριών, μετασχηματιστών και γραμμών μεταφοράς μέσω εισαγωγής των γεωμετρικών πληροφοριών τους ή των πληροφοριών που αναγράφονται στην αντίστοιχη πινακίδα του μηχανήματος).

- Δυνατότητα διαμόρφωσης συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο ο χρήστης να έχει πρόσβαση είτε απευθείας είτε μέσω κάποιου συστήματος τηλεμετρίας και αυτόματου ελέγχου (SCADA-supervisory control and data acquisition).
- Ικανότητα διεπαφής με διάφορα συστήματα ηλεκτρονικής χαρτογράφησης.

Επιπρόσθετα, η χρήση μίας μόνο βάσης δεδομένων, η οποία περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (για τις γραμμές μεταφοράς, για τις γεννήτριες, για τους διακόπτες κτλ), δίνει την δυνατότητα στο συγκεκριμένο πρόγραμμα να εκτελεί όλους τους υπολογισμούς ροής ισχύος μέσα σε ένα μόνο προγραμματιστικό περιβάλλον, κάνοντάς το πολύ εύκολο στην χρήση του. Τέτοιοι υπολογισμοί είναι η ροή φορτίου, τα αποτελέσματα κάποιου βραχυκυκλώματος, η ανάλυση των αρμονικών που παρουσιάζονται, η σταθερότητα του συστήματος και η ανάλυση των κόμβων του συστήματος [24].

3.2 Δομή βάσης δεδομένων *PowerFactory*

Αναλυτικότερα, όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο έχει γίνει η ενσωμάτωση των απαραίτητων στοιχείων στην βάση δεδομένων του συγκεκριμένου προγράμματος καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτή έχει δομηθεί, μπορούμε να αναφέρουμε τα ακόλουθα:

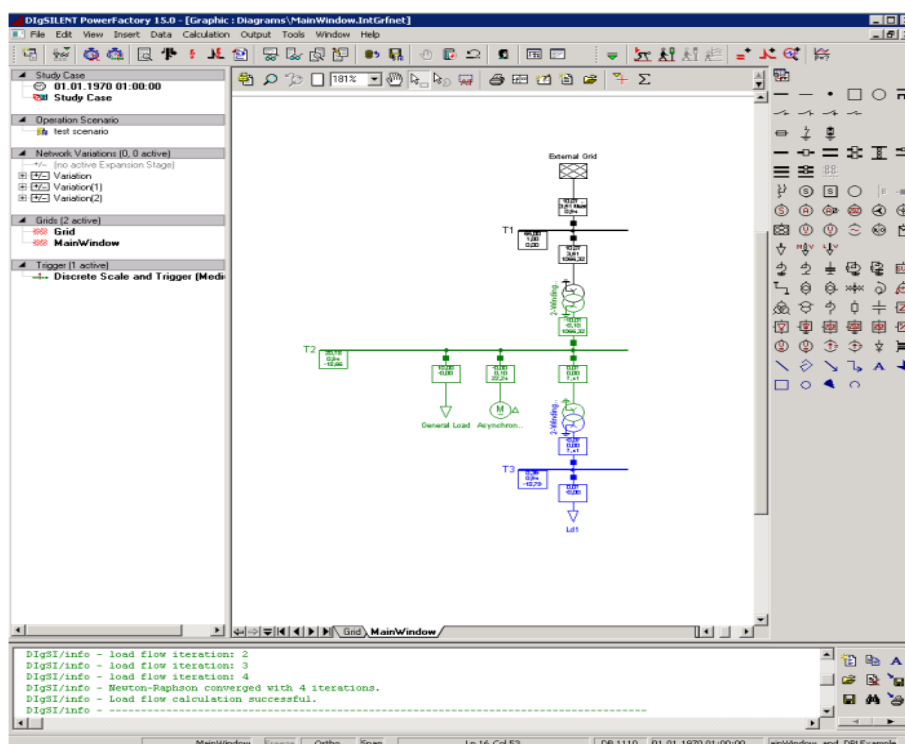
- Σχέδιο μοναδικής βάσης δεδομένων: Όπως προαναφέρθηκε, το *PowerFactory* χρησιμοποιεί μία μόνο βάση δεδομένων στην οποία συγκεντρώνονται όλα τα στοιχεία για την λειτουργία του προγράμματος. Παρέχεται η βέλτιστη οργάνωση δεδομένων, η απομνημόνευση των επιλογών λειτουργίας και ρυθμίσεων του προγράμματος (με δυνατότητα αποθήκευσης προτιμήσεων ενός ή πολλαπλών χρηστών αυτού), καθώς και οτιδήποτε απαιτείται για την υλοποίηση μοντέλων και την προσομοίωση συστημάτων ισχύος.

- Αντικειμενοστραφής προσέγγιση: Όλα τα δεδομένα που ορίζουν ένα μοντέλο συστήματος ισχύος, αποθηκεύονται σε φάκελο με την ονομασία “Project”. Μέσα σε αυτόν τον φάκελο υπάρχει ο υποφάκελος “Study Cases”, στον οποίο αποθηκεύονται δεδομένα που ορίζουν τις διάφορες μελέτες τόσο για τμήματα όσο και για ολόκληρο το υπό εξέταση δίκτυο, καθώς και τις διάφορες παραλλαγές που υλοποιούμε σε μορφή αντικειμένων (objects). Η προσέγγιση αυτή, μέσω της οποίας μπορούμε εύκολα να διαχειριστούμε τις μελέτες, αποτελεί μια ιδιαίτερη εφαρμογή του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού καθώς έπειτα αυτά τα objects ταξινομούνται με την σειρά τους σε ομάδες (classes). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο πλεονασμός δεδομένων και απλοποιείται η διαχείρισή τους.
- Λειτουργία πολλαπλών χρηστών: Η δομή της βάσης δεδομένων, επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες, είτε να υλοποιεί ο καθένας τα δικά του έργα, είτε να διαμοιράζονται δεδομένα μεταξύ των μελετών τους. Σε αυτήν την περίπτωση, τα δικαιώματα εισόδου για κάθε χρήστη και οι ομάδες διαμοιρασμού των δεδομένων, ορίζονται από τον διαχειριστή της βάσης δεδομένων.
- Λειτουργία εκτός δικτύου: Σε κάποιες περιπτώσεις η σύνδεση σε μια διαδικτυακή βάση δεδομένων μπορεί να μην είναι εφικτή, έτσι το PowerFactory δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να εργαστεί σε λειτουργία εκτός σύνδεσης. Κατά την λειτουργία αυτή, τα απαιτούμενα δεδομένα για την ορθή λειτουργία του συγκεκριμένου έργου, αποθηκεύονται στην μνήμη του υπολογιστή που χρησιμοποιείται, και μπορούν σε δεύτερο χρόνο να συγχρονιστούν με την διαδικτυακή βάση δεδομένων, όποτε επανέλθει η δυνατότητα σύνδεσης σε αυτή. Η λειτουργία εκτός σύνδεσης, συμπεριλαμβάνει την δυνατότητα του «κλειδώματος» και «ξεκλειδώματος» μελετών όσον αφορά την δυνατότητα επεξεργασίας τους, και τον χαρακτηρισμό τους ως «μόνο προς ανάγνωση», ώστε να μειωθεί ο απαιτούμενος όγκος δεδομένων που θα πρέπει να αποθηκευτεί στον υπολογιστή του χρήστη.
- Εξατομίκευση: Υπάρχουν δύο βασικά είδη προφίλ του προγραμματιστικού περιβάλλοντος που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης, τα οποία είναι το «Βασικό» και το «Πρότυπο». Το πρώτο προφίλ περιορίζει τα εικονίδια που

παρουσιάζονται στην κύρια γραμμή εργαλείων και χρησιμοποιείται συνήθως από τους νέους χρήστες και για απλές εντολές όπως αυτές του βραχυκυκλώματος και της ροής φορτίου. Ο διαχειριστής της βάσης δεδομένων, μπορεί να δημιουργήσει και να εξατομικεύσει τα διάφορα προφίλ, όπως για παράδειγμα να τροποποιήσει τα παράθυρα διαλόγου που εμφανίζονται, να αλλάξει τις εντολές που εμφανίζονται στις γραμμές εργαλείων και να προσαρμόσει το κυρίως μενού όπως αυτός επιθυμεί.

3.3 Περιβάλλον του PowerFactory

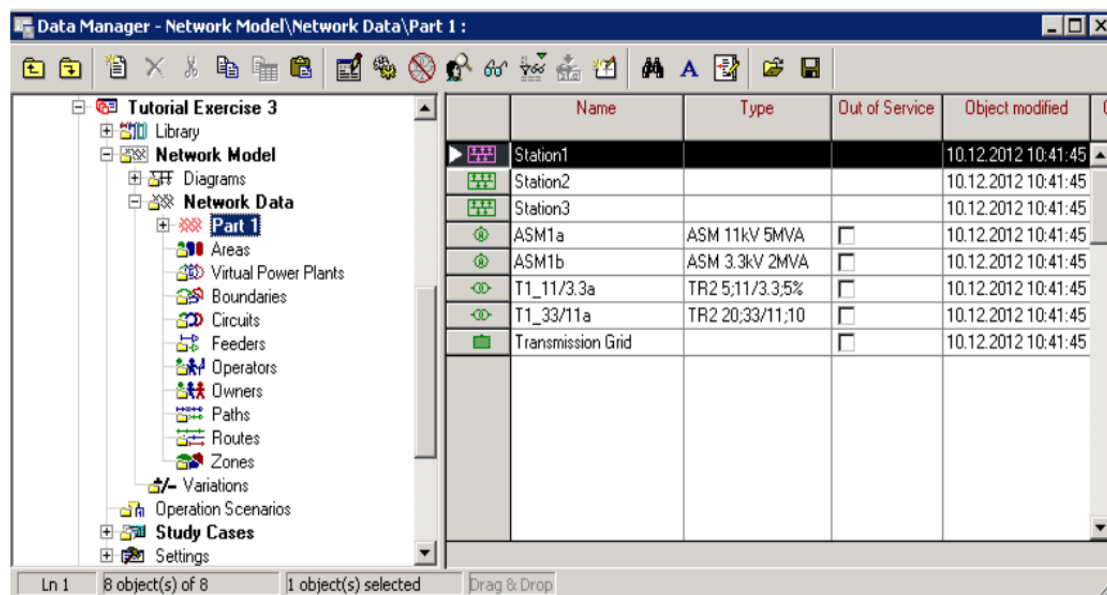
Το PowerFactory σχεδιάστηκε με σκοπό να χρησιμοποιείται και να λειτουργεί μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει ότι τα βασικά δεδομένα εισάγονται σχεδιάζοντας τα στοιχεία του δικτύου που θέλουμε να υλοποιήσουμε, και έπειτα αυτά μορφοποιούνται και τους αναθέτονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Ακολουθεί εικόνα από το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος, όταν έχουμε ενεργό κάποιο έργο:



Εικόνα 24: Γραφικό Περιβάλλον Προγράμματος PowerFactory

Παρατηρούμε ότι όλα τα δεδομένα για τα αντικείμενα είναι τοποθετημένα ιεραρχικά σε φακέλους για να γίνει πιο εύκολη η περιήγηση. Η προβολή αυτών των

δεδομένων γίνεται μέσω ενός ξεχωριστού παραθύρου (Data Manager), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 25: Παράθυρο του Data Manager του PowerFactory

Τα εν λόγω δεδομένα είναι ομαδοποιημένα με βάση δύο βασικά κριτήρια:

1. Δεδομένα που αφορούν άμεσα το υπό εξέταση σύστημα, τα οποία είναι επί των πλείστων πληροφορίες για τα ηλεκτρολογικά στοιχεία.
2. Δεδομένα που αφορούν την εκτέλεση της μελέτης, όπως για το ποια γραφήματα θα πρέπει να εμφανιστούν, τι ρυθμίσεις έχουν επιλεγεί για την ροή φορτίου και ποιες περιοχές του δικτύου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες ενέργειες που μπορεί να κάνει ο χρήστης, γίνονται τόσο στην προβολή του μονογραμμικού σχεδίου όσο και από το παράθυρο του Data Manager.

3.4 Βιβλιοθήκες, μονογραμμικά διαγράμματα και δεδομένα δικτύου υπό μελέτη

Υπάρχουν δύο είδη βιβλιοθηκών, μία που περιέχει πληθώρα από προκαθορισμένα μοντέλα και αποτελεί την κύρια βιβλιοθήκη του προγράμματος, όπως:

- Δεδομένα για τα βασικά στοιχεία (αγωγοί, κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές)

- Βασικές μακροεντολές ελέγχου και μοντέλα (συναρτήσεις μεταφοράς, λογικά διαγράμματα)
- Βασικά μοντέλα μετασχηματιστών τάσεως και ρεύματος, ασφαλειών και διακοπών
- Προκαθορισμένα πρότυπα για διάφορα μοντέλα όπως συστοιχία μπαταριών, μοντέλο ανεμογεννήτριας επαγωγής με διπλή τροφοδοσία, δίκτυο φωτοβολταϊκών και ανεμογεννήτρια με δρομέα μεταβλητής αντίστασης.
- Βασικές συναρτήσεις στην γλώσσα προγραμματισμού του προγράμματος (DPL-DigSilent Programming Language) όπως είναι αυτές για την παραγωγή καμπυλών ισχύος και για την ροή φορτίου συναρτήσει την πάροδο του χρόνου,

και μία βιβλιοθήκη που αφορά το εκάστοτε έργο, η οποία περιλαμβάνει πληροφορίες για την λειτουργία του δικτύου, τους κώδικες που έχει γράψει ο χρήστης, τα πρότυπά του, και μοντέλα ορισμένα από αυτόν.

Όσον αφορά τα μονογραμμικά διαγράμματα που σχεδιάζει ο χρήστης, κάθε ένα από αυτά αποθηκεύεται σε έναν ξεχωριστό φάκελο ώστε να είναι εύκολη η επεξεργασία και τροποποίησή του σε δεύτερο χρόνο, εφόσον απαιτηθεί. Τα μονογραμμικά διαγράμματα, αποτελούνται από γραφικά στοιχεία τα οποία αντιστοιχούν στα εξαρτήματα του υπό μελέτη δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο χρήστης να δύναται να ορίσει και να τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων αυτών, απευθείας από την προβολή του μονογραμμικού διαγράμματος. Τα εξαρτήματα του δικτύου μπορούν να απεικονιστούν με περισσότερα από ένα γραφικά στοιχεία, με αποτέλεσμα το ίδιο εξάρτημα να παρουσιάζεται σε διαφορετικά διαγράμματα. Κάθε μονογραμμικό διάγραμμα συσχετίζεται με ένα δίκτυο και κάθε φορά που ο χρήστης προσθέτει ένα δίκτυο στην μελέτη του, ερωτάται ποιο από τα συσχετισμένα διαγράμματα να προβληθεί.

Όλες οι πληροφορίες που αφορούν το ηλεκτρολογικό κομμάτι του δικτύου, αποθηκεύονται και αυτές σε συγκεκριμένους φακέλους. Ένα σύστημα ισχύος μπορεί να έχει όσα δίκτυα θέλει να ορίσει ο χρήστης, τα οποία είτε μπορεί να είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, είτε και όχι. Επίσης, δίνεται η επιλογή να γίνουν ενεργά ή όχι τα δίκτυα τα οποία θέλει να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς ή να παραλειφθούν αντίστοιχα. Τα δεδομένα που θα προκύψουν, μπορούν έπειτα να ταξινομηθούν με βάση κάποια λογική σειρά (για παράδειγμα το είδος δικτύου που ανήκουν) ή με βάση τις γεωγραφικές περιοχές των δικτύων από όπου προέκυψαν.

Επειδή κατά την διάρκεια του σχεδιασμού και της αρχικής εκτίμησης ενός συστήματος ισχύος, συχνά απαιτείται να αναλύσουμε διάφορες παραλλαγές του βασικού μας

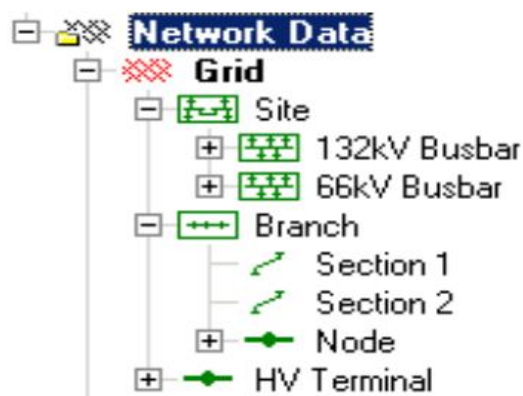
δικτύου και δυνατότητες επέκτασής του, το PowerFactory προσφέρει αυτή ακριβώς την δυνατότητα μέσω ειδικών αντικειμένων, τα οποία ονομάζονται “variations”. Ουσιαστικά, πρόκειται για αντικείμενα τα οποία αποθηκεύουν και πραγματοποιούν τις απαιτούμενες αλλαγές στο δίκτυο και μπορούν εύκολα να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν. Η χρήση τους, επιτρέπει στον χρήστη να εκτελέσει μελέτες του δικτύου υπό διαφορετικές καταστάσεις με έναν απλό και οργανωμένο τρόπο.

Σε συνέχεια των παραπάνω, προστίθενται οι παράμετροι “study time” (χρόνος μελέτης) και “activation time” (χρόνος ενεργοποίησης). Η πρώτη αποτελεί μια παράμετρο η οποία ορίζει τον χρονικό ορίζοντα που διεξάγεται η μελέτη και η δεύτερη ορίζει τον χρόνο κατά τον οποίο τα αντικείμενα “variations” , θα επιφέρουν τις αλλαγές που έχει ορίσει ο χρήστης στο δίκτυο. Εάν ο χρόνος ενεργοποίησης προηγείται του χρόνου μελέτης, τότε οι αλλαγές επιφέρονται απευθείας στο αρχικό δίκτυο. Τέτοιες αλλαγές μπορεί να είναι:

- Τροποποίηση σε ένα εξάρτημα δικτύου
- Προσθήκη κάποιου εξαρτήματος στο δίκτυο
- Αφαίρεση κάποιου εξαρτήματος από το δίκτυο

3.5 Δομή Έργου

Η δομή του έργου μας εξαρτάται από την πολυπλοκότητά του, το ποιο μοντέλο χρησιμοποιεί ο χρήστης και τις προτιμήσεις του. Ο χρήστης, έχει την ευελιξία να ορίσει τα εξαρτήματα του δικτύου απευθείας μέσα από αυτό ή να τα οργανώσει και να τα ομαδοποιήσει με τέτοιον τρόπο που να απλοποιεί την διαχείριση των δεδομένων του έργου. Στην διπλανή εικόνα δίνεται ένα παράδειγμα δομής των δεδομένων ενός έργου. Σε αυτήν την περίπτωση έχουν οριστεί δύο ζυγοί στα 132kV και στα 66kV αντίστοιχα, οι οποίοι είναι ομαδοποιημένοι υπό το “Site”, το οποίο περιλαμβάνει και έναν μετασχηματιστή 132kV/66kV, ο οποίος δεν φαίνεται εδώ. Ένας κλάδος (“branch”), ο οποίος αποτελείται από δύο γραμμές μεταφοράς και από έναν κόμβο,



Εικόνα 26: Δομή «δένδρου» Power Factory

συνδέει τον ζυγό των 132kV με το τερματικό σταθμό Υψηλής Τάσης (ακροδέκτης). Η ομαδοποίηση των στοιχείων κατά αυτόν τον τρόπο, απλοποιεί την διαχείριση των δεδομένων,

κάνει πιο εύκολη την σχεδίαση των διαγραμμάτων και διευκολύνει τον ορισμό και αποθήκευση των ρυθμίσεων των διακοπών του υποσταθμού. Στην συνέχεια γίνεται εν τάχει μια αναφορά στα κύρια εξαρτήματα που αφορούν την τοπολογία του δικτύου.

Οι κόμβοι που συνδέουν γραμμές μεταφοράς, γεννήτριες, φορτία κτλ, στο συγκεκριμένο πρόγραμμα ορίζονται σαν ακροδέκτες. Με βάση την χρήση τους μέσα στο σύστημα ισχύος, οι ακροδέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν ζυγούς, διακλαδώσεις ή εσωτερικούς κόμβους (η κάθε λειτουργία τους επιλέγεται από ένα μενού επιλογής). Σύμφωνα με την λειτουργία τους, γίνονται διαθέσιμες και διαφορετικές συναρτήσεις υπολογισμού (για παράδειγμα, η επιλογή για τον υπολογισμό βραχυκυκλώματος, είναι διαθέσιμη μόνο σε αυτούς που έχουν οριστεί ως ζυγοί ή μεταξύ ζυγών και κόμβων).

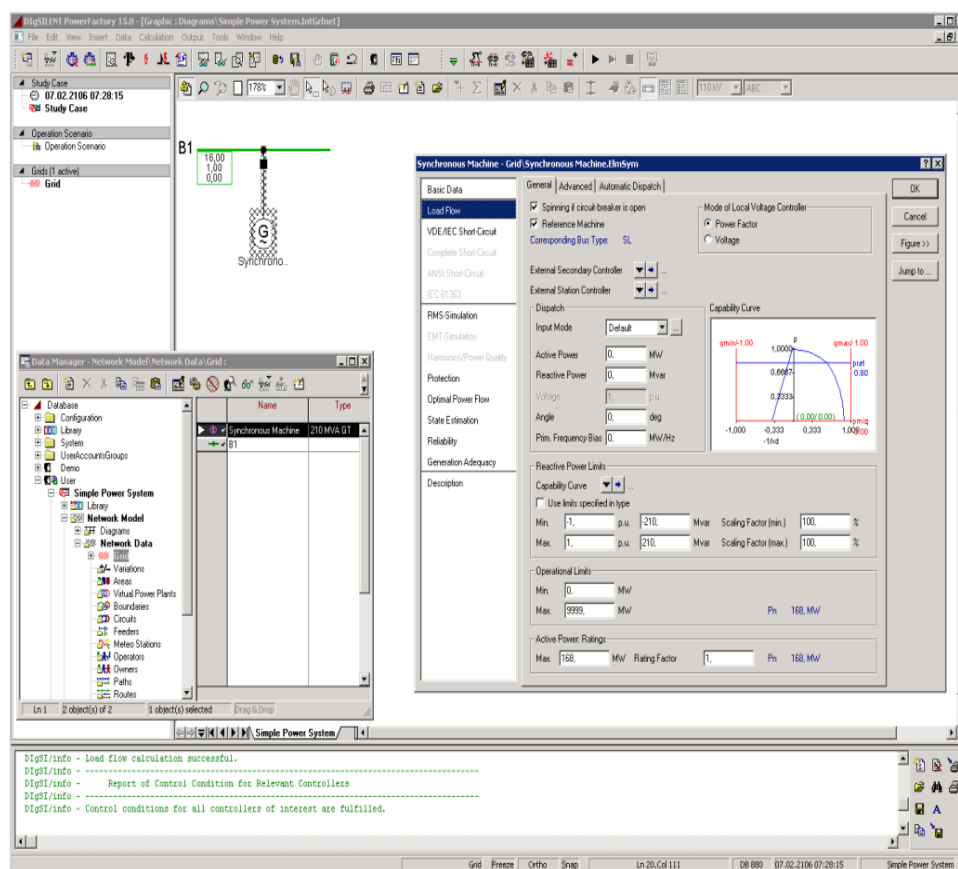
Στοιχεία με πολλαπλές διασυνδέσεις, αναφέρονται ως διακλαδώσεις. Οι διακλαδώσεις συμπεριλαμβάνουν και στοιχεία δύο διασυνδέσεων, όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές, στοιχεία τριών συνδέσεων όπως είναι οι μετασχηματιστές τριών τυλιγμάτων, οι AC/DC μετατροπείς με δύο DC άκρα και άλλα.

Όταν ένα στοιχείο διακλάδωσης συνδέεται απευθείας με έναν ακροδέκτη, τότε το PowerFactory εισάγει αυτόματα ένα νέο στοιχείο για να ορίσει την σύνδεση, το “Cubicle”. Το “Cubicle” ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το πάνελ σε έναν πίνακα διακοπών πάνω στο οποίο συνδέεται το στοιχείο διακλάδωσης.

Για την μοντελοποίηση περίπλοκων συνδέσεων μεταξύ ζυγών και υποσταθμών, χρησιμοποιούνται στοιχεία διακοπών, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ως αποζεύκτες, διακόπτες ισχύος κτλ. Η σύνδεση μεταξύ κάποιου στοιχείου με κάποιον ακροδέκτη γίνεται αυτόματα χωρίς την ανάγκη εισαγωγής κάποιου διακόπτη χειροκίνητα [24].

3.6 Διεπαφή Χρήστη

Το κύριο παράθυρο του προγράμματος φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 27: Κύριο παράθυρο προγράμματος PowerFactory

Συνοπτικά, κάποια βασικά τμήματα που μπορούμε να διακρίνουμε είναι τα εξής:

1. Το κύριο παράθυρο περιλαμβάνει την έκδοση του PowerFactory που χρησιμοποιούμε, και τα τυπικά εικονίδια για ελαχιστοποίηση, για μεγέθυνση και για κλείσιμο του παραθύρου. Επιπρόσθετα, μπορούμε να εντοπίσουμε την γραμμή με τα κύρια μενού όπως επίσης και την γραμμή εργαλείων.
2. Το παράθυρο “Graphical Editor”, εμφανίζει τα μονογραμμικά διαγράμματα, τα μπλοκ διαγράμματα και/ή γραφικές παραστάσεις από τις προσομοιώσεις της ενεργής μελέτης. Μέσω του συγκεκριμένου παραθύρου, όπως προαναφέρθηκε, ο χρήστης μπορεί απευθείας να τροποποιήσει τα διάφορα μοντέλα του τοποθετώντας ή ενώνοντας διάφορα στοιχεία. Επίσης με δεξί κλικ σε οποιοδήποτε στοιχείο, εμφανίζεται ένα επιπλέον μενού με διάφορες εντολές, ενώ με διπλό αριστερό κλικ εμφανίζεται το παράθυρο διεπαφής του αντικειμένου με τον χρήστη, από το οποίο

μπορούμε να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά του και το οποίο αποτελείται από αρκετές σελίδες, με την κάθε μία να αντιστοιχεί και σε κάποια συγκεκριμένη λειτουργία (πχ σελίδα με ρυθμίσεις που αφορούν την ροή φορτίου).

3. Το παράθυρο “Data manager”, αποτελεί την άμεση επαφή του χρήστη με την βάση δεδομένων του προγράμματος. Στο αριστερό κομμάτι του, εμφανίζεται σε μορφή δέντρου το σύνολο της βάσης δεδομένων ενώ στο δεξί τμήμα φαίνονται τα περιέχονται από τον φάκελο που έχουμε επιλέξει. Ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει περισσότερα από ένα τέτοια παράθυρα και η κύρια λειτουργία τους είναι να προσφέρουν πρόσβαση στα εξαρτήματα/αντικείμενα του συστήματος ισχύος.
4. Το παράθυρο εξόδου φαίνεται στο κάτω μέρος της παραπάνω εικόνας, το οποίο δεν έχει την επιλογή να κλείσει, αλλά μόνο να ελαχιστοποιηθεί.
5. Τέλος, το παράθυρο “Project Overview”, βρίσκεται στο αριστερό μέρος της οθόνης, μεταξύ της κύριας γραμμής εργαλείων και του παραθύρου εξόδου. Σε αυτό, παρουσιάζεται μία σύνοψη του έργου, επιτρέποντας στο χρήστη να δει την κατάστασή του με μια γρήγορη ματιά και να έχει εύκολη πρόσβαση στα δεδομένα του.

Αναλυτικότερα, όσον αφορά την γραμμή με τα κύρια μενού, σε κάθε ένα από αυτά εμφανίζεται μια λίστα με επιλογές που αφορούν κάποια συγκεκριμένη λειτουργία. Όσες επιλογές είναι γκρι, σημαίνει πως δεν γίνεται να εκτελεστούν και γίνονται ενεργές μόνο εφόσον ο χρήστης ενεργοποιήσει τις απαιτούμενες υπολογιστικές λειτουργίες.

Η κύρια γραμμή εργαλείων δίνει στον χρήστη πρόσβαση στις διαθέσιμες κύριες εντολές του προγράμματος. Όπως και στην γραμμή με τα μενού, έτσι και εδώ, όποιο κουμπί είναι γκρι, σημαίνει ότι η συγκεκριμένη επιλογή είναι μη διαθέσιμη. Με την τοποθέτηση του δείκτη του ποντικιού πάνω σε κάποιο κουμπί για λίγα δευτερόλεπτα, εμφανίζεται η βοήθεια, περιγράφοντας την λειτουργία για την συγκεκριμένη εντολή. Μερικές από τις βασικές εντολές της γραμμής εργαλείων είναι η ρύθμιση βραχυκυκλώματος και η εκτέλεσή του υπολογισμού του, ο υπολογισμός της ροής φορτίου, η σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ δύο υπολογισμών του συστήματος (εφόσον έχει γίνει κάποια αλλαγή στο σύστημα) και η πρόσβαση στις ρυθμίσεις του χρήστη.

Τέλος, όσον αφορά το παράθυρο εξόδου, προβάλλονται σε αυτό κυρίως μηνύματα υπό την μορφή κειμένου, που αφορούν σφάλματα, προειδοποιήσεις, αποτελέσματα υπολογισμών, αναφορές και άλλα. Τα περιεχόμενα του συγκεκριμένου παραθύρου, μπορούν να αποθηκευτούν, μορφοποιηθούν, αντιγραφούν κτλ, μέσω εντολών υπό την μορφή εικονιδίων που βρίσκονται στην δεξιά περιοχή του παραθύρου ή κάνοντας δεξιά κλικ εντός

του παραθύρου. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνονται κάποια σφάλματα και ένα μήνυμα πληροφορίας όπως αυτά εμφανίζονται στο παράθυρο εξόδου:

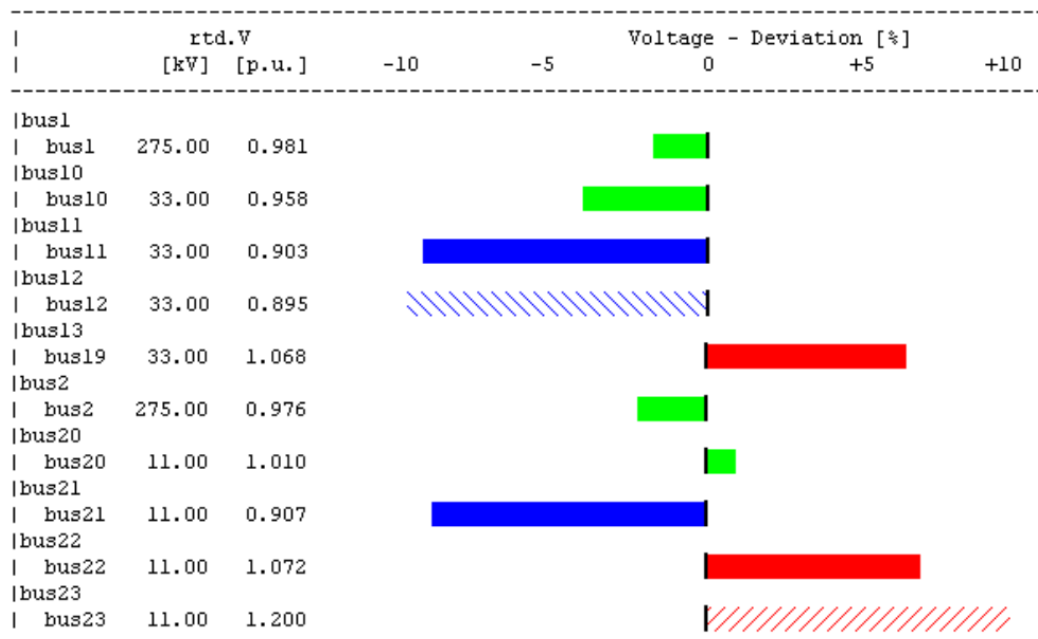
```

DIgSI/err - -----
DIgSI/err - 'Simple Power System\Synchronous Machine.ElmSym':
DIgSI/err - missing type!
DIgSI/err - Calculation not possible!
DIgSI/err - Error in load flow data!
DIgSI/info - Load flow calculation not executed.
DIgSI/err - last command leads to error(s), see output window!

```

Εικόνα 28: Παράθυρο Εξόδου PowerFactory

Οι αρχικές ρυθμίσεις του προγράμματος, ορίζουν τα μηνύματα σφαλμάτων να εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα (DIgSI/err -), τα μηνύματα πληροφορίας να είναι πράσινα (DIgSI/info-), τα μηνύματα προειδοποίησης να είναι καφέ (DIgSI/wrng -) , τα μηνύματα πρωτοκόλλου να είναι μπλε και τέλος το απλό κείμενο να είναι μαύρο. Εκτός από τα μηνύματα κειμένου, υπάρχει περίπτωση κάποια αναφορά να περιέχει πληροφορίες υπό την μορφή γραφήματος. Για παράδειγμα, οι τιμές των ανά μονάδα τάσεων των ζυγών μετά από τον υπολογισμό ροής φορτίου, εμφανίζονται υπό την μορφή μπαρών:



Εικόνα 29: Παράδειγμα γραφήματος τάσεων ζυγών στο α.μ. σύστημα

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, οι μπάρες με το πράσινο χρώμα δηλώνουν ότι οι συγκεκριμένες τάσεις είναι εντός ορίων, με μπλε χρώμα ότι οι τιμές είναι κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο, με κόκκινο χρώμα ότι είναι εκτός ορίων και με διαγράμμιση ότι η τιμή είναι εκτός εύρους απεικόνισης [24].

3.7 Εργαλεία ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

3.7.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου (Load Flow Analysis)

Οποτεδήποτε αξιολογούμε την λειτουργία και τον έλεγχο ενός ηλεκτρικού συστήματος, ερχόμαστε αντιμέτωποι με τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Είναι οι τάσεις των ζυγών σε ανεκτά επίπεδα;
- Πόση είναι η φόρτιση των γραμμών και του εκάστοτε εξοπλισμού;
- Πώς μπορούμε να πετύχουμε την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος;
- Υπάρχει κάποιο σημείο αδυναμίας στο σύστημα και αν ναι, πού εντοπίζεται και πώς μπορώ να το διορθώσω;

Για να μπορέσουμε να απαντήσουμε στα παραπάνω, απαιτείται η εκτέλεση του υπολογισμού ροής φορτίου. Η συγκεκριμένη ανάλυση, χρησιμοποιείται για την μελέτη συστημάτων ισχύος σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας (άρα υπό συνθήκες χωρίς την παρουσία σφαλμάτων). Δηλαδή, σε καταστάσεις όπου όλες οι μεταβλητές και οι παράμετροι θεωρούνται σταθερές στον χρόνο παρατήρησης, σαν να έχουμε ένα στιγμιότυπο του συστήματος που μελετάμε για μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου, καθορίζεται η ενεργός και η άεργος ισχύς που ρέει από όλους τους κλάδους, το μέτρο της τάσης και η φάση της σε όλους τους ζυγούς. Υπολογίζεται επίσης η φόρτιση των κλάδων, οι απώλειες του συστήματος και τα προφίλ των τάσεων. Μπορούν να εκτελεστούν εντολές βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος υπό μελέτη, όπως η ελαχιστοποίηση των απωλειών ή τα κόστη παραγωγής ενέργειας και τέλος, υπολογίζονται οι αρχικές τιμές για τις προσομοιώσεις σταθερότητας του δικτύου ή για τον υπολογισμό βραχυκυκλωμάτων.

Ανάλογα με τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη που μπορεί να γνωρίζουμε για κάθε κόμβο (μέτρο τάσης, φάση τάσης, ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς), μπορούμε να τους διακρίνουμε στις τέσσερις ακόλουθες κατηγορίες:

- **PV Node:** Σε αυτούς τους κόμβους, είναι ορισμένη η ενεργός ισχύς και η τάση. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση γεννητριών και σύγχρονων μηχανών που η ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης είναι ελεγχόμενα από τον χρήστη. Για να ορίσουμε τα όρια λειτουργίας κατά τη μη φυσιολογική λειτουργία του δικτύου, μπορούμε να καθορίσουμε επίσης την άεργο ισχύ για το εκάστοτε εξάρτημα του δικτύου.
- **PQ Node:** Σε αυτήν την περίπτωση, η ενεργός και η άεργος ισχύς είναι καθορισμένες. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση φορτίων και μηχανημάτων με σταθερές τιμές. Τα στοιχεία που χαρακτηρίζονται ως PQ (για παράδειγμα οι σύγχρονες μηχανές και οι μετατροπείς) μπορούν να ελεγχθούν από τον αλγόριθμο ώστε πάντα οι τιμές της ενεργούς και άεργους ισχύος που προκύπτουν από την ανάλυση φορτίου να είναι εντός κάποιων προκαθορισμένων ορίων.
- **Slack Node:** Εδώ το μέτρο τάσης και η φάση της είναι προκαθορισμένα και χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση κάποιας σύγχρονης γεννήτριας ή εξωτερικού δικτύου που έχει ως σκοπό την εξισορρόπηση της ισχύος στο υπόλοιπο δίκτυο.
- **Device Node:** Είναι μια ειδική περίπτωση που χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες συσκευές, όπως οι μετατροπείς HVDC, και έχει καθορισμένες συνθήκες ελέγχου όπως είναι ο έλεγχος της ενεργούς ισχύος εντός συγκεκριμένου διαστήματος.

Σε αντίθεση με άλλα προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος, το PowerFactory δεν ορίζει άμεσα τον χαρακτηρισμό κάθε κόμβου, αντί αυτού, ορίζονται πιο ρεαλιστικές συνθήκες ελέγχου με βάση τα στοιχεία του δικτύου για κάθε κόμβο ξεχωριστά.

Για την εκτέλεση του υπολογισμού της ροής φορτίου στο εναλλασσόμενο ρεύμα, το PowerFactory χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Για να σχηματιστούν οι εξισώσεις των κόμβων, εφαρμόζονται δύο διαφορετικές διατυπώσεις της μεθόδου Newton – Raphson, η πρώτη δημιουργεί εξισώσεις με βάση τα ρεύματα ενώ η δεύτερη δημιουργεί εξισώσεις με βάση την ισχύ. Η δεύτερη αποτελεί και την πιο συνηθισμένη προσέγγιση για την επίλυση ροής φορτίου.

Και στις δύο περιπτώσεις, τα συστήματα με τις μη γραμμικές εξισώσεις που προκύπτουν, πρέπει να λυθούν μέσω επαναληπτικής μεθόδου. Έτσι το PowerFactory χρησιμοποιεί την μέθοδο Newton – Raphson ως τρόπο επίλυσης αυτών των μη γραμμικών εξισώσεων. Η διατύπωση της μεθοδολογίας με βάση την οποία θα γίνει η επίλυση θα πρέπει

να οριστεί από τον χρήστη, ανάλογα με το είδος του δικτύου. Για μεγάλα συστήματα μεταφοράς ενέργειας, ειδικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη φόρτιση αυτών, η τυπική μορφή του αλγορίθμου, αυτού δηλαδή που χρησιμοποιεί εξισώσεις με βάση την ισχύ που μεταφέρεται, συνήθως συγκλίνει καλύτερα προς την λύση. Σε συστήματα διανομής, και κυρίως σε αυτά στα οποία δεν υπάρχει ισορροπία ισχύος, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί εξισώσεις με βάση το ρεύμα, έχει μεγαλύτερη επιτυχία στη σύγκλιση.

Επιπρόσθετα των επαναλήψεων που διεξάγονται κατά την μέθοδο Newton – Raphson, μέσω των οποίων λύνονται οι εξισώσεις των κόμβων του δικτύου, το PowerFactory εφαρμόζει και έναν εξωτερικό βρόχο επαναλήψεων μέσω του οποίου λαμβάνει υπόψη τις χαρακτηριστικές καμπύλες ελέγχου των μεταγωγών των μετασχηματιστών. Μόλις η μέθοδος Newton – Raphson συγκλίνει σε μία λύση μετά από κάποιες επαναλήψεις, οι οποίες δεν υπερβαίνουν έναν μέγιστο αριθμό που ορίζει ο χρήστης, (χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψη οι εξισώσεις ελέγχου των μεταγωγών των μετασχηματιστών), τότε ο αλγόριθμος μεταβαίνει στον εξωτερικό βρόχο με σκοπό να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές. Οι ενέργειες που λαμβάνονται κατά την εκτέλεση του εξωτερικού βρόχου είναι:

1. Η αύξηση/μείωση του βήματος στους μεταγωγείς των μετασχηματιστών
2. Περιορισμός ή όχι των σύγχρονων γεννητριών όσον αφορά την μέγιστη ή την επιθυμητή άεργο ισχύ.

Μόλις πραγματοποιηθούν οι ανωτέρω εντολές, μια νέα επανάληψη της μεθόδου Newton – Raphson λαμβάνει μέρος, για να εξακριβωθεί το νέο σημείο λειτουργίας του δικτύου. Γενικά, εάν μια λύση είναι εφικτή (δηλαδή το δίκτυο μπορεί να λυθεί μαθηματικά), το PowerFactory θα βρει αυτήν την λύση. Σε μερικές περιπτώσεις, ο χρήστης μπορεί να έχει κάνει κάποιο λάθος, το οποίο δεν επιτρέπει στην εύρεση αυτής της λύσης. Τέτοιο παράδειγμα είναι η τοποθέτηση ενός τόσο μεγάλου φορτίου που να δημιουργεί μια τεράστια πτώση τάσης, η οποία με τη σειρά της να οδηγεί σε κατάρρευση του δικτύου. Και στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο όντως μπορεί να συμβεί.

Εκτός από την επιλογή της επίλυσης ροής φορτίου για εναλλασσόμενο ρεύμα (AC Load Flow), μας δίνεται και η επιλογή επίλυσης που χαρακτηρίζεται ως επίλυση συνεχούς ρεύματος (DC Load Flow). Η συγκεκριμένη επίλυση δεν εφαρμόζεται ωστόσο σε δίκτυα συνεχούς ρεύματος αλλά κυρίως σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτό συμβαίνει διότι σε κάποιες περιπτώσεις θέλουμε να διεξάγουμε μια γρήγορη ανάλυση σε πολύπλοκα δίκτυα μεταφοράς ισχύος, όπου είναι ικανοποιητικές οι προσεγγιστικές τιμές της ενεργούς ισχύος. Επίσης, η συγκεκριμένη μέθοδος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και τις περιπτώσεις όπου η AC ανάλυση αδυνατεί να επιτύχει τη σύγκλιση.

Σε αυτή τη μέθοδο, το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων των κόμβων που προκύπτει, απλοποιείται λόγω της επικρατούσας σχέσης μεταξύ της φάσης της τάσης και της ροής ενεργούς ισχύος στα δίκτυα υψηλής τάσεως. Μέσω αυτής της θεώρησης, προκύπτει ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων, όπου οι φάσεις των ζυγών σχετίζονται άμεσα με τη ροή ενεργούς ισχύος μέσω της αυτεπαγωγής του εκάστοτε στοιχείου. Η DC ανάλυση, δεν χρησιμοποιεί την επαναληπτική διαδικασία, με αποτέλεσμα ο χρόνος που απαιτείται για την υλοποίησή της να είναι σημαντικά μικρότερος, και υπολογίζεται η ροή ενεργούς ισχύος μόνο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τυχόν απώλειες. Συνοψίζοντας, η DC ανάλυση έχει τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

- Για την εκτέλεση του υπολογισμού, χρειάζεται η επίλυση ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων.
- Δεν απαιτούνται επαναλήψεις, επομένως είναι γρήγορη και δεν προκύπτουν προβλήματα σύγκλισης.
- Προσφέρει μια προσεγγιστική λύση (οι τάσεις σε όλους τους κόμβους θέτονται στις ονομαστικές -1 α.μ. , υπολογίζεται μόνο η ενεργός ισχύς και οι φάσεις των τάσεων, οι απώλειες αμελούνται).

3.7.2 Ανάλυση Βραχυκυκλώματος (Short-Circuit Analysis)

Τόσο τα συστήματα μεταφοράς ισχύος όσο και τα βιομηχανικά συστήματα, σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταφέρουν ισχύ στα φορτία ασφαλώς και με αξιοπιστία. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό και λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων είναι η επάρκεια στη δυνατότητα χειρισμού βραχυκυκλωμάτων. Αν και τα συστήματα σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτρέπονται τα βραχυκυκλώματα, αυτό δεν σημαίνει ότι μηδενίζεται η πιθανότητα εμφάνισής τους. Το βραχυκύκλωμα γενικά προκαλεί μεγάλα, ανεξέλεγκτα ρεύματα τα οποία αν δεν εντοπιστούν και αντιμετωπιστούν σωστά μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στον εξοπλισμό, την διακοπή παροχής ισχύος σε μεγάλα τμήματα του δικτύου (πέραν του σημείου όπου έγινε το σφάλμα), όπως επίσης και να θέσουν σε κίνδυνο το ανθρώπινο δυναμικό. Έτσι, ένα καλοσχεδιασμένο σύστημα, θα πρέπει να είναι ικανό να απομονώνει ασφαλώς τα βραχυκυκλώματα, περιορίζοντας όσο το δυνατόν γίνεται τη ζημιά του εξοπλισμού και τη διακοπή τμημάτων του συστήματος. Τυπικές αιτίες βραχυκυκλωμάτων είναι οι ακόλουθες:

- Χτύπημα κεραυνού σε εκτεθειμένο εξοπλισμό, όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς
- Πρόωρη γήρανση της μόνωσης κυρίως λόγω μόνιμης υπερφόρτισης ή ακατάλληλου αερισμού του εκάστοτε εξοπλισμού
- Συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ή βιομηχανικών ρύπων στους αποζεύκτες ή και στις μονώσεις
- Αστοχία εξοπλισμού
- Λανθασμένος χειρισμός του συστήματος

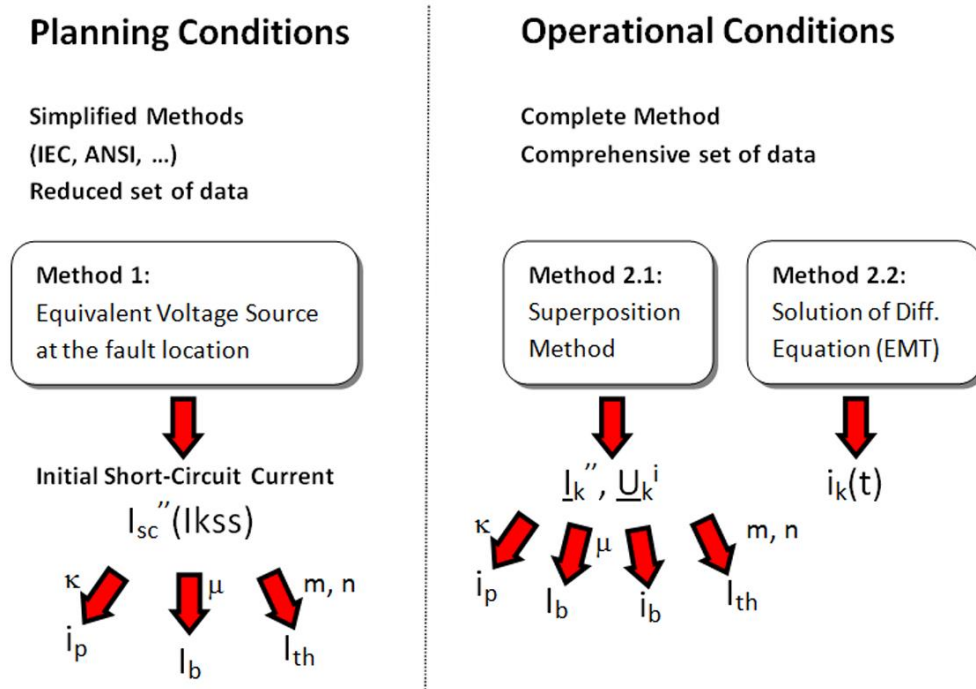
Ένας από τους κυριότερους λόγους που διεξάγουμε τον υπολογισμό βραχυκυκλωμάτων κατά την φάση σχεδίασης, είναι για να ελέγξουμε τα κριτήρια που θα πρέπει να καλύπτει ο εξοπλισμός μας. Σε αυτήν την περίπτωση, ο σχεδιαστής ενδιαφέρεται στον υπολογισμό των μέγιστων ρευμάτων που μπορεί να προκύψουν (για την σωστή διαστασιολόγηση του εξοπλισμού) και των ελάχιστων ρευμάτων (για τον σχεδιασμό του συστήματος προστασίας). Οι υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων που διεξάγονται κατά την φάση σχεδιασμού, συνήθως χρησιμοποιούν μεθόδους που δεν απαιτούν ένα λεπτομερές δίκτυο (για παράδειγμα μέθοδοι που δεν χρειάζονται πληροφορίες σχετικά με τη φόρτιση του δικτύου) και οι οποίες θα υπολογίσουν τις τιμές των ρευμάτων σε ακραίες καταστάσεις. Παραδείγματα αυτών των μεθόδων και των προτύπων είναι η μέθοδος IEC 60909/VDE 0102, η μέθοδος ANSI και η IEC 61363 για τα δίκτυα εναλλασσομένου ρεύματος και η μέθοδος IEC 61660 και ANSI/IEEE 946 για δίκτυα συνεχούς ρεύματος. Τέλος, υπάρχει και η μέθοδος της υπέρθεσης (γνωστή επίσης και ως Complete Method), η οποία βασίζεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας του δικτύου.

Ο υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων στο PowerFactory, μπορεί να προσομοιάσει τόσο μονά όσο και πολλαπλά σφάλματα σχεδόν απεριόριστης πολυπλοκότητας. Εφόσον τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς των βραχυκυκλωμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς, το PowerFactory υποστηρίζει διαφορετικές αναπαραστάσεις και υπολογιστικές μεθόδους για την ανάλυση των ρευμάτων που προκύπτουν από σφάλματα. Παραδείγματα εφαρμογών των αποτελεσμάτων από τον υπολογισμό βραχυκυκλωμάτων στη λειτουργία ενός συστήματος αποτελούν τα κάτωθι:

- Διασφάλιση τήρησης των ορίων ρευμάτων από βραχυκυκλώματα
- Καθορισμός και διαστασιολόγηση ασφαλειών και προστατευτικών διακοπών
- Ανάλυση σφαλμάτων του συστήματος όπως η λανθασμένη λειτουργία προστατευτικού εξοπλισμού

- Ανάλυση πιθανών παρεμβολών μεταξύ παράλληλων γραμμών μεταφοράς ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν από την διεξαγωγή ανάλυσης βραχυκυκλώματος στο PowerFactory.



Εικόνα 30: Μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση βραχυκυκλώματος [24]

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909, έχουμε τα παρακάτω μεγέθη:

- I_{kss} : Αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης
- i_p : Μέγιστη στιγμιαία τιμή ρεύματος
- I_b : Συμμετρικό ρεύμα διακοπής
- I_{th} : Θερμικό ισοδύναμο ρεύματος βραχυκύκλωσης
- κ : Συντελεστής υπολογισμού μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης
- μ : Συντελεστής υπολογισμού συμμετρικού ρεύματος διακοπής
- m : Συντελεστής θερμικής επίδρασης σε εξάρτημα συνεχούς ρεύματος
- n : Συντελεστής θερμικής επίδρασης σε εξάρτημα εναλλασσομένου ρεύματος
- i_b : Μέγιστη στιγμιαία τιμή ρεύματος διακοπής

Η βασική διαφορά μεταξύ των υποθέσεων που γίνονται από τις υπολογιστικές μεθόδους, είναι ότι κατά τον σχεδιασμό του συστήματος, οι λειτουργικές του συνθήκες είναι άγνωστες και για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να γίνουν προσεγγίσεις. Οι μέθοδοι IEC (και VDE), κατά τις οποίες χρησιμοποιείται μια ισοδύναμη πηγή τάσεως στο σημείο του

βραχυκυκλώματος, είναι γενικά αποδεκτές από χώρες οι οποίες χρησιμοποιούν τα πρότυπα IEC. Για τον υπολογισμό σφαλμάτων σε εναλλασσόμενο ρεύμα, η IEC 60909 (και VDE 0102) λειτουργούν ανεξάρτητα από τη ροή φορτίου (σημείο λειτουργίας) του συστήματος. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στο ονομαστικό ή στο υπολογισμένο εύρος του σημείου λειτουργίας του συστήματος και χρησιμοποιούν συντελεστές διόρθωσης για τις τάσεις και τις σύνθετες αντιστάσεις, με αποτέλεσμα να δίνουν πιο συντηρητικά αποτελέσματα. Για τον υπολογισμό των ελάχιστων και μέγιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συντελεστές. Θα πρέπει να τονιστεί ότι και τα δύο αυτά πρότυπα δεν εφαρμόζονται σε μονοφασικά στοιχεία.

Άλλη μία παρόμοια μέθοδος ανάλυσης βραχυκυκλωμάτων είναι η ANSI, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στην Βόρεια Αμερική, αλλά είναι αποδεκτή και από άλλες χώρες. Η μέθοδος ANSI είναι βασισμένη στα πρότυπα του IEEE C37.010 τα οποία αναφέρονται για εξοπλισμό μέσης και υψηλής τάσης.

Για τον υπολογισμό των βραχυκυκλωμάτων σε λειτουργικά AC και DC συστήματα, το ακριβές σημείο λειτουργίας όπως και οι συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργούν, είναι γνωστές. Αν η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση των παραπάνω μεθόδων δεν είναι επαρκής, ή αν θέλουμε να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της υπέρθεσης. Η μέθοδος της υπέρθεσης (Complete method), υπολογίζει το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης στο δίκτυο, βασιζόμενη στην υπάρχουσα λειτουργική κατάστασή του. Εάν τα μοντέλα που εξετάζουμε είναι σωστά, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι πιο ακριβή από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσεγγιστικών μεθόδων (όπως η IEC 60909). Συχνά ωστόσο, ο αναλυτής του συστήματος, θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι οι πιο δυσμενής συνθήκες λαμβάνονται υπόψη συγκριτικά με την κλίμακα της εγκατάστασης, κάτι το οποίο απαιτεί εκτενείς μελέτες στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της υπέρθεσης.

Η μέθοδος IEC 60909/VDE 0102, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιεί μια ισοδύναμη πηγή τάσης στον ζυγό όπου προκύπτει το σφάλμα και είναι απλούστερη από τη μέθοδο της υπέρθεσης (Complete method). Ο σκοπός αυτής της μεθόδου είναι η επίτευξη ενός υπολογισμού βραχυκυκλώματος που να βρίσκεται κοντά στην πραγματικότητα, χωρίς την απαίτηση να έχει γίνει υπολογισμός της ροής φορτίου από πριν και τον καθορισμό του σημείου λειτουργίας του δικτύου. Οι κύριες απλοποιήσεις που γίνονται κατά την μέθοδο αυτή είναι οι εξής:

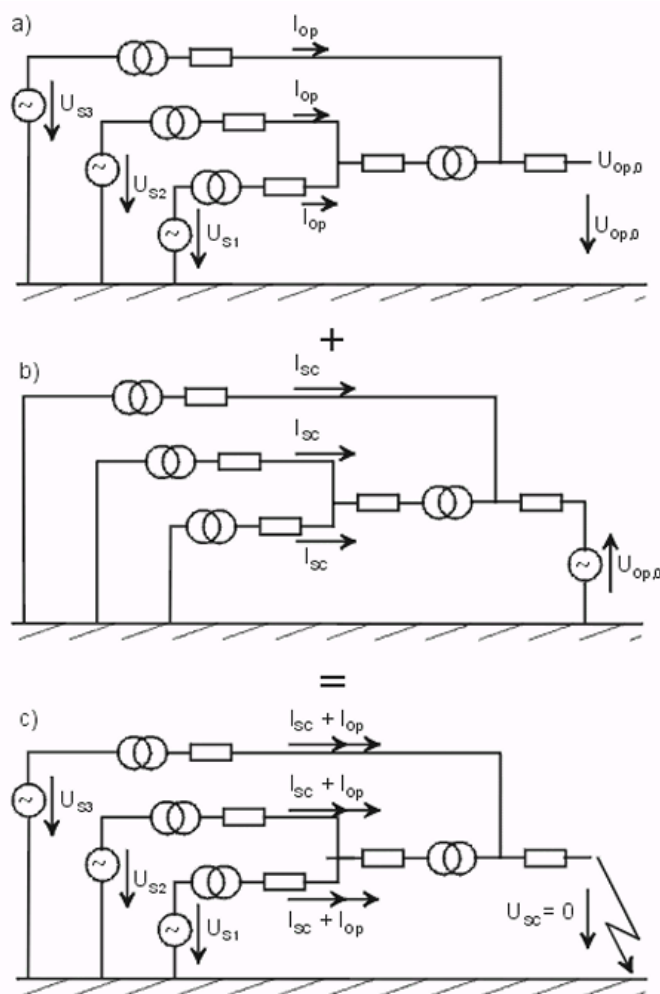
- Θεωρούνται ονομαστικές συνθήκες για το δίκτυο (πχ όλοι οι ζυγοί έχουν ονομαστική τάση)

- Αγνοούνται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που μπορεί να προκύψουν από τα φορτία
- Χρησιμοποιείται μια απλοποιημένη μορφή του δικτύου (πχ τα φορτία δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την θετική και αρνητική ακολουθία του δικτύου)
- Για να εξασφαλιστεί ότι έχει γίνει συντηρητική εκτίμηση των αποτελεσμάτων, ένας συντελεστής διόρθωσης εφαρμόζεται στην τάση του ζυγού όπου γίνεται το σφάλμα. Αυτός ο συντελεστής διαφέρει για τον υπολογισμό των μέγιστων και των ελάχιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης του δικτύου.

Ο υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων, ο οποίος βασίζεται σε αυτές τις απλοποιήσεις, μπορεί να μην είναι επαρκής για κάποιες πρακτικές εφαρμογές. Επομένως, εφαρμόζονται επιπρόσθετοι συντελεστές για την διόρθωση της αγωγιμότητας των φυσικών στοιχείων του δικτύου.

Η μέθοδος της υπέρθεσης (Complete Method), είναι μια ακριβής μέθοδος υπολογισμού, όσον αφορά την μοντελοποίηση ενός δικτύου. Τα ρεύματα που προκύπτουν από το σφάλμα, καθορίζονται με την επικάλυψη μιας κατάστασης ροής φορτίου πριν την ύπαρξη βραχυκυκλώματος, με την κατάσταση όπου όλες οι πηγές τάσεως θέτονται ίσες με μηδέν.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η διαδικασία υπολογισμού ρευμάτων βραχυκύκλωσης με την συγκεκριμένη μέθοδο. Η αρχική κατάσταση του δικτύου φαίνεται στην Εικόνα 31 (α), πριν την παρουσία βραχυκυκλώματος. Σε αυτήν την κατάσταση φαίνονται οι συνθήκες διέγερσης των γεννητριών, οι μετασχηματιστές και η κατάσταση των διακοπών που αναπαριστούν τις λειτουργικές περιπτώσεις. Από τις συνθήκες πριν το σφάλμα, μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση του ζυγού στον οποίο πρόκειται να γίνει το σφάλμα. Για την στιγμή του σφάλματος, όλες οι πηγές/γεννήτριες μηδενίζονται εκτός από τον ζυγό που θα γίνει το σφάλμα, ο οποίος συνδέεται με μια υποθετική πηγή (Εικόνα 31 (b)). Εφόσον οι αγωγιμότητες του δικτύου θεωρούνται γραμμικές, οι συνθήκες του συστήματος μετά το σφάλμα, μπορούν αν υπολογιστούν από το άθροισμα των συνθηκών πριν και μετά από αυτό (Εικόνα 31 (c)).



Εικόνα 31: Διαδικασία μεθόδου υπέρθεσης [24]

3.7.3 Ανάλυση ευστάθειας (RMS Analysis)

Μεταβατικές καταστάσεις, προβλήματα αστάθειας και ελέγχου, είναι κάποια από τα βασικά σενάρια τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό και λειτουργία ενός σύγχρονου συστήματος ισχύος. Μελέτες που περιέχουν ηλεκτρομαγνητικές μεταβατικές καταστάσεις και διάφορα σενάρια ευστάθειας ενός δικτύου, μπορούν να διεξαχθούν χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου για διάφορες χρονικές περιόδους, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν εργαλεία δυναμικής ανάλυσης ή ανάλυσης μικρού σήματος.

Η μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος, εμπεριέχει την ανάλυσή του υπό συνθήκες πριν και μετά μιας απότομης αλλαγής στα φορτία ή στην παραγωγή ισχύος του δικτύου. Το πόσο στιβαρό είναι ένα σύστημα, προκύπτει από την ικανότητά του να διατηρεί σταθερή τη λειτουργία του υπό φυσιολογικές και μεταβατικές καταστάσεις. Είναι επομένως αναγκαίος ο σχεδιασμός ενός συστήματος, ώστε μεταβατικά φαινόμενα να μπορούν να προκύψουν, δίχως

να προκαλούν την απώλεια ισχύος σε φορτία ή του συγχρονισμού του δικτύου. Τα μεταβατικά φαινόμενα σε ένα ηλεκτρικό σύστημα μπορούν να χαρακτηριστούν με βάση τρεις χρονικούς ορίζοντες:

- Βραχυπρόθεσμα ή αλλιώς τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα
- Μεσοπρόθεσμα ή αλλιώς τα ηλεκτρομηχανικά μεταβατικά φαινόμενα
- Μακροπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα

Για τους ανωτέρω χρονικούς ορίζοντες προσφέρονται και τα αντίστοιχα εργαλεία ανάλυσης των μεταβατικών φαινομένων από το PowerFactory. Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων στο πεδίο του χρόνου, απαιτείται προηγουμένως να έχει εκτελεστεί μια ορθή ροή φορτίου στο δίκτυο, ώστε οι συναρτήσεις του προγράμματος να καθορίσουν τις αρχικές συνθήκες όλων των στοιχείων που υπάρχουν. Αυτές οι αρχικές συνθήκες αποτελούν το σημείο λειτουργίας σταθερής κατάστασης στην αρχή κάθε προσομοίωσης, ικανοποιώντας την απαίτηση ότι όλες οι παράγωγοι των μεταβλητών κατάστασης των φορτίων, γεννητριών και ελεγκτών είναι μηδέν.

Η προσομοίωση χρησιμοποιεί την διαδικασία με τις επαναλήψεις για την επίλυση της ροής φορτίου όπως προαναφέρθηκε καθώς και διάφορα δυναμικά μοντέλα υπολογισμού μεταβλητών ταυτόχρονα. Μη γραμμικά μοντέλα, με υψηλή ακρίβεια οδηγούν σε ορθά αποτελέσματα ακόμα και σε έντονα μεταβατικά φαινόμενα. Η τυπική διαδικασία εκτέλεσης μιας προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων, περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογισμός αρχικών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένης της επίλυσης ροής φορτίου,
2. Ορισμός μεταβλητών προς εύρεση και/ή συμβάντων προσομοίωσης,
3. Δυνατότητα ορισμού γραφημάτων για την απεικόνιση αποτελεσμάτων,
4. Εκτέλεση προσομοίωσης,
5. Δημιουργία νέων γραφημάτων ή εικονικών οργάνων, ή τροποποίηση των υπαρχόντων,
6. Τροποποίηση ρυθμίσεων, επανάληψη υπολογισμών,
7. Τύπωμα αποτελεσμάτων.

3.7.3.1 Συμμετρική προσομοίωση RMS

Η συνάρτηση της συμμετρικής προσομοίωσης RMS λαμβάνει υπόψη την δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρομηχανικών και θερμικών συσκευών όπως επίσης και των

συσκευών ελέγχου. Χρησιμοποιεί μια συμμετρική αναπαράσταση και θεωρεί το δίκτυο σε κατάσταση ηρεμίας, υπολογίζοντας έτσι μόνο τις βασικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος. Ανάλογα με τα μοντέλα των γεννητριών, κινητήρων, ελεγκτών και των υπόλοιπων διατάξεων παραγωγής ενέργειας, μπορούν αν διεξαχθούν και οι αντίστοιχες μελέτες, όπως για παράδειγμα είναι η μελέτη του δικτύου κατά την εκκίνηση ενός κινητήρα, ή μελέτη ευστάθειας κατά τις μεταβατικές καταστάσεις (για τον προσδιορισμό του χρόνου εκκαθάρισης κάποιου σφάλματος). Λόγω του ότι οι ανωτέρω υπολογισμοί γίνονται βασισμένοι στην αναπαράσταση του δικτύου ως συμμετρικό, οι συναρτήσεις υπολογισμού των προσομοιώσεων επιτρέπουν μόνο την διεξαγωγή συμμετρικών σφαλμάτων.

3.7.3.1 Τριφασική προσομοίωση RMS (Three-Phase RMS Simulation)

Εάν απαιτείται η διεξαγωγή και μελέτη μη συμμετρικών σφαλμάτων, ή η ανάλυση μη συμμετρικών δικτύων, τότε, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση για την τριφασική προσομοίωση RMS. Αυτή η προσομοίωση χρησιμοποιεί μια τριφασική αναπαράσταση του δικτύου, πάλι σε κατάσταση ισορροπίας, και μπορεί με αυτόν τον τρόπο να υπολογίσει μη συμμετρικές καταστάσεις του συστήματος, οι οποίες μπορεί να οφείλονται είτε σε μη συμμετρικά στοιχεία του, είτε σε μη συμμετρικά σφάλματα. Η δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρομηχανικών και θερμικών συσκευών, και των συσκευών ελέγχου, αναπαρίσταται με τον ίδιο τρόπο που γίνεται και στην απλή RMS προσομοίωση.

Μη συμμετρικές ηλεκτρομηχανικές συσκευές μπορούν να μοντελοποιηθούν, και τόσο μονοφασικά όσο και διφασικά δίκτυα μπορούν να αναλυθούν με την συγκεκριμένη συνάρτηση. Επιπρόσθετα των συμμετρικών συμβάντων που μπορούν να διεξαχθούν με τη χρήση της συνάρτησης για τη συμμετρική μοντελοποίηση, μη συμμετρικά σφάλματα μπορούν επίσης να διεξαχθούν όπως μονοφασικά και διφασικά βραχυκυκλώματα, σφάλματα μεταξύ γραμμών μεταφοράς, και βραχυκυκλώματα μεταξύ φάσεων. Όλα αυτά τα σφάλματα, μπορούν να μοντελοποιηθούν ώστε να συμβούν ταυτόχρονα ή σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, με αποτέλεσμα να μπορεί να υπολογιστεί οποιοσδήποτε συνδυασμός συμμετρικών και μη συμμετρικών σφαλμάτων [24].

Κεφάλαιο 4^ο: Μοντελοποίηση Δικτύων Μέσης Εναλλασσόμενης Τάσης και εξέταση συμπεριφοράς τους υπό διάφορα σενάρια φόρτισης και λειτουργίας

Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναφερθούμε στον τρόπο υλοποίησης του δικτύου μέσης εναλλασσόμενης τάσης, το οποίο θα υποβληθεί σε διάφορες φορτίσεις και σενάρια λειτουργίας. Θα αναλύσουμε την ροή φορτίου σε εκάστοτε σενάριο φόρτισης, και την γενική του συμπεριφορά σε διαφορετικού είδους βραχυκυκλώματα. Τέλος, θα εξεταστεί η συμπεριφορά κάποιων ενδεικτικών στοιχείων του (πχ κάποιας γεννήτριας) σε μεταβατικές καταστάσεις όπως είναι αυτή κατά την διάρκεια και μετά την αποκατάσταση σφαλμάτων (RMS Evaluation).

4.1 Υλοποίηση δικτύου εννέα ζυγών

Για τις προσομοιώσεις μας, δημιουργήθηκε ένα δίκτυο εννέα ζυγών, το οποίο περιλαμβάνει γεννήτριες, φορτία και φωτοβολταϊκά. Θεωρούμε ότι το δίκτυο λειτουργεί υπό τις σύνηθες συνθήκες φόρτισης αρχικά, με τα στοιχεία του να φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί. Το δίκτυο είναι συνδεδεμένο στο ένα άκρο του με ένα άλλο εξωτερικό δίκτυο, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται ως «μαύρο κουτί», και ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί την τάση του ζυγού σύνδεσής του σταθερή ανταλλάζοντας την απαραίτητη ενεργό και άεργο ισχύ (και άρα ο ζυγός του να λειτουργεί ως Slack Bus). Εφαρμόστηκε η τοπολογία του δικτυωτού συστήματος, στην οποία αναφερθήκαμε στο κεφάλαιο Νο2, και αποτελεί και τη συνηθέστερη τοπολογία στα δίκτυα διανομής. Η ονομαστική τάση των ζυγών της μέσης τάσης είναι 20kV. Συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των στοιχείων του δικτύου φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Όπως προαναφέρθηκε, η διαφορά της παραγόμενης από την καταναλισκόμενη ισχύ, καλύπτεται μέσω της επιπλέον ροής ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο.:

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Στοιχείων Δικτύου 9 Ζυγών

Ζυγός	Ονομαστική Τάση (kV)	Φορτίο (MVA)	Σ.Ι. Φορτίου	Γεννήτρια (MVA)	Σ.Ι. Γεννήτριας	Φ/B (MW)
T_1 (SL)	20	-	-	-	-	-
T_2	20	5,56	0,9	5	0,8	3

T_3	20	6	1	-	-	-
T_4	20	-	-	-	-	10
T_5	20	3	1	-	-	-
T_6	20	7,5	1	-	-	-
T_7	20	4,21	0,95	-	-	-
T_8	20	-	-	1,875	0,8	-
T_9	20	3,89	0,9	-	-	-
Συνολική παραγόμενη ισχύς (MVA):			19,875		Συνολική καταναλισκόμενη ισχύς (MVA):	30,16

Όσον αφορά τις γραμμές μεταφοράς, επιλέχθηκαν γραμμές τύπου ACSR95 (Aluminium Conductor Steel Reinforced – Γραμμή με αγωγό αλουμινίου ενισχυμένη με ατσάλι), καθώς ο συγκεκριμένος τύπος χρησιμοποιείται ευρύτατα σε εναέριας γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος στην Ελλάδα. Για τον τύπο αυτό, ισχύει ότι η ωμική αντίσταση του αγωγού στους 20°C, είναι 0,215 Ohm/km , ενώ η επαγωγική του αντίσταση είναι 0,334 Ohm/km [25]. Επίσης, μέσω του προγράμματος, μπορούμε να ορίσουμε τις ανωτέρω αντιστάσεις και κατά την μηδενική ακολουθία σε περίπτωση σφάλματος καθώς και το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διέλθει από τον αγωγό (στην περίπτωση μας είναι 448Α). Αναλυτικά, στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται το παράθυρο μέσω του οποίου ορίστηκαν τα ανωτέρω χαρακτηριστικά:

Εικόνα 32: Ορισμός Χαρακτηριστικών Καλωδίου Γραμμής Μεταφοράς

Στον παρακάτω πίνακα, αναγράφονται τα μήκη των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους αντίστοιχους ζυγούς:

Πίνακας 2: Μήκη γραμμών μεταφοράς σύνδεσης Ζυγών

Όνομα Γραμμής	Ζυγός i	Ζυγός j	Μήκος γραμμής (km)
Line 1	T_1 (SL)	T_2	15
Line 2	T_2	T_3	15
Line 3	T_3	T_4	30
Line 4	T_3	T_5	10
Line 5	T_5	T_6	10
Line 6	T_6	T_7	20
Line 7	T_7	T_8	20
Line 8	T_8	T_9	20
Line 9	T_9	T_1	30
Line 10	T_4	T_8	15

Η παραμετροποίηση των λειτουργικών στοιχείων του δικτύου (φορτία, γεννήτριες, φωτοβολταϊκά), έγινε ως ακολούθως. Για την γεννήτριες, ορίσαμε ένα βασικό μοντέλο, και έπειτα χρησιμοποιήθηκε σε ομάδες παράλληλα συνδεδεμένων στοιχείων ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή παραγωγή ισχύος. Η κάθε μονάδα, έχει ονομαστική ισχύ 0,625MVA, ονομαστική τάση λειτουργίας 20kV, συντελεστή ισχύος 0,8 και συνδέεται σε αστέρα με ουδέτερο με το δίκτυο. Η υπομεταβατική επαγωγή της (x_d') τέθηκε στα 0,2αμ , η επαγωγή της μηδενικής ακολουθίας τέθηκε στα 0,15αμ και της αρνητικής ακολουθίας στα 0,2αμ , όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν [1]:

Synchronous Machine Type - Equipment Type Library\S. Generator.TypeSym

Basic Data

Name: S. Generator

Nominal Apparent Power: 0.625 MVA

Nominal Voltage: 20. kV

Power Factor: 0.8

Connection: YN

OK Cancel

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Protection

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Description

Synchronous Machine Type - Equipment Type Library\S. Generator.TypeSym

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Protection

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Description

Synchronous Reactances

xd 2. p.u.

xq 2. p.u.

Reactive Power Limits

Minimum Value -1. p.u.

Maximum Value 1. p.u.

Zero Sequence Data

Reactance x0 0.15 p.u.

Resistance r0 0. p.u.

Negative Sequence Data

Reactance x2 0.2 p.u.

Resistance r2 0. p.u.

OK

Cancel

Εικόνα 33: Ορισμός Χαρακτηριστικών Γεννητριών

Για τα φορτία, μπορούμε να ορίσουμε μόνο την τροφοδοσία τους (AC ή DC), καθώς και την συνδεσμολογία τους. Για τα φωτοβολταϊκά αντίστοιχα, μπορούμε να ορίσουμε την συνδεσμολογία τους, την ονομαστική τους ισχύς και τον συντελεστή ισχύος τους. Στις ακόλουθες εικόνες φαίνονται ενδεικτικά τα εν λόγω παράθυρα:

General Load Type - Equipment Type Library\Load.TypeLod

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Description

Name Load

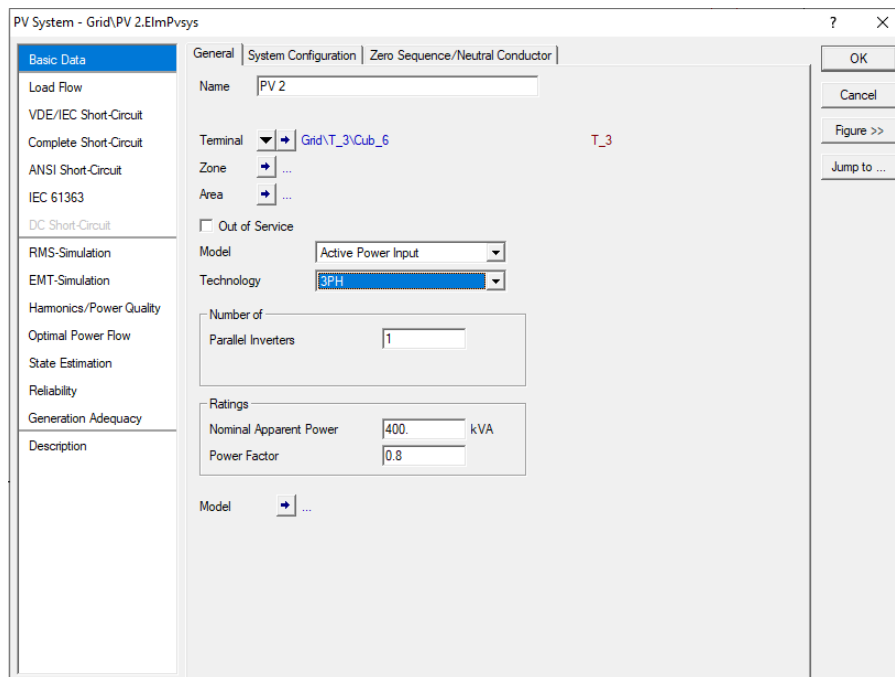
System Type AC

Technology 3PH-D'

OK

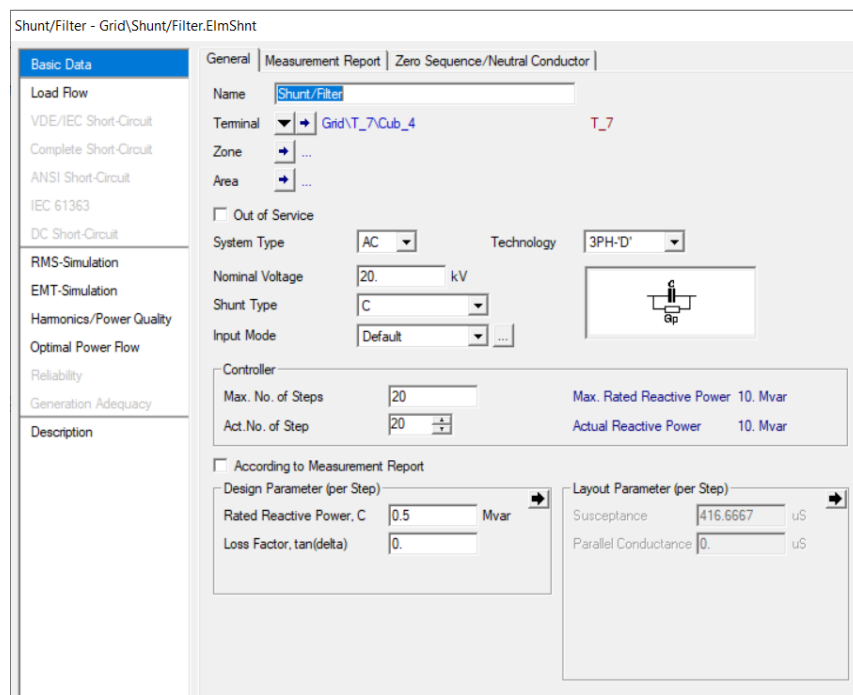
Cancel

Εικόνα 34: Ορισμός Χαρακτηριστικών Φορτίου



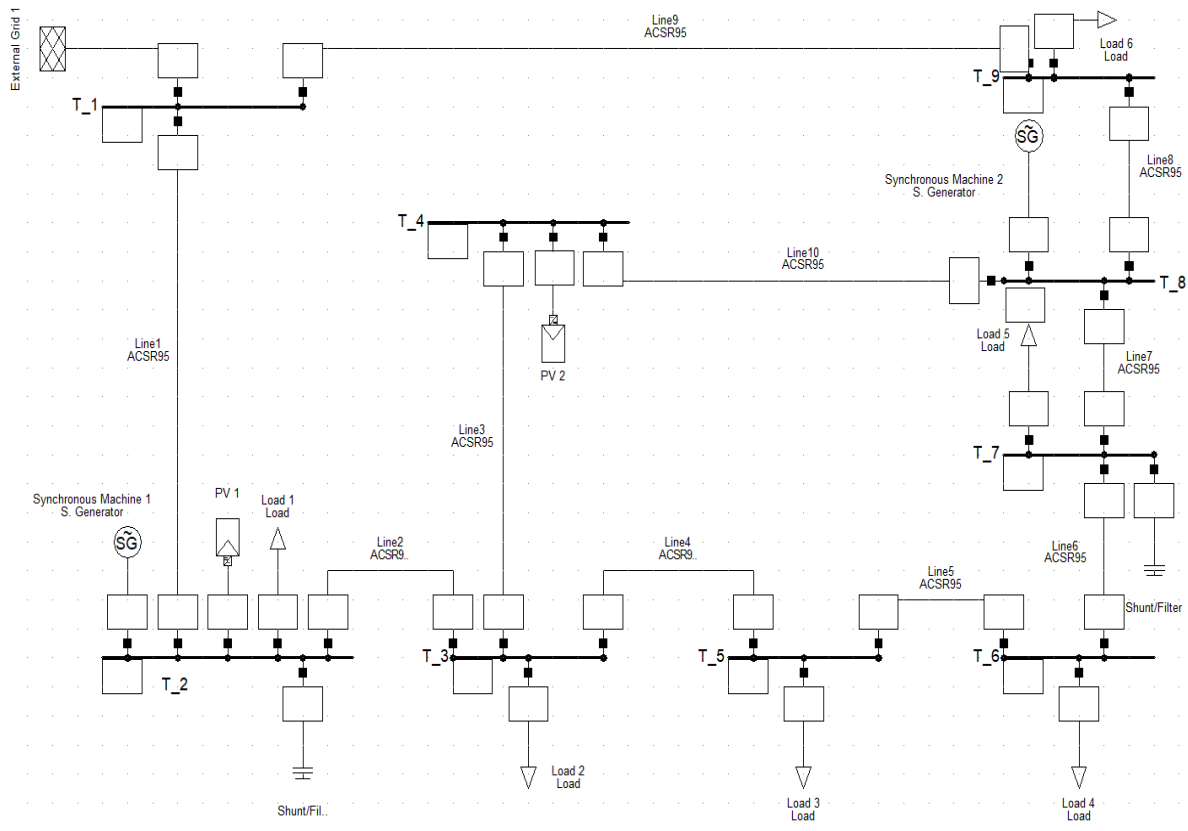
Εικόνα 35: Ορισμός Χαρακτηριστικών Φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τέλος, για να επιτύχουμε όσο το δυνατόν γίνεται τάση πλησιέστερα στην ονομαστική στους ζυγούς, τοποθετήθηκαν συστοιχίες ιδανικών πυκνωτών στους ζυγούς Νο2 και Νο7, οι οποίοι έχουν ως στόχο την παροχή άεργου ισχύος στο υπόλοιπο δίκτυο. Η συγκεκριμένη μεθόδευση κρίνεται αναγκαία καθώς λόγω των μεγάλων μηκών των γραμμών υπάρχει έντονα το φαινόμενο πτώσης τάσης μεταξύ των ζυγών. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το παράθυρο ρύθμισης των πυκνωτών αυτών:



Εικόνα 36: Ορισμός συστοιχίας πυκνωτών

Έχοντας πλέον κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις στο εκάστοτε στοιχείο και έχοντας συνδέσει τους ζυγούς όπως προαναφέρθηκε καταλήγουμε στην ακόλουθη μορφή του δικτύου:



Εικόνα 37: Δίκτυο εννέα ζυγών

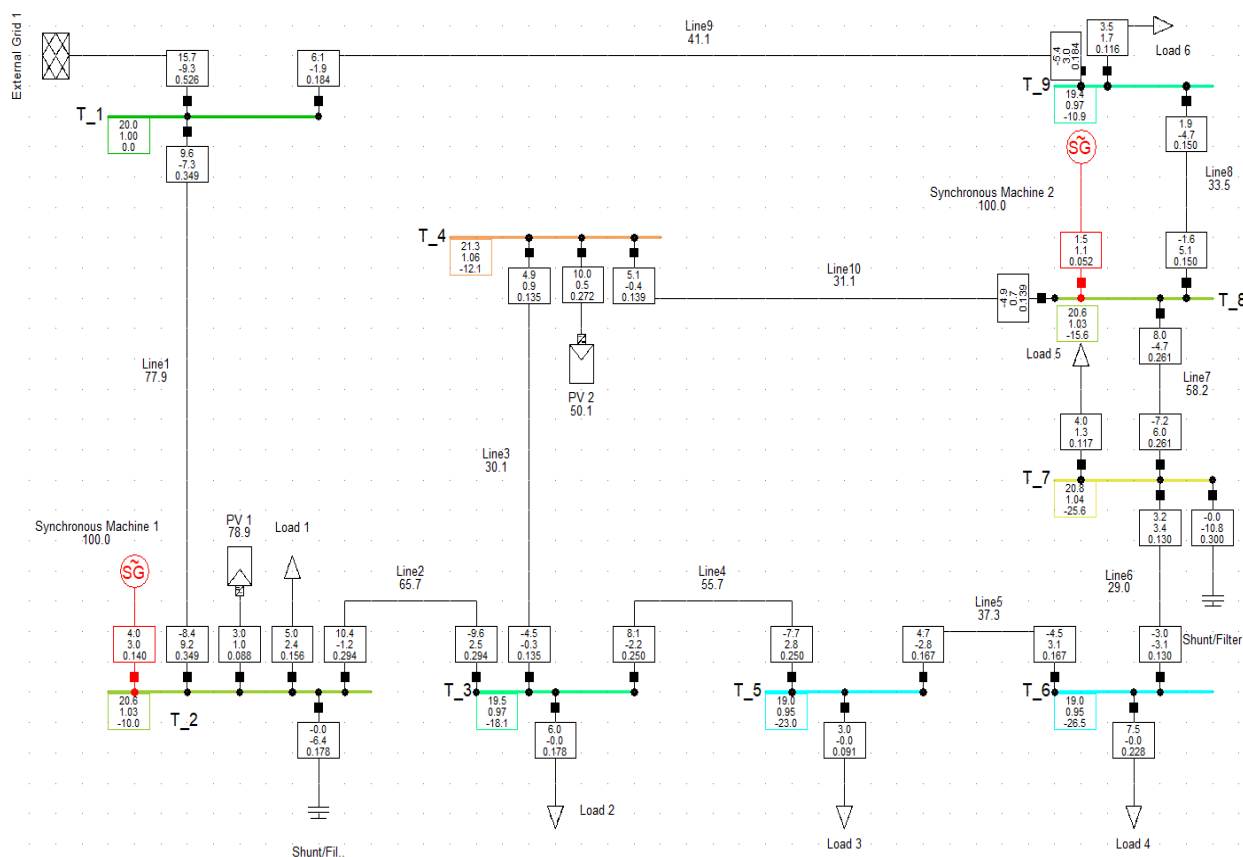
Όσον αφορά τον τρόπο συνδεσμολογίας των ζυγών μεταξύ τους, επιλέχθηκε η συγκεκριμένη τοπολογία ώστε να αποφύγουμε την δημιουργία νησίδων σε περιπτώσεις όπου κάποια γραμμή μεταφοράς τεθεί εκτός λειτουργίας, όπως θα γινόταν και στην πραγματικότητα.

4.2 Υπολογισμός ροής φορτίου σε δίκτυο εννέα ζυγών υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Στο παρόν κεφάλαιο θα υποβάλουμε το δίκτυο που δημιουργήσαμε σε διάφορα σενάρια φόρτισης και θα αναλύσουμε την ροή φορτίου στην εκάστοτε περίπτωση. Θα δώσουμε έμφαση στην τάση του εκάστοτε ζυγού, στην φόρτιση των γραμμών και στις απώλειες που προκύπτουν, καθώς αυτά θα είναι και τα βασικά σημεία σύγκρισης με τα δίκτυα που θα δημιουργηθούν αργότερα, τα οποία θα περιέχουν κομμάτι DC μέσης τάσης.

4.2.1 Υπολογισμός ροής φορτίου σε δίκτυο εννέα ζυγών σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario).

Αρχικά, εκτελούμε τον υπολογισμό της ροής φορτίου στο δίκτυο που έχουμε δημιουργήσει και με την παραγόμενη/ καταναλισκόμενη ισχύ που προαναφέρθηκε. Ακολουθεί εικόνα του δικτύου στην οποία φαίνεται το αποτέλεσμα του υπολογισμού με χρήση χρωματικού κώδικα για τις τάσεις των ζυγών, το φορτίο των γεννητριών και φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και για την φόρτιση των γραμμών. Επιπλέον, απεικονίζονται τα βασικά μεγέθη στα «κουτιά» αποτελέσματος (result boxes) δίπλα από το εκάστοτε στοιχείο. Έπειτα, επισυνάπτονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού, υπό μορφή πίνακα.



Εικόνα 38: Αποτέλεσμα ροής φορτίου δικτύου σε λειτουργία σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

Αναλυτικά, οι υπολογισθείσες τιμές φαίνονται στην αναφορά που ακολουθεί:

Πίνακας 3: Αποτελέσματα υπολογισμού ροής φορτίου στο δίκτυο των εννέα ζυγών

Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	1179.3	77.93	T_1	1.00
LINE 2	838.3	65.71	T_2	1.03
LINE 3	351.9	30.10	T_3	0.97
LINE 4	402.0	55.72	T_4	1.06
LINE 5	179.9	37.28	T_5	0.95
LINE 6	217.9	29.01	T_6	0.95
LINE 7	876.6	58.19	T_7	1.04
LINE 8	291.2	33.54	T_8	1.03
LINE 9	655.0	41.07	T_9	0.97
Line10	187.7	31.09		

Από τα ανωτέρω παρατηρούμε ότι οι γραμμές Νο1 και Νο2, είναι αυτές με την μεγαλύτερη φόρτιση και επομένως παρουσιάζουν και τις περισσότερες απώλειες. Αυτό συμβαίνει διότι μέσω αυτών διέρχεται το μεγαλύτερο τμήμα της ισχύος που θα καταναλωθεί στους επόμενους ζυγούς του δικτύου. Οι γραμμές Νο3 και Νο10, μεταφέρουν μόνο την ισχύ που παράγεται από τη συστοιχία των φωτοβολταϊκών που βρίσκεται στο ζυγό Νο4 και άρα αποτελούν κάποιες από τις ελάχιστα φορτισμένες γραμμές. Εξίσου συγκριτικά χαμηλά, φορτίζεται και η γραμμή Νο6, μέσω της οποίας τροφοδοτείται μόνο ο ζυγός Νο6, που αποτελεί τον πιο απομακρυσμένο ζυγό του δικτύου μας.

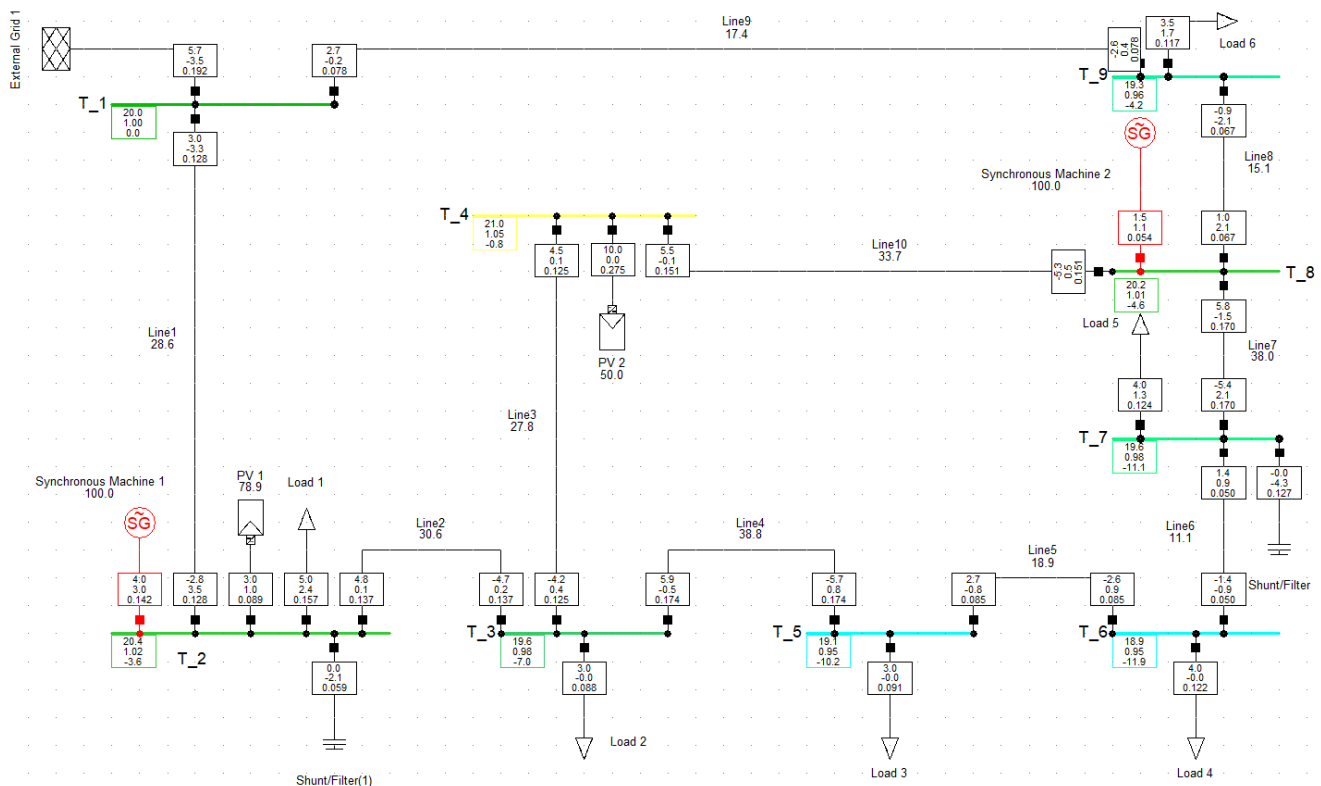
Όσον αφορά τις τάσεις των ζυγών, οι ζυγοί Νο5 και Νο6, παρουσιάζουν την χαμηλότερη τάση (0,95 α.μ.), το οποίο είναι λογικό καθώς βρίσκονται στην άκρη του δικτύου μας και επομένως η επίδραση της πτώση τάσης εμφανίζεται εντονότερα. Την μεγαλύτερη τάση την εμφανίζει ο ζυγός Νο4 (1,06 α.μ.) λόγω της μεγάλης παραγωγής ισχύος των φωτοβολταϊκών. Οι υπόλοιποι ζυγοί, έχουν τάσεις κοντά στην ονομαστική, όπως και παρατηρούμε.

4.2.2 Υπολογισμός ροής φορτίου σε δίκτυο εννέα ζυγών με μειωμένη κατανάλωση.

Στον επόμενο υπολογισμό, αλλάζουμε την ισχύ που καταναλώνουν τα φορτία, με σκοπό να ελέγξουμε τη συμπεριφορά του δικτύου στην περίπτωση όπου μεγάλοι καταναλωτές μειώνουν την απορροφούμενη ενέργεια. Αυτό το σενάριο είναι κάτι που μπορεί να συμβεί εάν για παράδειγμα θεωρήσουμε τους μεγάλους καταναλωτές ως εργοστάσια τα οποία λόγω αργίας σταματούν την παραγωγή τους. Οι αλλαγές πραγματοποιήθηκαν στα φορτία των ζυγών Νο3 και Νο6 και συνοπτικά είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 4: Αλλαγές δικτύου για μειωμένη κατανάλωση

Ζυγός	Ονομαστική Τάση (kV)	Φορτίο (MVA)	Σ.Ι. Φορτίου	Γεννήτρια (MVA)	Σ.Ι. Γεννήτριας	Φ/B (MW)
T_3	20	3	1	-	-	-
T_6	20	4	1	-	-	-



Εικόνα 39: Αποτέλεσμα ροής φορτίου δικτύου με μειωμένη κατανάλωση

Ακολουθούν και πάλι οι υπολογισθείσες τιμές στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5: Αποτελέσματα ροής φορτίου για AC δίκτυο με μειωμένη κατανάλωση

Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	159.2	28.63	T_1	1.00
LINE 2	181.5	30.58	T_2	1.02
LINE 3	301.1	27.85	T_3	0.98
LINE 4	194.4	38.76	T_4	1.05
LINE 5	46.5	18.94	T_5	0.95
LINE 6	31.8	11.08	T_6	0.95
LINE 7	374.0	38.00	T_7	0.98
LINE 8	58.7	15.05	T_8	1.01
LINE 9	117.2	17.37	T_9	0.96
Line10	220.0	33.66		

Στο συγκεκριμένο σενάριο παρατηρούμε πως η φόρτιση των γραμμών του δικτύου μας είναι πολύ χαμηλότερη συγκριτικά με την προηγούμενη κατάσταση. Αυτό συμβαίνει διότι μεγάλο μέρος της ισχύος που καταναλώνεται στους ζυγούς που τροποποιήσαμε έπρεπε να εισαχθεί από το εξωτερικό δίκτυο. Έτσι, όλες οι γραμμές που οδηγούν στους συγκεκριμένους ζυγούς, είναι πλέον πολύ λιγότερο φορτισμένες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γραμμή No1 με φόρτιση μόλις 28,63% (ενώ προηγουμένως η φόρτισή της ανερχόταν στο 77.93%). Τα ανωτέρω έχουν επιπρόσθετα ως αποτέλεσμα οι απώλειες των γραμμών να είναι εξίσου σε χαμηλά επίπεδα. Και πάλι χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γραμμή No1, η οποία αρχικά είχε απώλειες της τάξης των 1179.3 kW, ενώ τώρα έχει μόλις 159.2 kW.

Για τις τάσεις των ζυγών ισχύει περίπου η ίδια κατάσταση με την αρχική. Οι ζυγοί No5 και No6 έχουν την χαμηλότερη (0,95 α.μ.) επειδή είναι οι πιο απομακρυσμένοι, ενώ ο ζυγός No4 συνεχίζει να έχει την υψηλότερη τάση (1,05 α.μ.) όπως και στο αρχικό σενάριο.

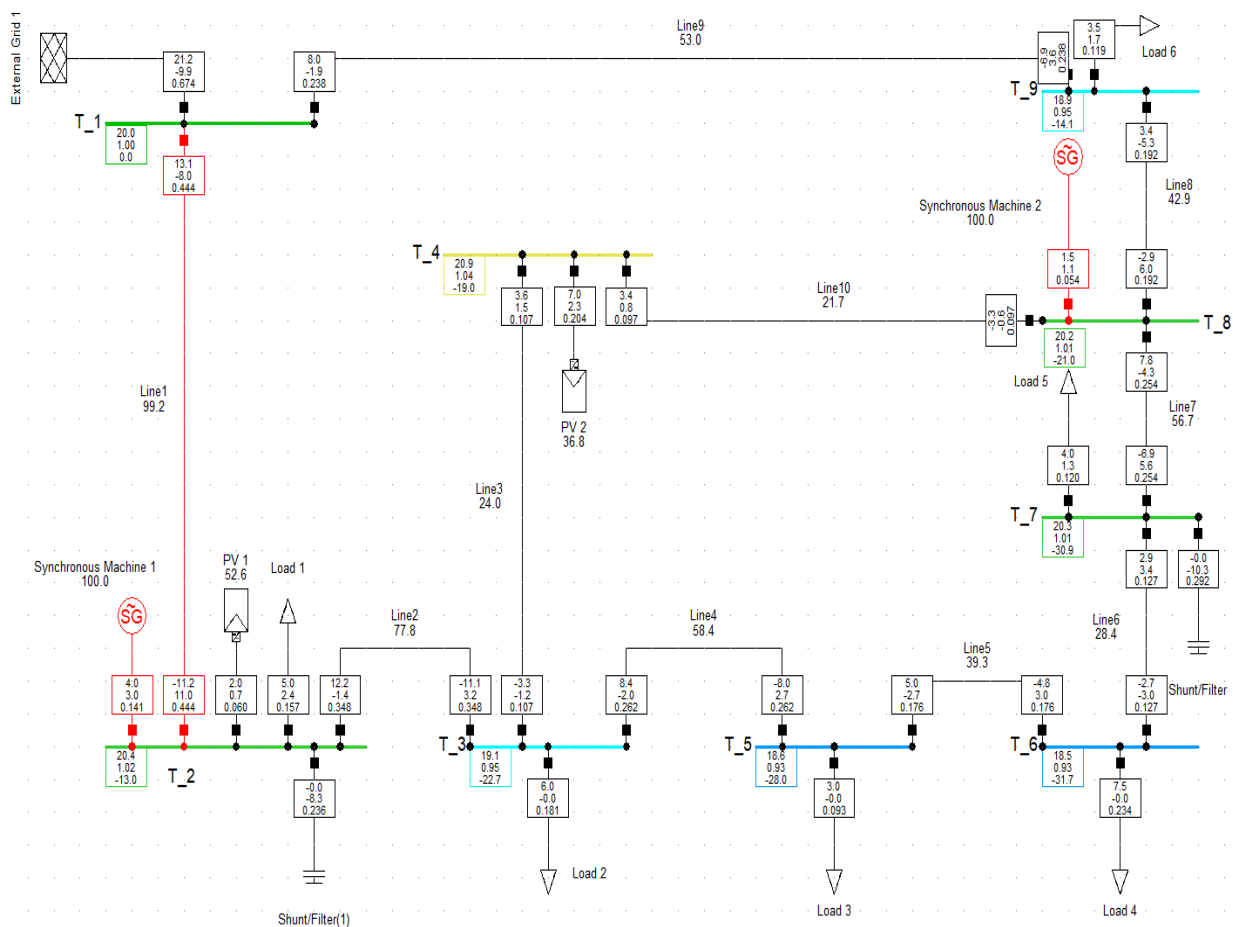
4.2.3 Υπολογισμός ροής φορτίου σε δίκτυο εννέα ζυγών με μειωμένη παραγωγή ισχύος.

Σε αυτήν την προσομοίωση θα προσπαθήσουμε να τροποποιήσουμε την ισχύ που παράγουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα με σκοπό την αύξηση της εισερχόμενης ισχύς από το

εξωτερικό δίκτυο. Ένα τέτοιο σενάριο, όπως είναι λογικό, αντιπροσωπεύει την πιθανότητα μειωμένης παραγωγής από τις συστοιχίες των φωτοβολταϊκών πάνελ, λόγω για παράδειγμα καιρικών συνθηκών. Και πάλι οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

Πίνακας 6: Αλλαγές δικτύου για μειωμένη παραγωγή ισχύος

Ζυγός	Ονομαστική Τάση (kV)	Φορτίο (MVA)	Σ.Ι. Φορτίου	Γεννήτρια (MVA)	Σ.Ι. Γεννήτριας	Φ/B (MW)
T_2	20	5,55	0,9	5	0,8	2
T_4	20	-	-	-	-	7



Εικόνα 40: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου με μειωμένη παραγωγή ισχύος

Ακολουθούν οι αναλυτικές τιμές των αποτελεσμάτων:

Πίνακας 7: Αποτελέσματα ροής φορτίου για AC δίκτυο με μειωμένη παραγωγή ισχύος

Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	1909.1	99.15	T_1	1.00
LINE 2	1174.7	77.78	T_2	1.02
LINE 3	223.5	23.99	T_3	0.95
LINE 4	441.6	58.40	T_4	1.04
LINE 5	199.9	39.29	T_5	0.93
LINE 6	208.6	28.39	T_6	0.93
LINE 7	832.7	56.71	T_7	1.01
LINE 8	477.0	42.92	T_8	1.01
LINE 9	1092.5	53.04	T_9	0.95
Line10	91.2	21.67		

Στο συγκεκριμένο σενάριο, λόγω της μειωμένης παραγωγής των φωτοβολταϊκών, αυξάνεται η απαίτηση εισαγωγής ενέργειας από το εξωτερικό δίκτυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή φόρτιση της γραμμής Νο1 (99,15%) όπως επίσης και της γραμμής Νο2 (77.78 %), κάτι το οποίο έχει ως επακόλουθο την εμφάνιση υψηλών απωλειών. Επιπλέον, οι γραμμές Νο8 και Νο9 έχουν αυξημένη φόρτιση, καθώς αποτελούν την δεύτερη οδό τροφοδότησης του υπόλοιπου δικτύου. Τέλος, στις υπόλοιπες γραμμές παρατηρείται γενικά μια αυξημένη φόρτιση και ως επακόλουθο αυξημένες απώλειες.

Οι τάσεις των ζυγών Νο5 και Νο6, μπορούμε να δούμε ότι είναι αρκετά μειωμένες λόγω της μειωμένης παραγωγής των φωτοβολταϊκών (βλέπουμε πως ο ζυγός Νο4 έχει τάση 1,04 α.μ. συγκριτικά με το 1,06 που είχε στα προηγούμενα σενάρια). Επίσης ενώ ο ζυγός Νο7 έχει λίγο παραπάνω τάση από την ονομαστική (1,01 α.μ.), ο ζυγός Νο6 που είναι γειτονικός του παρουσιάζει μεγάλη πτώση τάσης δείχνοντας πόσο σημαντική είναι η επίδραση του φορτίου του εκάστοτε ζυγού στην τάση αυτού.

Προσπαθώντας να διορθώσουμε τις τάσεις των ζυγών με χρήση πυκνωτών, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι συμβάλουμε αρνητικά στην φόρτιση των γραμμών καθώς αυτή η παραγόμενη άεργος ισχύς οδηγείται προς το εξωτερικό δίκτυο, εφόσον δεν καταναλώνεται από τα φορτία μας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό στην χρήση των χωρητικών διατάξεων του δικτύου μας, και της ικανότητάς μας να ρυθμίζουμε την τάση των πυκνωτών όσο πλησιέστερα γίνεται στην ονομαστική. Επομένως, η διόρθωση που πραγματοποιήθηκε έγινε με βάση την γραμμή Νο1, καθώς αυτή φτάνει πιο γρήγορα στο 100% της φόρτισής της,

και επομένως θέτει το όριο στην άεργο ισχύ που μπορεί να μεταφέρει θεωρώντας ότι η μεταφορά της απαραίτητης ενεργούς ισχύος έχει εξασφαλιστεί.

4.3 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυο εννέα ζυγών

Έχοντας ολοκληρώσει τις προσομοιώσεις της ροής φορτίου υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας, περνάμε στο επόμενο σενάριο, το οποίο είναι η διεξαγωγή σφαλμάτων (βραχυκυκλωμάτων) σε διάφορα μέρη του δικτύου, με σκοπό να συγκρίνουμε την απόκριση του δικτύου MVAC, με εκείνη των επόμενων δικτύων τα οποία πρακτικά είναι υβριδικά δίκτυα καθώς θα περιέχουν τμήματα MVDC. Τα μεγέθη πάνω στα οποία θα επικεντρωθούμε και θα χρησιμοποιήσουμε ως μέτρο σύγκρισης είναι η αρχική Ισχύς Βραχυκυκλώματος (S_{kss}), το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{kss}), και το μέγιστο εμφανιζόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{peak}).

Όσον αφορά τα πρότυπα σύμφωνα με τα οποία θα διεξαχθούν τα εν λόγω σφάλματα, το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε από μια πληθώρα αυτών, όπως είναι τα ακόλουθα: IEC 60909, VDE 0102, ANSI, IEC 61660 (DC), DIN EN 61660 (DC) και της μεθόδου COMPLETE. Στην παρούσα εργασία οι προσομοιώσεις θα διεξαχθούν με χρήση της μεθόδου υπέρθεσης «complete method», στην οποία αναφερθήκαμε στο κεφάλαιο Νο3, η οποία λαμβάνει και την συνεισφορά των μετατροπέων στον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης και βασίζεται στο διεθνές πρότυπο IEC 60909 [26].

Επίσης, θα πρέπει να τονιστεί, ότι σε αυτήν την εργασία, δεν θα γίνει χρήση προτύπων που αφορούν τον υπολογισμό σφαλμάτων σε DC τμήματα, κυρίως, διότι σκοπός μας είναι η σύγκριση των επιπτώσεων των σφαλμάτων αυτών στα AC τμήματα του εκάστοτε δικτύου. Όπως θα αναφερθεί και αργότερα, το Power Factory, διαφοροποιεί εξολοκλήρου τα DC με τα AC τμήματα, με αποτέλεσμα ένα σφάλμα στο DC κομμάτι, να μην έχει καμία επίδραση στο AC κομμάτι του δικτύου [27].

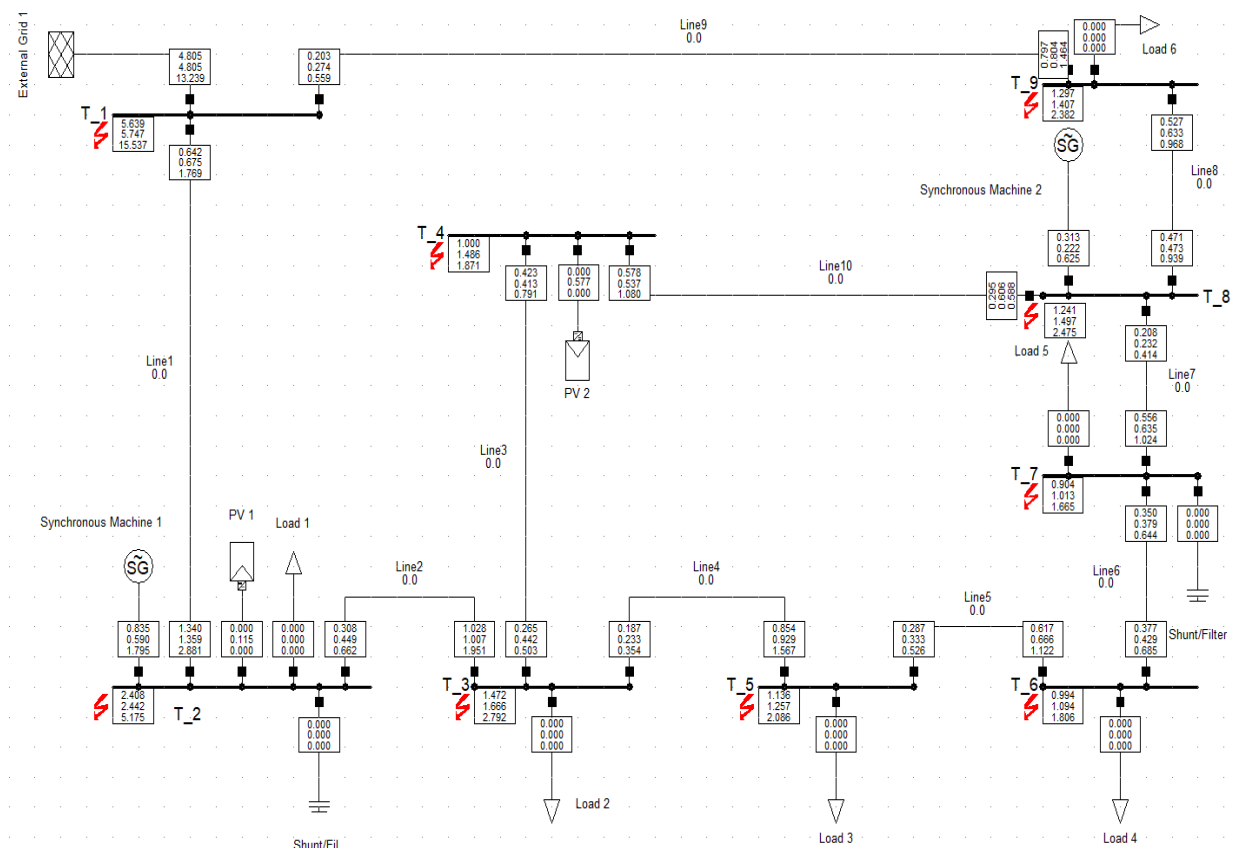
Τα σφάλματα θα πραγματοποιηθούν αρχικά σε κάθε ζυγό ξεχωριστά, για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν ως προς τους αντίστοιχους ζυγούς στις επόμενες υλοποιήσεις, και έπειτα μόνο στη γραμμή νούμερο 10 (η οποία συνδέει τον ζυγό Νο4 με τον ζυγό Νο8), για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα και πάλι με τις επόμενες υλοποιήσεις.

Τέλος, στα πλαίσια περιορισμού του μεγέθους αυτής της εργασίας, δεν θα παρουσιαστούν εκτενώς τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν στο παράθυρο εξόδου του

Power Factory, αλλά θα γίνει ανασκόπηση σε αυτά ξανά μέσω πινάκων. Στους πίνακες αυτούς θα αναγραφούν τα αποτελέσματα μόνο των ζυγών που θα εξακολουθήσουν να λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση και στις υπόλοιπες υλοποιήσεις δικτύου.

4.3.1 Υπολογισμός σφαλμάτων σε σύνολο ζυγών δικτύου AC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete

Αρχικά, όπως προαναφέρθηκε, θα πραγματοποιηθούν διάφορα σφάλματα στο σύνολο των ζυγών του δικτύου. Αυτό δεν σημαίνει ότι εκτελούμε μια προσομοίωση στην οποία γίνονται ταυτόχρονα τα σφάλματα σε όλους τους ζυγούς του δικτύου, αλλά λαμβάνουν χώρα σε κάθε έναν ζυγό ξεχωριστά, και εμφανίζονται συνολικά τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα για εξοικονόμηση χρόνου. Αρχικά, υλοποιούμε τριφασικά βραχυκυκλώματα, έπειτα διφασικά βραχυκυκλώματα και τέλος βραχυκυκλώματα μιας εκ των φάσεων με την γη. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται ο υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο σύνολο των ζυγών του αρχικού μας δικτύου:



Εικόνα 41: Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος σύμφωνα με τη μέθοδο Complete στο σύνολο των ζυγών

Η ανωτέρω διαδικασία επαναλήφθηκε για την διεξαγωγή και των υπόλοιπων σφαλμάτων με τα εξής αποτελέσματα:

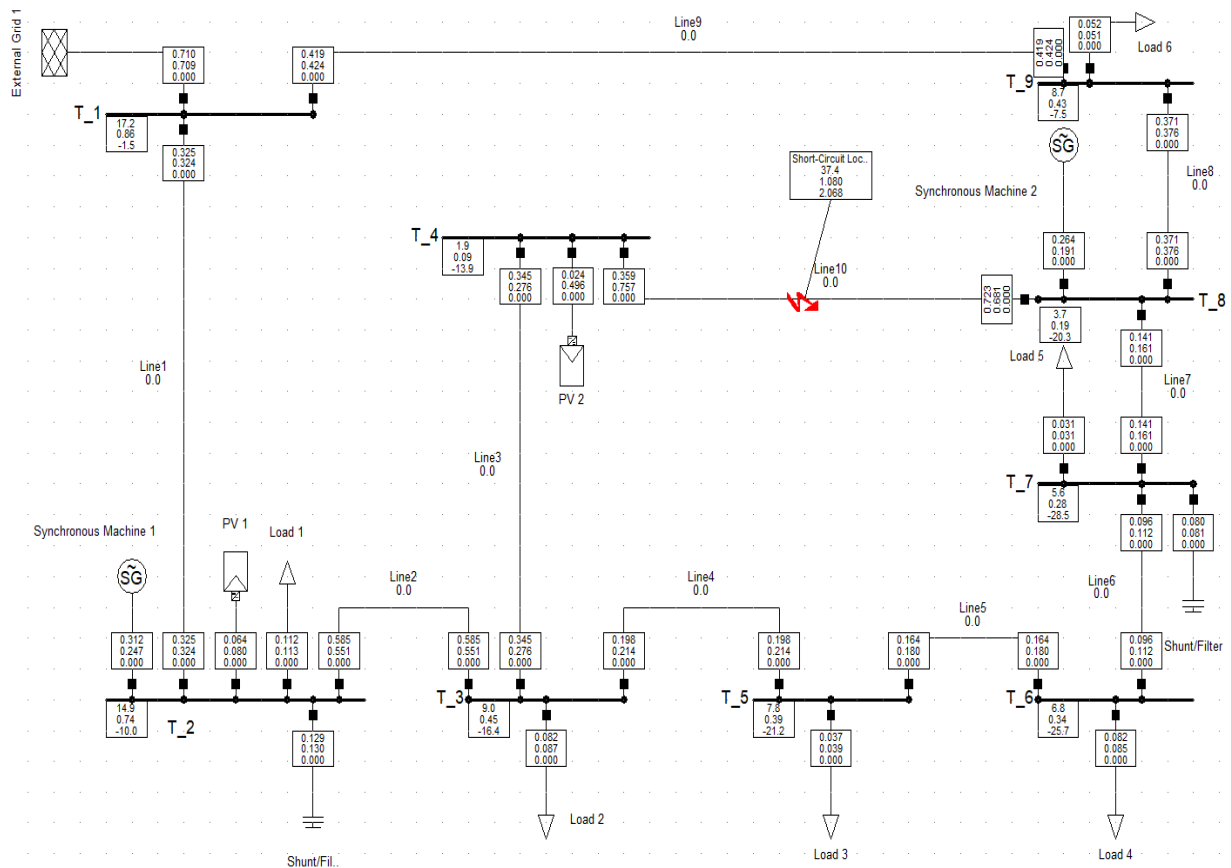
Πίνακας 8: Αποτελέσματα υλοποίησης βραχυκυκλωμάτων κατά Complete στο σύνολο των ζυγών

Busbar	Τριφασικό Βραχυκύκλωμα			Διφασικό Βραχυκύκλωμα			Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα		
	S_k'' (MVA)	I_k'' (kA)	I_p (kA)	S_k'' (MVA)	I_k'' (kA)	I_p (kA)	S_k'' (MVA)	I_k'' (kA)	I_p (kA)
T_1	195.34	5.64	15.54	56.69	4.91	13.53	17.19	1.49	4.10
T_2	83.42	2.41	5.18	24.71	2.14	4.60	21.83	1.89	4.06
T_4	34.65	1.00	1.87	10.81	0.94	1.75	8.00	0.69	1.30
T_7	31.31	0.90	1.67	9.35	0.81	1.49	7.03	0.61	1.12
T_8	42.98	1.24	2.48	13.00	1.13	2.25	11.30	0.98	1.95
T_9	44.93	1.30	2.38	13.24	1.15	2.10	8.06	0.70	1.28

Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται στο ζυγό No1, όπου έχουμε και τη σύνδεση με το εξωτερικό δίκτυο, το οποίο είναι λογικό εφόσον αυτό έχει ισχύ βραχυκύκλωσης ίση με 175 MVA. Αμέσως μετά είναι ο ζυγός No2 όπου έχουμε μονάδες παραγωγής ενέργειας (τόσο φωτοβολταϊκά όσο και σύγχρονες γεννήτριες) και έπειτα ακολουθούν οι ζυγοί No8 και No9, όπου είναι πλησίον του No1 και όπου έχουμε και εκεί μονάδες παραγωγής ενέργειας. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές του I_{peak} αλλά και του I_{kss} , είναι ανάλογες όπως είναι λογικό της ισχύος βραχυκυκλώσεως, δηλαδή όπου έχουμε μεγάλες τιμές S_{kss} , θα έχουμε και μεγάλες τιμές I_{kss} και I_{peak} .

4.3.2 Υπολογισμός σφαλμάτων σε γραμμή No10 δικτύου AC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete

Στην επόμενη εικόνα, φαίνεται το αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος στο 50% του συνολικού μήκους (δηλαδή στα 7,5 km από τον ζυγό No4) της γραμμής No10. Στο ανωτέρω σημείο εκτελέστηκε επίσης διφασικό και μονοφασικό σφάλμα. Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα μεγέθη που εξετάσαμε προηγουμένως (S_{kss} , I_{kss} , I_{peak}) και τα ρεύματα ανά φάση που παρουσιάζονται σε κάθε γραμμή για τα υπόλοιπα σφάλματα τα οποία είναι μη συμμετρικά:



Εικόνα 42: Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος σύμφωνα με την μέθοδο Complete στο 50% του συνολικού μήκους της γραμμής Νο10

Πίνακας 9: Αποτελέσματα σφαλμάτων στην γραμμή Νο10

	Τιμές στο σημείο σφάλματος		I _k '' (kA)			I _k '' (kA)		
			Μετά από διφασικό σφάλμα			Μετά από μονοφασικό σφάλμα		
			Φάση A	Φάση B	Φάση C	Φάση A	Φάση B	Φάση C
S _k '' (MVA)	37,4	Γραμμή 10	0	0,933	0,933	0,776	0	0
I _k '' (kA)	1,08							
I _p (kA)	2,07							

Για το συγκεκριμένο σενάριο θα υποτυπωθούν και οι πτώσεις τάσεως για το συμμετρικό σφάλμα, όπως επίσης και οι τάσεις των ζυγών για τα μη συμμετρικά σφάλματα, ώστε να τις συγκρίνουμε με αυτές που θα προκύψουν από τις επόμενες τοπολογίες.

Τάσεις Ζυγών σε τριφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 20kV)		Τάσεις Ζυγών σε διφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 11,57kV ανά φάση)			Τάσεις Ζυγών σε μονοφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 11,57kV ανά φάση)		
Ζυγός	Τάση ζυγού	Φάση A	Φάση B	Φάση C	Φάση A	Φάση B	Φάση C
T_1	17.24	11.52	10.83	10.31	9.42	11.39	13.01
T_2	14.88	10.96	8.26	7.74	7.53	11.54	11.14
T_4	1.85	11.25	5.73	5.63	1.08	14.28	12.65
T_7	5.56	10.91	6.20	5.75	3.54	12.89	11.46
T_8	3.73	11.24	6.12	5.71	3.04	13.34	11.87
T_9	8.67	11.12	7.32	7.06	5.39	12.39	12.07

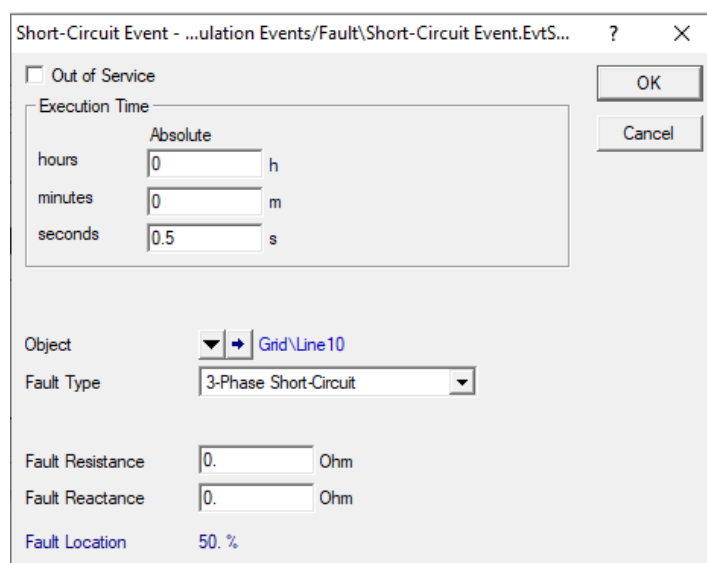
Από τα ανωτέρω αποτελέσματα, μπορούμε να δούμε ότι το σφάλμα, έχει την μεγαλύτερη επίδραση στους ζυγούς No4 και No8, οι οποίοι βρίσκονται εκατέρωθεν της γραμμής No10 (όπου και διεξάγεται το σφάλμα). Ο ζυγός No1, διατηρεί την τάση του πλησιέστερα στην ονομαστική, κάτι που αναμενόταν, όντας ο ζυγός με την μεγαλύτερη ισχύ βραχυκύκλωσης. Τέλος, ο ζυγός No2, ο οποίος βρίσκεται αντιδιαμετρικά από εκεί που γίνεται το σφάλμα, διατηρεί και αυτός, συγκριτικά με τους υπόλοιπους, αρκετά υψηλά την τάση του. Όσον αφορά τα μη συμμετρικά σφάλματα, παρατηρούμε ότι οι τάσεις ανά φάση, στους ζυγούς No1 και No2 είναι πλησιέστερα στις ονομαστικές, συγκριτικά με τους υπόλοιπους ζυγούς (όπως και στο συμμετρικό σφάλμα δηλαδή). Επίσης, στο μονοφασικό σφάλμα, παρατηρούμε ότι στους ζυγούς με την μεγαλύτερη πτώση τάσης στη φάση που γίνεται το σφάλμα (στην περίπτωση μας στην φάση A), στις υπόλοιπες φάσεις εντοπίζεται μεγαλύτερη τάση από την ονομαστική.

4.4 Εκτέλεση RMS Αξιολόγησης σε δίκτυο AC εννέα ζυγών

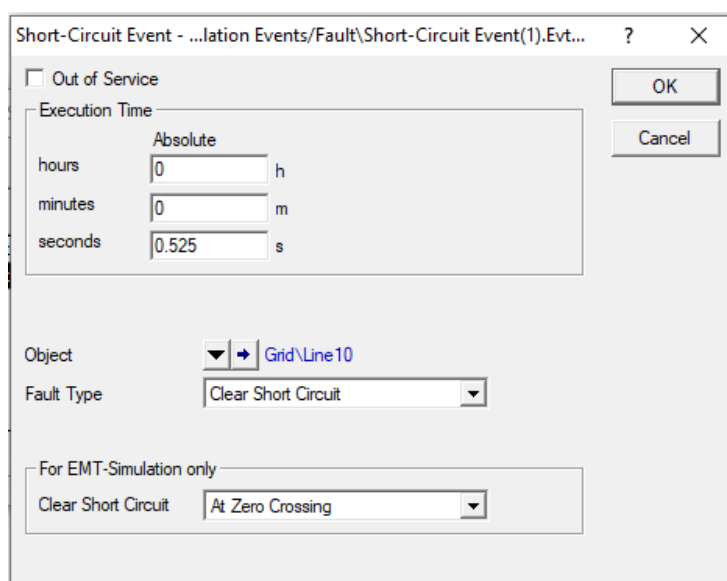
Το τελευταίο σενάριο από το οποίο θα εξάγουμε δεδομένα για να συγκρίνουμε με τις επόμενες τοπολογίες, οι οποίες θα περιέχουν MVDC τμήματα, είναι η διεξαγωγή σφάλματος και έπειτα η εκκαθάριση του σφάλματος αυτού μετά από κάποιον καθορισμένο χρόνο, ώστε να αξιολογήσουμε τα μεταβατικά φαινόμενα στα οποία υπόκεινται τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου (κυρίως αναφερόμαστε στις μονάδες παραγωγής μας, δηλαδή στις σύγχρονες γεννήτριες του δικτύου).

Για να υλοποιήσουμε το παραπάνω σενάριο, επιλέχθηκε και πάλι η διεξαγωγή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή No10, στο ίδιο σημείο με πριν, όμως αυτήν την φορά μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, το σφάλμα αποκατατίθεται και το δίκτυο επανέρχεται πάλι σε ισορροπία.

Συγκεκριμένα, αρχικά θέσαμε τα γεγονότα (events) τα οποία θα πραγματοποιηθούν και σε ποιον χρόνο της προσομοίωσης. Ορίσαμε το τριφασικό βραχυκύκλωμα να πραγματοποιηθεί 0,5sec μετά την έναρξη της μελέτης, και τον χρόνο αποκατάστασής του μετά από 0,025 sec, δηλαδή στα 0,525sec μετά την έναρξη. Στις επόμενες εικόνες, εμφανίζονται οι παραπάνω ρυθμίσεις.

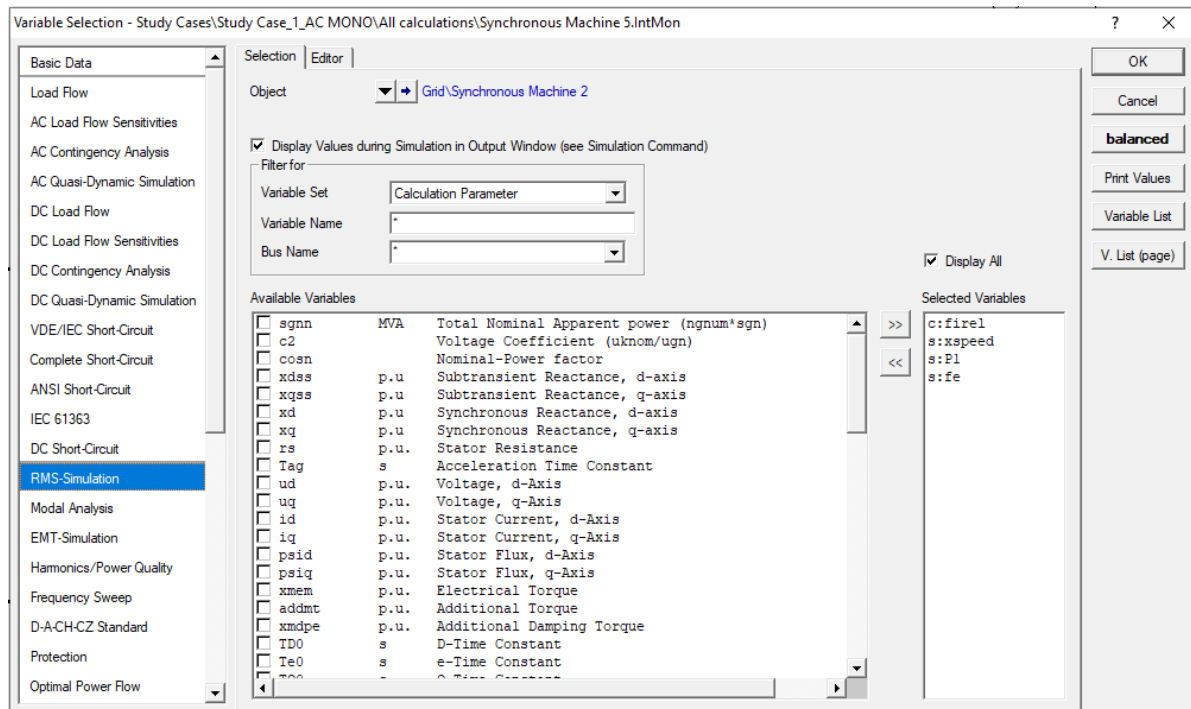


Εικόνα 43: Ορισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος για την εκτέλεση αξιολόγησης RMS



Εικόνα 44: Ορισμός χρόνου αποκατάστασης σφάλματος

Έπειτα, ορίσαμε τις μεταβλητές για τις οποίες θα εξάγουμε τα απαραίτητα δεδομένα προς σύγκριση με τις επόμενες υλοποιήσεις του δικτύου. Ως γεννήτρια προς έλεγχο, επιλέχθηκε η γεννήτρια No2, που βρίσκεται στον ζυγό No8 και για την οποία θα εξεταστεί η απόκριση της ισχύος εξόδου της, η απόκριση της παραγόμενης τάσης της, η αλλαγή της γωνίας του ρότορα συγκριτικά με την γωνία αναφοράς του ζυγού No1 (Sluck bus) η οποία είναι ίση με 0 μοίρες και τέλος η συχνότητά της.

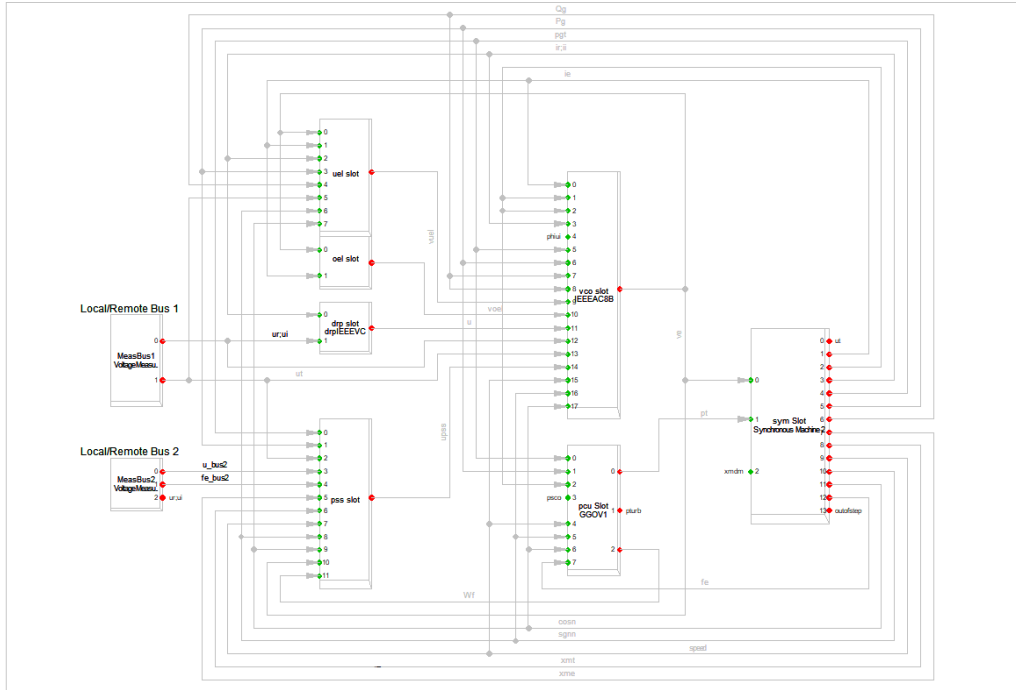


Εικόνα 45: Ορισμός μεταβλητών γεννήτριας No2 για την αξιολόγηση RMS

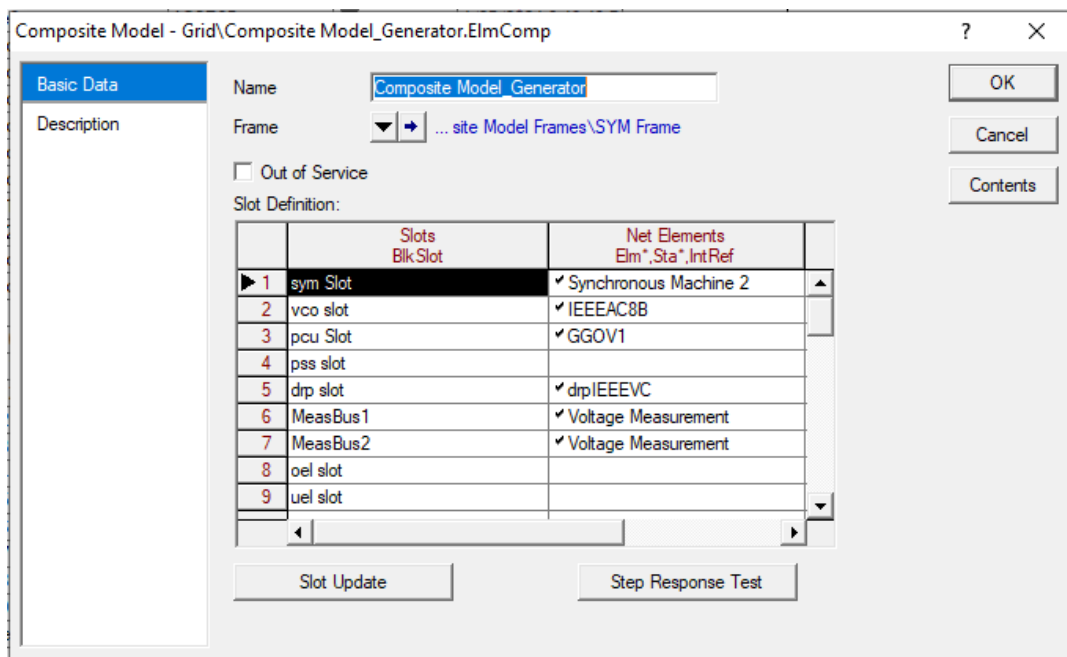
Τέλος, για να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ορθά αποτελέσματα, τα οποία να ανταποκρίνονται και στην πραγματικότητα, χρειάζεται να ορίσουμε ένα μοντέλο ελέγχου της γεννήτριας, το οποίο να ρυθμίζει την λειτουργία της υπό αυτές ακριβώς τις μεταβατικές συνθήκες. Για να υλοποιηθεί αυτό στο power factory, χρειάζεται να ορίσουμε ένα “Composite model” συγκεκριμένα για αυτήν την γεννήτρια. Έτσι, θα χρησιμοποιήσουμε σαν σώμα ένα composite model από τα ήδη υπάρχοντα στη βιβλιοθήκη του προγράμματος, το οποίο ονομάζεται “SYM frame” (Synchronous Machine frame). Πρακτικά, το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελείται από διάφορα slots, στα οποία μπορούμε να εισάγουμε σύνθετες συναρτήσεις οι οποίες προσομοιάζουν τα στοιχεία ελέγχου μιας γεννήτριας από την πραγματικότητα. Τέτοια στοιχεία είναι ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης εξόδου (Automatic Voltage Regulator = AVR) και ο ρυθμιστής καυσίμου (Governor). Και πάλι, χρησιμοποιήσαμε συναρτήσεις οι οποίες ήδη υπάρχουν στη βιβλιοθήκη μας. Επίσης, όπως

είναι λογικό, απαιτούνται ως είσοδοι διάφορες μετρήσεις μεγεθών σε πραγματικό χρόνο, όπως είναι η τάση του ζυγού όπου είναι συνδεδεμένη η γεννήτρια. Αυτό γίνεται μέσω ορισμού ενός μετρητή (μετρητή τάσης σε αυτήν την περίπτωση) στο επιθυμητό σημείο. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται το block diagram του μοντέλου καθώς και τα slots συμπληρωμένα με τις απαραίτητες συναρτήσεις [26]:

SYM Frame: Synchronous Machine Signal Interconnections



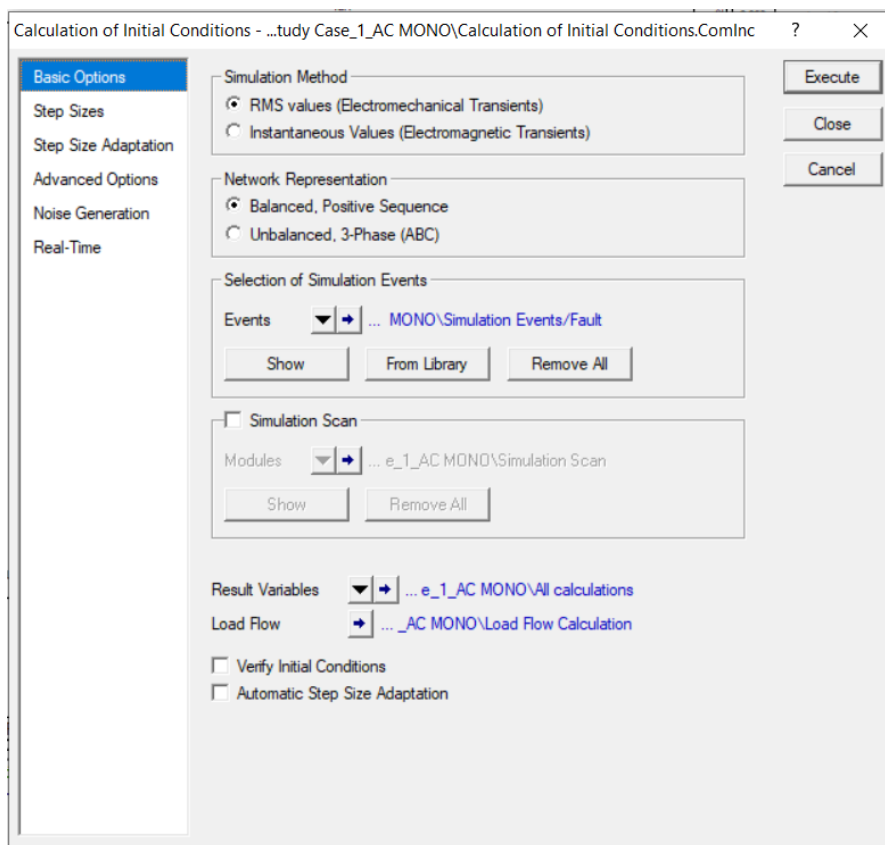
Εικόνα 46: Block diagram του SYM Frame



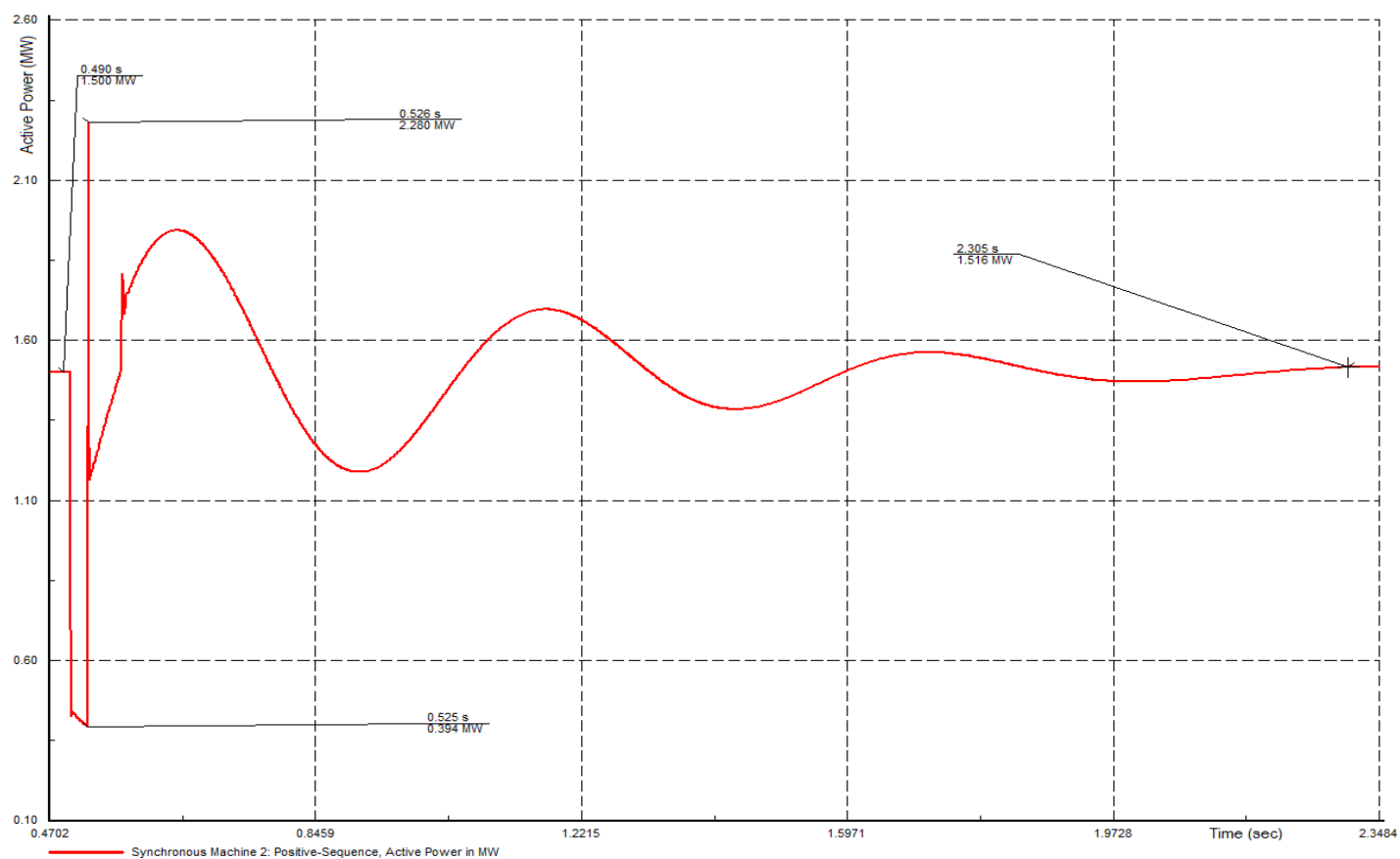
Εικόνα 47: Συμπληρωμένο Composite Model γεννήτριας No2

Επιπρόσθετα, ορίσαμε εξίσου ένα “Composite model” για τον έλεγχο του φωτοβολταϊκού πάρκου και για την απόκτηση ορθότερων αποτελεσμάτων. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα πρότυπο μοντέλο από την βιβλιοθήκη του προγράμματος το οποίο τροποποιήθηκε κατάλληλα, ώστε να ανταποκριθεί στα χαρακτηριστικά του συστήματος που χρησιμοποιείται στο δίκτυό μας. Τέλος, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα και της ισχύος που μεταφέρεται δια μέσου της γραμμής στην οποία διεξάγουμε το σφάλμα, με τις υπόλοιπες υβριδικές τοπολογίες δικτύου που ακολουθούν.

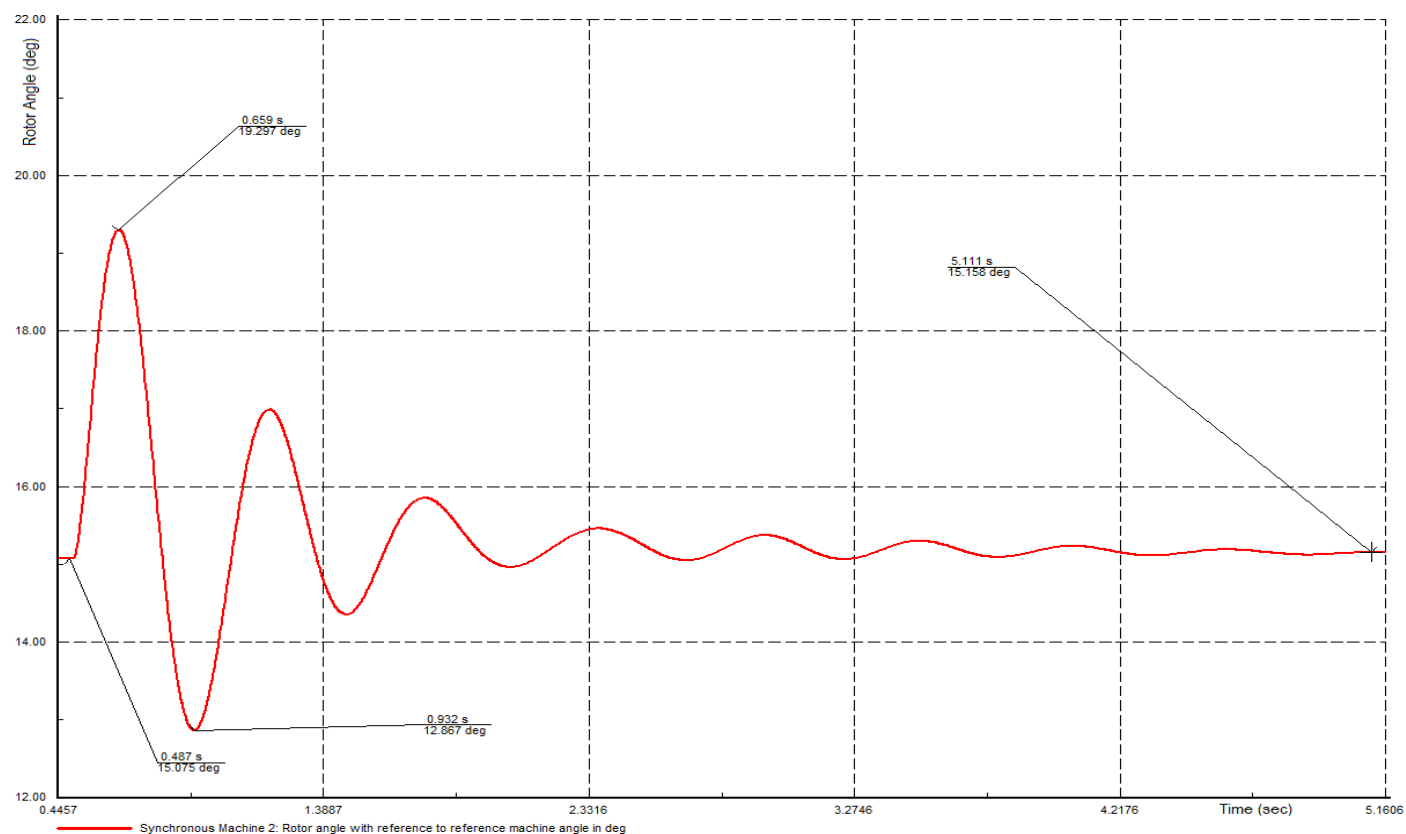
Εφόσον πλέον έχουμε ορίσει τόσο τα events όσο και τις μεταβλητές για την προσομοίωση μας, καθώς και το μοντέλο ελέγχου της γεννήτριας, μπορούμε στο επόμενο βήμα να την εκτελέσουμε. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το παράθυρο από το οποίο ορίζουμε τις αρχικές συνθήκες και έπειτα τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε:



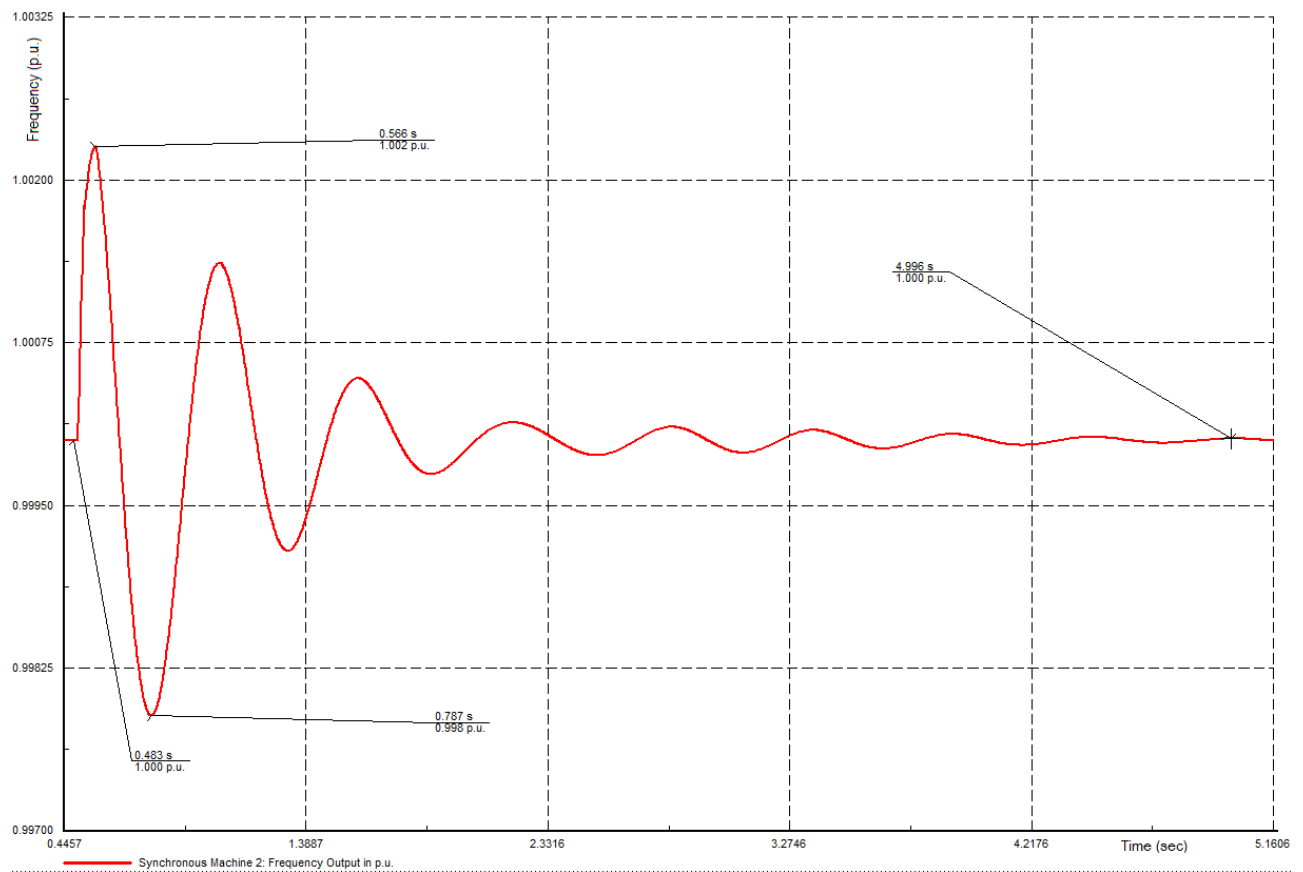
Εικόνα 48: Αρχικές συνθήκες εκτέλεσης αξιολόγησης RMS



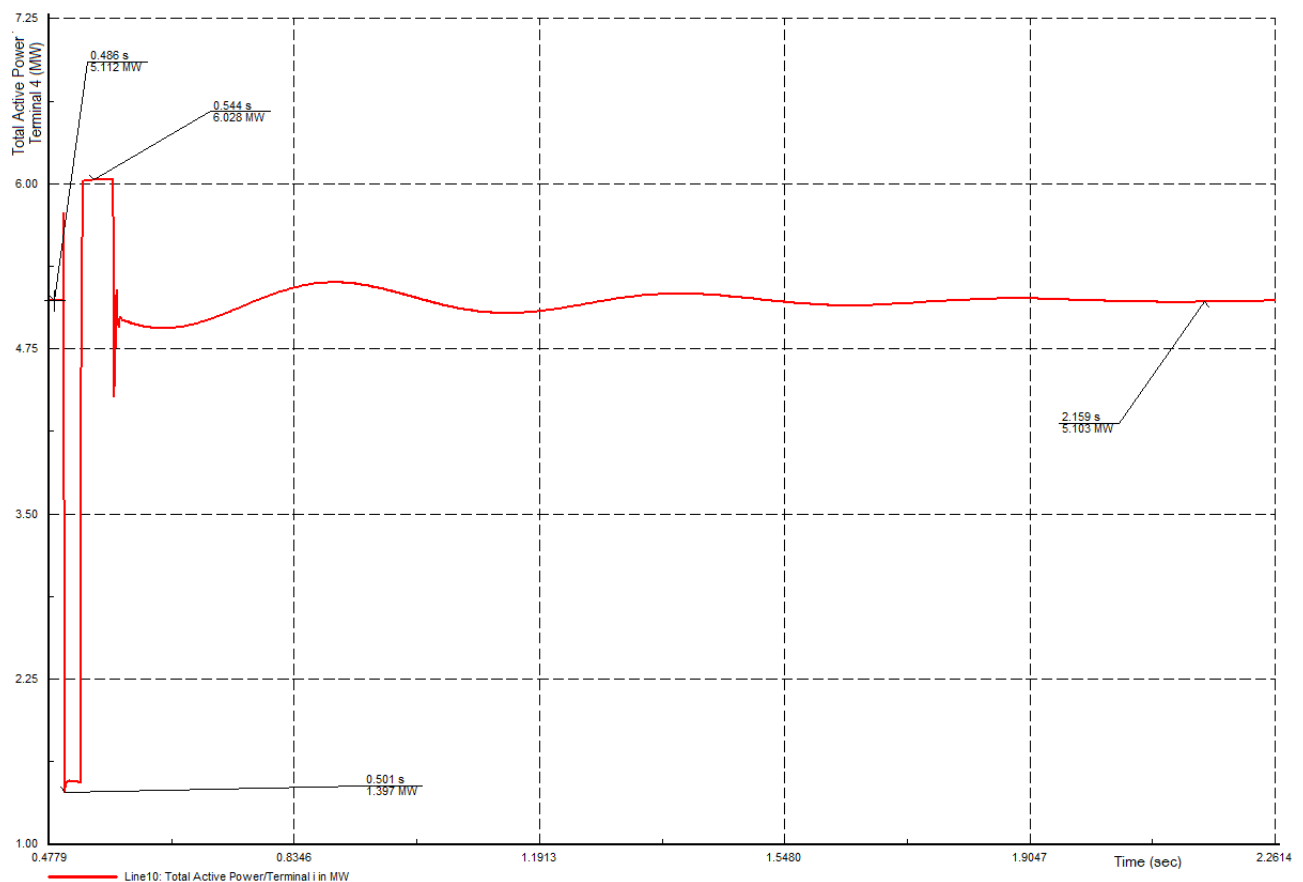
Διάγραμμα 1: Παραγόμενη Ενεργός Ισχύς σύγχρονης γεννήτριας Νο2



Διάγραμμα 2: Γωνία ρότορα σύγχρονης γεννήτριας Νο2

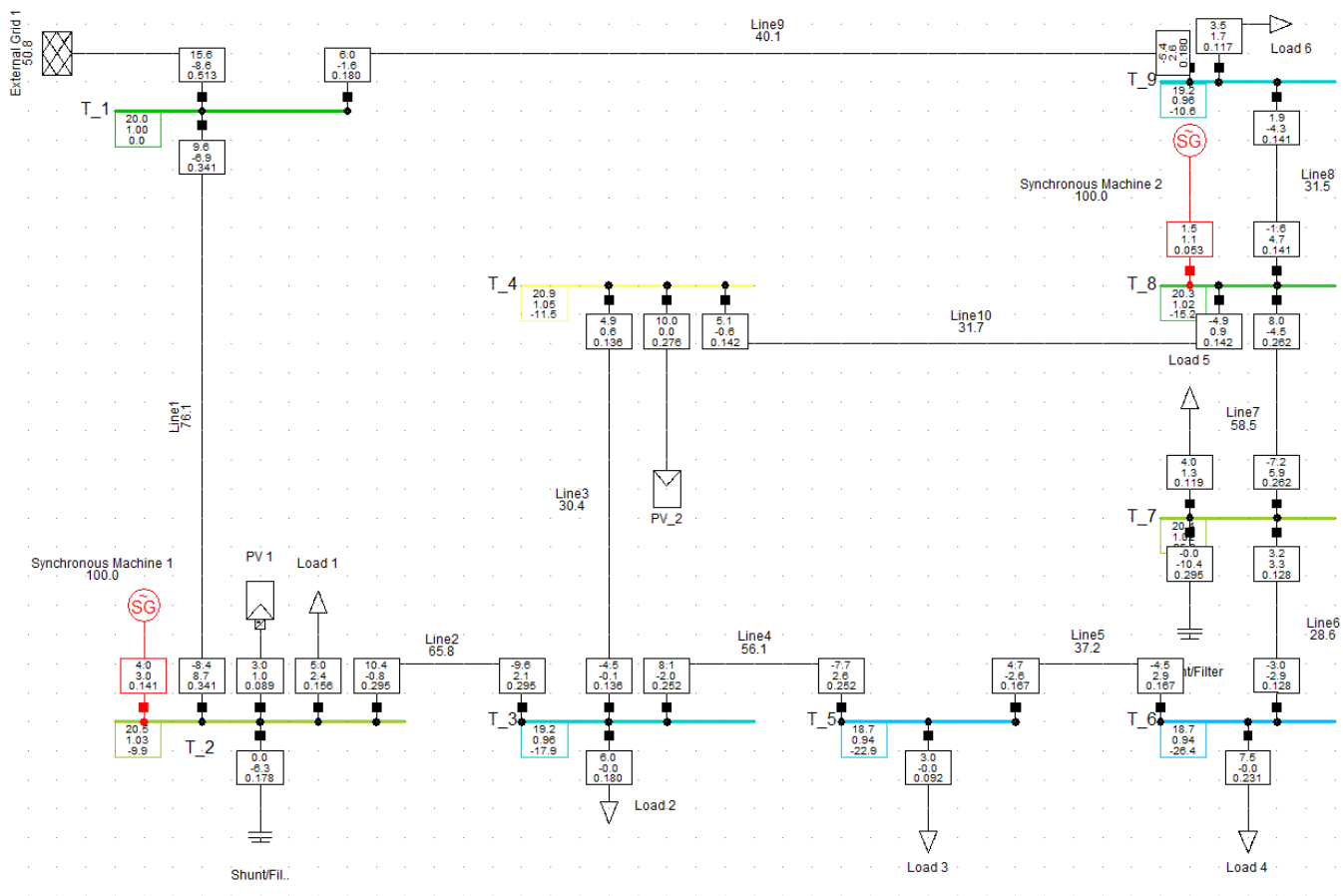


Διάγραμμα 3: Συχνότητα γεννήτριας Νο2



Διάγραμμα 4: Ενεργός ισχύς που διοχετεύεται στην γραμμή 10

Τέλος, στην επόμενη εικόνα φαίνεται η ροή φορτίου μετά το σφάλμα:



Εικόνα 49: Δίκτυο μετά την αποκατάσταση σφάλματος στη γραμμή μεταφοράς Νο10

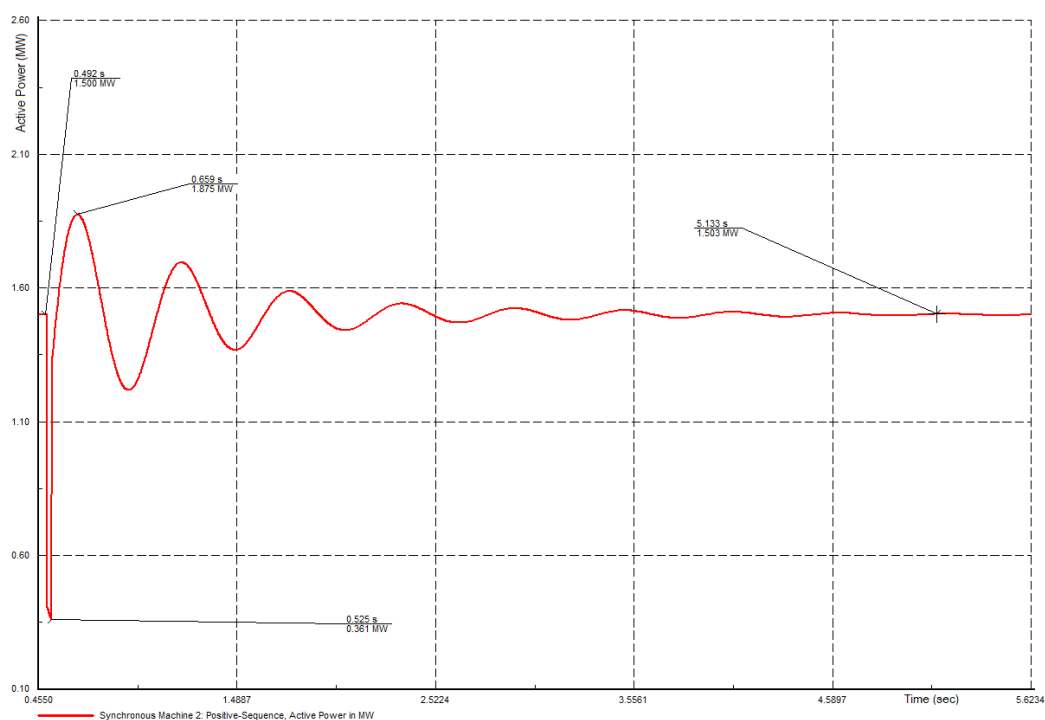
Συνοπτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Ο χρόνος επαναφοράς της κατάστασης προ του σφάλματος αφορά τον απόλυτο χρόνο μετά τα 0,525sec της προσομοίωσης όπου έγινε η αποκατάσταση του σφάλματος:

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα RMS αξιολόγησης

	Αρχική τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τελική τιμή	Χρόνος επαναφοράς κατάστασης προ σφάλματος
Ενεργός Ισχύς Gen_No2	1,5 MW	2,28 MW	0,394 MW	1,516 MW	1,78 s
Γωνία Ρότορα Gen_No2	15,075 Deg	19,28Deg	12,867 Deg	15,158 Deg	4,586 s
Συχνότητα Gen_No2	1 pu	1,002 pu	0,998 pu	1 pu	4,471 s

Ενεργός Ισχύς Γραμμής Νο10	5,112 MW	6,028 MW	1,397 MW	5,103 MW	1,634 s
-------------------------------	----------	----------	----------	----------	---------

Από τα ανωτέρω, παρατηρούμε ότι η παραγόμενη ενεργός ισχύς της γεννήτριας αλλά και αυτή που εισέρχεται από τον ζυγό που βρίσκεται το φωτοβολταϊκό πάρκο, επιστρέφουν στην πρότερη κατάσταση γρηγορότερα (σχεδόν μέσα σε χρόνο 1,5 sec μετά την αποκατάσταση του σφάλματος) από τη συχνότητα και τη γωνία ρότορα της γεννήτριας, τα οποία μεγέθη επιστρέφουν στην πρότερη κατάσταση μετά από χρόνο περί των 4,5 sec, μετά την αποκατάσταση του σφάλματος. Επιπρόσθετα, από τα διαγράμματα, μπορούμε να παρατηρήσουμε την επίδραση που έχει ο ελεγκτής των φωτοβολταϊκών στην απόκριση της γεννήτριας. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται η απόκριση που έχει η γεννήτρια εάν απενεργοποιήσουμε τον ελεγκτή του φωτοβολταϊκού πάρκου:



Διάγραμμα 5: Απόκριση Gen No2, με απενεργοποιημένο ελεγκτή φ/β πάρκου

Όπως βλέπουμε, μετά την αποκατάσταση σφάλματος, η καμπύλη της απόκρισης ακολουθεί μια ημιτονοειδής μορφή μέχρι να επιστρέψουμε στην πρότερη κατάσταση. Επίσης, ο χρόνος αυτός της επιστροφής, έχει αυξηθεί δραματικά (έχει υπερδιπλασιαστεί), ενώ η μέγιστη τιμή ισχύος σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει έχοντας τον ελεγκτή του φ/β πάρκου ενεργοποιημένο. Συνοψίζοντας, ο λόγος που η καμπύλη απόκρισης της ισχύος δεν έχει αυτή την ημιτονοειδή μορφή αλλά εμφανίζει τις έντονες αιχμές, είναι η επίδραση του μοντέλου του ελεγκτή που ελέγχει και ρυθμίζει την ισχύ εξόδου των φωτοβολταϊκών, πάνω στην γεννήτρια Νο2.

Κεφάλαιο 5^ο: Μετατροπή Δικτύων Μέσης Εναλλασσόμενης Τάσης σε υβριδικά δίκτυα με τμήματα Συνεχούς Τάσης και εξέταση συμπεριφοράς τους υπό διάφορα σενάρια φόρτισης και λειτουργίας

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα τροποποιηθεί το ήδη μοντελοποιημένο δίκτυο που λειτουργεί στην μέση εναλλασσόμενη τάση, ώστε πλέον ένα τμήμα του να λειτουργεί στην μέση συνεχή τάση. Καθώς η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μετατροπή αυτή διατηρώντας τις ίδιες γραμμές μεταφοράς, θα εξεταστούν μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν τις υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς. Τα δύο μοντέλα αυτά είναι:

1. LCC-MVDC (Line Commutated Converter – Medium Voltage Direct Current)
2. VSC-MVDC (Voltage Source Converter - Medium Voltage Direct Current)

Θεωρώντας ότι προηγουμένως, για την μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιούσαμε τρεις γραμμές μεταφοράς (μία για κάθε φάση), τώρα θα χρησιμοποιηθούν οι δύο μόνο για την μεταφορά της ισχύος ενώ η τρίτη γραμμή θα αποτελεί την γείωση [2].

Για να βρούμε την τάση που θα έχουν στα άκρα τους οι μετατροπείς για τη τοπολογία LCC-MVDC χρησιμοποιούμε την σχέση:

$$U_d = \frac{(s_0 * q)}{\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * V_{LL} \quad (1)$$

Όπου:

- U_d είναι η συνεχής τάση στην πλευρά DC του μετατροπέα
- s_0 είναι ο αριθμός των ομάδων μεταγωγής
- q είναι ο αριθμός των κλάδων σε κάθε ομάδα μεταγωγής και
- V_{LL} είναι η πολική τάση στην πλευρά AC του μετατροπέα

Στην περίπτωση μας, οι μετατροπείς αποτελούνται από δύο ομάδες μεταγωγής και τρεις κλάδους σε κάθε ομάδα μεταγωγής. Η πολική τάση του δικτύου υπό εξέταση όπως προαναφέρθηκε είναι 20kV, άρα η σχέση (1) γίνεται:

$$U_d = \frac{2 * 3}{\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * 20 * 10^3 = 27,0095 * 10^3 = 27,001 \text{ kV}$$

Επιπρόσθετα, οι μετατροπείς λειτουργούν με θυρίστορ και ως γνωστόν η τάση εξόδου στην DC πλευρά τους, εξαρτάται από την γωνία εναύσεως (α), σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$U_{DC} = U_d * \cos(\alpha) \quad (2)$$

Η ονομαστική γωνία εναύσεως σύμφωνα με το πρόγραμμα είναι οι 15° , και άρα:

$$U_{DC} = 27,001 * \cos(15^\circ) = 26,089 \text{ kV}$$

Επομένως, θα χρησιμοποιήσουμε την τάση 26,089kV, ως ονομαστική τάση των ζυγών DC και των μετατροπέων [27]. Για τις γραμμές μεταφοράς δημιουργήσαμε νέες, με ίδια χαρακτηριστικά με τις προηγούμενες, όσον αφορά την ωμική αντίσταση, όμως αυτήν την φορά τις θέσαμε για τροφοδοσία με συνεχές ρεύμα. Όπως έχει προαναφερθεί, σκοπός της εργασίας είναι η μετατροπή ενός τμήματος δικτύου MVAC, σε MVDC, διατηρώντας όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία αναλλοίωτα, διότι πρακτικά, μας ενδιαφέρει να μετατρέψουμε τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, και αυτό αφορά κυρίως τις γραμμές μεταφοράς. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η ανωτέρω ρύθμιση.

Εικόνα 50: Ορισμός χαρακτηριστικών DC γραμμής μεταφοράς

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται τα στοιχεία που μετατράπηκαν σε DC:

Πίνακας 11: Τροποποιημένα στοιχεία δικτύου τοπολογίας LCC

Ζυγός	Ονομαστική Τάση (kV DC)	Φορτίο (MVA)	Σ.Ι. Φορτίου	Γεννήτρια (MVA)	Σ.Ι. Γεννήτριας	Φ/B (MW)
T_3	26,089	6	1	-	-	-
T_5	26,089	3	1	-	-	-
T_6	26,089	7,5	1	-	-	-

Μετατρέψαμε τους ανωτέρω ζυγούς σε DC, δημιουργώντας έτσι έναν «διάδρομο» που ενώνει τον ζυγό Νο1 με τον ζυγό Νο4 και Νο7, και με τον οποίο ανταλλάσσει ισχύ ο ζυγός Νο2 ο οποίος παραμένει σε λειτουργία με εναλλασσόμενη τάση. Στους υπόλοιπους ζυγούς και στα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου, δεν έγινε καμία αλλαγή.

5.1 Μετατροπή Δικτύων Μέσης Εναλλασσόμενης Τάσης σε Συνεχούς Τάσης με χρήση LCC

Για να μετατραπεί το δίκτυο των εννέα ζυγών, με βάση το μοντέλο όπου χρησιμοποιούνται LC Converters, χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο ‘Rectifier/Inverter 1 DC – Connection’ του PowerFactory. Στους ζυγούς όπου είχαμε παραγωγή ενέργειας προς το υπόλοιπο δίκτυο, ρυθμίσαμε τους converters να λειτουργούν ως ανορθωτές ώστε να εξασφαλίζεται η παροχή ενέργειας που απαιτείται. Στους ζυγούς όπου έχουμε κατανάλωση ενέργειας, οι converters ρυθμίστηκαν ως αντιστροφείς, ώστε να μετατρέπουν την DC σε AC τάση, να αντλούν την ενέργεια αυτή από το δίκτυο και να την διοχετεύουν προς τα αντίστοιχα φορτία.

Μέσω του λογισμικού, μας δίνεται η δυνατότητα να ορίσουμε για τους μετατροπείς ποιο φυσικό μέγεθος να ελέγχουν (τάση, ρεύμα, ισχύς). Έτσι, για να εξασφαλίσουμε τις ίδιες συνθήκες φόρτισης και μεταφοράς ισχύος με αυτές που υπήρχαν στο εξολοκλήρου AC δίκτυο, σε όλες τις περιπτώσεις (τόσο στους ανορθωτές, όσο και στους αντιστροφείς), επιλέχθηκε ο έλεγχος ενεργούς ισχύος. Οι επιθυμητές τιμές της ενεργούς ισχύος τέθηκαν έτσι ώστε τα στοιχεία του δικτύου, να παράγουν και να καταναλώνουν ενεργό ισχύ ίση με την ονομαστική τους. Μόνο στην περίπτωση του μετατροπέα που συνδέεται στον ζυγό του εξωτερικού δικτύου επιλέχθηκε ο έλεγχος της συνεχούς τάσης, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η DC τάση στην έξοδό του, θα παραμένει ίση με 1 α.μ. Τέλος, ο έλεγχος του ρεύματος, της

άεργου ισχύος ή της τάσης στον AC ζυγό όπου συνδέονται τα ηλεκτρονικά ισχύος, δεν αποτελούν εύχρηστοι τρόποι ελέγχου, καθώς οι τιμές του ρεύματος πρέπει να εισαχθούν με μεγάλη ακρίβεια ώστε να επιλυθεί η ροή φορτίου (οι οποίες δεν γνωρίζονται εκτός και αν γίνει επίλυση της ροής με άλλον τρόπο), η χρήση ελέγχου της άεργου ισχύος οδηγεί σε αποτυχία επίλυσης της μεθόδου, και τέλος επειδή σε όλους σχεδόν τους ζυγούς AC όπου συνδέονται οι συγκεκριμένες διατάξεις, υπάρχει κάποια γεννήτρια/εξωτερικό δίκτυο, δεν μας επιτρέπεται από το πρόγραμμα ο ταυτόχρονος έλεγχος της AC τάσης από περισσότερα από ένα στοιχείο.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι με τα συγκεκριμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανόρθωση-αντιστροφή της τάσης, δεν δύναται να υπάρξει ανταλλαγή ισχύος, εάν δεν γίνουν οι κατάλληλες τροποποιήσεις στο εκάστοτε στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε αλλαγή στην ονομαστική ισχύ κάποιου φορτίου ή γεννήτριας, ή ακόμα και σε κάποιο χαρακτηριστικό των γραμμών μεταφοράς, θα πρέπει να οριστούν και πάλι τα όρια ελέγχου του κάθε μετατροπέα, ώστε το πρόγραμμα να μπορεί να επιλύσει την επαναληπτική μέθοδο για τον υπολογισμό της ροής ισχύος.

Επιπρόσθετα, για να προκύψει ένας καλύτερος υπολογισμός όσον αφορά τις απώλειες του εκάστοτε δικτύου, με βάση τις οδηγίες του προγράμματος, το στοιχείο 'Rectifier/Inverter 1 DC – Connection', δεν έχει την δυνατότητα να του ορίσουμε εσωτερικές απώλειες (π.χ. διακοπτικές απώλειες), μπορούν ωστόσο να παραστούν με χρήση μιας αντίστασης συνδεδεμένη σε σειρά, στην DC έξοδο του στοιχείου. Επιλέχθηκαν τέτοιες αντιστάσεις ώστε στην φυσιολογική λειτουργία των LCC, να παρουσιάζονται απώλειες της τάξεως του 1%, της ονομαστικής τους ισχύος. Ο υπολογισμός των αντιστάσεων έγινε με χρήση του τύπου:

$$P_{απωλ} = I_{DC}^2 * R$$

Όπου, $P_{απωλ}$: η ισχύ απωλειών του converter

I_{DC} : το ρεύμα που διέρχεται κατά τη φυσιολογική λειτουργία του δικτύου και προέρχεται από την επίλυση της ροής φορτίου

R : η αντίσταση που θα πρέπει να τοποθετηθεί στην DC πλευρά του Converter
Ακολουθεί εικόνα από το εγχειρίδιο (tech reference) του στοιχείου Rectifier/Inverter 1 DC – Connection, όπου φαίνεται η εν λόγω υλοποίηση [27]:

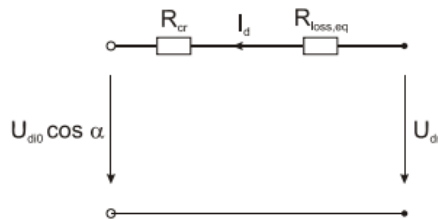


Figure 1.6: Simplified Modelling of Losses for a 6-Pulse Converter

Rectifier / Inverter (ElmRec, ElmRecmono, TypRec)

9

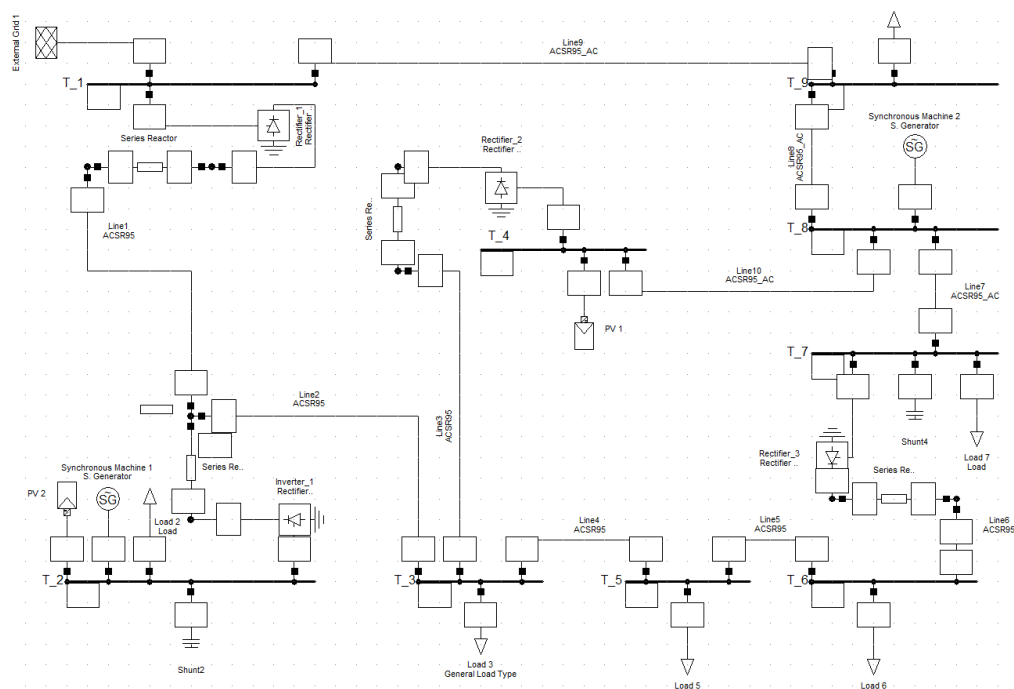
Εικόνα 51: Απλοποιημένο μοντέλο απωλειών για το στοιχείο Rectifier/Inverter του PowerFactory

Επιπρόσθετα, στον πίνακα που ακολουθεί, αναγράφεται η ονομαστική ισχύ του εκάστοτε converter, η αντίστοιχη ισχύς απωλειών και το μέγεθος της αντίστασης.

Πίνακας 12: Μέγεθος αντιστάσεων για τον εκάστοτε Converter

Converter	Ονομαστική ισχύς	Απώλειες	Αντίσταση
Ζυγού Νο1	10 MW	100kW	0,68 Ohm
Ζυγού Νο2	2 MW	20kW	3,38 Ohm
Ζυγού Νο4	5 MW	50kW	1,35 Ohm
Ζυγού Νο7	3 MW	30kW	2,25 Ohm

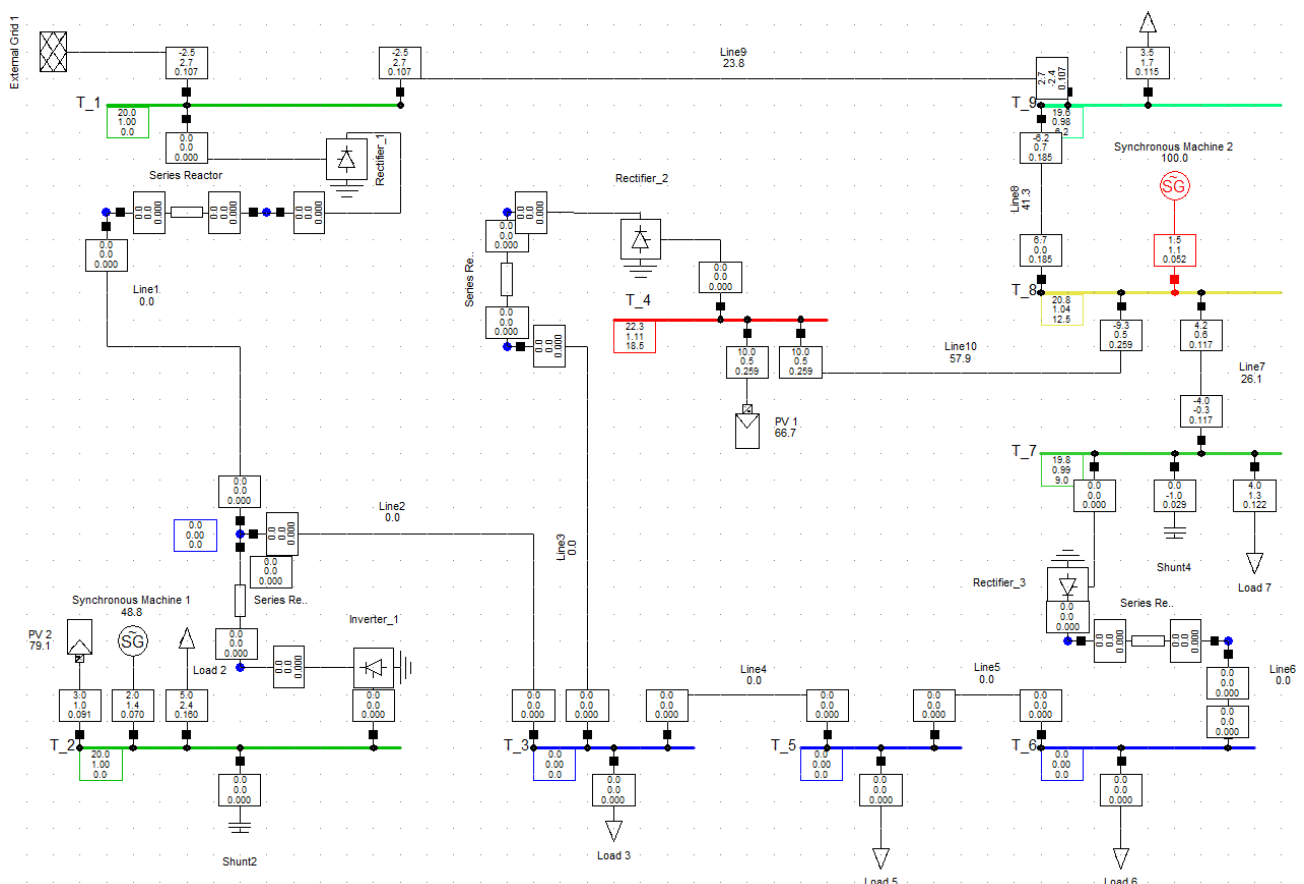
Παρακάτω, φαίνεται το δίκτυο εννέα ζυγών, τροποποιημένο με βάση το μοντέλο LCC – MVDC:



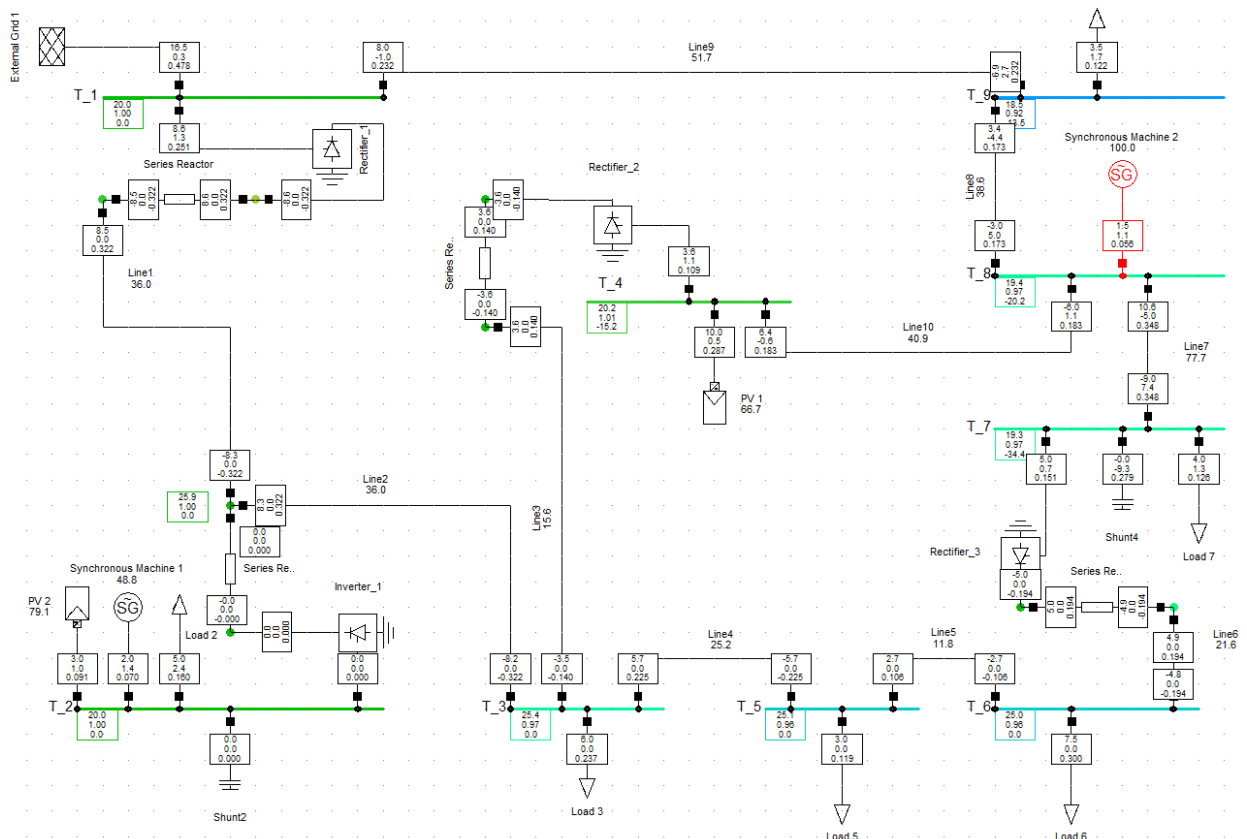
Εικόνα 52: Δίκτυο εννέα Ζυγών με τοπολογία LCC

5.1.2 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Στο παρόν κεφάλαιο θα υποβάλουμε το νέο δίκτυο που δημιουργήσαμε στα ίδια ακριβώς σενάρια φόρτισης που υποβάλλαμε και το αρχικό μας δίκτυο (το οποίο δεν περιείχε κάποιο τμήμα MVDC). Θα αναλύσουμε και πάλι την ροή φορτίου στην εκάστοτε περίπτωση ώστε να παραχθούν τα κατάλληλα δεδομένα που χρειαζόμαστε για να πραγματοποιήσουμε την σύγκριση μεταξύ των διάφορων τοπολογιών των δικτύων. Έμφαση επίσης θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι δοκιμάστηκαν και τα υπόλοιπα μεγέθη ελέγχου, στα πλαίσια εύρεσης κάποιας αποδοτικότερης επίλυσης της ροής φορτίου (θέτοντας για παράδειγμα και στις υπόλοιπες διατάξεις τον έλεγχο τάσεως των ζυγών ή σε όλες τις διατάξεις τον έλεγχο ενεργούς ισχύος), με αρνητικά ωστόσο αποτελέσματα καθώς σε κάποιες περιπτώσεις το πρόγραμμα αδυνατούσε να εκτελέσει αποτελεσματικά την επαναληπτική μέθοδο ενώ σε άλλα, η επίλυση οδηγούσε σε μεγαλύτερες απώλειες. Τέτοια παραδείγματα είναι τα ακόλουθα:



Εικόνα 53 Επίλυση Ροής φορτίου σε δίκτυο LCC με έλεγχο της ενεργούς ισχύος σε όλους τους μετατροπείς (Αδυναμία επίλυσης ροή φορτίου)

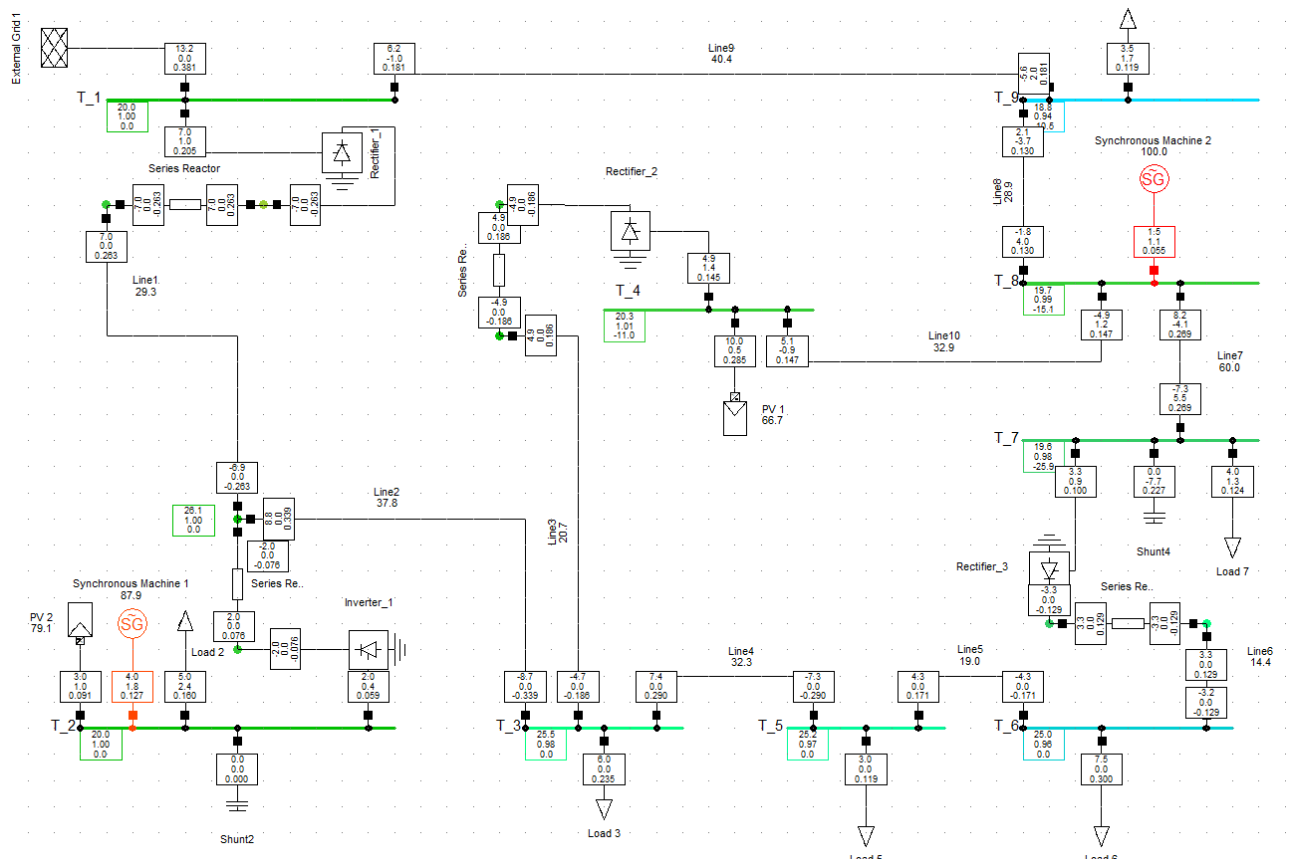


Εικόνα 54: Επίλυση Ροής φορτίου σε δίκτυο LCC με έλεγχο της τάσης DC ζυγού σε όλους τους μετατροπείς (Αύξηση απωλειών δικτύου κατά 1,37MW σε σύγκριση με την αρχική μεθόδευση)

Δοκιμάστηκαν και άλλοι συνδυασμοί στον έλεγχο των ανορθωτών και των αντιστροφών χωρίς την επίτευξη κάποιου ιδανικότερου αποτελέσματος. Για αυτόν τον λόγο σε όλα τα σενάρια θα εφαρμοστεί ο έλεγχος που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.1.2.1 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario).

Αρχικά, εκτελούμε τον υπολογισμό της ροής φορτίου στο νέο δίκτυο που έχουμε δημιουργήσει. Παρακάτω φαίνεται το αποτέλεσμα του υπολογισμού με χρήση του ίδιου χρωματικού κώδικα για τις τάσεις των ζυγών, το φορτίο των γεννητριών και φωτοβολταϊκών συστημάτων και την φόρτιση των γραμμών όπως και πριν.



Εικόνα 55: Αποτέλεσμα υπολογισμού ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας LCC υπό λειτουργία τυπικής φόρτισης (base scenario)

Πίνακας 13: Αποτελέσματα ροής φορτίου υβριδικού δικτύου, τοπολογίας LCC

Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	111.5	29.35	T_1	1.00
LINE 2	185.2	37.83	T_2	1.00
LINE 3	111.3	20.73	T_3	0.98
LINE 4	90.2	32.33	T_4	1.01
LINE 5	31.3	19.05	T_5	0.97
LINE 6	35.7	14.39	T_6	0.96
LINE 7	933.4	60.04	T_7	0.98
LINE 8	216.6	28.92	T_8	0.99
LINE 9	635.1	40.44	T_9	0.94
Line10	209.8	32.87		

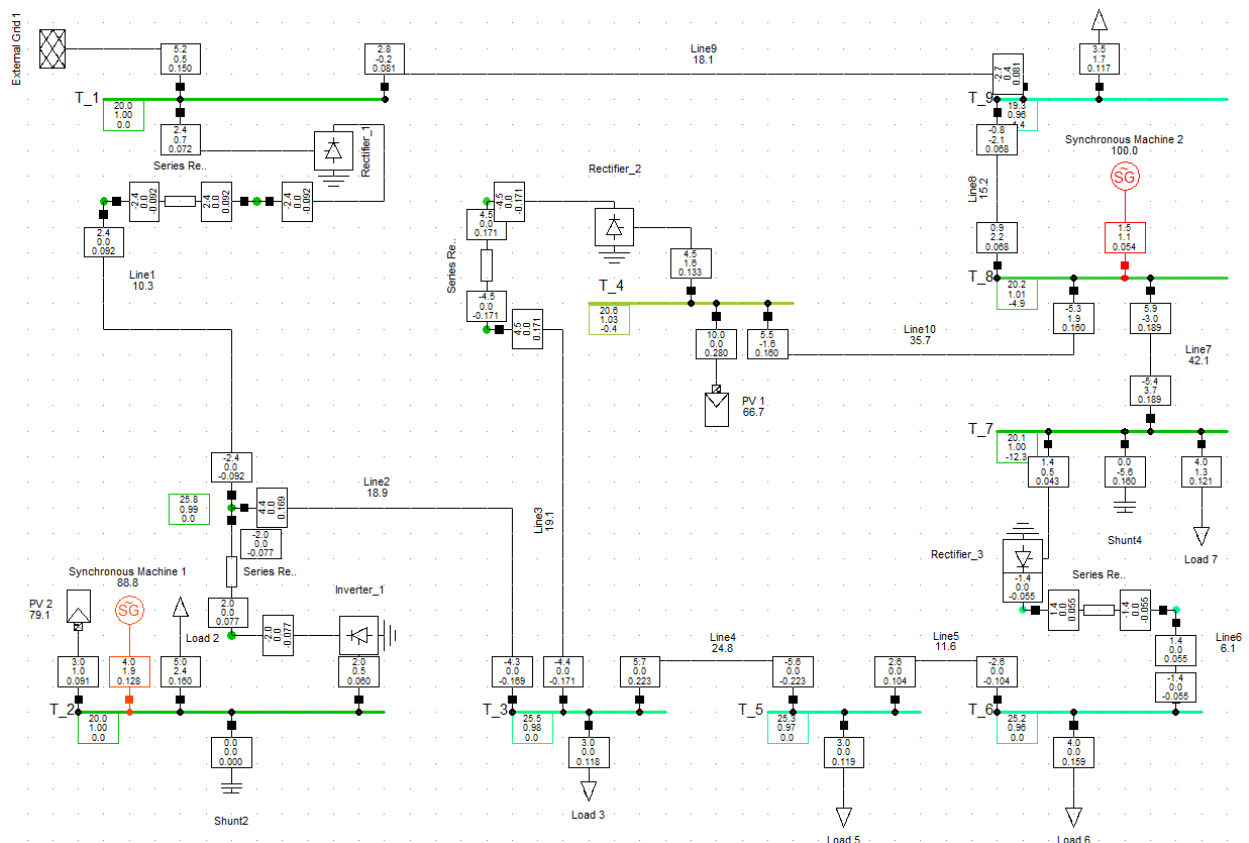
Από τα ανωτέρω, παρατηρούμε ότι η γραμμή με την μεγαλύτερη φόρτιση είναι η γραμμή Νο7, η οποία παρουσιάζει και τις μεγαλύτερες απώλειες (το οποίο είναι και το αναμενόμενο, λόγω της μεγάλης φόρτισής της). Η γραμμή Νο7 συνδέει τους ζυγούς Νο7 και Νο8, και εκεί έχουμε μια μεγάλη μεταφορά άεργου ισχύος από την διάταξη πυκνωτών του ζυγού Νο8 προς το υπόλοιπο δίκτυο. Στην φόρτιση των γραμμών ακολουθεί η γραμμή Νο9, η οποία όντας συνδεδεμένη στον ζυγό Νο1, μεταφέρει μεγάλο μέρος της ενεργού ισχύος που θα καταναλωθεί από τα φορτία του δικτύου. Παρατηρούμε επίσης ότι οι γραμμές Νο1 έως και την Νο6, έχουν χαμηλές φορτίσεις (με την μέγιστη φόρτιση και απώλειες να εμφανίζονται στην γραμμή Νο2), καθώς αποτελούν το κομμάτι του δικτύου που λειτουργεί με συνεχές ρεύμα και άρα διαρρέονται μόνο από ενεργό ισχύ. Τέλος, όσον αφορά τις τάσεις των ζυγών, ο Νο9 παρουσιάζει την μικρότερη (0,94 α.μ.) λόγω της παρουσίας του φορτίου το οποίο καταναλώνει μια σημαντική ποσότητα άεργου ισχύος και η οποία δεν δύναται να αντισταθμιστεί καθώς δεν μπορούμε να ελέγξουμε την ροή αυτής της ισχύος στις γραμμές εναλλασσομένου ρεύματος. Η μεγαλύτερη τάση (1,01 α.μ.) εμφανίζεται στον ζυγό Νο4 όπου έχουμε το μεγάλο φωτοβολταϊκό πάρκο.

5.1.2.2 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC με μειωμένη κατανάλωση.

Για τον επόμενο υπολογισμό, αλλάζουμε και πάλι την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ισχύ από τα στοιχεία του δικτύου, με σκοπό την αύξηση της τάσης των ζυγών. Οι αλλαγές που έγιναν είναι οι ίδιες ακριβώς που έγιναν και στο κεφάλαιο 4.2.2. Ωστόσο, απαιτείται τροποποίηση στην ισχύ που διοχετεύουν-αντλούν προς-από το δίκτυο οι converters, ώστε να ταυτίζεται και πάλι η ροή ισχύος με το αντίστοιχο δίκτυο που είναι καθαρά AC.

Πίνακας 14: Αλλαγές δικτύου για μειωμένη κατανάλωση

Ζυγός	Ονομαστική Τάση (kV)	Φορτίο (MVA)	Σ.Ι. Φορτίου	Γεννήτρια (MVA)	Σ.Ι. Γεννήτριας	Φ/B (MW)
T_3	20	3	1	-	-	-
T_6	20	4	1	-	-	-



Εικόνα 56: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC με μειωμένη κατανάλωση

Ακολουθούν και πάλι οι υπολογισθείσες τιμές στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 15: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας LCC, με μειωμένη κατανάλωση

Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	13.7	10.29	T_1	1.00
LINE 2	46.1	18.86	T_2	1.00
LINE 3	94.4	19.10	T_3	0.98
LINE 4	53.2	24.84	T_4	1.03
LINE 5	11.6	11.59	T_5	0.97
LINE 6	6.5	6.15	T_6	0.96
LINE 7	458.4	42.08	T_7	1.00
LINE 8	59.6	15.18	T_8	1.01
LINE 9	126.6	18.05	T_9	0.96
Line10	248.1	35.74		

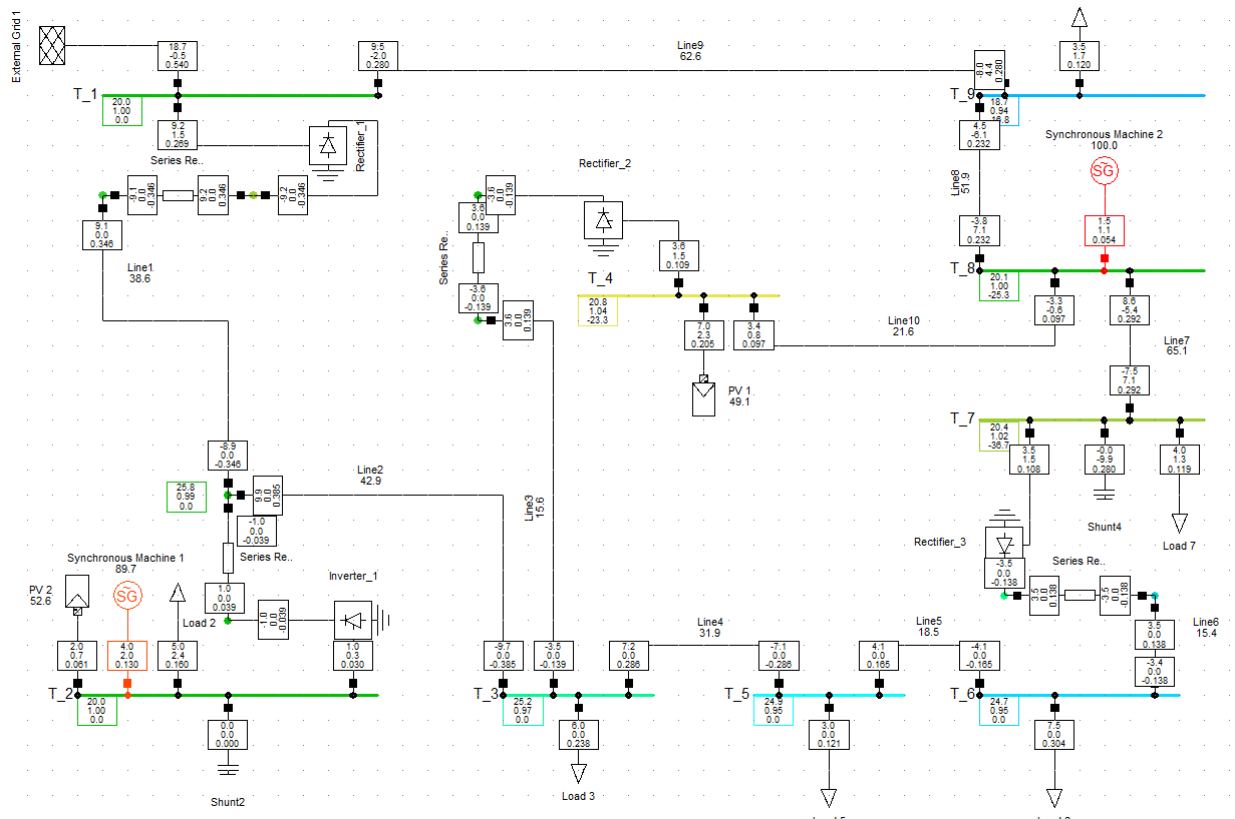
Από τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στον ανωτέρω πίνακα, παρατηρούμε ότι γενικά οι φορτίσεις και οι απώλειες είναι μικρότερες από τα δύο προηγούμενα σενάρια. Η γραμμή Νο7, έχει και την μεγαλύτερη φόρτιση αλλά και τις περισσότερες απώλειες, ενώ η γραμμή Νο10 είναι η επόμενη. Η γραμμή Νο10 συνδέει τον ζυγό Νο4 με τον Νο8 και μεταφέρει την ενεργό ισχύ που παράγει το φωτοβολταϊκό πάρκο στο υπόλοιπο δίκτυο που λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα. Εφόσον έχουμε μειωμένη κατανάλωση, δεν απαιτείται η εισροή μεγάλης ποσότητας ενεργούς ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο και για αυτό πλέον όλες οι υπόλοιπες γραμμές έχουν μικρότερες φορτίσεις και απώλειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γραμμή Νο6, η οποία έχει μόλις φόρτιση 6,15%, καθώς μεταφέρει μόνο 1,4MW ισχύος προς το ζυγό Νο6. Οι ζυγοί Νο9 και Νο6 έχουν την μικρότερη τάση (0,96 α.μ.) , καθώς βρίσκονται μακρύτερα από τις διαθέσιμες πηγές ενεργούς και άεργους ισχύος. Η μεγαλύτερη τάση για ακόμα μια φορά εμφανίζεται στον ζυγό Νο4 (1,03 α.μ.), μεγαλύτερη από τις προηγούμενες μελέτες, λόγω της μειωμένης κατανάλωσης των φορτίων.

5.1.2.3 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC με μειωμένη παραγωγή ισχύος.

Σε αυτήν την προσομοίωση, εφαρμόζονται οι ίδιες τροποποιήσεις που έγιναν στο κεφάλαιο 4.2.3. Επίσης, ρυθμίζονται και πάλι κατάλληλα οι Converters, ώστε να έχουμε παρόμοιο αποτέλεσμα στην ροή ισχύος μεταξύ του δικτύου AC και του νέου υβριδικού δικτύου.

Πίνακας 16: Αλλαγές δικτύου για μειωμένη παραγωγή ισχύος

Ζυγός	Ονομαστική Τάση (kV)	Φορτίο (MVA)	Σ.Ι. Φορτίου	Γεννήτρια (MVA)	Σ.Ι. Γεννήτριας	Φ/B (MW)
T_2	20	5,55	0,9	5	0,8	2
T_4	20	-	-	-	-	7



Εικόνα 57: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας LCC με μειωμένη παραγωγή ισχύος

Ακολουθούν οι αναλυτικές τιμές των αποτελεσμάτων, υπό μορφή πίνακα όπως προηγούμενως:

Πίνακας 17: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας LCC, με μειωμένη κατανάλωση

Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	193.3	38.64	T_1	1.00
LINE 2	238.7	42.94	T_2	1.00
LINE 3	62.7	15.56	T_3	0.97
LINE 4	87.9	31.91	T_4	1.04
LINE 5	29.4	18.45	T_5	0.95
LINE 6	41.1	15.43	T_6	0.95
LINE 7	1097.6	65.11	T_7	1.02
LINE 8	696.6	51.87	T_8	1.00
LINE 9	1521.5	62.59	T_9	0.94
Line10	90.7	21.61		

Παρατηρούμε για ακόμα μια φορά πως η γραμμή με την μεγαλύτερη φόρτιση είναι η Νο7 στην οποία ωστόσο δεν εμφανίζονται οι μεγαλύτερες απώλειες. Ο λόγος της υψηλής φόρτισης και αυτήν την φορά, είναι η μεταφορά μεγάλης ποσότητας άεργου ισχύος στο υπόλοιπο δίκτυο, ειδικά στην συγκεκριμένη μελέτη, όπου λόγω της μειωμένης παραγωγής των φωτοβολταϊκών η απαίτηση άεργου ισχύος στα πλαίσια διατήρησης ονομαστικής τάσης των ζυγών του δικτύου, είναι μεγαλύτερη. Οι μεγαλύτερες απώλειες στο συγκεκριμένο σενάριο, εντοπίζονται στην γραμμή Νο9. Η γραμμή Νο9 αν και έχει ελαφρώς λιγότερη φόρτιση από την γραμμή Νο7, 62.59% έναντι του 65.11%, παρουσιάζει τις μεγαλύτερες απώλειες διότι μεταφέρει μεγάλη ποσότητα ενεργού ισχύος και είναι κατά 10 χιλιόμετρα μεγαλύτερη από τη γραμμή Νο7. Αυτοί οι δύο παράγοντες οδηγούν στις αυξημένες απώλειες ενώ η φόρτιση είναι μικρότερη. Οι φορτίσεις των γραμμών που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα είναι και πάλι αρκετά μικρότερες από τις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου, λόγω της απουσίας ροής άεργου ισχύος. Τέλος, όσον αφορά τα επίπεδα των τάσεων των ζυγών, η μικρότερη τάση εμφανίζεται στον ζυγό Νο9, ενώ η μεγαλύτερη στον ζυγό Νο4, όπως και πριν.

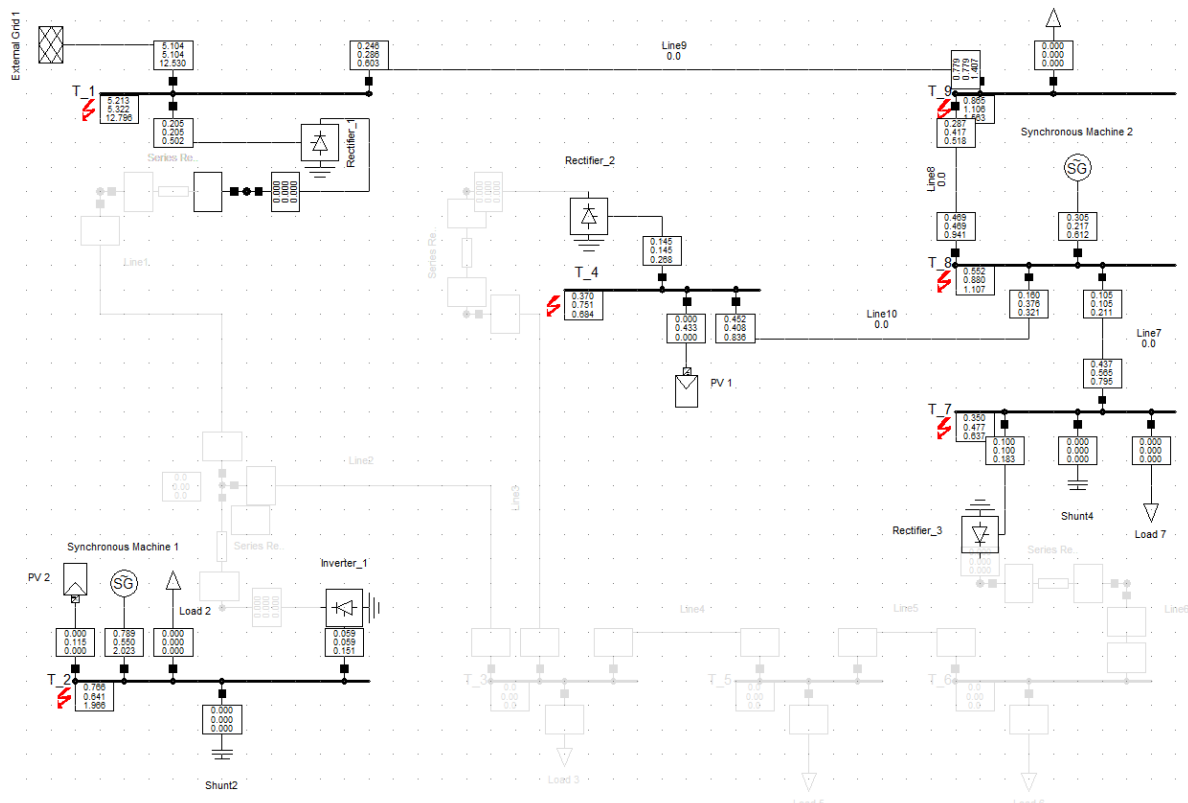
5.1.3 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυο εννέα ζυγών τοπολογίας LCC

Έχοντας και πάλι ολοκληρώσει τις προσομοιώσεις της ροής φορτίου υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας, όπως και στο κεφάλαιο 4.3, θα προβούμε στη διεξαγωγή σφαλμάτων στα ίδια τμήματα του δικτύου, ώστε στο τέλος να συγκρίνουμε το σύνολο αποτελεσμάτων. Τα μεγέθη πάνω στα οποία θα επικεντρωθούμε είναι τα ίδια όπως στο κεφάλαιο με το AC δίκτυο (Skss, Ikss, Ipeak).

Και πάλι, οι προσομοιώσεις θα διεξαχθούν με χρήση της μεθόδου «Complete», και τα σφάλματα θα πραγματοποιηθούν στα ίδια τμήματα όπως και στο δίκτυο που ήταν εξολοκλήρου AC.

5.1.3.1 Υπολογισμός σφαλμάτων σε σύνολο ζυγών δικτύου τοπολογίας LCC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete

Αρχικά, όπως και προηγουμένως, εκτελούμε τη διεξαγωγή σφαλμάτων, με βάση τη μέθοδο “complete” στο σύνολο των ζυγών. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται το αποτέλεσμα της μεθόδου για τριφασικό σφάλμα:



Εικόνα 58: Αποτέλεσμα υλοποίησης τριφασικού βραχυκυκλώματος με βάση της μεθόδου Complete στο σύνολο των ζυγών δικτύου τοπολογίας LCC

Η ανωτέρω διαδικασία επαναλήφθηκε για την διεξαγωγή και των υπόλοιπων σφαλμάτων με τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 18: Αποτελέσματα υλοποίησης βραχυκυκλωμάτων με τη μέθοδο Complete στο σύνολο των ζυγών δικτύου τοπολογίας LCC

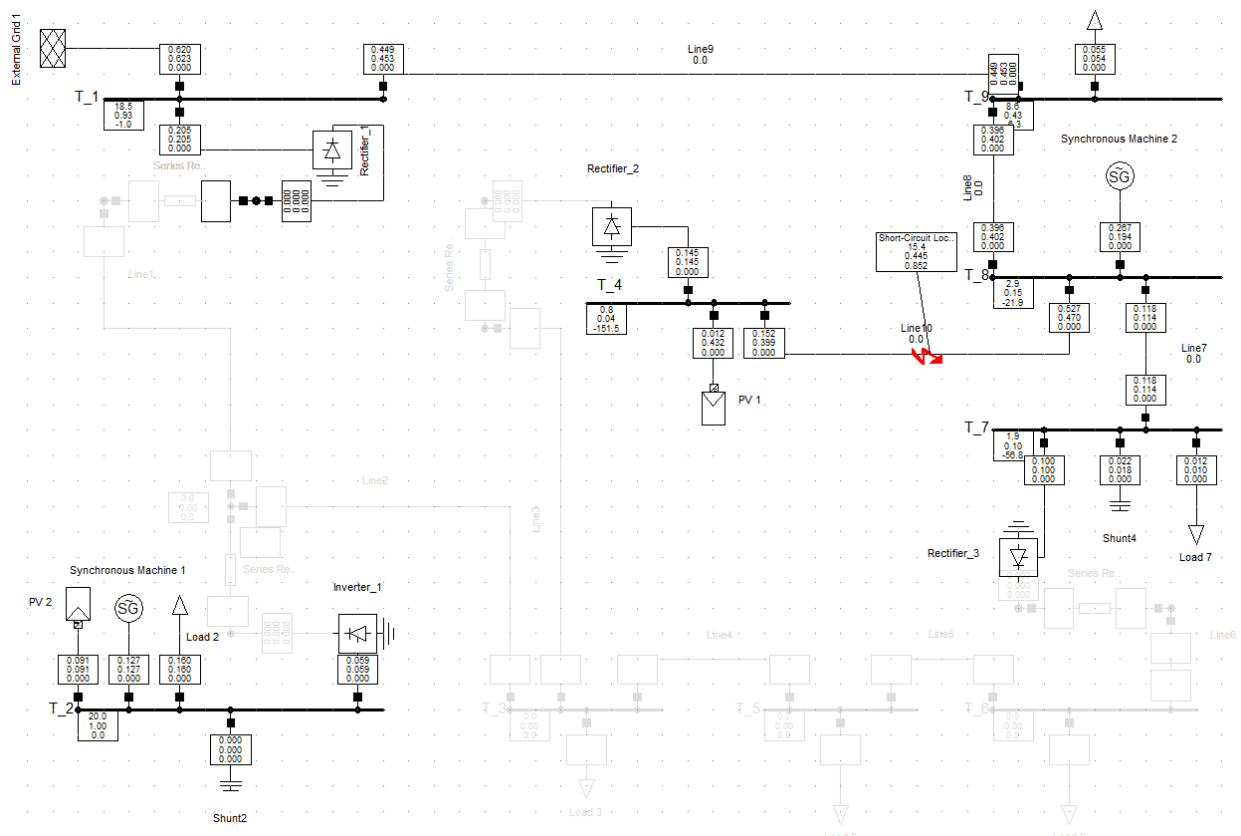
Busbar	Τριφασικό Βραχυκύκλωμα			Διφασικό Βραχυκύκλωμα			Μonoφασικό Βραχυκύκλωμα		
	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	I_p (kA)	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	I_p (kA)	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	I_p (kA)
T_1	180.57	5.21	12.80	52.07	4.51	11.07	11.55	1.00	2.46
T_2	26.54	0.77	1.97	7.85	0.68	1.74	9.68	0.84	2.15
T_4	12.81	0.37	0.68	4.44	0.38	0.71	3.99	0.35	0.64
T_7	12.14	0.35	0.64	3.80	0.33	0.60	3.48	0.30	0.55
T_8	19.11	0.55	1.11	6.23	0.54	1.08	6.47	0.56	1.13
T_9	29.98	0.87	1.56	9.18	0.80	1.44	6.40	0.55	1.00

Οι μέγιστες τιμές ισχύος και ρευμάτων εμφανίζονται στον ζυγό Νο1, το οποίο αποτελεί και λογικό αποτέλεσμα, όντας ο ζυγός στον οποίο συνδέεται το εξωτερικό δίκτυο. Στο συμμετρικό σφάλμα, ο ζυγός Νο9 παρουσιάζει τις αμέσως μεγαλύτερες τιμές ενώ ακολουθεί ο ζυγός Νο2, ο οποίος αν και απομονωμένος από τους υπόλοιπους ζυγούς AC

λόγω του δικτύου συνεχούς ρεύματος, εμφανίζει μεγάλες τιμές ρεύματος και ισχύος βραχυκύκλωσης, συγκριτικά με τους υπόλοιπους ζυγούς, λόγω της συμβολής των γεννητριών και του μετατροπέα. Οι τιμές των υπόλοιπων ζυγών είναι παραπλήσιες κατά το συμμετρικό σφάλμα. Στα ασύμμετρα σφάλματα, τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια, με τους ζυγούς No2 και No9 να εμφανίζουν για ακόμα μια φορά τις μεγαλύτερες τιμές.

5.1.3.2 Υπολογισμός σφαλμάτων σε γραμμή No10 δικτύου τοπολογίας LCC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete

Στη συνέχεια, εκτελούμε το σύνολο σφαλμάτων στο 50% του συνολικού μήκους (δηλαδή στα 7,5 km από τον ζυγό No4) της γραμμής No10. Στην επόμενη εικόνα, φαίνεται το αποτέλεσμα που προκύπτει από την εκτέλεση τριφασικού σφάλματος.



Εικόνα 59: Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος σύμφωνα με τη μέθοδο Complete στο 50% του συνολικού μήκους της γραμμής No10

Στο ανωτέρω σημείο εκτελέστηκαν επίσης ένα διφασικό και ένα μονοφασικό σφάλμα, όπως ακριβώς έγινε και στο δίκτυο που λειτουργούσε εξολοκλήρου σε AC. Στον

πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται τα αποτελέσματα με τον ίδιο τρόπο που παρουσιάστηκαν για το αρχικό μας δίκτυο:

Πίνακας 19: Αποτελέσματα σφαλμάτων στο 50% του μήκους της γραμμής Νο10

	Τιμές στο σημείο σφάλματος		I _k '' (kA)			I _k '' (kA)		
			Μετά από διφασικό σφάλμα			Μετά από μονοφασικό σφάλμα		
			A	B	C	A	B	C
S _k '' (MVA)	15.4	Γραμμή 10	0	0.534	0.534	0.479	0	0
I _k '' (kA)	0.445							
I _p (kA)	0.852							

Στον πίνακα που ακολουθεί, υποτυπώνονται οι πτώσεις τάσεως για το συμμετρικό σφάλμα, όπως επίσης και οι τάσεις των ζυγών για τα μη συμμετρικά σφάλματα:

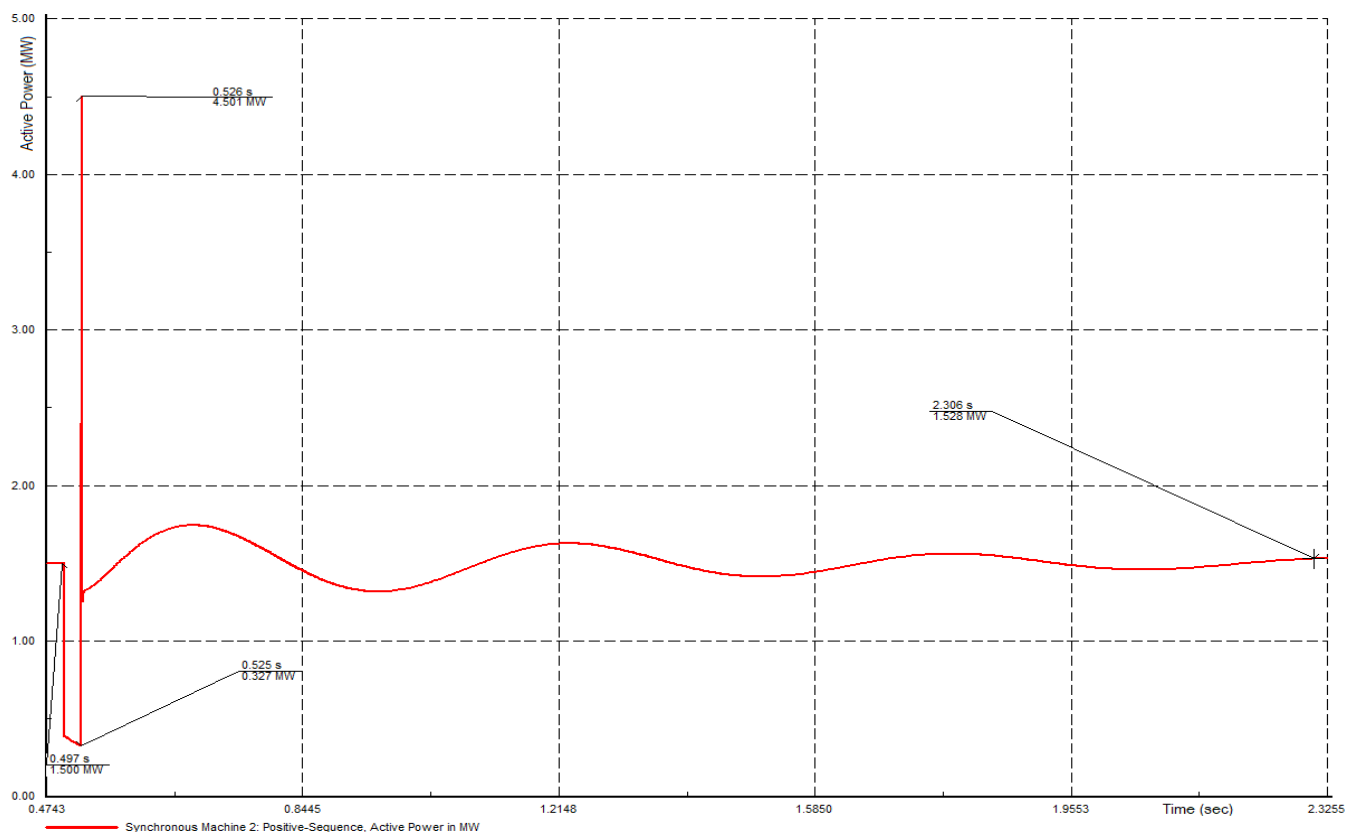
Τάσεις Ζυγών σε τριφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 20kV)		Τάσεις Ζυγών σε διφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 11,57kV ανά φάση)			Τάσεις Ζυγών σε μονοφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 11,57kV ανά φάση)		
Ζυγός	Τάση ζυγού	Φάση A	Φάση B	Φάση C	Φάση A	Φάση B	Φάση C
T_1	18.53	11.48	10.90	10.90	10.38	10.90	12.68
T_2	20.00	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55
T_4	0.85	10.09	5.12	4.97	0.16	13.52	10.12
T_7	1.93	9.87	5.28	4.76	2.43	12.44	8.46
T_8	2.93	10.10	5.09	5.41	2.53	12.42	9.49
T_9	8.63	9.84	5.84	7.18	5.15	11.24	10.23

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα, προκύπτει ότι η μεγαλύτερη πτώση τάσης εντοπίζεται στον ζυγό Νο4 , ο οποίος βρίσκεται στο ένα άκρο της γραμμής που διεξάγεται το σφάλμα. Αμέσως μετά, ακολουθεί ο ζυγός Νο7, ο οποίος αν και δεν είναι άμεσα συνδεδεμένος με την γραμμή Νο10, έχει μεγαλύτερη πτώση τάσης από τον ζυγό Νο8, οποίος είναι. Αυτό συμβαίνει διότι στο ζυγό Νο8, υπάρχει η γεννήτρια η οποία συμβάλει έστω και με ένα μικρό ποσοστό στη διατήρηση της τάσης, ενώ ο ζυγός Νο7 έχει μόνο φορτία και τον

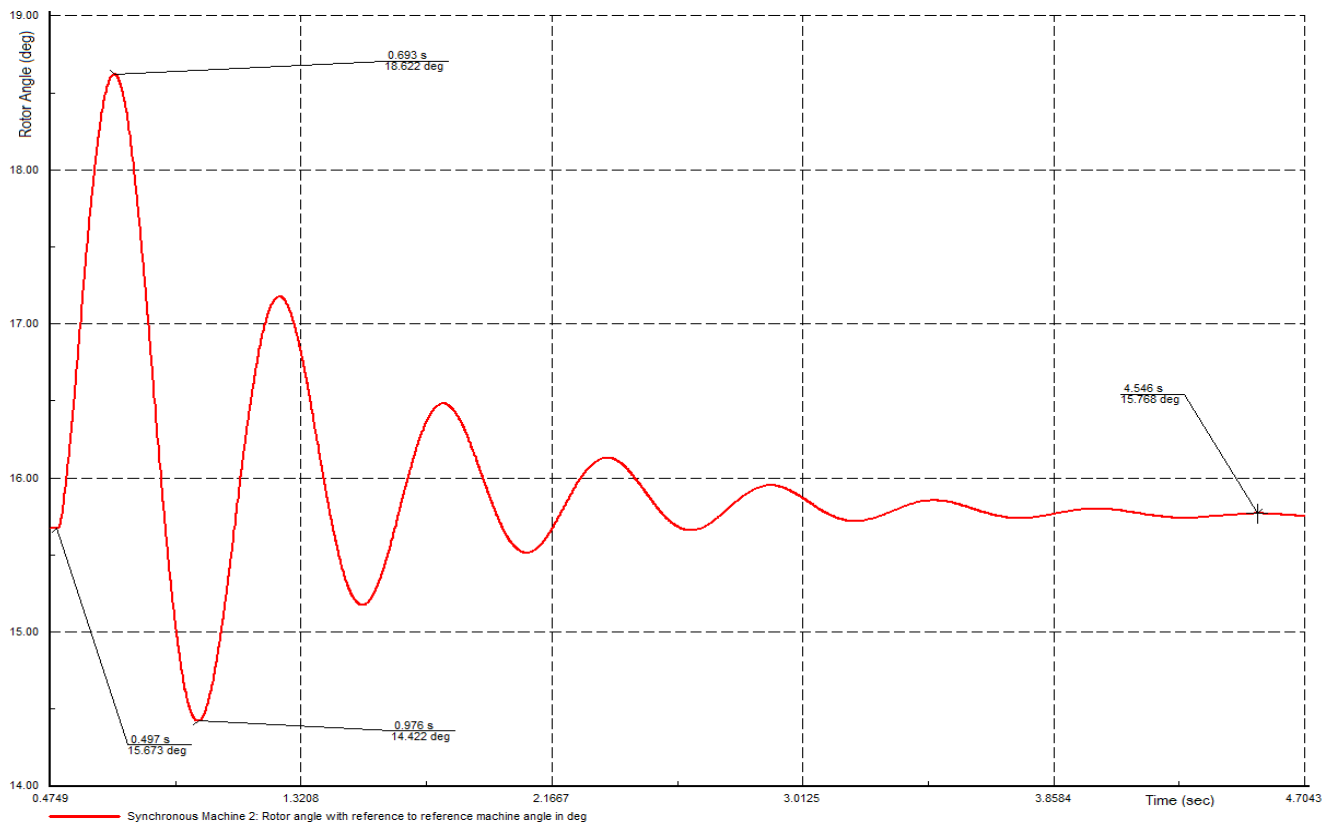
μετατροπέα. Έμφαση θα πρέπει να δοθεί στον ζυγό No2, ο οποίος διατηρεί την τάση του στο ονομαστικό επίπεδο (20kV), ανεξαρτήτως του βραχυκυκλώματος. Όπως προαναφέραμε, ο ζυγός No2 είναι απομονωμένος από τους υπόλοιπους ζυγούς AC, και έτσι η επιρροή των σφαλμάτων που προκύπτουν σε αυτούς έχουν πολύ μικρό αντίκτυπο. Οι ανωτέρω παρατηρήσεις ισχύουν και για τα ασύμμετρα σφάλματα, με τη μοναδική επιπλέον παρατήρηση, του εντοπισμού μεγαλύτερης της ονομαστικής τάσης σε κάποιες φάσεις που δεν μετέχουν στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα.

5.1.4 Εκτέλεση RMS Αξιολόγησης σε δίκτυο εννέα ζυγών τοπολογίας LCC

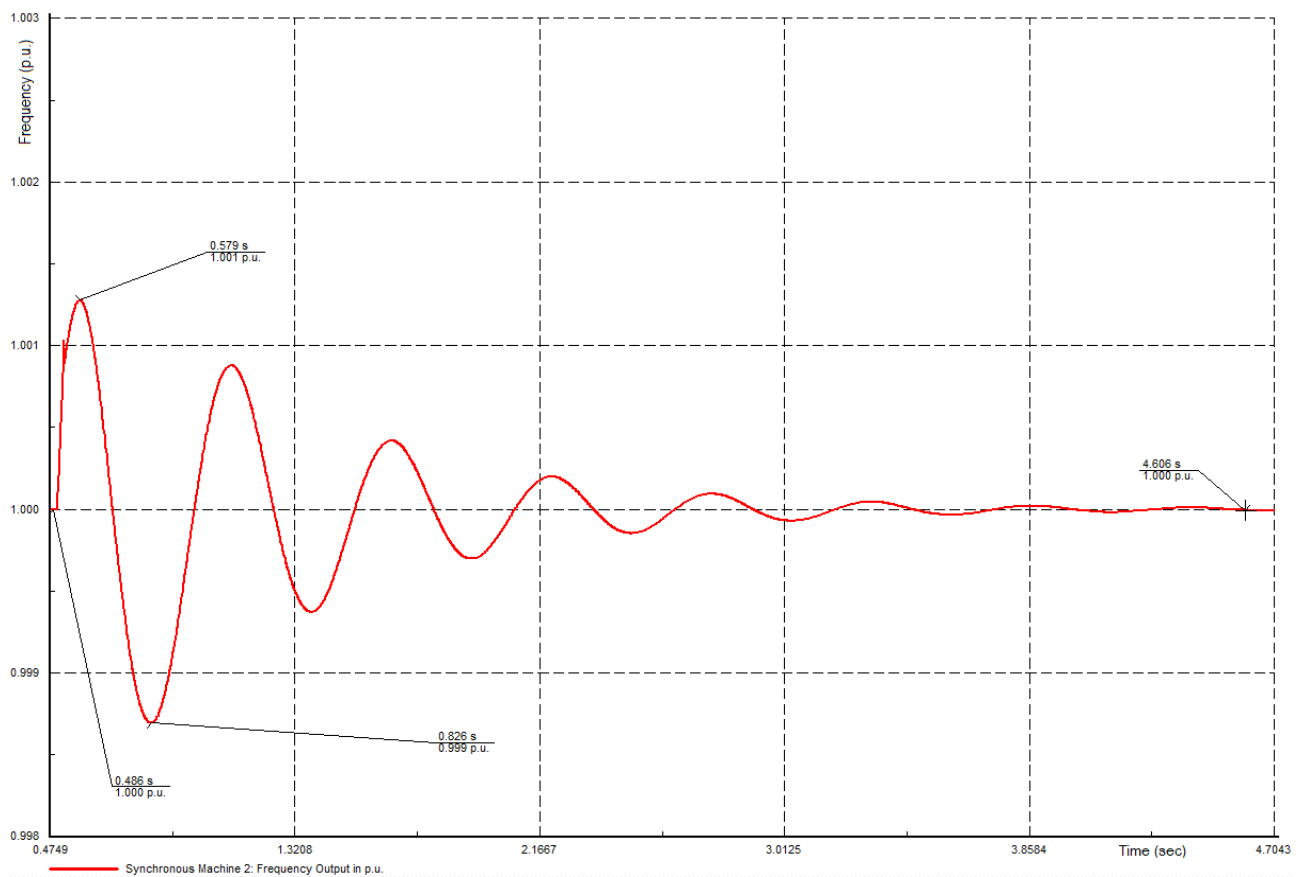
Όπως και στο κεφάλαιο 4.4, έτσι και εδώ, θα μελετήσουμε την συμπεριφορά και απόκριση του δικτύου και των στοιχείων του, σε μεταβατικά φαινόμενα, μέσω της ανάλυσης RMS. Και πάλι για να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα, θα εκτελεστεί ακριβώς το ίδιο σφάλμα και θα γίνει η αποκατάστασή του στον ίδιο χρόνο με αυτόν της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε στο δίκτυο που ήταν εξολοκλήρου AC. Εφόσον λοιπόν έχουμε ρυθμίσει τα ανωτέρω, όπως επίσης και ορίσει το μοντέλο ελέγχου της γεννήτριας No2 και του φωτοβολταϊκού πάρκου, εκτελούμε την προσομοίωση. Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:



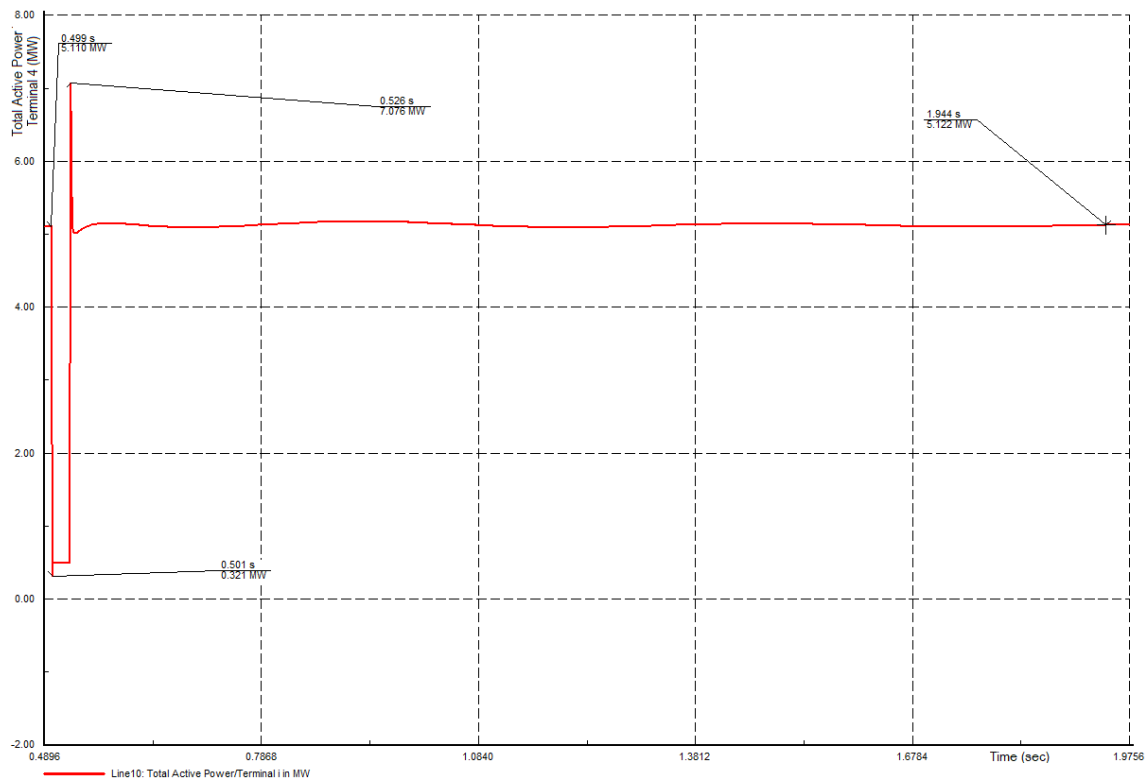
Διάγραμμα 6: Παραγόμενη Ενεργός Ισχύς γεννήτριας No2 δικτύου με LCCs



Διάγραμμα 7: Γωνία ρότορα γεννήτριας Νο2 δικτύου με LCCs

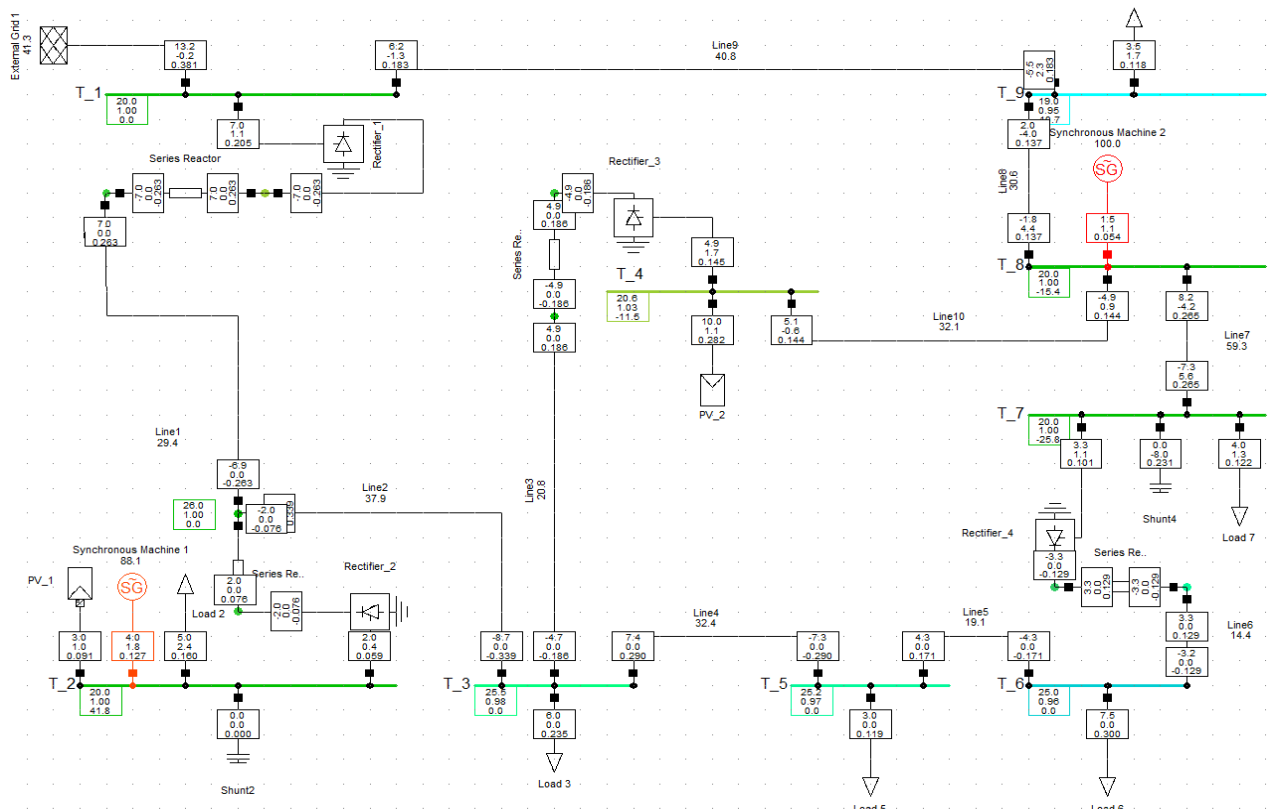


Διάγραμμα 8: Συχνότητα γεννήτριας Νο2 δικτύου με LCCs



Διάγραμμα 9: Συνολική μεταφερόμενη ενεργός ισχύς μέσω της γραμμής Νο10

Τέλος, όπως και προηγουμένως επισυνάπτεται εικόνα από το αποτέλεσμα της ροής φορτίου που εκτελεί το power factory με κατά την RMS μελέτη:



Εικόνα 60: Ροή φορτίου στο δίκτυο με LCCs, μετά την ολοκλήρωση RMS μελέτης

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της μελέτης για τη γεννήτρια No2, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί, και πάλι ο χρόνος επαναφοράς κατάστασης προ σφάλματος, είναι ο απόλυτος χρόνος μετά την επαναφορά του σφάλματος στα 0,525sec της προσομοίωσης:

Πίνακας 20: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα RMS αξιολόγησης δικτύου με LCCs

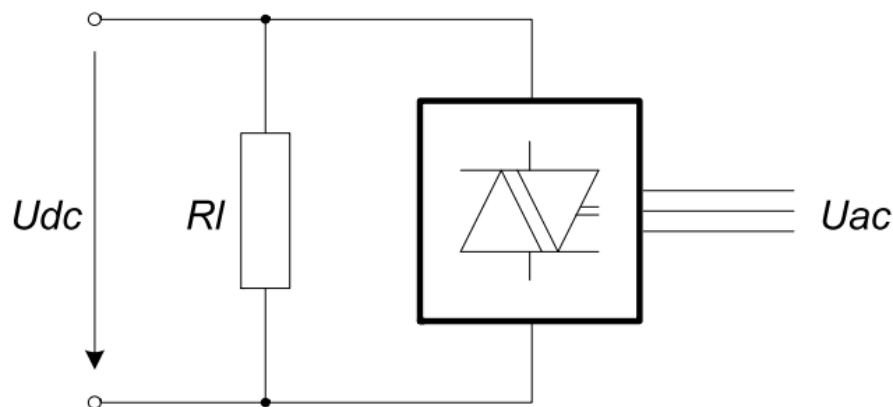
	Αρχική τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τελική τιμή	Χρόνος επαναφοράς κατάστασης προ σφάλματος
Ενεργός Ισχύς Gen_No2	1,5 MW	4,5 MW	0,327 MW	1,528 MW	1,781 s
Γωνία Ρότορα Gen_No2	15,673 Deg	18,622Deg	14,422 Deg	15,768 Deg	4,021 s
Συχνότητα Gen_No2	1 pu	1,001 pu	0,999 pu	1 pu	4,081 s
Ενεργός Ισχύς Γραμμής No10	5,11 MW	7,076 MW	0,321 MW	5,12 MW	1,419 s

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα, συμπεραίνουμε πως και πάλι, τα μεγέθη της ισχύος επιστρέφουν στις πρωταρχικές τιμές γρηγορότερα από ότι η συχνότητα και η γωνία του ρότορα της γεννήτριας No2 (σχεδόν 2,5 sec πιο γρήγορα). Επίσης παρατηρούμε, την μεγάλη διακύμανση στις τιμές της ενεργού ισχύος που διέρχεται από τη γραμμή No10, λόγω της απόκρισης του ελεγκτή του φωτοβολταϊκού πάρκου, συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στον ανωτέρω πίνακα, η χαμηλότερη τιμή είναι 0,321 MW ενώ η μεγαλύτερη είναι 7,076 MW. Αυτή η διακύμανση επηρεάζει και την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας No2, καθώς παρατηρείται και εκεί μια μεγάλη διακύμανση στις τιμές ισχύος. Τέλος, από το διάγραμμα No9, το οποίο αφορά την ισχύ που εισέρχεται στη γραμμή No10, παρατηρούμε πως η ευθεία της απόκρισης έχει μια πολύ ελαφριά ημιτονοειδή μορφή σχεδόν ανεπαίσθητη, και άρα θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι επιτυγχάνεται η τιμή προ του σφάλματος ελάχιστα εκατοστά του δευτερολέπτου μετά την αποκατάστασή του, για παράδειγμα για χρόνο 0,8 sec, το οποίο αντιστοιχεί σε 0,275 sec μετά την αποκατάσταση του σφάλματος.

5.2 Μετατροπή Δικτύων Μέσης Εναλλασσόμενης Τάσης σε Συνεχούς Τάσης με χρήση VSC

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε την δεύτερη τοπολογία που θα εξετάσουμε, η οποία χρησιμοποιεί Variable Source Converters (VSCs). Οι εν λόγω μετατροπείς, χρησιμοποιούν διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (insulated gate bipolar transistor), ευρέως γνωστά και ως IGBTs, τα οποία ελέγχονται μέσω παλμών, έχουμε δηλαδή PWM διαμόρφωση. Για αυτόν τον λόγο και το στοιχείο που θα χρησιμοποιήσουμε στο Power Factory για να υλοποιήσουμε την συγκεκριμένη τοπολογία, ονομάζεται “PWM Converter”. Το πρόγραμμα και πάλι μας δίνει δύο επιλογές για αυτό το στοιχείο, μία με τρεις ακροδέκτες (ένας για το AC, και δύο για το DC) ενώ η άλλη επιλογή είναι με δύο ακροδέκτες (ένας για το AC, ένας για το DC και ο προηγούμενος τρίτος ακροδέκτης είναι γειωμένος). Εμείς, όπως και για τους LCC, θα χρησιμοποιήσουμε το γειωμένο στοιχείο, και άρα θα επιλέξουμε το “PWM Converter/ 1 DC Connection”.

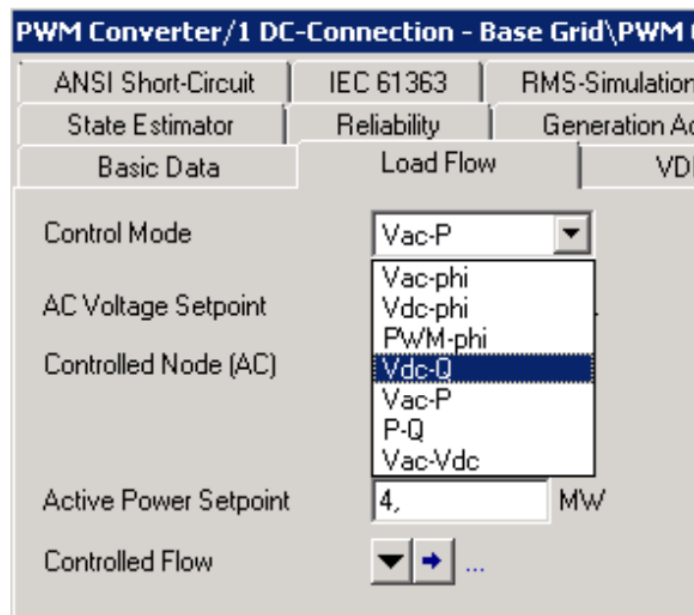
Όσον αφορά τις απώλειες της εν λόγω διάταξης, οι σημαντικότερες είναι οι διακοπτικές, οι οποίες αναφέρονται και ως “No load losses” και μπορούν να αναπαρασταθούν με χρήση αντιστάσεων παράλληλα συνδεδεμένες με τις γραμμές DC. Ωστόσο, αυτήν την φορά το πρόγραμμα τις έχει ήδη ενσωματωμένες στα στοιχεία και επομένως εμείς ορίζουμε απλά τη συνολική ισχύ απωλειών. Παρακάτω φαίνεται το απλό ισοδύναμο κύκλωμα ενός PWM Converter με διακοπτικές απώλειες [28].



Εικόνα 61: PWM – Converter με ισοδύναμη αντίσταση που αναπαριστά τις διακοπτικές απώλειες

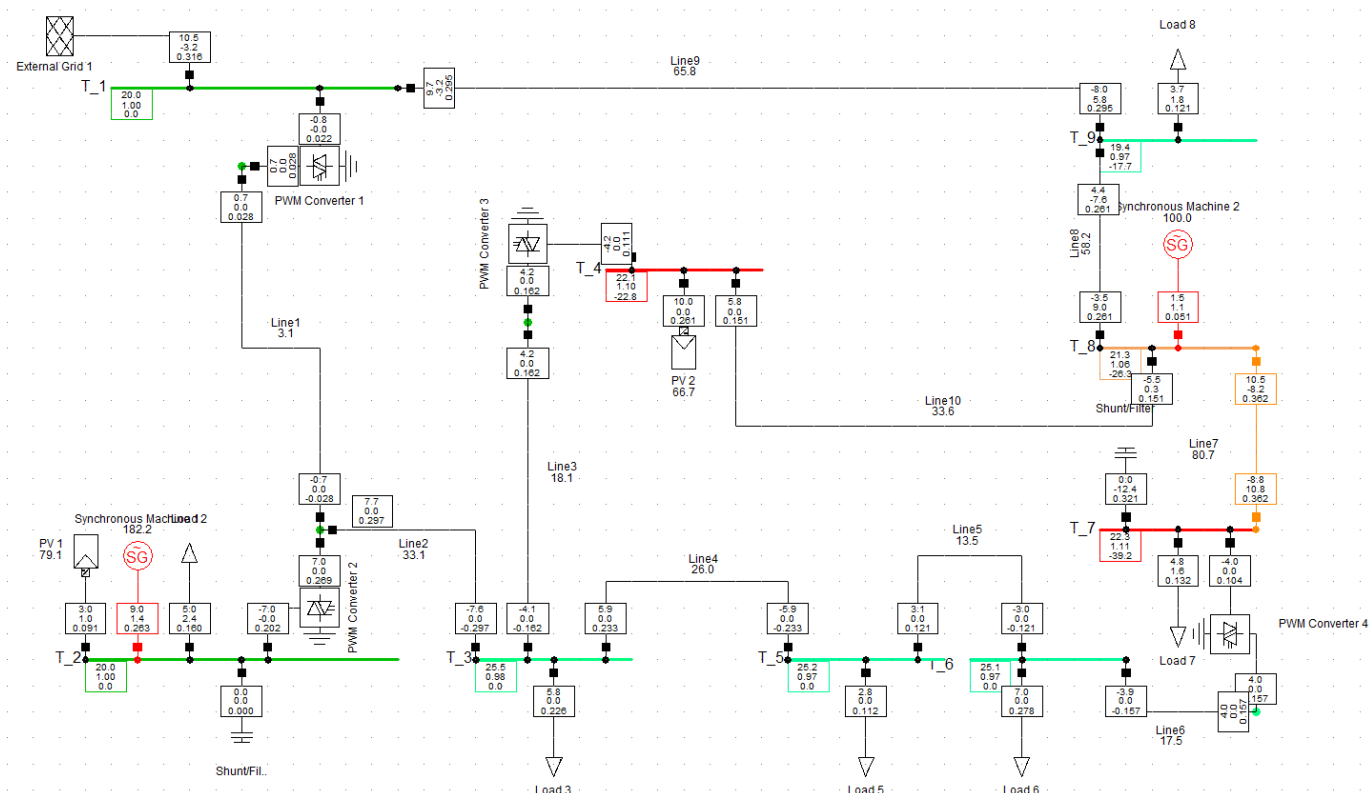
Όπως και στην περίπτωση των LCC, όσον αφορά την μελέτη ροής φορτίου, έτσι και εδώ μας δίνεται η δυνατότητα να μπορούμε να επιλέξουμε από μια πληθώρα μεγεθών τα οποία θέλουμε να ελέγξουμε. Σε αντίθεση με τους LCCs, όπου η ροή φορτίου είναι μόνο προς τη μία κατεύθυνση και άρα πρέπει να ορίσουμε από πριν αν θα λειτουργήσουν ως ανορθωτές

ή ως αντιστροφείς, στα VSCs η ροή φορτίου είναι αμφίδρομη. Επομένως μπορούμε να διαχειριστούμε ανεξάρτητα την παραγόμενη AC τάση από τη διαφορά φάσης της, το οποίο με τη σειρά του μας δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της ενεργούς ισχύος ανεξάρτητα από την άεργο και εν τέλη, μπορούμε ταυτόχρονα να ελέγχουμε δύο μεγέθη (είτε είναι καθαρά ισχύς, είτε τάσεις είτε ρεύματα).



Εικόνα 62: Επιλογές ρύθμισης ροής φορτίου σε PWM Converter

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο με τα LCCs, έτσι και εδώ ο έλεγχος της AC τάσης ή του Συντελεστή ισχύος μέσω της γωνίας ϕ (“phi” όπως αναγράφεται στο πρόγραμμα) είναι δύσκολος και προκύπτουν σφάλματα από την εφαρμογή του, καθώς σε όλους σχεδόν τους ζυγούς από την πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος των VSCs, υπάρχουν άλλα στοιχεία που ήδη ελέγχουν τα συγκεκριμένα μεγέθη. Ωστόσο, όπως και πριν, εκτελέστηκαν διάφορες δοκιμές όσον αφορά τον έλεγχο των διατάξεων, όπως είναι η ακόλουθη όπου εφαρμόστηκε εξολοκλήρου έλεγχος της Vdc και της άεργου ισχύος με επιθυμητές τιμές 1 α.μ. και 0 αντίστοιχα.



Εικόνα 63: Επίλυση ροής φορτίου σε δίκτυο τοπολογίας VSC, με εφαρμογή ελέγχου Vdc και άεργου ισχύος

Όπως φαίνεται στην εικόνα 62, ενώ και πάλι το πρόγραμμα επιλύει τη ροή φορτίου, η επίλυση αυτή οδηγεί στην εμφάνιση υψηλών τιμών τάσεως στους ζυγούς AC, όπως για παράδειγμα στον ζυγό No4 και στον ζυγό No7, όπου η τάση φτάνει στο 1,1 α.μ. και 1,11 α.μ. αντίστοιχα, και στην μεγάλη φόρτιση των AC γραμμών όπως είναι η γραμμή No7, με φόρτιση στο 80,7%. Άρα, για ακόμα μια φορά, μόνο ο έλεγχος των DC τάσεων των ζυγών, δεν επαρκεί.

Τέλος, εφαρμόστηκε και ο έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος στο σύνολο των διατάξεων, με ικανοποιητικά αποτελέσματα υπολογισμού. Ωστόσο, με αυτόν τρόπο χάνεται η ευελιξία που έχουμε όσον αφορά την ροή ενέργειας από το εξωτερικό δίκτυο σε περίπτωση μεταβολής κάποιου φορτίου ή μονάδας παραγωγής. Επομένως και πάλι θα εφαρμοστεί στο σύνολο των προσομοιώσεων ο τρόπος ελέγχου που εφαρμόστηκε και στην τοπολογία LCC. Δηλαδή ο ανορθωτής που συνδέεται με το εξωτερικό δίκτυο θα κάνει έλεγχο της DC τάσης και της άεργου ισχύος, ενώ όλοι οι υπόλοιποι ανορθωτές και αντιστροφείς θα ελέγχουν την ροή ενεργού και άεργου ισχύος.

Για την προσομοίωσή μας, επιλέξαμε έτσι τις απώλειες ώστε να ανταποκρίνονται στο 1% της μεταφερόμενης ισχύος και ρυθμίσαμε και πάλι την ονομαστική AC τάση στα 20kV

καθώς και την ονομαστική DC τάση στα 26.089kV. Ακολουθούν εικόνες από τη ρύθμιση ενός τέτοιου στοιχείου:

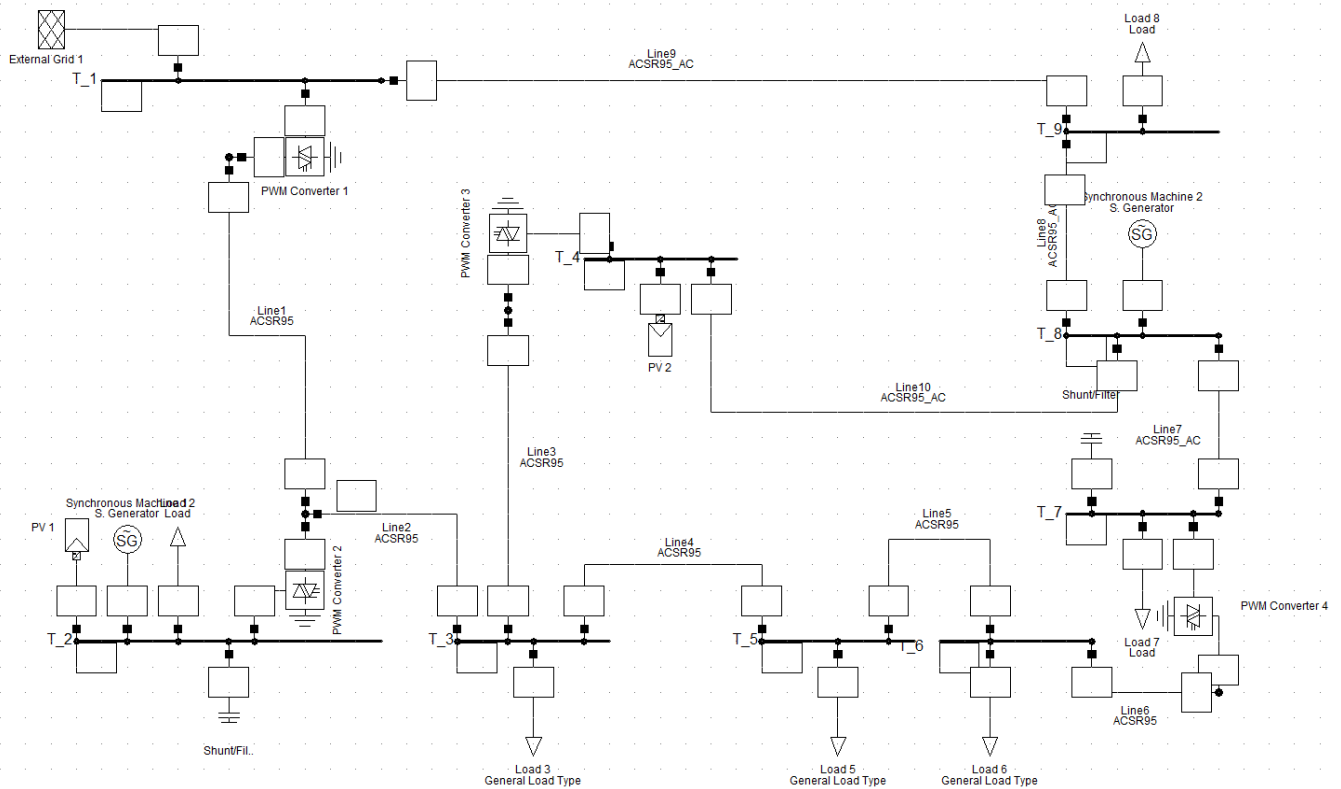
The screenshot shows the 'PWM Converter/1 DC-Connection - Grid\PWM Converter 2.ElmVscmono *' dialog box. The 'Basic Data' tab is selected. The 'Name' field is 'PWM Converter 2'. The 'Terminal AC' is 'Grid\T_3\Cub_7' and the 'Terminal DC' is 'Grid\Terminal(2)\Cub_1'. The 'Zone' and 'Area' are both 'Terminal AC'. The 'Out of Service' checkbox is unchecked. The 'Number of parallel Converters' is '1'. The 'Ratings' section shows 'Rated AC-Voltage' as '20.' kV, 'Rated DC-Voltage (DC)' as '26.089' kV, and 'Rated Power' as '2.7' MVA. The 'Modulation' section has 'Sinusoidal PWM' selected. The 'Series Reactor' section shows 'Short Circuit Impedance' as '0.' % and 'Copper Losses' as '0.' kW. The 'No-Load Losses' are '27.' kW. The 'Model' field is empty.

Εικόνα 64: Ορισμός PWM – Converter

The screenshot shows the 'PWM Converter/1 DC-Connection - Grid\PWM Converter 2.ElmVscmono *' dialog box, 'Advanced' tab. The 'Control Mode' is 'P-Q'. The 'Wind Generator Model' checkbox is unchecked. The 'Active Power Setpoint' is '2.7' MW and the 'Reactive Power Setpoint' is '0.' Mvar. The 'Controlled Flow' and 'External Station Controller' are both set to '...'. The 'Reactive Power Limits' section shows 'Min.' as '-1.' p.u. and 'Max.' as '1.' p.u. The 'Scaling Factor (min.)' and 'Scaling Factor (max.)' are both '100.' %. The 'Setpoint for DC Load Flow' section shows 'Active Power Setpoint' as '2.7' MW and 'Controlled Flow' as '...'. A 'Capability Curve' plot is shown on the right, displaying a circle with axes 'p' and 'q' ranging from -1.00 to 1.00.

Εικόνα 65 Ρύθμιση ροής φορτίου PWM – Converter

Παρακάτω, φαίνεται το δίκτυο εννέα ζυγών, τροποποιημένο με βάση το μοντέλο VSC – MVDC:



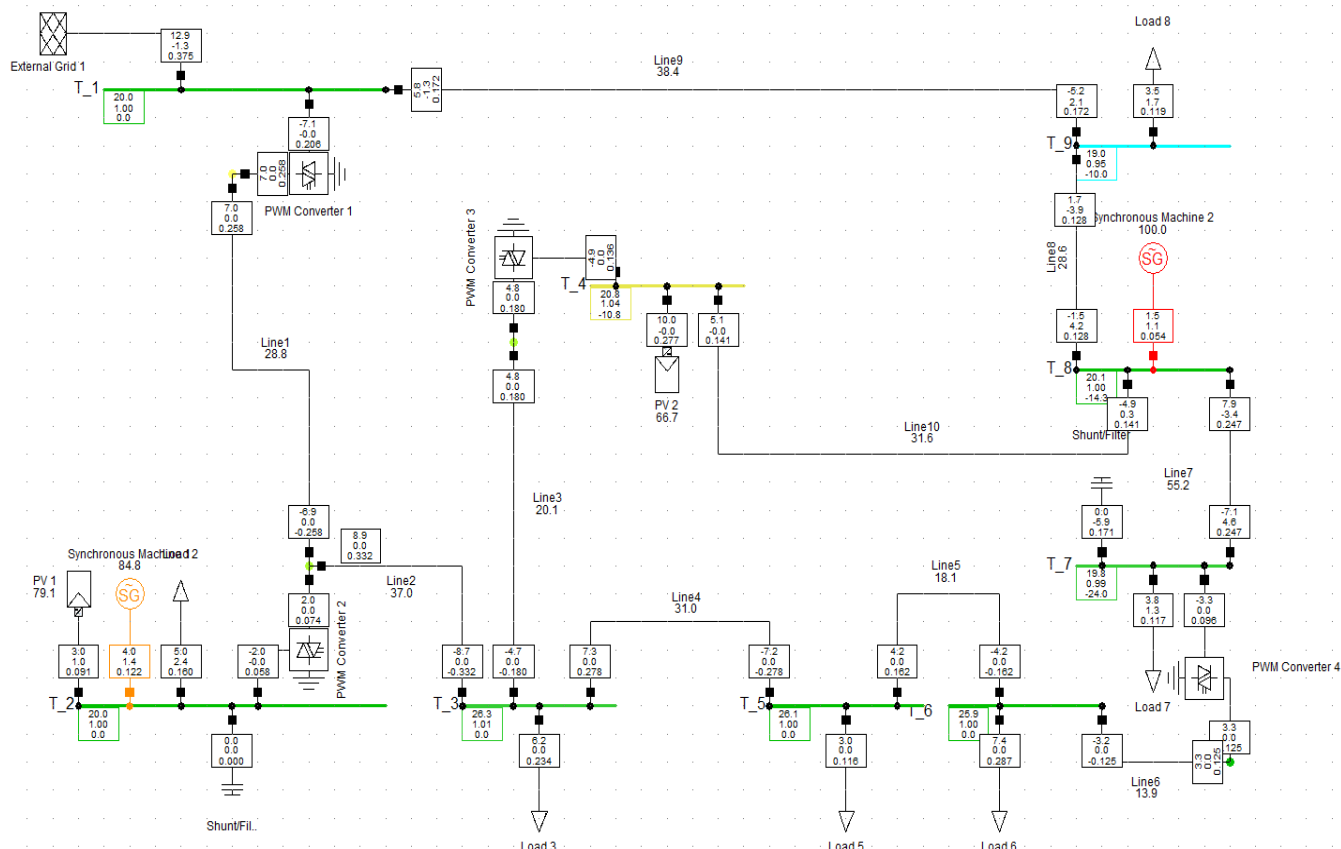
Εικόνα 66: Δίκτυο εννέα Ζυγών με τοπολογία VSC

5.2.2 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Όπως και προηγουμένως, στη συνέχεια θα εξετάσουμε τη συγκεκριμένη τοπολογία υπό τα ίδια ακριβώς σενάρια φόρτισης που υποβάλλαμε και τα προηγούμενά μας δίκτυα.

5.2.2.1 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC υπό τυπική φόρτιση (base scenario).

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του υπολογισμού της ροής φορτίου, για το νέο δίκτυο, στη λειτουργία σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario).



Εικόνα 67: Αποτέλεσμα υπολογισμού ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας VSC σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

Επισυνάπτεται όπως και τις προηγούμενες φορές, τα αποτελέσματα του υπολογισμού, συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 21: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας VSC σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	105.1	28.50	T_1	1.00
LINE 2	174.2	36.68	T_2	1.00
LINE 3	106.2	20.26	T_3	1.01
LINE 4	82.1	30.85	T_4	1.04
LINE 5	27.8	17.95	T_5	1.00
LINE 6	34.2	14.08	T_6	0.99
LINE 7	788.7	55.19	T_7	0.99
LINE 8	212.2	28.63	T_8	1.00
LINE 9	571.8	38.37	T_9	0.95

Line10	193.4	31.56		
--------	-------	-------	--	--

Από τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι η γραμμή με τις περισσότερες απώλειες και την μεγαλύτερη φόρτιση είναι η γραμμή Νο7 (ίδια δηλαδή γραμμή όπως και στην τοπολογία LCC). Όπως και πριν, αυτό συμβαίνει γιατί από τη συγκεκριμένη γραμμή διέρχεται μεγάλο μέρος άεργου ισχύος από τον ζυγό Νο7 προς το υπόλοιπο δίκτυο. Η αμέσως επόμενη γραμμή όσον αφορά τις απώλειες και την φόρτιση είναι η γραμμή Νο9, από την οποία διέρχεται η ισχύς που παρέχεται από το εξωτερικό δίκτυο. Εμφανές είναι πως και πάλι οι γραμμές που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα, έχουν χαμηλότερη φόρτιση και απώλειες από ότι οι γραμμές που λειτουργούν με εναλλασσόμενο. Τέλος, όσον αφορά τις τάσεις των ζυγών, παρατηρούμε ότι όλοι σχεδόν οι ζυγοί έχουν την ονομαστική τους τάση. Εξαίρεση αποτελούν οι ζυγοί Νο4 και Νο9, όπου ο Νο4 έχει τάση ίση με 1,04 α.μ. λόγω της παρουσίας του φωτοβολταϊκού πάρκου, ενώ ο ζυγός Νο9 έχει τάση ίση με 0,95 α.μ. καθώς βρίσκεται μακριά από άλλες μονάδες παραγωγής ενέργειας και έχει ένα μεγάλο σχετικά φορτίο που τροφοδοτεί.

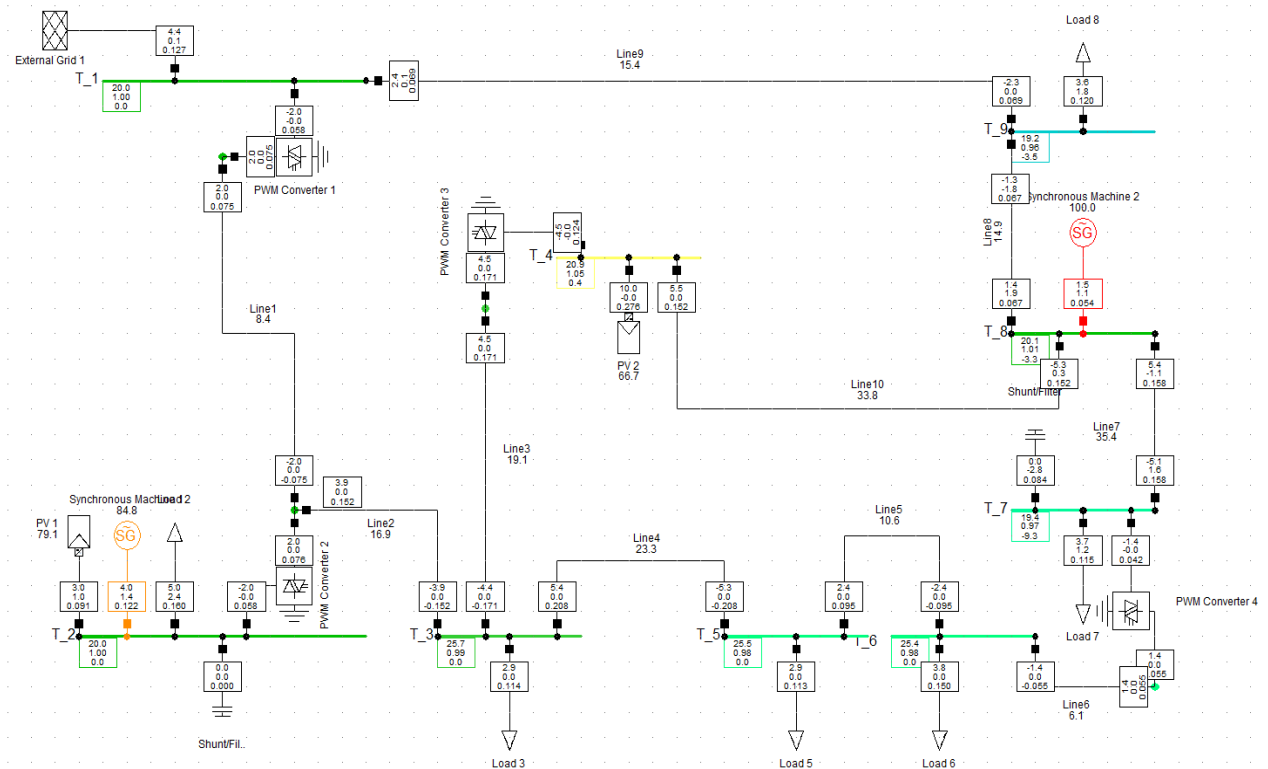
5.2.2.2 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC με μειωμένη κατανάλωση.

Για ακόμα μια φορά, τροποποιούμε τα στοιχεία του δικτύου ώστε τα φορτία να ταυτίζονται με το σενάριο του συγκεκριμένου κεφαλαίου, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 22: Αλλαγές δικτύου τοπολογίας VSC για μειωμένη κατανάλωση

Ζυγός	Ονομαστική Τάση (kV)	Φορτίο (MVA)	Σ.Ι. Φορτίου	Γεννήτρια (MVA)	Σ.Ι. Γεννήτριας	Φ/B (MW)
T_3	20	3	1	-	-	-
T_6	20	4	1	-	-	-

Διεξάγοντας την προσομοίωση, προκύπτουν τα αποτελέσματα που αναγράφονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 21.



Εικόνα 68: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC με μειωμένη κατανάλωση

Πίνακας 23: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας VSC με μειωμένη κατανάλωση

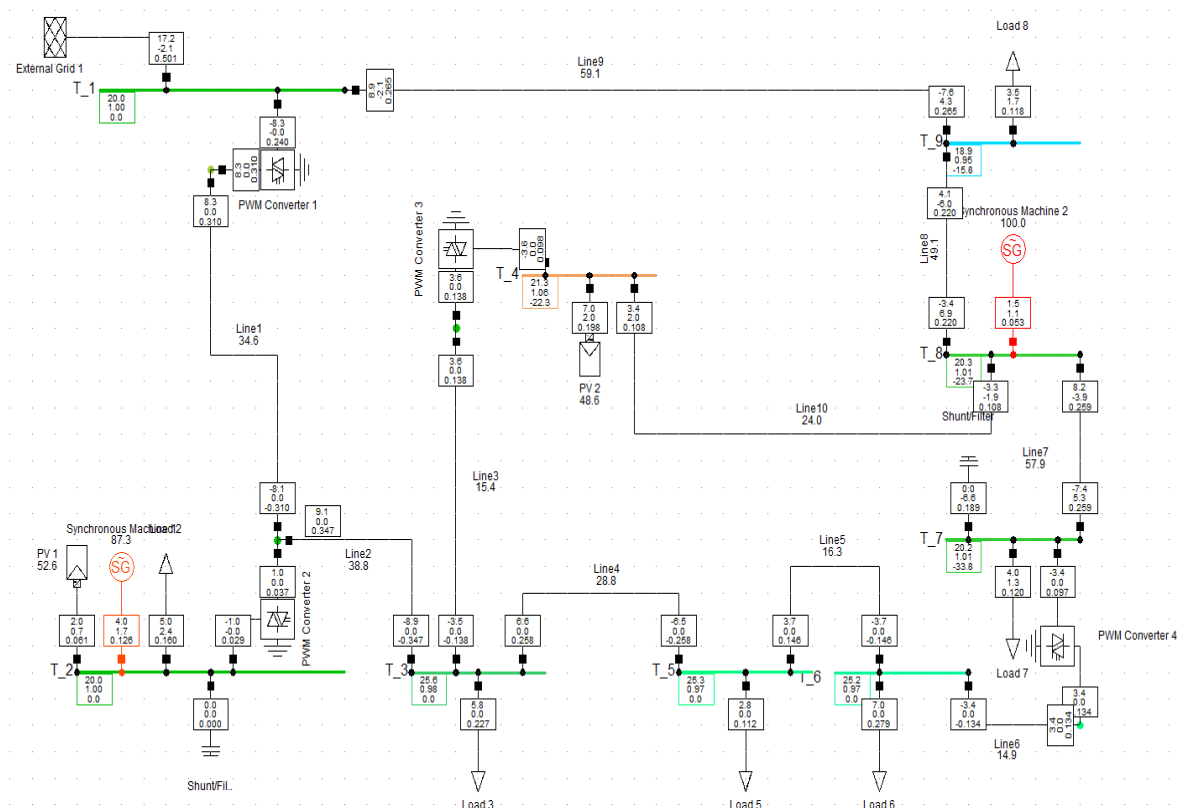
Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	9.2	8.43	T_1	1.00
LINE 2	37.0	16.91	T_2	1.00
LINE 3	94.2	19.07	T_3	0.99
LINE 4	46.7	23.26	T_4	1.05
LINE 5	9.8	10.64	T_5	0.98
LINE 6	6.5	6.12	T_6	0.98
LINE 7	323.7	35.36	T_7	0.97
LINE 8	57.4	14.89	T_8	1.01
LINE 9	91.8	15.38	T_9	0.96
Line10	222.5	33.85		

Συμπερασματικά, για ακόμα μια φορά, η γραμμή No7 παρουσιάζει την μεγαλύτερη φόρτιση και τις περισσότερες απώλειες. Η γραμμή N10 αυτήν την φορά ακολουθεί στην

κατάταξη, η οποία μεταφέρει ενέργεια από το φωτοβολταϊκό πάρκο του ζυγού Νο4 στο υπόλοιπο δίκτυο. Καθώς η απαίτηση ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο είναι μικρή, οι γραμμές Νο9 και Νο8 έχουν χαμηλή φόρτιση και επομένως και χαμηλές απώλειες. Παρατηρούμε για ακόμα μια φορά, πως οι γραμμές οι οποίες λειτουργούν σε συνεχές ρεύμα, έχουν μικρή φόρτιση με χαρακτηριστικό παράδειγμα, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο τη γραμμή Νο6, με φόρτιση μόλις 6,12%. Οι τάσεις των ζυγών επί των πλείστων είναι στα ονομαστικά επίπεδα, με εξαίρεση τους ζυγούς Νο4 και Νο9, με τάσεις 1,05 α.μ. και 0,96 α.μ., για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί.

5.2.2.3 Υπολογισμός ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC με μειωμένη παραγωγή ισχύος.

Όπως στο κεφάλαιο 4.2.3 και 5.1.2.3, εξετάζουμε την περίπτωση όπου έχουμε μειωμένη παραγωγή ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού είναι αυτά που ακολουθούν.



Εικόνα 69: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου εννέα ζυγών τοπολογίας VSC με μειωμένη παραγωγή φ/β μονάδων

Πίνακας 24: Αποτελέσματα ροής φορτίου δικτύου τοπολογίας VSC, με μειωμένη παραγωγή φ/β μονάδων

Γραμμή	Απώλειες (kW)	Φόρτιση (%)	Ζυγός	Τάση (α.μ.)
LINE 1	155.1	34.62	T_1	1.00
LINE 2	194.6	38.77	T_2	1.00
LINE 3	61.2	15.38	T_3	0.98
LINE 4	71.5	28.79	T_4	1.06
LINE 5	22.8	16.25	T_5	0.97
LINE 6	38.3	14.90	T_6	0.97
LINE 7	868.7	57.92	T_7	1.01
LINE 8	624.4	49.11	T_8	1.01
LINE 9	1354.6	59.06	T_9	0.95
Line10	112.0	24.02		

Όπως φαίνεται και βάση των αποτελεσμάτων, η γραμμή με την μεγαλύτερη φόρτιση είναι η γραμμή Νο9, στην οποία παρουσιάζονται και οι μεγαλύτερες απώλειες. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ροής ενεργού ισχύος που εισέρχεται από το εξωτερικό δίκτυο προς κάλυψη της μειωμένης παραγωγής των φωτοβολταϊκών πάρκων. Όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις, ακολουθεί η γραμμή Νο7, και έπειτα η γραμμή Νο8. Παρατηρούμε ακόμα μια φορά πως οι γραμμές που λειτουργούν στο DC, εμφανίζουν μικρότερες φορτίσεις και μικρότερες απώλειες, συγκριτικά με το υπόλοιπο δίκτυο. Ο ζυγός Νο4 έχει την υψηλότερη τάση (1,06 α.μ.) και ο ζυγός Νο9 την χαμηλότερη (0,95 α.μ.), το οποίο είναι αποτέλεσμα της έγχυσης άεργου ισχύος μέσω των inverters του φωτοβολταϊκού πάρκου που βρίσκεται στον ζυγό Νο4. Στην προσπάθειά μας να διατηρήσουμε την τάση του ζυγού Νο9 εντός ορίων, χρειάστηκε να αυξηθεί η τάση στον ζυγό Νο4, καθώς είναι από τις ελάχιστες δυνατότητες ελέγχου της τάσης που μας δίνονται στο δίκτυο AC. Τέλος, οι υπόλοιποι ζυγοί, όπως φαίνεται και στον ανωτέρω πίνακα, έχουν τάσεις αρκετά κοντά στην ονομαστική.

5.2.3 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυο εννέα ζυγών τοπολογίας VSC

Όπως και προηγουμένως, μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων της ροής φορτίου, προβαίνουμε στη διεξαγωγή σφαλμάτων, αυτήν την φορά για το δίκτυο τοπολογίας

5.2.3.1 Υπολογισμός σφαλμάτων σε σύνολο ζυγών δικτύου τοπολογίας VSC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete

Η ανωτέρω διαδικασία επαναλήφθηκε για την διεξαγωγή και των υπόλοιπων σφαλμάτων με τα εξής αποτελέσματα:

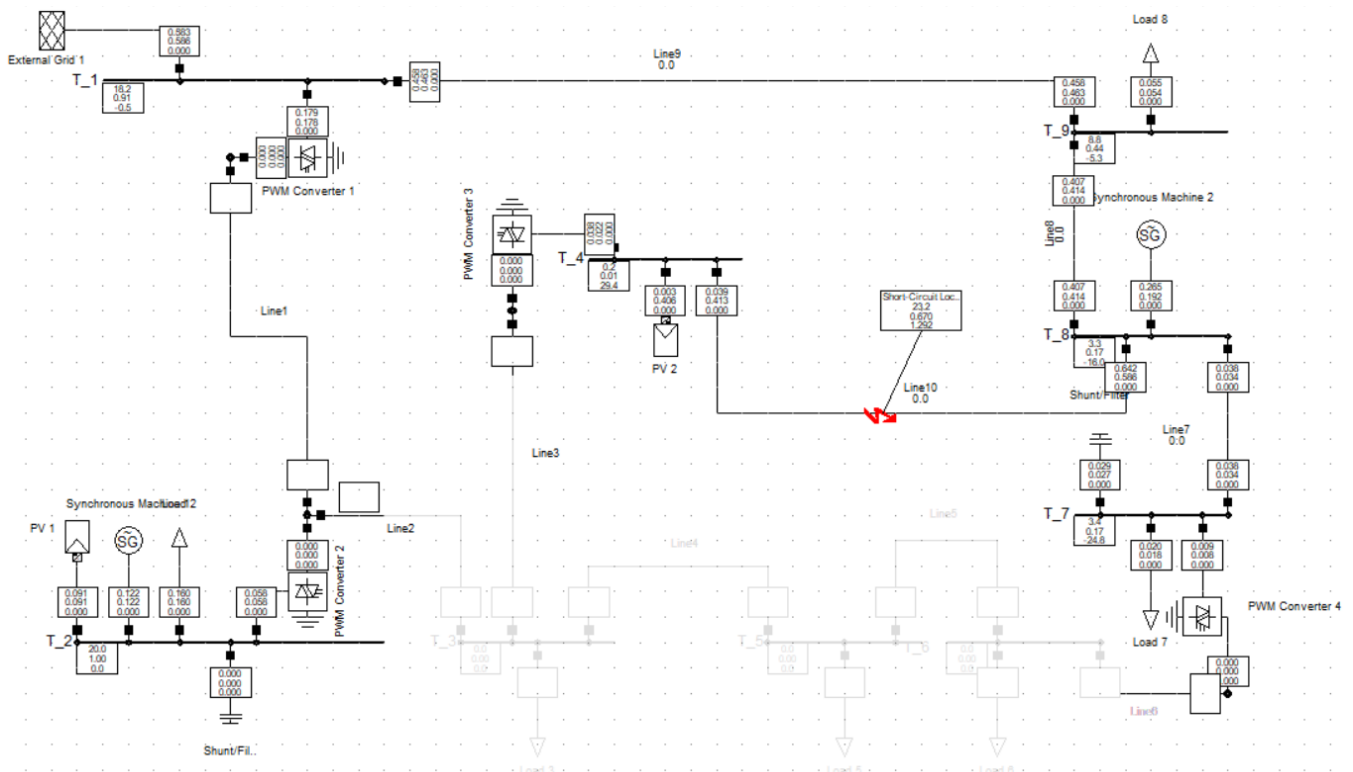
**Πίνακας 25: Αποτελέσματα υλοποίησης βραχυκυκλωμάτων με τη μέθοδο Complete στο σύνολο των
ζυγών δικτύου τοπολογίας VSC**

Busbar	Τριφασικό Βραχυκύκλωμα			Διφασικό Βραχυκύκλωμα			Μonoφασικό Βραχυκύκλωμα		
	S _{k''} (MVA)	I _{k''} (kA)	I _p (kA)	S _{k''} (MVA)	I _{k''} (kA)	I _p (kA)	S _{k''} (MVA)	I _{k''} (kA)	I _p (kA)
T_1	168.56	4.87	11.90	48.18	4.17	10.20	10.57	0.92	2.24
T_2	28.48	0.82	2.06	8.14	0.71	1.77	9.97	0.86	2.17
T_4	19.81	0.57	1.07	5.70	0.49	0.93	4.65	0.40	0.75
T_7	18.47	0.53	0.99	5.00	0.43	0.80	4.06	0.35	0.65
T_8	28.09	0.81	1.63	7.84	0.68	1.36	7.55	0.65	1.31
T_9	37.19	1.07	2.00	10.55	0.91	1.70	6.79	0.59	1.09

Παρατηρούμε για ακόμα μία φορά, πως ο ζυγός με τις μεγαλύτερες τιμές των μεγεθών βραχυκύκλωσης είναι ο ζυγός No1 και ακολουθεί ο ζυγός No9 ο οποίος συνδέεται με τον ζυγό No1 μέσω της γραμμής No9. Ακολουθούν οι ζυγοί No2 και No8. Ο ζυγός No2, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο όπου εξετάστηκε η τοπολογία LCC, αν και αποκομμένος από το υπόλοιπο δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης, εμφανίζει σημαντικές τιμές ισχύος και ρευμάτων βραχυκύκλωσης, λόγω των μονάδων παραγωγής που βρίσκονται σε αυτόν. Ο ζυγός No8 έχει και αυτός σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες συμβάλουν στα εν λόγω μεγέθη, και τέλος, ακολουθούν οι ζυγοί No4 και No7 οι οποίοι έχουν τις μικρότερες τιμές. Επίσης, οι τιμές του συμμετρικού τριφασικού σφάλματος είναι σαφώς οι μεγαλύτερες καθώς είναι πιο έντονο το φαινόμενο όταν βραχυκυκλωθούν και οι τρεις φάσεις του δικτύου.

5.1.3.2 Υπολογισμός σφαλμάτων σε γραμμή No10 δικτύου τοπολογίας VSC σύμφωνα με τη μέθοδο Complete

Στην επόμενη εικόνα, το αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος στο 50% του συνολικού μήκους της γραμμής No10, το οποίο και πρόκειται να αναλυθεί:



Εικόνα 71: Αποτέλεσμα τριφασικού σφάλματος σύμφωνα με τη μέθοδο Complete στο 50% του συνολικού μήκους της γραμμής Νο10 τοπολογίας VSC

Στο ανωτέρω σημείο εξετάστηκε και η επίδραση ενός διφασικού και ενός μονοφασικού σφάλματος. Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων:

Πίνακας 26: Αποτελέσματα σφαλμάτων στο 50% του μήκους της γραμμής Νο10

	Τιμές στο σημείο σφάλματος		I _{k''} (kA)			I _{k''} (kA)		
			Μετά από διφασικό σφάλμα			Μετά από μονοφασικό σφάλμα		
			A	B	C	A	B	C
S _{k''} (MVA)	23.2	Γραμμή 10	0	0.577	0.577	0.496	0	0
I _{k''} (kA)	0.670							
I _p (kA)	1.292							

Στον πίνακα που ακολουθεί, υποτυπώνονται οι πτώσεις τάσεως για το συμμετρικό σφάλμα, όπως επίσης και οι τάσεις των ζυγών για τα μη συμμετρικά σφάλματα:

Τάσεις Ζυγών σε τριφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 20kV)		Τάσεις Ζυγών σε διφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 11,57kV ανά φάση)			Τάσεις Ζυγών σε μονοφασικό βραχυκύκλωμα (kV) (Ονομαστική τιμή 11,57kV ανά φάση)		
Ζυγός	Τάση ζυγού	Φάση A	Φάση B	Φάση C	Φάση A	Φάση B	Φάση C
T_1	18.22	11.58	10.85	10.71	10.05	10.93	13.07
T_2	20.00	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55
T_4	0.20	12.16	5.89	6.27	0.34	15.30	12.49
T_7	3.35	11.93	6.47	5.78	2.92	14.12	10.66
T_8	3.31	11.86	6.23	6.03	2.76	13.85	11.29
T_9	8.82	11.15	6.79	7.35	5.20	12.23	11.50

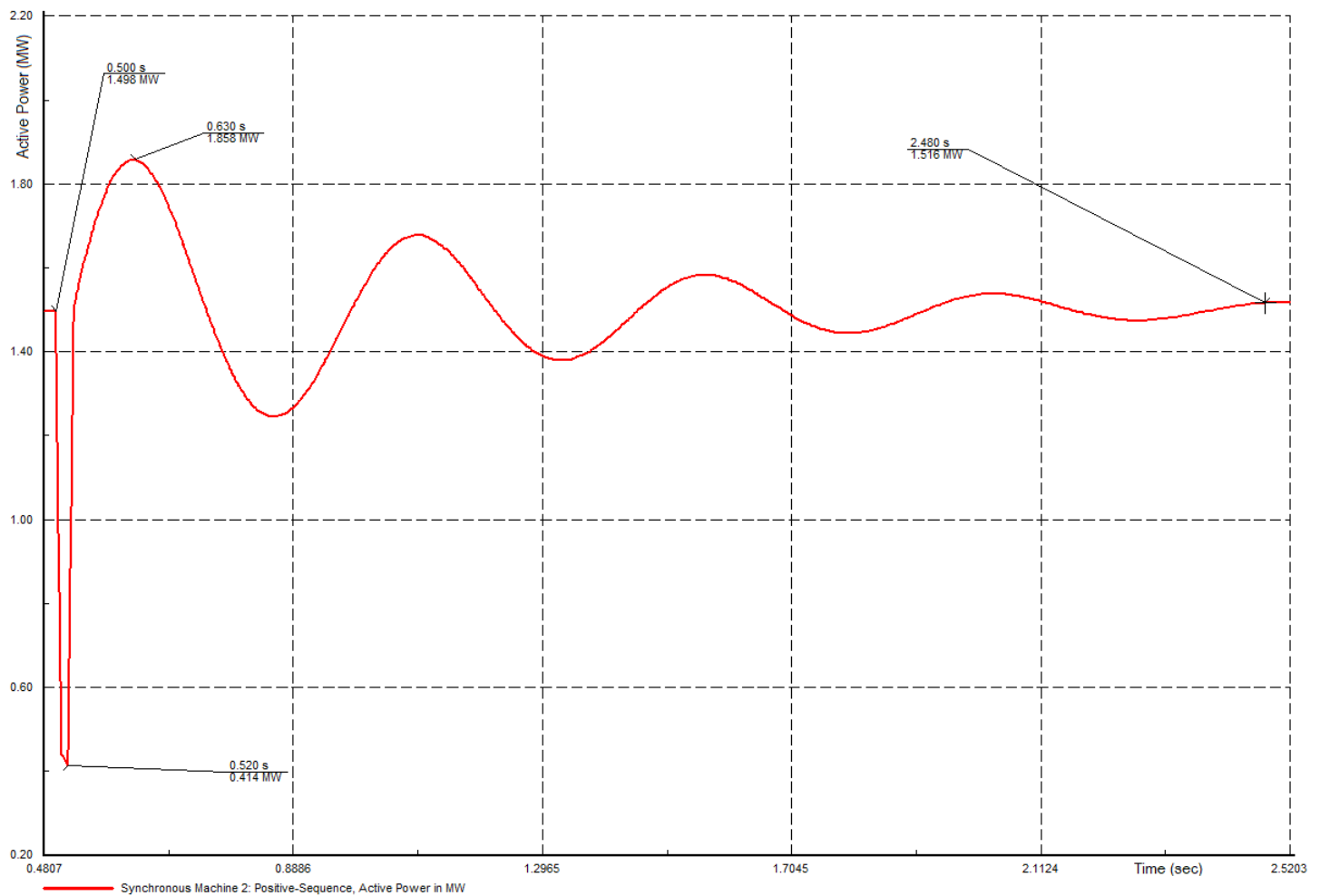
Αρχικά, έμφαση πρέπει να δοθεί στον Ζυγό Νο2, ο οποίος διατηρείται ανεπηρέαστος από την εμφάνιση του σφάλματος. Όπως και στην τοπολογία LCC, έτσι και εδώ, όντας απομονωμένος μέσω των μετατροπέων, η παρουσία του βραχυκυκλώματος είτε αυτό είναι συμμετρικό είτε μη συμμετρικό, δεν τον επηρεάζει σχεδόν καθόλου. Αντιθέτως, ο ζυγός στον οποίο έχει την μεγαλύτερη επίδραση το σφάλμα είναι ο ζυγός Νο4 και ακολουθούν οι ζυγοί Νο7 και Νο8. Ο ζυγός Νο4 και Νο8 βρίσκονται εκατέρωθεν της γραμμής στην οποία διεξάγεται το σφάλμα, ενώ ο ζυγός Νο7 επικοινωνεί με τον ζυγό Νο8 μέσω της γραμμής Νο7. Επομένως είναι λογικό αυτοί οι ζυγοί να πλήττονται το περισσότερο. Ο ζυγός Νο9, αν και παρουσιάζει μεγάλη πτώση τάσης, εφόσον επικοινωνεί με τον ζυγό Νο1 και άρα με το εξωτερικό δίκτυο μέσω της γραμμής Νο9, παρατηρούμε ότι διατηρεί μια τάση μεγαλύτερη από τους υπόλοιπους ζυγούς. Τέλος, ο ζυγός Νο1, παρουσιάζει μια μείωση τάσης κατά 8,9% (στο συμμετρικό σφάλμα), καθώς το εξωτερικό δίκτυο έχει μεγάλη ισχύ βραχυκύκλωσης και επομένως δύναται να ανταπεξέλθει καλύτερα στις επιπτώσεις των βραχυκυκλωμάτων.

5.2.4 Εκτέλεση RMS Αξιολόγησης σε δίκτυο εννέα ζυγών τοπολογίας VSC

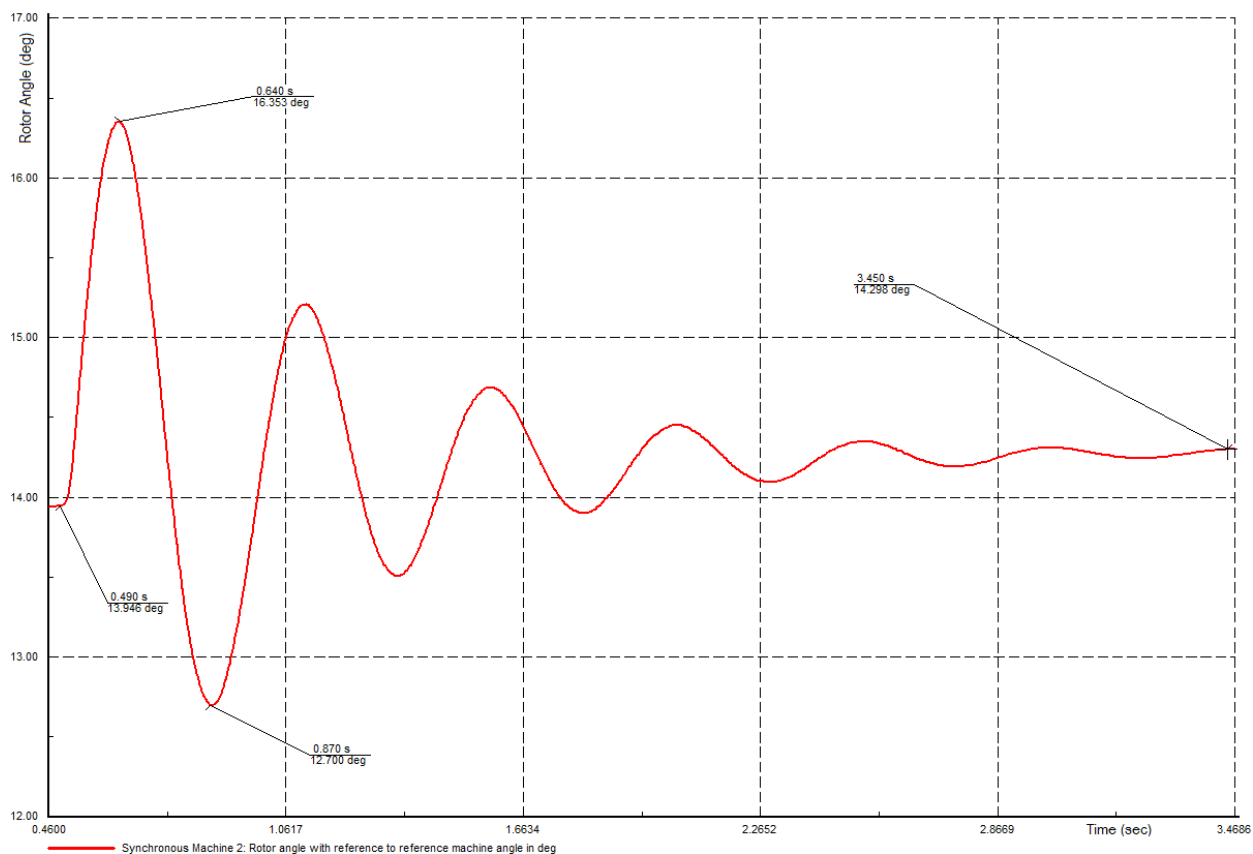
Τελευταία, θα εξετάσουμε την απόκριση του δικτύου που περιέχει VSCs, σε μεταβατικά φαινόμενα. Όπως και στις προηγούμενες αντίστοιχες προσομοιώσεις το σφάλμα θα γίνει στο μισό μήκος της γραμμής Νο10 και θα ελέγξουμε την απόκριση της γεννήτριας Νο2 και την μεταφερόμενη ενεργό ισχύ μέσω της γραμμής Νο10. Εφόσον ρυθμίσουμε και πάλι τον χρόνο των «γεγονότων» και το composite model για τον έλεγχο της γεννήτριας και

του φ/β πάρκου, μπορούμε να διεξάγουμε την προσομοίωση. Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η διάρκεια που χρειάζεται για να φτάσει το δίκτυο σε μία κατάσταση ισορροπίας πριν γίνει το σφάλμα, λόγω της ύπαρξης των VSCs. Για αυτόν τον λόγο ξεκινάμε την προσομοίωση 1 δευτερόλεπτο πιο πριν από ότι στο AC.

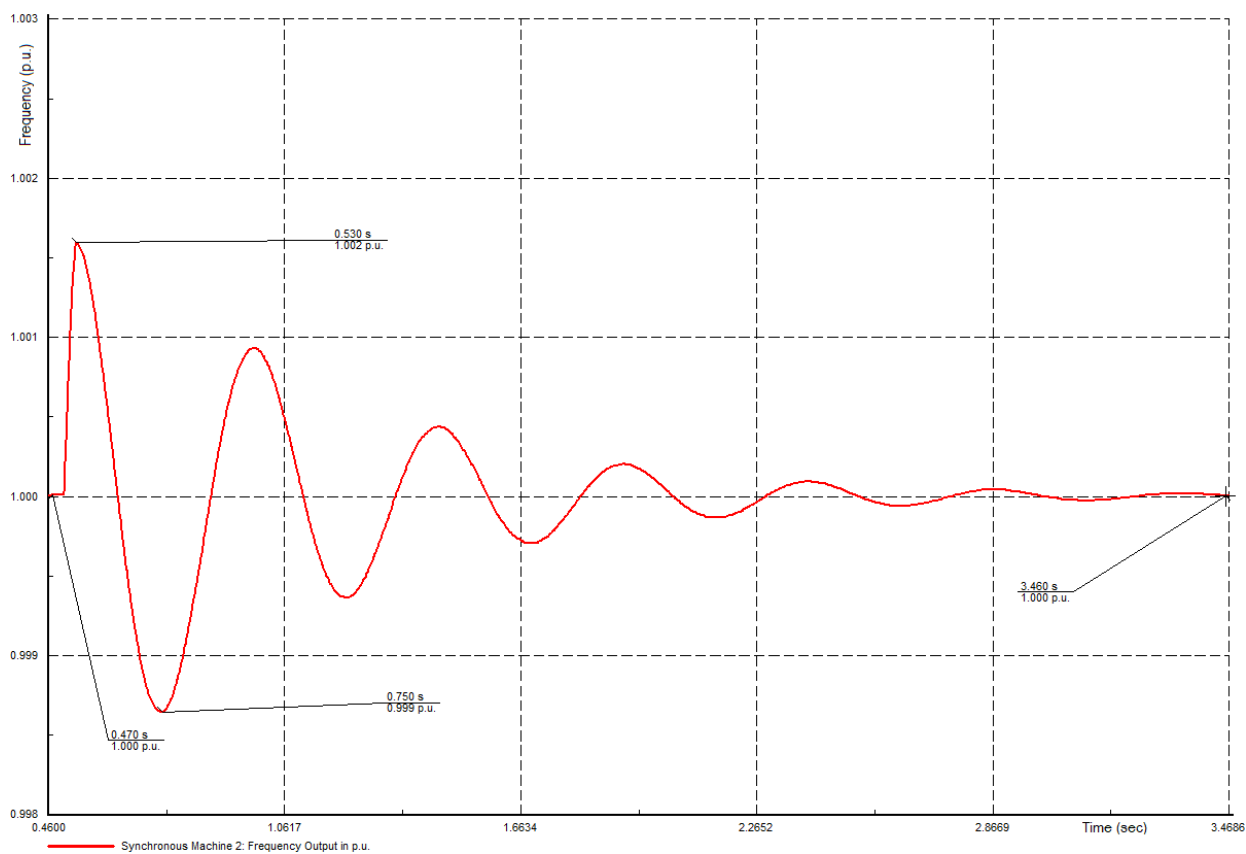
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν:



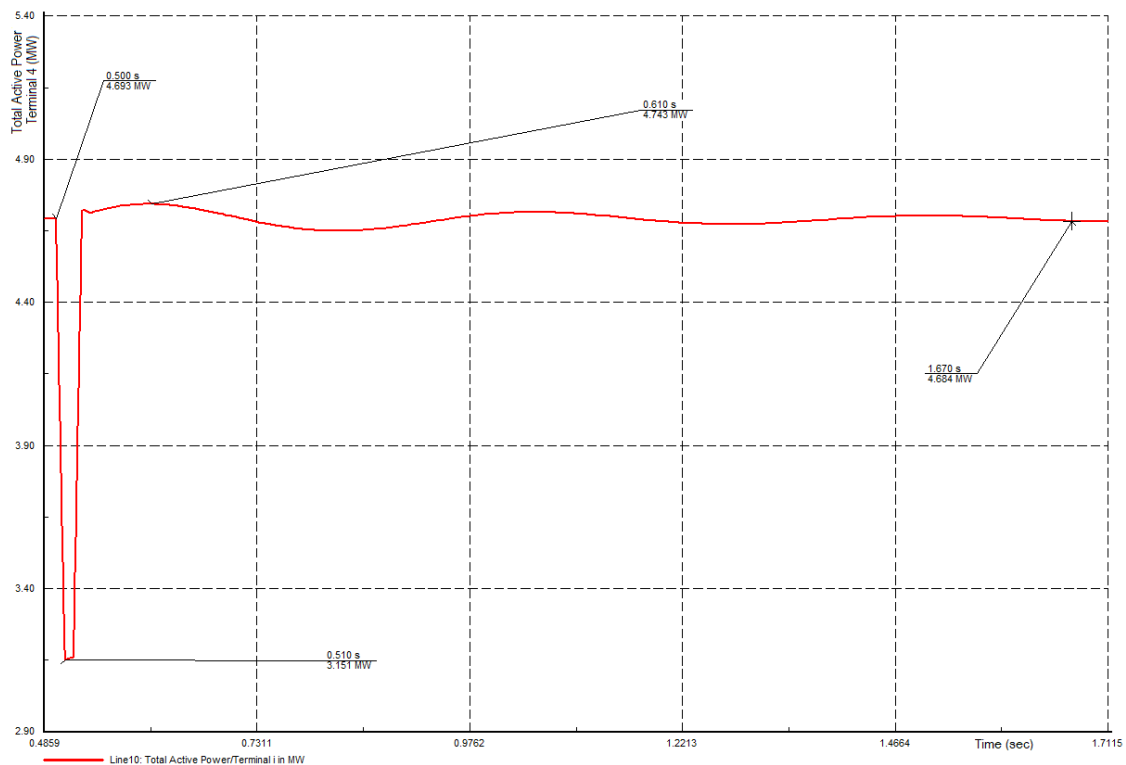
Διάγραμμα 10: Ενεργός ισχύς γεννήτριας No2 δικτύου τοπολογίας VSC



Διάγραμμα 11: Γωνία ρότορα γεννήτριας Νο2 δικτύου τοπολογίας VSC

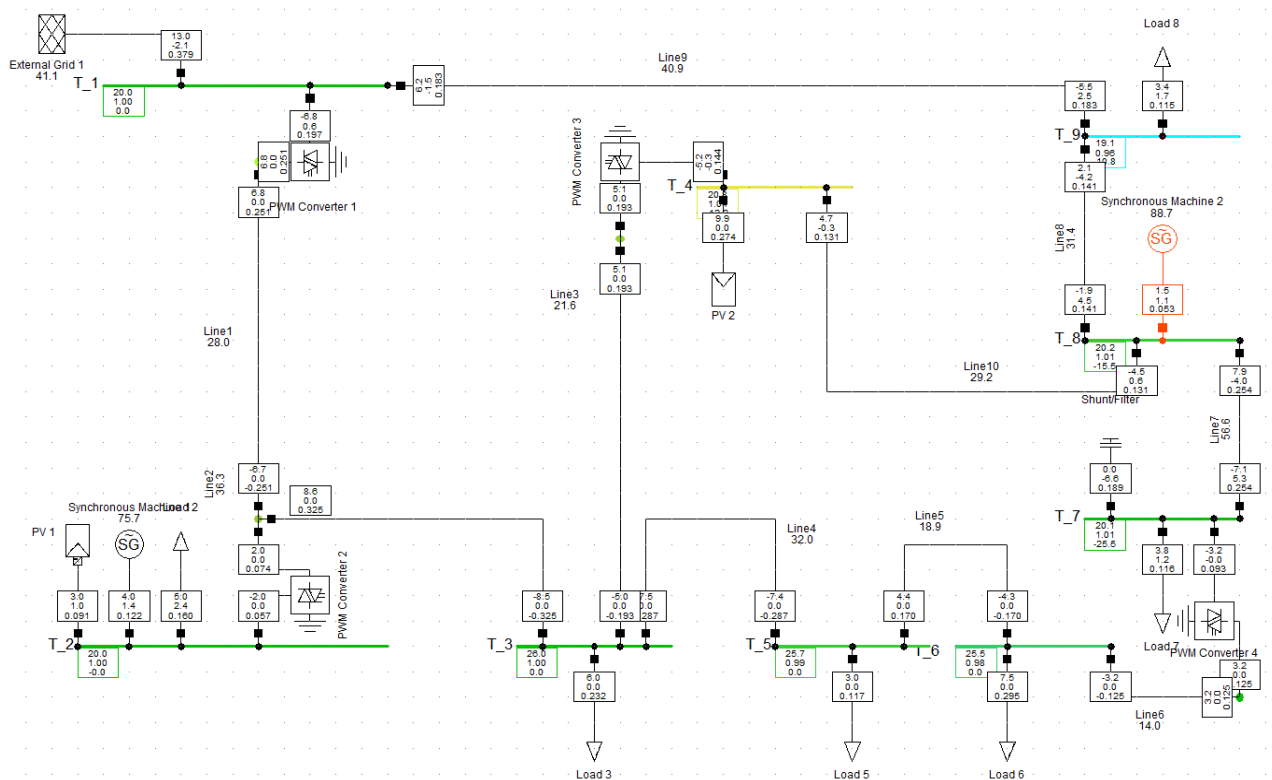


Διάγραμμα 12: Συχνότητα γεννήτριας Νο2 δικτύου τοπολογίας VSC



Διάγραμμα 13: Συνολική μεταφερόμενη ενεργός ισχύς μέσω της γραμμής No10 τοπολογίας VSC

Τέλος, επισυνάπτεται εικόνα από το αποτέλεσμα επίλυσης της ροής φορτίου μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης:



Εικόνα 72: Αποτέλεσμα ροής φορτίου μετά την ολοκλήρωση RMS μελέτης δικτύου με VSCs

Συνοπτικά τα αποτελέσματα επισυνάπτονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 27: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα RMS αξιολόγησης δικτύου με VSCs

	Αρχική τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τελική τιμή	Χρόνος επαναφοράς κατάστασης προ σφάλματος
Ενεργός Ισχύς Gen_No2	1,498 MW	1,858 MW	0,414 MW	1,516 MW	1,955 s
Γωνία Ρότορα Gen_No2	13,946 Deg	16,353 Deg	12,7 Deg	14,298 Deg	2,925 s
Συχνότητα Gen_No2	1 pu	1,002 pu	0,999 pu	1 pu	2,935 s
Ενεργός Ισχύς Γραμμής No10	4,693 MW	4,743 MW	3,151 MW	4,68 MW	1,145 s

Από τις ανωτέρω τιμές, παρατηρούμε πως για ακόμα μια φορά η ενεργός ισχύς είναι το μέγεθος που επανέρχεται στην κατάσταση προ του σφάλματος ταχύτερα. Ωστόσο αυτήν την φορά, τόσο η συχνότητα της γεννήτριας όσο και η γωνία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του ρότορα επανέρχονται στην πρότερη κατάσταση σχεδόν 1,5 sec αργότερα. Επιπρόσθετα, όπως στην τοπολογία LCC, έτσι και τώρα, η ισχύς που μεταφέρεται μέσω της γραμμής No10 και η οποία προέρχεται από τον ζυγό No4, επανέρχεται σχεδόν ακαριαία μετά την αποκατάσταση του σφάλματος στην πρότερη κατάσταση, καθώς παρουσιάζει μια πολύ μικρή διακύμανση. Μικρό σχετικά είναι και το εύρος τιμών των υπόλοιπων μεγεθών με χαρακτηριστικό παράδειγμα την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας η οποία εμφανίζει μέγιστη τιμή μόλις 0,350MW περισσότερα, περίπου, από την ισχύ κανονικής λειτουργίας της. Τέλος, παρατηρούμε πως η καμπύλη της απόκρισης όλων των μεγεθών ακολουθεί την ημιτονοειδή μορφή, και πως δεν υπάρχουν έντονες αιχμές λόγω της λειτουργίας του ελεγκτή του φωτοβολταϊκού πάρκου όπως είχαν παρατηρηθεί στην τοπολογία LCC. Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν όλα τα ανωτέρω, μπορούμε να συμπεράνουμε πως οι δύο ελεγκτές που έχουμε ορίσει, τόσο της γεννήτριας όσο και του φ/β πάρκου, μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά σε συνεργασία με τα VSCs, ώστε να επιτύχουν την επαναφορά της ομαλής λειτουργίας του δικτύου σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, μετά την αποκατάσταση του σφάλματος.

Κεφάλαιο 6ο: Σύγκριση - Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τη διεξαγωγή των ανωτέρω μελετών και θα γίνει η ανάλυσή τους. Θα ξεκινήσουμε με την ανάλυση των αποτελεσμάτων της ροής φορτίου, έπειτα θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων των σφαλμάτων και τέλος θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα από την RMS αξιολόγηση.

6.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων ροής φορτίου των τριών διαφορετικών σεναρίων

Α. Όπως προαναφέρθηκε, αρχικά θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα της μελέτης των ροών φορτίου, για τις τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης του δικτύου, ξεκινώντας από την κατάσταση συνήθους λειτουργίας. Επισυνάπτονται συγκεντρωτικοί πίνακες με τις απώλειες και φορτίσεις των γραμμών καθώς και τάσης των ζυγών:

Πίνακας 28: Απώλειες γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

Losses (kW)			
	AC	LCC	VSC
Line 1	1179.3	111.5	105.1
Line 2	838.3	185.2	174.2
Line 3	351.9	111.3	106.2
Line 4	402.0	90.2	82.1
Line 5	179.9	31.3	27.8
Line 6	217.9	35.7	34.2
Line 7	876.6	933.4	788.7
Line 8	291.2	216.6	212.2
Line 9	655.0	635.1	571.8
Line10	187.7	209.8	193.4
Σύνολο	5179.7	2560.1	2295.9

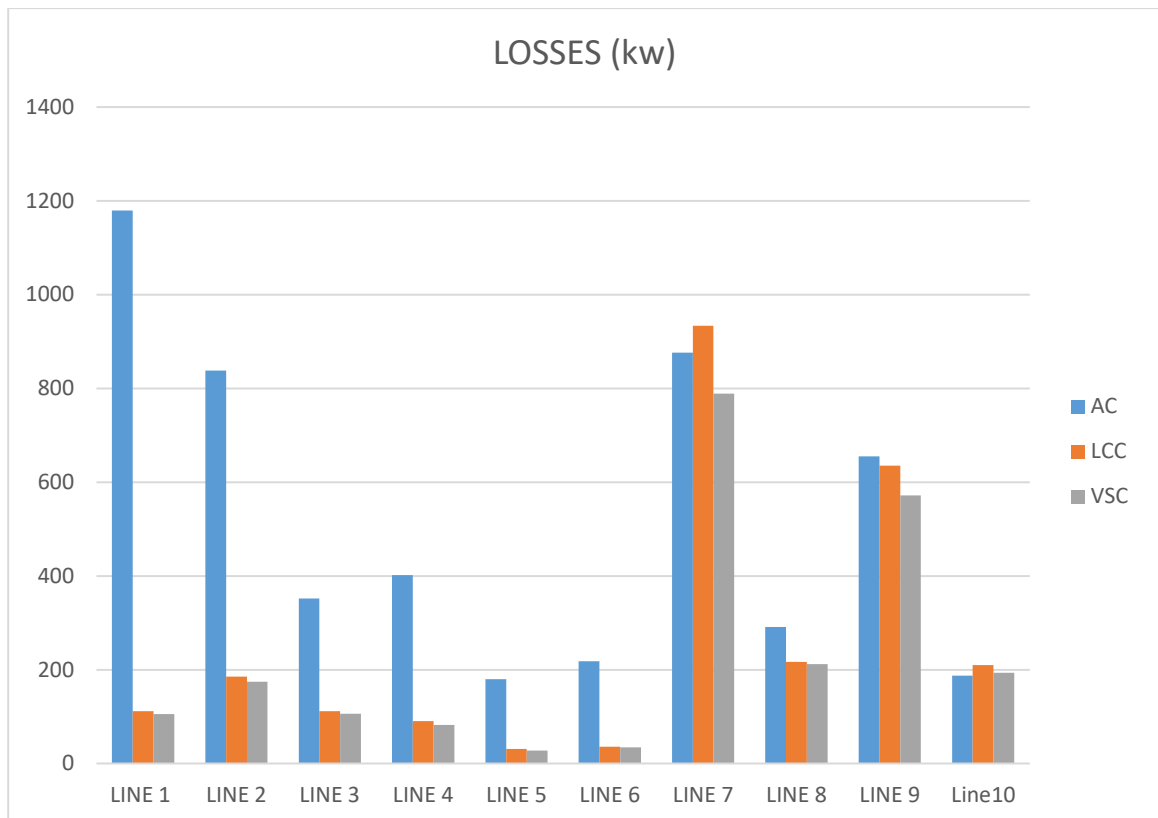
Πίνακας 29: Απώλειες γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario), σε ποσοστό επί τοις εκατό της μεταφερόμενης ισχύος

Losses (% της μεταφερόμενης ισχύος)			
Line	AC	LCC	VSC
Line 1	12.3	1.6	1.5
Line 2	8.1	2.1	2.0
Line 3	7.2	2.3	2.2
Line 4	5.0	1.2	1.1
Line 5	3.8	0.7	0.7
Line 6	6.8	1.1	1.0
Line 7	11.0	11.4	10.0
Line 8	15.3	10.3	12.5
Line 9	10.7	10.2	9.9
Line10	3.7	4.1	3.8

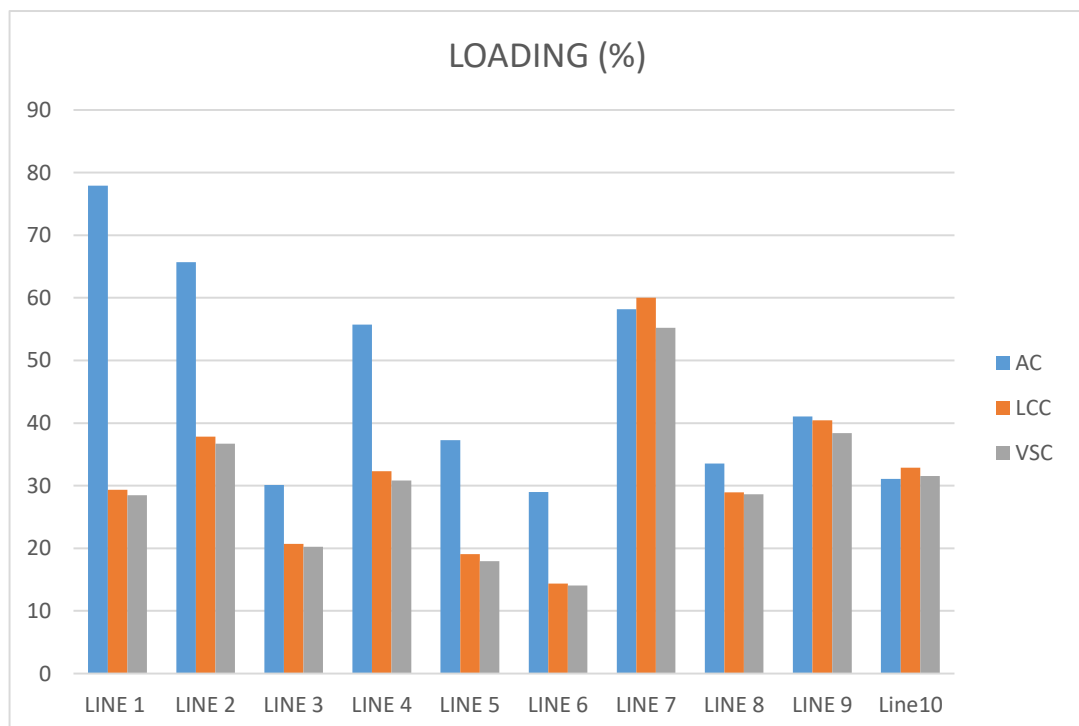
Πίνακας 30: Φόρτιση γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

Loading (%)			
Line	AC	LCC	VSC
Line 1	77.93	29.35	28.50
Line 2	65.71	37.83	36.68
Line 3	30.10	20.73	20.26
Line 4	55.72	32.33	30.85
Line 5	37.28	19.05	17.95
Line 6	29.01	14.39	14.08
Line 7	58.19	60.04	55.19
Line 8	33.54	28.92	28.63
Line 9	41.07	40.44	38.37
Line10	31.09	32.87	31.56

Επιπρόσθετα, επισυνάπτονται τα παρακάτω γραφήματα για να αναπαρασταθούν γραφικά τα αποτελέσματα:



Γράφημα 1: Απώλειες γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)



Γράφημα 2: Φόρτιση γραμμών δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

Όσον αφορά λοιπόν τις απώλειες και τη φόρτιση των γραμμών, παρατηρούμε ότι έχουμε τις μεγαλύτερες απώλειες στο δίκτυο που λειτουργεί εξολοκλήρου σε εναλλασσόμενη τάση, έπειτα ακολουθεί το δίκτυο τοπολογίας LCC και τέλος, το δίκτυο όπου εμφανίζονται οι λιγότερες απώλειες είναι αυτό της τοπολογίας VSC. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και με τη φόρτιση των γραμμών, εκτός από τις γραμμές No7 και No10, όπου έχουμε λιγότερες απώλειες και φόρτιση συγκριτικά με μία έστω τοπολογία υβριδικού δικτύου, ενώ τις περισσότερες στο δίκτυο τοπολογίας LCC. Αυτό, οφείλεται στη μεταφορά άεργου ισχύος στις γραμμές. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι στις γραμμές που διέρχεται πλέον συνεχές ρεύμα και άρα δεν έχουμε μεταφορά άεργου ισχύος, οι απώλειες είναι οι ελάχιστες. Οι διαφορές που προκύπτουν ανάμεσα στις τοπολογίες LCC και VSC, είναι σχεδόν μηδαμινές. Αντιθέτως, στις γραμμές που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα σε όλες τις τοπολογίες, παρατηρούμε ότι έχουμε αυξημένη μεταφορά άεργου ισχύος, καθώς οι converters δεν διοχετεύουν πλέον την άεργο ισχύ που παράγεται στο DC τμήμα, και αυτή οδηγείται μέσω των υπολοίπων γραμμών στο εξωτερικό δίκτυο. Αυτό, διακρίνεται και από τον ακόλουθο πίνακα όπου είναι συγκεντρωμένες οι συνολικές απώλειες του δικτύου:

Πίνακας 31: Συνολικές Απώλειες Δικτύων σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

	AC	LCC	VSC
P_{losses} (MW)	5.2	2.7	2.4
Q_{losses} (MVar)	8.1	6.8	2.7

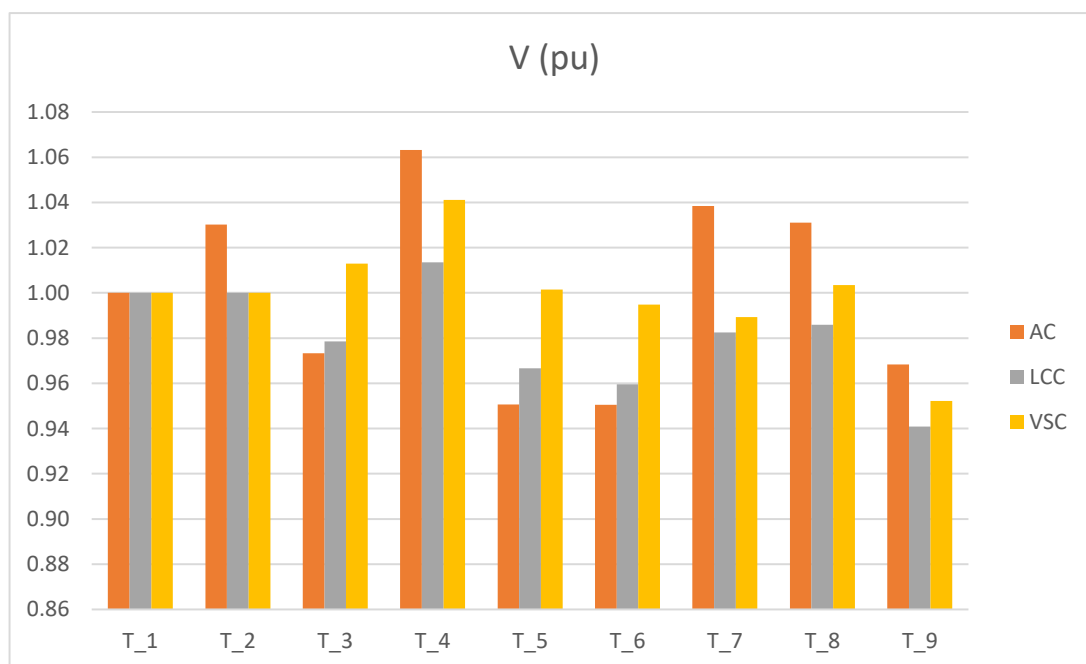
Από τον ανωτέρω πίνακα, παρατηρούμε ότι ειδικά στο δίκτυο τοπολογίας VSC έχουμε τις μικρότερες απώλειες σε άεργο ισχύ, ενώ υπάρχει μια πολύ μεγάλη κατανάλωση στην τοπολογία LCC έναντι αυτής που χρησιμοποιούμε VSC. Αυτό συμβαίνει διότι στα θυρίστορ, ενώ η ενεργοποίηση γίνεται μέσω ενός σήματος, η απενεργοποίησή τους πρέπει να γίνει φυσικά, μέσω της διέλευσης της τάσης από το μηδέν, και συγκεκριμένα η μεταγωγή από το ένα στο άλλο, πρέπει να γίνει μέσω της φυσικής μεταγωγής της τάσης της AC πλευράς. Η μεταγωγή δηλαδή ξεκινάει κατά την θετική διέλευση τάσης από την πλευρά του ανορθωτή και πρέπει να ολοκληρωθεί πριν από την αρνητική διέλευση τάσης από την πλευρά του αντιστροφέα. Αυτό έχει ως συνέπεια τόσο η πλευρά του ανορθωτή όσο και του αντιστροφέα να καταναλώνουν άεργο ισχύ από το AC τμήμα του δικτύου λόγω της επίδρασης της ανόρθωσης στην φάση μεταξύ του ρεύματος και της τάσης. Ακριβώς για την κάλυψη αυτής της απαίτησης χρησιμοποιούνται τοπικά συνήθως φίλτρα ή πυκνωτές [20]. Αν και η κατανάλωση αυτή επηρεάζεται και από την τάση του AC ζυγού, σε μία σταθερή κατάσταση

εκτιμάται ότι καταναλώνεται περίπου το 60% της ενεργούς ισχύος που μεταφέρεται, σε άεργο ισχύ [29].

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την τάση των ζυγών σε ανά μονάδα σύστημα και για τις τρεις τοπολογίες, για την συγκεκριμένη φόρτιση, από τα οποία προκύπτει και το παρακάτω διάγραμμα:

Πίνακας 32: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύου σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

Τάση Ζυγών (αμ)			
	AC	LCC	VSC
T_1	1.00	1.00	1.00
T_2	1.03	1.00	1.00
T_3	0.97	0.98	1.01
T_4	1.06	1.01	1.04
T_5	0.95	0.97	1.00
T_6	0.95	0.96	0.99
T_7	1.04	0.98	0.99
T_8	1.03	0.99	1.00
T_9	0.97	0.94	0.95



Γράφημα 3: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύου σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario)

Παρατηρούμε πως σε κάθε σχεδόν περίπτωση, με χρήση της τοπολογίας VSC, καταφέρνουμε να πετύχουμε μια τάση στον εκάστοτε ζυγό πιο κοντά στην ονομαστική. Αυτό συμβαίνει διότι μέσω της συγκεκριμένης τοπολογίας, μας επιτρέπεται να ρυθμίσουμε τόσο την ροή ενεργούς, όσο και την ροή άεργου ισχύος, η οποία επιδρά περισσότερο στην ανύψωση / πτώση τάσης.

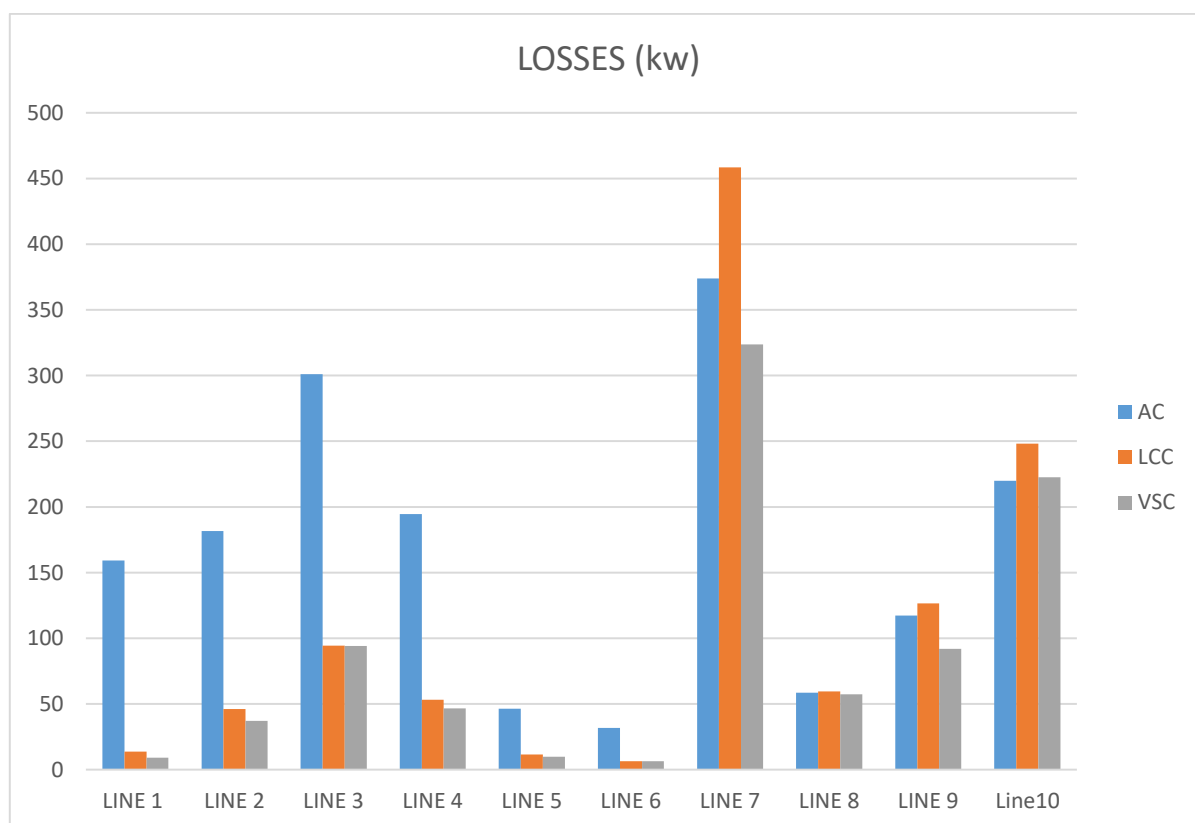
B. Ακολούθως, θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα από το δεύτερο σενάριο φόρτισης, όπου έχουμε μειωμένη κατανάλωση ισχύος από τα φορτία. Μια τέτοια κατάσταση φόρτισης μπορεί να προκύψει για παράδειγμα μια μέρα η οποία να αποτελεί αργία, με αποτέλεσμα οι μεγάλες βιομηχανικές μονάδες να βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Επισυνάπτονται και πάλι συγκεντρωτικοί πίνακες με τις απώλειες και φορτίσεις των γραμμών καθώς και τάσεις των ζυγών, μαζί με τα αντίστοιχα γραφήματα:

Πίνακας 33: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση

Losses (kW)			
	AC	LCC	VSC
Line 1	159.2	13.7	9.2
Line 2	181.5	46.1	37.0
Line 3	301.1	94.4	94.2
Line 4	194.4	53.2	46.7
Line 5	46.5	11.6	9.8
Line 6	31.8	6.5	6.5
Line 7	374.0	458.4	323.7
Line 8	58.7	59.6	57.4
Line 9	117.2	126.6	91.8
Line10	220.0	248.1	222.5
Σύνολο	1684.4	1118.3	898.8

Πίνακας 34: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση, σε ποσοστό επί τοις εκατό της μεταφερόμενης ισχύος

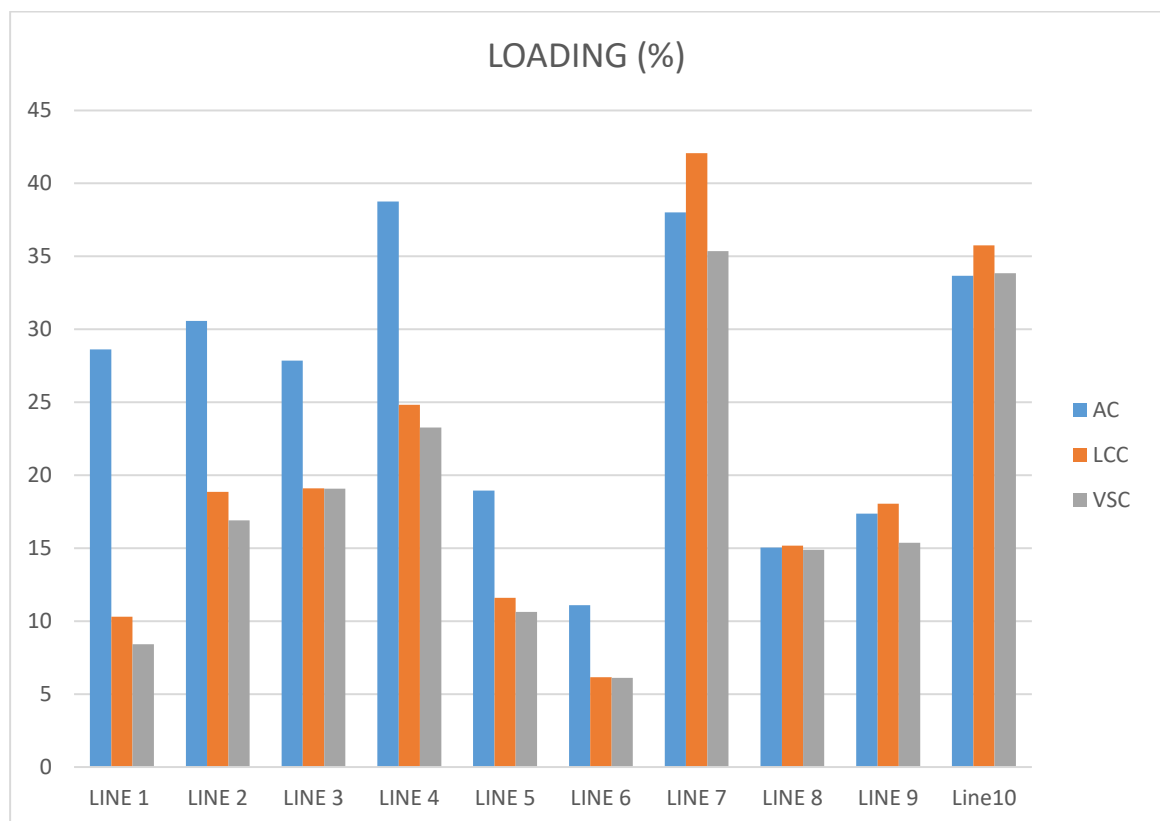
Losses (% της μεταφερόμενης ισχύος)			
	AC	LCC	VSC
Line 1	5.3	0.6	0.5
Line 2	3.8	1.0	0.9
Line 3	6.7	2.1	2.1
Line 4	3.3	0.9	0.9
Line 5	1.7	0.4	0.4
Line 6	2.3	0.5	0.5
Line 7	6.4	7.8	6.0
Line 8	5.9	6.6	4.1
Line 9	4.3	4.5	3.8
Line10	4.0	4.5	4.0



Γράφημα 4: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση

Πίνακας 35: Φόρτιση γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση

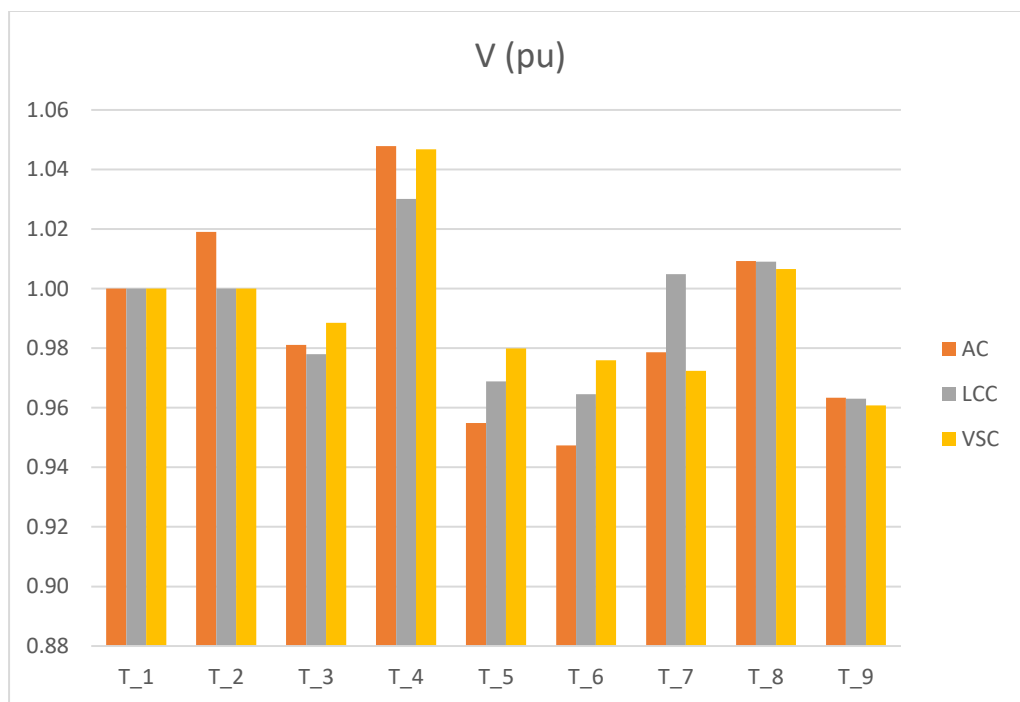
Loading (%)			
	AC	LCC	VSC
Line 1	28.63	10.29	8.43
Line 2	30.58	18.86	16.91
Line 3	27.85	19.10	19.07
Line 4	38.76	24.84	23.26
Line 5	18.94	11.59	10.64
Line 6	11.08	6.15	6.12
Line 7	38.00	42.08	35.36
Line 8	15.05	15.18	14.89
Line 9	17.37	18.05	15.38
Line10	33.66	35.74	33.85



Γράφημα 5: Φόρτιση γραμμών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση

Πίνακας 36: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση

Τάση Ζυγών (αμ)			
	AC	LCC	VSC
T_1	1.00	1.00	1.00
T_2	1.02	1.00	1.00
T_3	0.98	0.98	0.99
T_4	1.05	1.03	1.05
T_5	0.95	0.97	0.98
T_6	0.95	0.96	0.98
T_7	0.98	1.00	0.97
T_8	1.01	1.01	1.01
T_9	0.96	0.96	0.96



Γράφημα 6: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύων με μειωμένη κατανάλωση

Πίνακας 37: Συνολικές Απώλειες Δικτύων με μειωμένη κατανάλωση

	AC	LCC	VSC
P_{losses} (MW)	1.7	1.2	1
Q_{losses} (MVar)	2.6	4.7	1.1

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι και πάλι έχουμε τις λιγότερες απώλειες στην τοπολογία VSC, ενώ οι περισσότερες εμφανίζονται στο καθαρά AC δίκτυο. Επίσης, είναι εμφανές ότι ανεξαρτήτως τοπολογίας οι συνολικές απώλειες έχουν μειωθεί δραματικά. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μικρότερης εισχώρησης ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο, και άρα της ελαχιστοποίησης της φόρτισης των γραμμών μεταφοράς. Όσον αφορά τις τάσεις των ζυγών, παρατηρούμε ότι για ακόμα μια φορά, η τοπολογία VSC, έχει τιμές πλησιέστερα στις ονομαστικές, συγκριτικά με τις λοιπές τοπολογίες. Τέλος, στην τοπολογία LCC, παρατηρούμε αυτήν την φορά υψηλότερη κατανάλωση άεργου ισχύος, συγκριτικά με το μη υβριδικό δίκτυο.

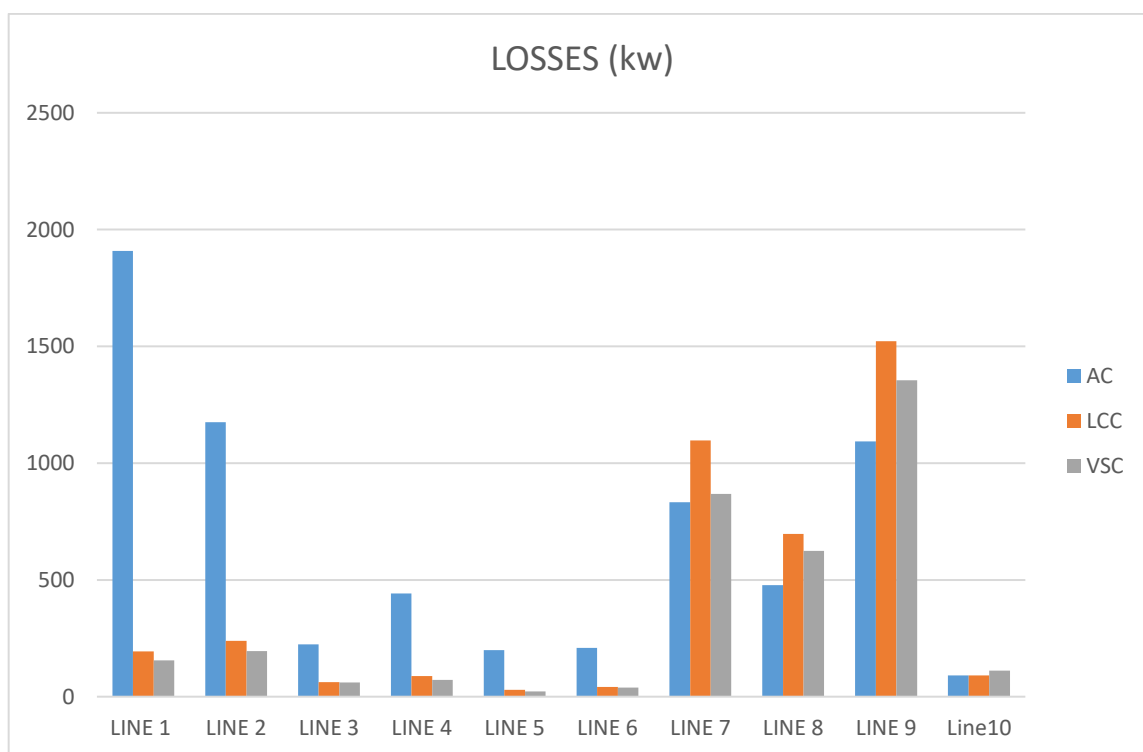
Γ. Σε αυτήν την υπο ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το τρίτο σενάριο φόρτισης, όπου έχουμε μειωμένη παραγωγή ισχύος από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Μια τέτοια κατάσταση φόρτισης μπορεί να προκύψει για παράδειγμα κάποιο βράδυ ή τις ημέρες με έντονη συννεφιά. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, ακολουθούν πίνακες με τα αποτελέσματα προς σύγκριση.

Πίνακας 38: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή

Losses (kW)			
	AC	LCC	VSC
Line 1	1909.1	193.3	155.1
Line 2	1174.7	238.7	194.6
Line 3	223.5	62.7	61.2
Line 4	441.6	87.9	71.5
Line 5	199.9	29.4	22.8
Line 6	208.6	41.1	38.3
Line 7	832.7	1097.6	868.7
Line 8	477.0	696.6	624.4
Line 9	1092.5	1521.5	1354.6
Line10	91.2	90.7	112.0
Σύνολο	6650.6	4059.5	3503.2

Πίνακας 39: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή, σε ποσοστό επί τοις εκατό της μεταφερόμενης ισχύος

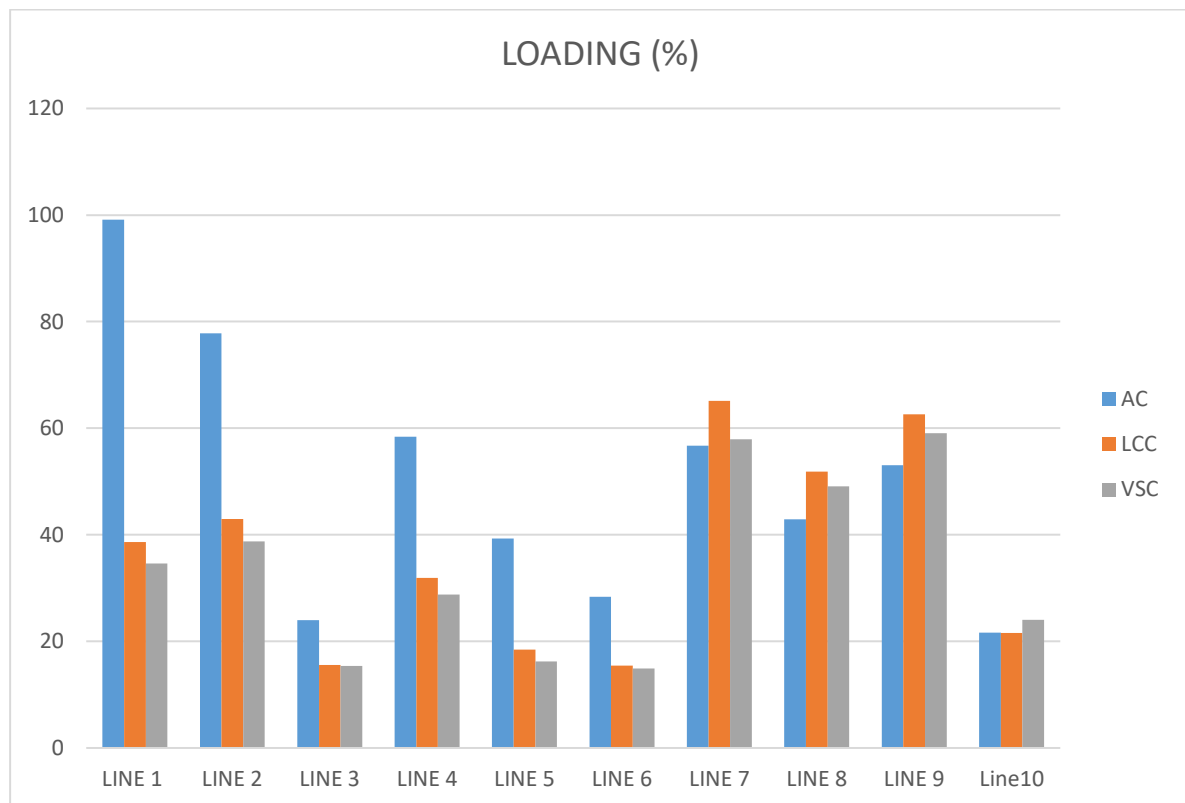
Losses (% της μεταφερόμενης ισχύος)			
	AC	LCC	VSC
Line 1	14.6	2.1	1.9
Line 2	9.6	2.4	2.1
Line 3	6.2	1.7	1.7
Line 4	5.3	1.2	1.1
Line 5	4.0	0.7	0.6
Line 6	7.2	1.2	1.1
Line 7	10.7	12.8	10.6
Line 8	14.0	15.5	15.2
Line 9	13.7	16.0	15.2
Line10	2.7	2.7	3.3



Γράφημα 7: Απώλειες γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή

Πίνακας 40: Φόρτιση γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή

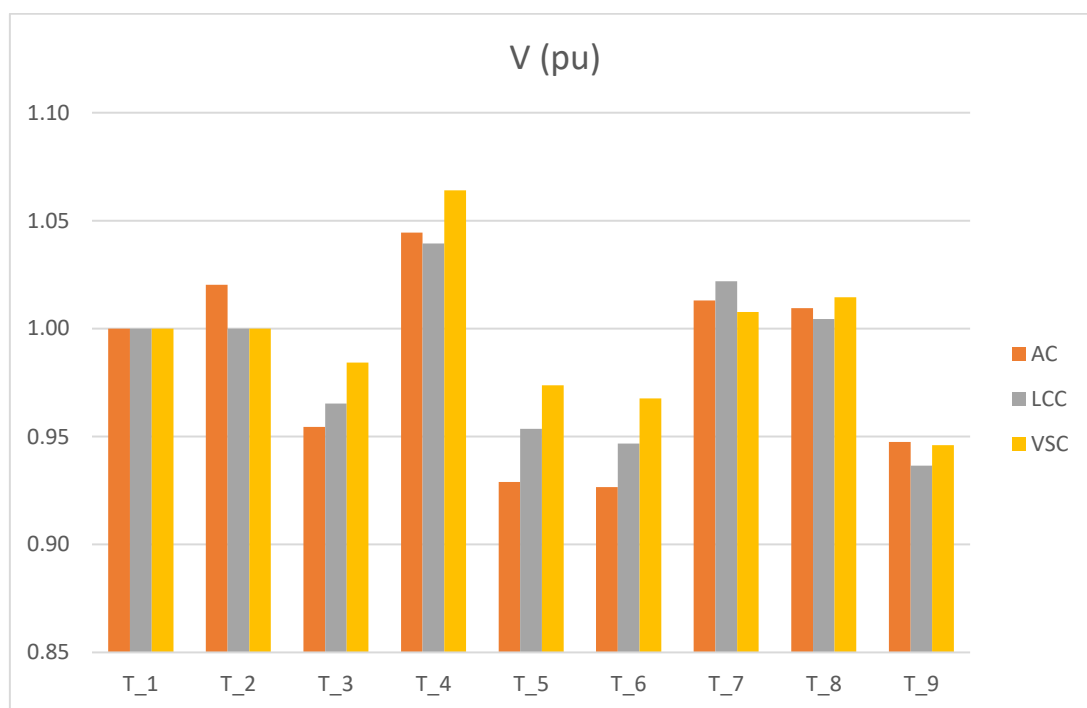
Loading (%)			
	AC	LCC	VSC
Line 1	99.15	38.64	34.62
Line 2	77.78	42.94	38.77
Line 3	23.99	15.56	15.38
Line 4	58.40	31.91	28.79
Line 5	39.29	18.45	16.25
Line 6	28.39	15.43	14.90
Line 7	56.71	65.11	57.92
Line 8	42.92	51.87	49.11
Line 9	53.04	62.59	59.06
Line10	21.67	21.61	24.02



Γράφημα 8: Φόρτιση γραμμών δικτύων με μειωμένη παραγωγή

Πίνακας 41: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύων με μειωμένη παραγωγή

Τάση Ζυγών (αμ)			
	AC	LCC	VSC
T_1	1.00	1.00	1.00
T_2	1.02	1.00	1.00
T_3	0.95	0.97	0.98
T_4	1.04	1.04	1.06
T_5	0.93	0.95	0.97
T_6	0.93	0.95	0.97
T_7	1.01	1.02	1.01
T_8	1.01	1.00	1.01
T_9	0.95	0.94	0.95



Γράφημα 9: Τάση (α.μ.) ζυγών δικτύων με μειωμένη παραγωγή

Πίνακας 42: Συνολικές Απώλειες Δικτύων με μειωμένη παραγωγή

	AC	LCC	VSC
P _{losses} (MW)	6.7	4.2	3.6
Q _{losses} (MVar)	10.3	10.1	4.6

Αρχικά, στο συγκεκριμένο σενάριο παρατηρούμε την μεγάλη αύξηση των απωλειών, λόγω της αυξημένης απαίτησης ισχύος από το εξωτερικό δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη φόρτιση των γραμμών, έως και στο 100%, όπως συμβαίνει με την γραμμή No1 στο αρχικό δίκτυο που είναι εξολοκλήρου AC. Απόρροια λοιπόν των αυξημένων φορτίσεων είναι οι αυξημένες απώλειες. Επιπρόσθετα, λόγω της μειωμένης παραγωγής, και στα πλαίσια διατήρησης της ονομαστικής τάσης των ζυγών, εγχέεται από τους πυκνωτές επιπρόσθετη άεργος ισχύς, η οποία δεν καταναλώνεται από κάποιο φορτίο, και έτσι πρέπει να οδηγηθεί μέσω των γραμμών μεταφοράς προς το εξωτερικό δίκτυο. Αυτό οδηγεί στην επιπλέον φόρτισή τους, περιορίζοντας έτσι το ποσό της ενεργούς ισχύος που μπορούν να μεταφέρουν. Στα υβριδικά δίκτυα ωστόσο, όπως φαίνεται και από τα ανωτέρω διαγράμματα, αυτές οι απώλειες μειώνονται σχεδόν στο μισό (όπως στην τοπολογία VSC), καθώς οι γραμμές μεταφοράς που λειτουργούν πλέον με συνεχές ρεύμα, μεταφέρουν μόνο την απαραίτητη ενεργό ισχύ. Οι τάσεις των ζυγών μπορούν να ρυθμιστούν με την επιπλέον εισχώρηση ενεργούς ισχύος, με αποτέλεσμα οι υπόλοιπες γραμμές του δικτύου να φορτίζονται ελαφρώς περισσότερο από τις αντίστοιχες του εξολοκλήρου AC δικτύου, καθώς η άεργος ισχύς των πυκνωτών διέρχεται μόνο από αυτές ώστε να φτάσει το εξωτερικό δίκτυο. Τέλος, οι τάσεις των ζυγών, για ακόμα μια φορά είναι πλησιέστερα στις ονομαστικές στην τοπολογία όπου έχουμε VSC, ενώ ακολουθεί η τοπολογία LCC. Αυτές οι τάσεις θα μπορούσαν να βελτιωθούν περαιτέρω μέσω της χρήσης των VSCs, ωστόσο αυτό θα οδηγούσε στην αύξηση των απωλειών και φόρτισης των γραμμών. Για αυτόν τον λόγο αποφασίστηκε να διατηρηθούν οι τάσεις σε επίπεδα εντός του ορίου από 0,95 έως 1,06 α.μ., χωρίς να γίνει περαιτέρω βελτιστοποίηση αυτών.

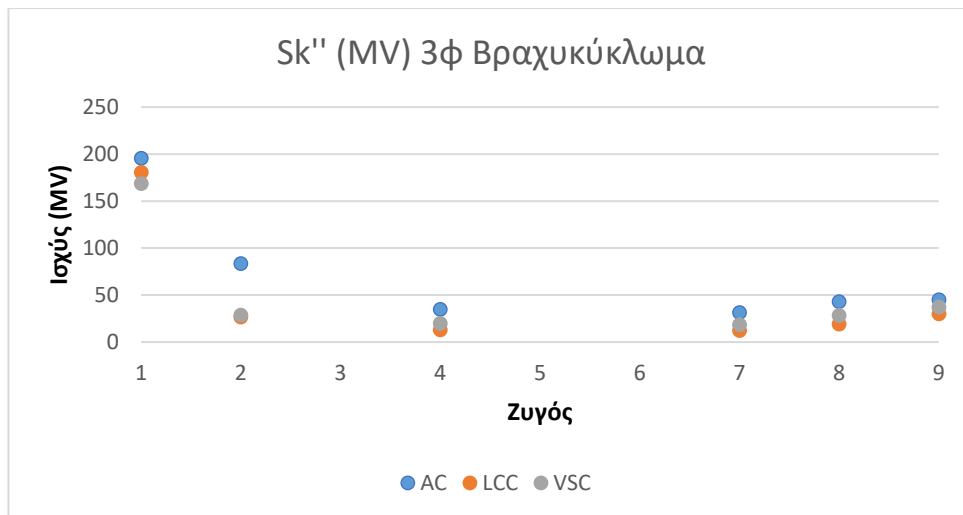
6.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων σφαλμάτων των τριών διαφορετικών τοπολογιών

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα από τα σφάλματα που εκτελέστηκαν στις τρεις διαφορετικές τοπολογίες. Θα γίνει πρώτα η ανάλυση των σφαλμάτων που εκτελέστηκαν στο σύνολο των ζυγών. Οι τιμές των μεγεθών υπό μελέτη παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

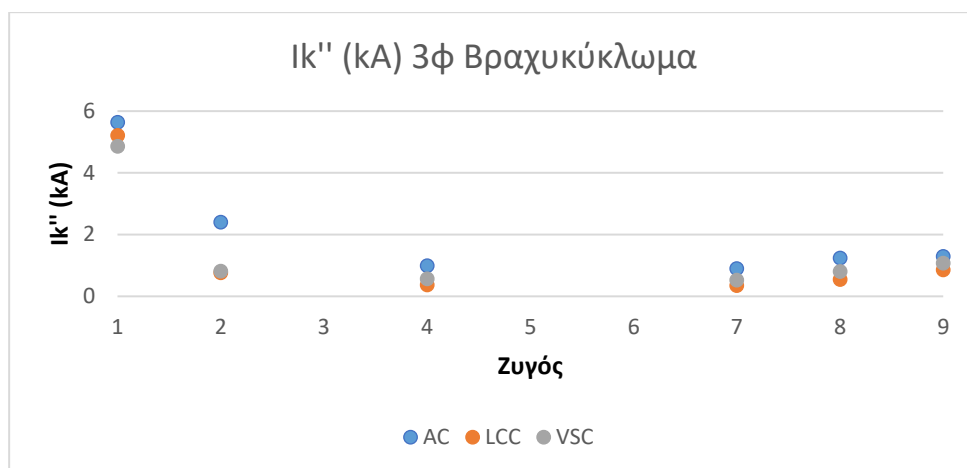
Πίνακας 43: Αποτελέσματα Σφαλμάτων σε σύνολο ζυγών δικτύων

Τριφασικό Βραχυκύκλωμα									
Busbar	AC			LCC			VSC		
	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)
T_1	195.34	5.64	15.54	180.57	5.21	12.80	168.56	4.87	11.90
T_2	83.42	2.41	5.18	26.54	0.77	1.97	28.48	0.82	2.06
T_4	34.65	1.00	1.87	12.81	0.37	0.68	19.81	0.57	1.07
T_7	31.31	0.90	1.67	12.14	0.35	0.64	18.47	0.53	0.99
T_8	42.98	1.24	2.48	19.11	0.55	1.11	28.09	0.81	1.63
T_9	44.93	1.30	2.38	29.98	0.87	1.56	37.19	1.07	2.00
Διφασικό Βραχυκύκλωμα									
Busbar	AC			LCC			VSC		
	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)
T_1	56.69	4.91	13.53	52.07	4.51	11.07	48.18	4.17	10.20
T_2	24.71	2.14	4.60	7.85	0.68	1.74	8.14	0.71	1.77
T_4	10.81	0.94	1.75	4.44	0.38	0.71	5.70	0.49	0.93
T_7	9.35	0.81	1.49	3.80	0.33	0.60	5.00	0.43	0.80
T_8	13.00	1.13	2.25	6.23	0.54	1.08	7.84	0.68	1.36
T_9	13.24	1.15	2.10	9.18	0.80	1.44	10.55	0.91	1.70
Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα									
Busbar	AC			LCC			VSC		
	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)	Sk'' (MVA)	Ik'' (kA)	Ipeak (kA)
T_1	17.19	1.49	4.10	11.55	1.00	2.46	10.57	0.92	2.24
T_2	21.83	1.89	4.06	9.68	0.84	2.15	9.97	0.86	2.17
T_4	8.00	0.69	1.30	3.99	0.35	0.64	4.65	0.40	0.75
T_7	7.03	0.61	1.12	3.48	0.30	0.55	4.06	0.35	0.65
T_8	11.30	0.98	1.95	6.47	0.56	1.13	7.55	0.65	1.31
T_9	8.06	0.70	1.28	6.40	0.55	1.00	6.79	0.59	1.09

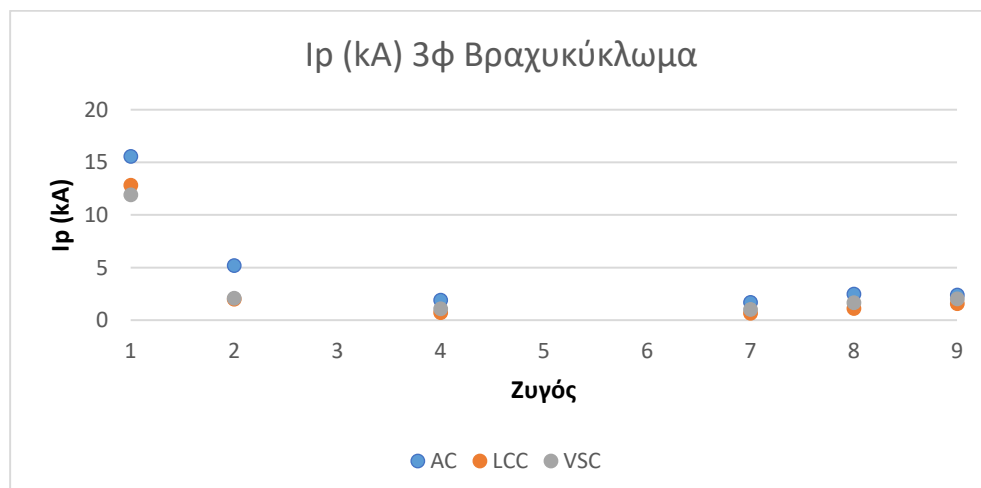
Επίσης, για την καλύτερη σύγκριση αποτελεσμάτων, παραθέτονται τα ακόλουθα γραφήματα:



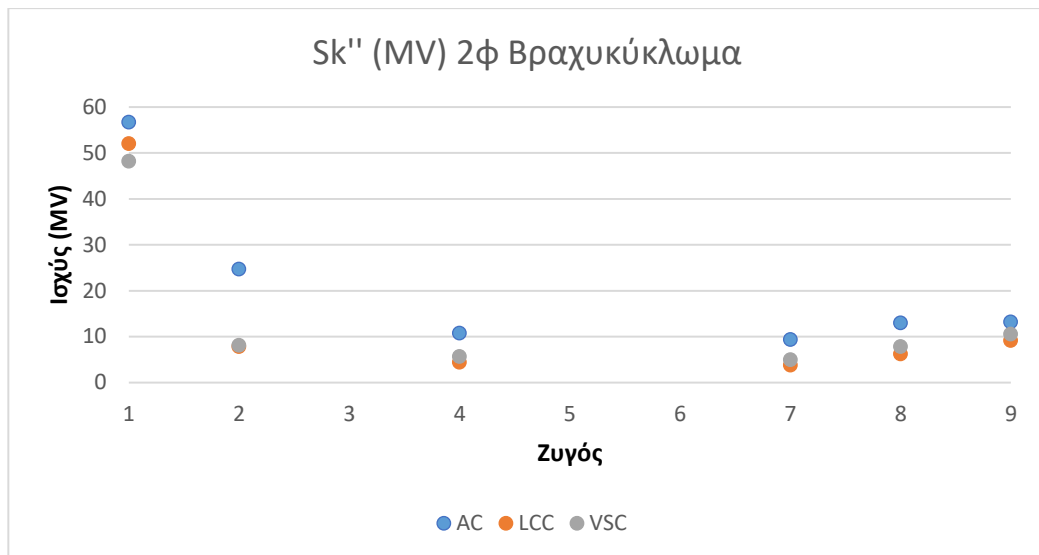
Γράφημα 10: Ισχύς βραχυκύκλωσης ζυγών σε τριφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες



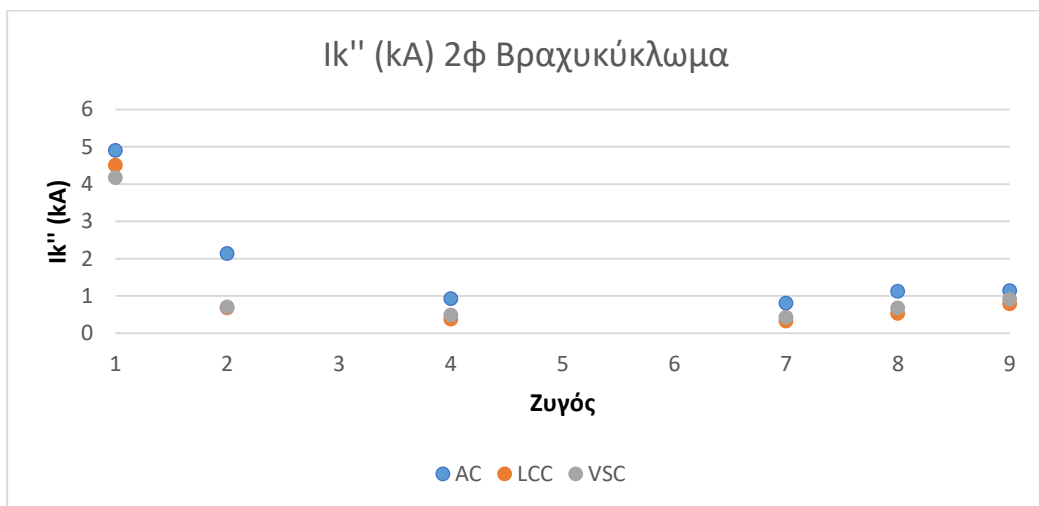
Γράφημα 11: Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε τριφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες



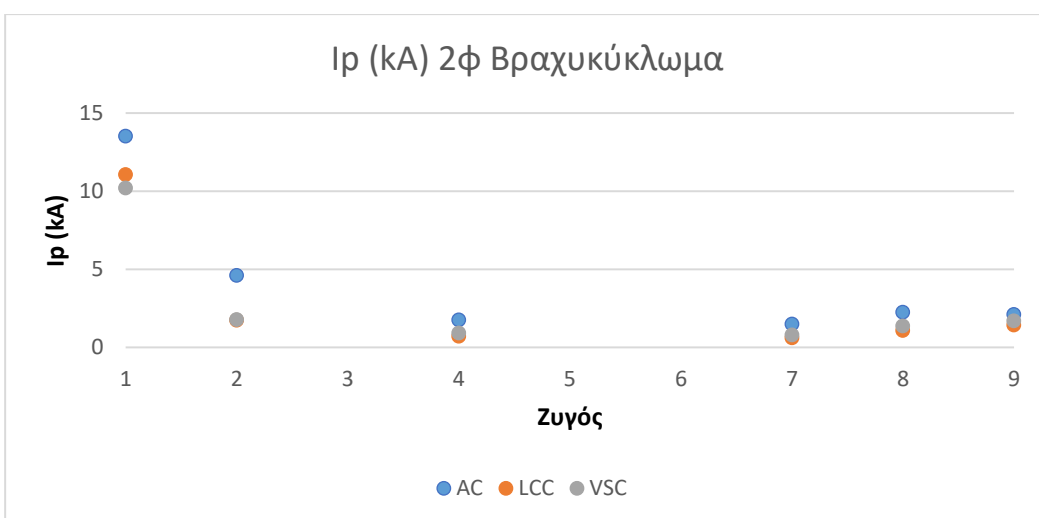
Γράφημα 12: Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε τριφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες



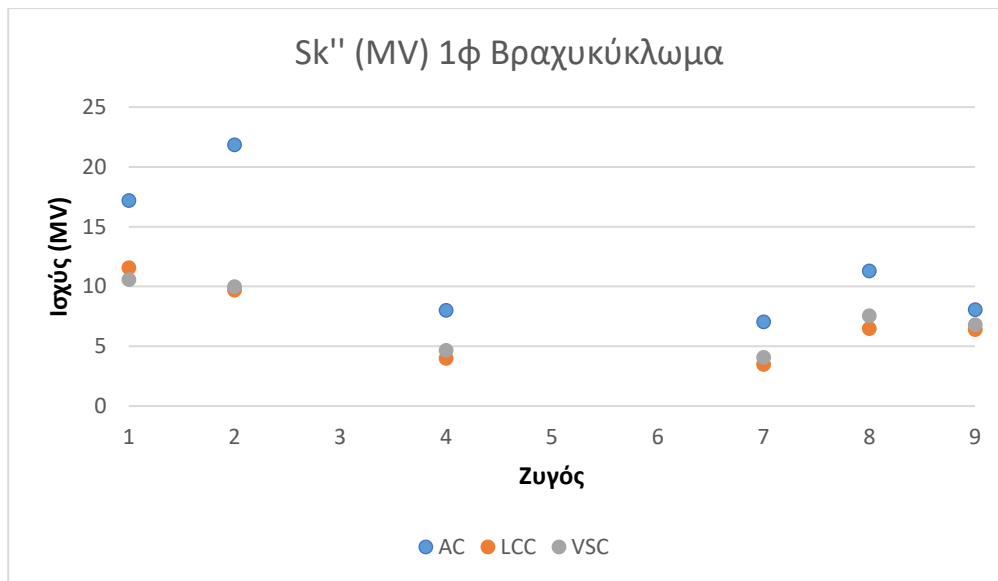
Γράφημα 13: Ισχύς βραχυκύκλωσης ζυγών σε διφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες



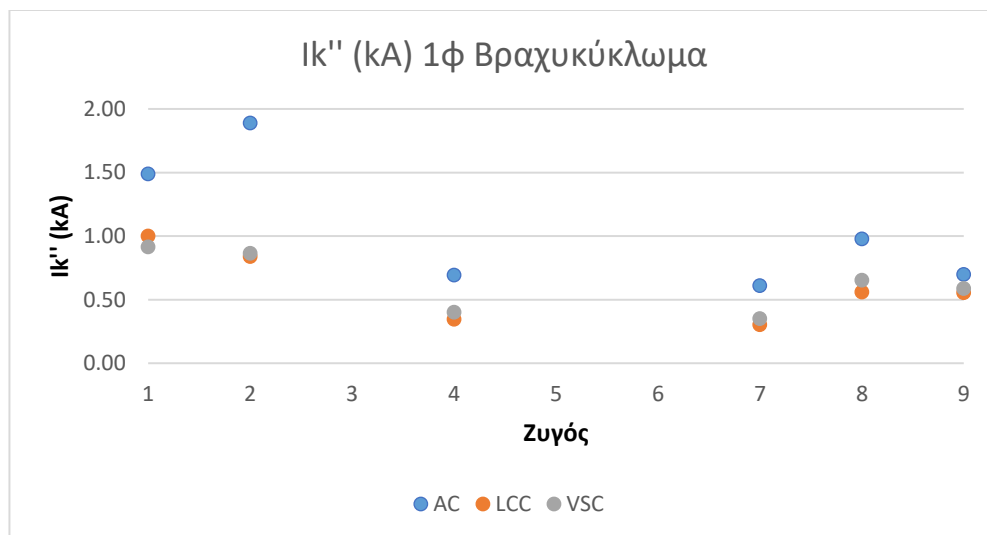
Γράφημα 14: Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε διφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες



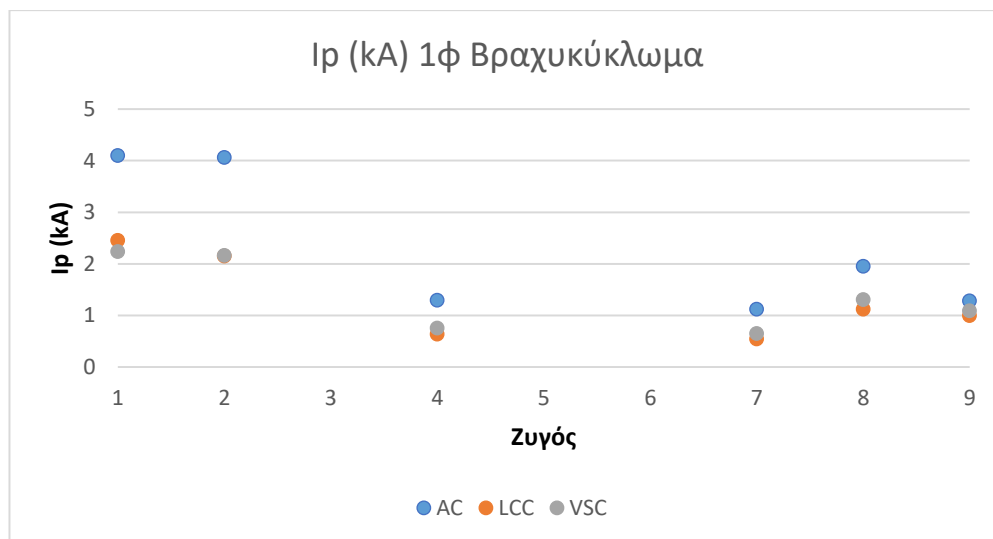
Γράφημα 15: Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε διφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες



Γράφημα 16: Ισχύς βραχυκύκλωσης ζυγών σε μονοφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες



Γράφημα 17: Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε μονοφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες



Γράφημα 18: Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ζυγών σε μονοφασικό σφάλμα για τις τρεις τοπολογίες

Από τα ανωτέρω, μπορούμε να παρατηρήσουμε εύκολα πως σε όλες τις περιπτώσεις οι τοπολογίες με τα DC τμήματα, παρουσιάζουν μικρότερες τιμές αρχικής Ισχύος Βραχυκυκλώματος (S_{kss}), αρχικού ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{kss}), καθώς και μέγιστου εμφανιζόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{peak}), με παραπλήσιες τιμές στα υβριδικά δίκτυα, ανεξαρτήτως σφάλματος.

Όπως προαναφέρθηκε, το Power Factory, έχει προγραμματιστεί με τέτοιον τρόπο ώστε στους υπολογισμούς βραχυκυκλωμάτων με βάση τα πρότυπα VDE, IEC και ANSI, να απομονώνει τα DC τμήματα εξολοκλήρου από το υπόλοιπο δίκτυο, καθώς τα θυρίστορ αυτόματα, στην περίπτωση που υπάρχει χαμηλή τάση στην AC πλευρά, μεταβαίνουν σε κατάσταση όπου εμποδίζουν την μεταγωγή. Η μόνη περίπτωση που συμμετέχουν οι μετατροπείς στην τοπολογία LCC, με κάποιο ρεύμα βραχυκύκλωσης στον υπολογισμό του εκάστοτε σφάλματος, είναι εάν θεωρήσουμε ότι λειτουργούν για να μεταβάλουν την ταχύτητα σε κινητήρα (λειτουργώντας δηλαδή ως variable speed drive), το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωσή μας. Σύμφωνα με τη μέθοδο “Complete”, το πρόγραμμα θέτει κάποιες προκαθορισμένες τιμές και το παραγόμενο ρεύμα προκύπτει από την ισχύ του κάθε μετατροπέα. Το ίδιο ισχύει και για την τοπολογία VSC, αν και μας δίνεται η δυνατότητα να ρυθμίσουμε με δικές μας τιμές το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Για να μπορέσουμε λοιπόν να συγκρίνουμε τις δύο τοπολογίες (LCC με VSC), θέσαμε τα ίδια ρεύματα βραχυκύκλωσης στους αντιστροφές και ανορθωτές των δύο διατάξεων.

Όσον αφορά λοιπόν τα αποτελέσματα από την εκτέλεση σφαλμάτων στο σύνολο των ζυγών του δικτύου, παρατηρούμε ότι οι μετατροπές εμποδίζουν την μεταφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης μέσω των dc γραμμών, ενώ η συνεισφορά των γεννητριών και των φωτοβολταϊκών στην ισχύ και στα ρεύματα βραχυκύκλωσης παραμένει ίδια. Δηλαδή, τόσο τα θυρίστορ όσο και τα IGBTs, δύναται να περιορίσουν το ρεύμα σφάλματος που ανταλλάσσεται μεταξύ των ζυγών εναλλασσόμενης τάσης που συνδέουν. Αποτέλεσμα όλων των ανωτέρω, είναι η εμφάνιση μικρότερων ρευμάτων στους ζυγούς AC τόσο στην τοπολογία LCC όσο και στην τοπολογία VSC.

Στον παρακάτω πίνακα, παραθέτονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλα τα σφάλματα που διεξήγαμε στη γραμμή No13 του δικτύου:

Πίνακας 44: Αποτελέσματα τριφασικού βραχυκυκλώματος συμφώνως μεθόδου “Complete” στα 50% του μήκους της γραμμής Νο10

	AC	LCC	VSC
Sk" (MVA)	35.2	20.6	24.2
Ik" (kA)	1.080	0.445	0.670
Ipeak (kA)	2.068	0.852	1.292

Πίνακας 45: Αποτελέσματα διφασικού και μονοφασικού βραχυκυκλώματος συμφώνως μεθόδου “Complete” στα 50% του μήκους της γραμμής Νο10

Διφασικό Βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων A-B (Ik'' (kA))									
Line	AC			LCC			VSC		
	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση
10	0	0.933	0.933	0	0.534	0.534	0,0	0.577	0.577
Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεως A και γης (Ik'' (kA))									
Line	AC			LCC			VSC		
	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση
10	0.776	0	0	0.479	0	0	0.496	0	0

Τέλος, στον επόμενο πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι τάσεις στους ζυγούς κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα και οι τάσεις των ζυγών μετά από τη διεξαγωγή ασύμμετρων σφαλμάτων.

Πίνακας 46: Τάση ζυγών AC των τριών τοπολογιών μετά από τριφασικό σφάλμα στη γραμμή Νο10

Τάση (kV)			
Busbar	AC	LCC	VSC
T_1	17.24	18.53	18.22
T_2	14.88	20.00	20.00
T_4	1.85	0.85	0.20
T_7	5.56	1.93	3.35
T_8	3.73	2.93	3.31
T_9	8.67	8.63	8.82

Πίνακας 47: Τάσεις ζυγών AC των τριών δικτύων μετά από διφασικό και μονοφασικό σφάλμα στη γραμμή Νο10

Διφασικό Βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων A-B (Τάσεις (kV))									
Busbar	AC			LCC			VSC		
	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση
T_1	11.46	10.40	10.32	11.48	10.90	10.90	11.58	10.85	10.71
T_2	11.64	9.32	9.67	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55
T_4	11.48	5.56	6.12	10.09	5.12	4.97	12.16	5.89	6.27
T_7	11.48	6.32	6.46	9.87	5.28	4.76	11.93	6.47	5.78
T_8	11.37	5.99	5.98	10.10	5.09	5.41	11.86	6.23	6.03
T_9	10.80	6.55	7.29	9.84	5.84	7.18	11.15	6.79	7.35
Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεως A και γης (Τάσεις (kV))									
Busbar	AC			LCC			VSC		
	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση	A' Φάση	B' Φάση	Γ' Φάση
T_1	9.46	11.57	12.57	10.38	10.90	12.68	10.05	10.93	13.07
T_2	9.35	12.31	11.70	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55
T_4	1.44	15.49	12.81	0.16	13.52	10.12	0.34	15.30	12.49
T_7	4.50	14.57	11.03	2.43	12.44	8.46	2.92	14.12	10.66
T_8	3.20	14.37	11.59	2.53	12.42	9.49	2.76	13.85	11.29
T_9	5.23	12.75	11.50	5.15	11.24	10.23	5.20	12.23	11.50

Από τους ανωτέρω πίνακες, αρχικά παρατηρούμε ότι σε συμμετρικό σφάλμα, τα ρεύματα αλλά και η ισχύς βραχυκύκλωσης της γραμμής όπου γίνεται το σφάλμα είναι μικρότερα στα υβριδικά δίκτυα από ότι στο καθαρά AC δίκτυο. Ωστόσο, οι πτώσεις τάσης στους ζυγούς στα υβριδικά δίκτυα είναι μεγαλύτερη καθώς σε αυτούς που βρίσκονται κοντά στο σφάλμα δεν υπεισέρχεται ισχύς από τους υπόλοιπους καθώς πλέον αυτή η ισχύς εμποδίζεται από τους μετατροπείς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη πτώση τάσεως στους ζυγούς πλησίον του σφάλματος αλλά και μικρότερη πτώση τάσεως στους ζυγούς μακράν του σφάλματος (όπως ο ζυγός Νο1). Έμφαση θα πρέπει να δοθεί στην πτώση τάσεως του ζυγού Νο3, οποίος στο δίκτυο που είναι εξολοκλήρου AC, έχει μια πτώση τάσης της τάξεως του 40%, ενώ στις άλλες δύο τοπολογίες έχει μηδενική πτώση τάσεως καθώς απομονώνεται από το σφάλμα εξολοκλήρου μέσω του αντιστροφέα που τον τροφοδοτεί.

Όσον αφορά τα ασύμμετρα σφάλματα, φαίνεται πως στις DC τοπολογίες, έχουμε μικρότερες τιμές ρευμάτων από ότι στο δίκτυο που λειτουργεί μόνο σε AC. Ωστόσο και πάλι, οι τάσεις των φάσεων των ζυγών μετά το σφάλμα είναι μεγαλύτερες στο αρχικό δίκτυο από ότι στα υβριδικά δίκτυα, κυρίως στους ζυγούς που βρίσκονται κοντά στο βραχυκύκλωμα.

6.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων RMS αξιολόγησης

Κλείνοντας, στο παρόν κεφάλαιο, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της RMS αξιολόγησης που προέκυψαν από τις τρεις διαφορετικές τοπολογίες. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από την εκάστοτε προσομοίωση:

Πίνακας 48: Πίνακας αποτελεσμάτων RMS αξιολογήσεων AC δικτύου

Εξολοκλήρου AC δίκτυο					
	Αρχική τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τελική τιμή	Χρόνος επαναφοράς κατάστασης προ σφάλματος
Ενεργός Ισχύς Gen_No2	1,5 MW	2,28 MW	0,394 MW	1,516 MW	1,78 s
Γωνία Ρότορα Gen_No2	15,075 Deg	19,28Deg	12,867 Deg	15,158 Deg	4,586 s
Συχνότητα Gen_No2	1 pu	1,002 pu	0,998 pu	1 pu	4,471 s
Ενεργός Ισχύς Γραμμής No10	5,112 MW	6,028 MW	1,397 MW	5,103 MW	1,634 s

Πίνακας 49: Πίνακας αποτελεσμάτων RMS αξιολογήσεων Υβριδικού δικτύου τοπολογίας LCC

Υβριδικό Δίκτυο τοπολογίας LCC					
	Αρχική τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τελική τιμή	Χρόνος επαναφοράς κατάστασης προ σφάλματος
Ενεργός Ισχύς Gen_No2	1,5 MW	4,5 MW	0,327 MW	1,528 MW	1,781 s
Γωνία Ρότορα Gen_No2	15,673 Deg	18,622Deg	14,422 Deg	15,768 Deg	4,021 s
Συχνότητα Gen_No2	1 pu	1,001 pu	0,999 pu	1 pu	4,081 s
Ενεργός Ισχύς Γραμμής No10	5,11 MW	7,076 MW	0,321 MW	5,12 MW	1,419 s

Πίνακας 50: Πίνακας αποτελεσμάτων RMS αξιολογήσεων Υβριδικού δικτύου τοπολογίας VSC

Υβριδικό Δίκτυο τοπολογίας VSC					
	Αρχική τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη τιμή	Τελική τιμή	Χρόνος επαναφοράς κατάστασης προ σφάλματος
Ενεργός Ισχύς Gen_No2	1,498 MW	1,858 MW	0,414 MW	1,516 MW	1,955 s
Γωνία Ρότορα Gen_No2	13,946 Deg	16,353 Deg	12,7 Deg	14,298 Deg	2,925 s
Συχνότητα Gen_No2	1 pu	1,002 pu	0,999 pu	1 pu	2,935 s
Ενεργός Ισχύς Γραμμής No10	4,693 MW	4,743 MW	3,151 MW	4,68 MW	1,145 s

Παρατηρούμε ότι όσον αφορά τον χρόνο επαναφοράς της παραγόμενης ισχύος από την γεννήτρια No2 στις τιμές προ του σφάλματος, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των τριών τοπολογιών, καθώς και στις τρεις περιπτώσεις, μετά από περίπου 1,9 sec έχει επανέρθει στην αρχική της τιμή. Αυτό που έχει σημασία να σχολιαστεί, είναι το εύρος των τιμών που λαμβάνει αυτή κατά την μεταβατική περίοδο. Η μεγαλύτερη τιμή εντοπίζεται στην τοπολογία

LCC (4,5 MW), ακολούθως στο αρχικό δίκτυο AC (2,28 MW), ενώ η μικρότερη εντοπίζεται στην τοπολογία VSC (1,858 MW). Η ελάχιστη τιμή είναι και στις τρεις τοπολογίες περίπου ίδια (περί τα 0,400 MW). Άμεσα συνδεδεμένες με τις ανωτέρω τιμές είναι και οι τιμές της ισχύος που μεταφέρεται δια μέσου της γραμμής No10, οι οποίες ακολουθούν την ίδια κατανομή όσον αφορά το εύρος. Δηλαδή, το μεγαλύτερο εύρος εντοπίζεται στην τοπολογία LCC, ενώ το μικρότερο στην τοπολογία VSC, στην οποία επιτυγχάνεται και ο μικρότερος χρόνος επαναφοράς (1,145 s).

Οι βέλτιστοι χρόνοι για την επαναφορά των τιμών σε αυτές προ του σφάλματος των μεγεθών της συχνότητας και της γωνίας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του ρότορα, εντοπίζονται στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας VSC, ακολουθούν σε αυτό της τοπολογίας LCC και τέλος στο αρχικό δίκτυο. Η διαφορά μεταξύ των χρόνων των δύο πρώτων δικτύων είναι ένα δευτερόλεπτο ενώ μεταξύ των δύο τελευταίων είναι μισό δευτερόλεπτο, ενώ το εύρος τιμών των εν λόγω μεγεθών είναι παρόμοιο και στις τρεις περιπτώσεις.

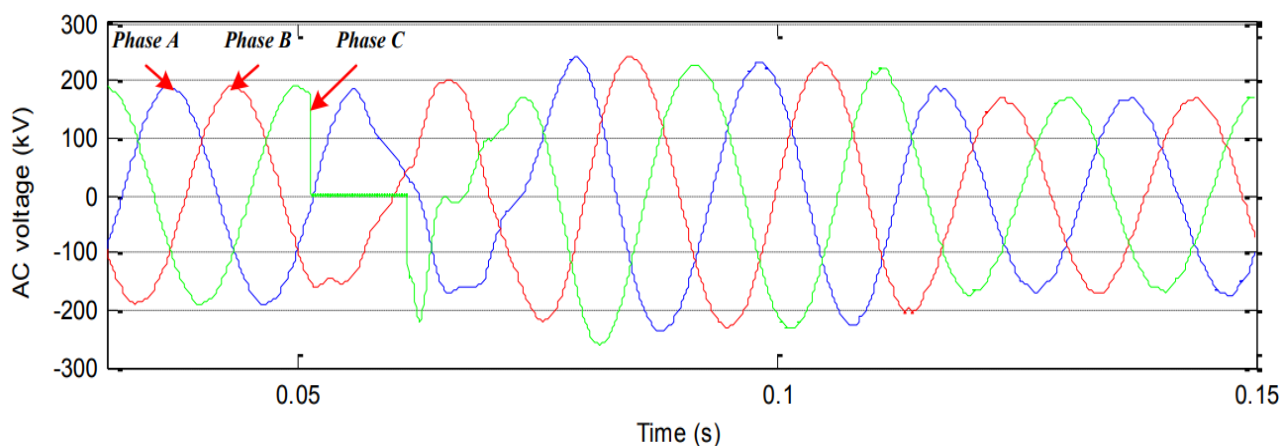
Τέλος, όσον αφορά την μορφή των διαγραμμάτων της ισχύος, όπως προαναφέρθηκε και στα σχόλια έπειτα από κάθε ανάλυση στο εκάστοτε κεφάλαιο, τόσο στο αρχικό μας δίκτυο όσο και στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας LCC, παρατηρούμε την ύπαρξη αιχμών και απότομων μεταβολών οι οποίες οφείλονται στην συμπεριφορά του ελεγκτή του φωτοβολταϊκού πάρκου. Αντιθέτως, παρατηρήθηκε πως στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας VSC, αυτές οι απότομες μεταβολές δεν εντοπίζονται και οι καμπύλες των αποκρίσεων ακολουθούν από την αρχή την ημιτονοειδή μορφή.

Άλλο ένα κομμάτι της αξιολόγησης που θα πρέπει να σχολιαστεί, είναι τα μηνύματα που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης στο παράθυρο εξόδου για το υβριδικό δίκτυο τοπολογίας LCC, τα οποία φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί:

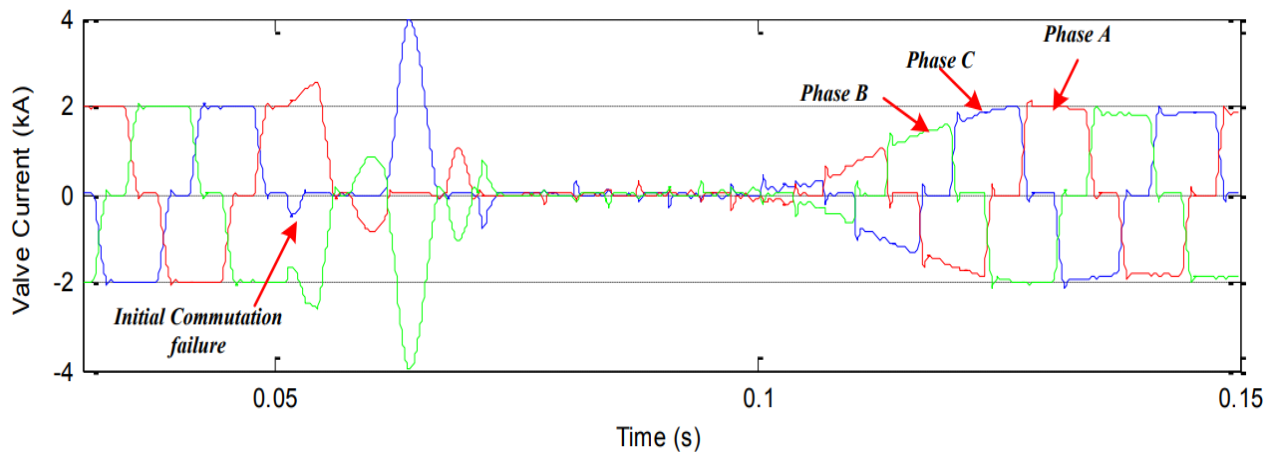
```
DIgSI/pcl - (t=500:029 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=500:029 ms) 'Grid\Rectifier_3.ElmRecmono':
DIgSI/pcl - (t=500:029 ms) Changed to blocking mode
DIgSI/pcl - (t=500:074 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=500:074 ms) 'Grid\Rectifier_2.ElmRecmono':
DIgSI/pcl - (t=500:074 ms) Changed to blocking mode
DIgSI/pcl - (t=525:000 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=525:000 ms) 'Grid\Line13.ElmLne':
DIgSI/pcl - (t=525:000 ms) Clear Short Circuit.
DIgSI/pcl - (t=525:500 ms) -----
DIgSI/pcl - (t=525:500 ms) 'Grid\Rectifier_2.ElmRecmono':
DIgSI/pcl - (t=525:500 ms) Back to normal operation
-----
```

Εικόνα 73: Παράθυρο εξόδου κατά την αξιολόγηση RMS στο δίκτυο τοπολογίας LCC

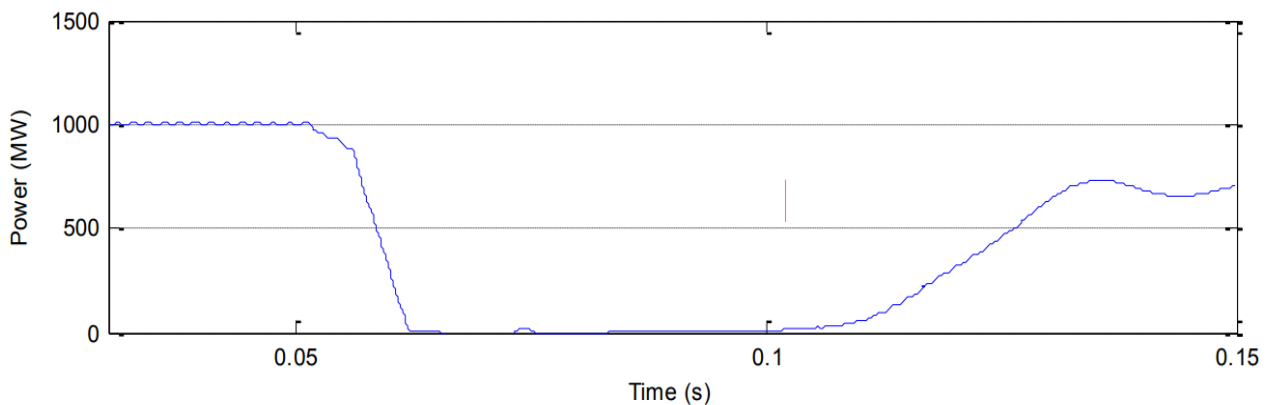
Η ανωτέρω εικόνα αποτελεί ένα μόνο τμήμα από το παράθυρο εξόδου, ωστόσο είναι αντιπροσωπευτική για το φαινόμενο που παρατηρείται. Όπως προαναφέρθηκε, τα θυρίστορ, ενώ ενεργοποιούνται μέσω παλμού, πρέπει να απενεργοποιηθούν μέσω της επιβολής αρνητικής τάσης από την AC πλευρά για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, ώστε να ξεκινήσει να άγει το επόμενο ζεύγος θυρίστορ, αλλιώς προκύπτει αυτό που ονομάζεται «αδυναμία μεταγωγής» (commutation failure) με αποτέλεσμα για παράδειγμα να άγουν ταυτόχρονα δύο από τα τρία ζεύγη θυρίστορ. Άρα χρειάζεται ένα περιθώριο μεταγωγής από την πλευρά του αντιστροφέα για να εξασφαλίσουμε επιτυχείς μεταγωγές. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που έχουμε απότομες πτώσεις τάσεως στην AC πλευρά ή απότομες αυξήσεις στο συνεχές ρεύμα, η αδυναμία μεταγωγής δεν μπορεί να αποφευχθεί. Μόλις το συγκεκριμένο φαινόμενο αναπτυχθεί, η ταυτόχρονη αγωγή από δύο ζεύγη θυρίστορ λειτουργεί ως ένα βραχυκύκλωμα από την πλευρά DC, και η μεταφερόμενη ισχύς μηδενίζεται. Επισυνάπτονται κάποιες χαρακτηριστικές κυματομορφές και η ισχύς εξόδου ενός αντιστροφέα, στον οποία παρατηρείται αδυναμία μεταγωγής λόγω στιγμιαίου μονοφασικού βραχυκυκλώματος της φάσης C με την γη [20]:



Εικόνα 74: Κυματομορφή τάσης εισόδου αντιστροφέα κατά την εκτέλεση μονοφασικού βραχυκυκλώματος με τη γη.



Εικόνα 75: Κυματομορφή DC ρεύματος εξόδου αντιστροφέα όπου εμφανίζεται το φαινόμενο αδυναμίας μεταγωγής



Εικόνα 76: Ισχύς εξόδου αντιστροφέα όπου εμφανίζεται το φαινόμενο της αδυναμίας μεταγωγής

Από τις παραπάνω εικόνες, συμπεραίνουμε πως ακόμα και από ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα, μηδενίζεται τόσο το DC ρεύμα, όσο και η μεταφερόμενη ισχύς με αποτέλεσμα να υπάρχουν σοβαρές επιπτώσεις του εν λόγω φαινομένου στο υπόλοιπο δίκτυο. Σε περιπτώσεις όπου έχουμε επαναλαμβανόμενες αδυναμίες μεταγωγής, θα πρέπει να απομονωθεί ολόκληρος ο μετατροπέας μέχρι να εκκαθαριστεί το σφάλμα, το οποίο μπορεί να προκύψει με μια μείωση της ac τάσης της τάξεως από 10 έως 14%. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ακόμα και σφάλματα που προκύπτουν σε μακρινά από τον μετατροπέα σημεία, να μπορούν να προκαλέσουν αδυναμία μεταγωγής [20].

Στην περίπτωση μας, όπως προαναφέρθηκε, και λόγω του αντίκτυπου του βραχυκυκλώματος σε ολόκληρο το δίκτυο, οι μετατροπείς μεταπίπτουν συνεχώς από κατάσταση λειτουργίας σε κατάσταση απομόνωσης στην προσπάθειά τους να απομονωθεί το σφάλμα και να επιτευχθεί και πάλι μια κατάσταση ισορροπίας στο δίκτυο, χωρίς αυτό να επιτυγχάνεται. Για την αποφυγή τέτοιων συμβάντων στην πραγματικότητα, έχουν αναπτυχθεί

διάφορα μοντέλα ελέγχου για τους μετατροπείς, τα οποία ρυθμίζουν για παράδειγμα τη γωνία εναύσεως των θυρίστωρ ή διάφορες διατάξεις (πχ χρήση πυκνωτών μεταξύ των δύο άκρων του εκάστοτε θυρίστωρ) για την εξασφάλιση τάσης ακόμα και όταν υπάρχει βραχυκύκλωμα, ώστε να επιτυγχάνεται η μεταγωγή. Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά αρχικά είναι αρκετά περίπλοκα, και άρα ξεφεύγουν από την ανάλυση της παρούσας διπλωματικής, καθώς θα μπορούσαμε να αφιερώσουμε μια ολόκληρη εργασία σε αυτά, και οι διατάξεις είναι σύνθετες και επεμβαίνουν στο επίπεδο του μετατροπέα κάτι το οποίο δεν μας επιτρέπεται από το ίδιο το power factory, καθώς ο χρήστης δεν μπορεί να εκτελέσει μετατροπές στο μπλοκ του στοιχείου.

Κλείνοντας, πρέπει να τονιστεί πως η αποτελεσματικότητα των ανωτέρω μεθόδων είναι περιορισμένη καθώς κυρίως αποτρέπουν τις επαναλαμβανόμενες αποτυχίες μεταγωγής και όχι εξολοκλήρου την εμφάνιση του φαινομένου, καθώς δεν μπορούμε εύκολα να προβλέψουμε το πότε θα προκύψει κάποιο σφάλμα και για να επιδράσουν τα μοντέλα ελέγχου απαιτείται κάποιος χρόνος [20].

7. Γενικά Συμπεράσματα

Έχοντας πλέον συγκρίνει συνολικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, μπορούμε πλέον να καταλήξουμε με ορθότητα στα συμπεράσματα που ακολουθούν, όσον αφορά τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της κάθε μίας εκ των τριών διαφορετικών τοπολογιών που εξετάστηκαν (τοπολογία δικτύου που λειτουργεί εξολοκλήρου στο εναλλασσόμενο ρεύμα, τοπολογία υβριδικού δικτύου LCC και τοπολογία υβριδικού δικτύου VSC), ώστε να καταλήξουμε σε αυτήν με τα περισσότερα πλεονεκτήματα.

1. Απώλειες και Φόρτιση Γραμμών

Όσον αφορά τη ροή φορτίου και τη λειτουργία του δικτύου υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, χωρίς την παρουσία σφαλμάτων, η τοπολογία παίζει καθοριστικό ρόλο στις απώλειες και στη φόρτιση των γραμμών μεταφοράς. Οι μεγαλύτερες απώλειες παρατηρούνται στο δίκτυο που λειτουργεί εξολοκλήρου στο εναλλασσόμενο ρεύμα, τόσο στην ενεργό όσο και στην άεργο ισχύ. Αντιθέτως, τα υβριδικά δίκτυα, και ιδιαίτερα η τοπολογία στην οποία γίνεται χρήση VSCs, παρουσιάζουν τις λιγότερες απώλειες. Αυτή η ιδιότητα προκύπτει από τη δυνατότητα των δικτύων DC, να μεταφέρουν μόνο ενεργό ισχύ, χωρίς την μεταφορά άεργου ρεύματος, μειώνοντας έτσι τις απώλειες λόγω ωμικών και επαγωγικών αντιστάσεων. Το ανωτέρω φαινόμενο γίνεται εντονότερο, όσο μεγαλώνει το μήκος των γραμμών μεταφοράς όπως χαρακτηριστικά παρατηρήθηκε στο σενάριο της μειωμένης παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά πάρκα όπου η γραμμή No9 στο δίκτυο τοπολογίας LCC, αν και με ελάχιστα μικρότερη φόρτιση σχετικά με την γραμμή No7, εμφάνισε περισσότερες απώλειες. Πιο συγκεκριμένα, η τοπολογία LCC παρουσιάζει 47,68% λιγότερες απώλειες κατά την τυπική φόρτιση (base scenario) του δικτύου, έναντι της εξολοκλήρου AC τοπολογίας και 15,65% λιγότερη κατανάλωση άεργου ισχύος. Στη μελέτη με την μειωμένη κατανάλωση, η τοπολογία LCC παρουσίασε μια μείωση απωλειών κατά 29,17% συγκριτικά με το αρχικό δίκτυο, ωστόσο υπήρξε μια αύξηση κατά 78,24% στην κατανάλωση άεργου ισχύος, λόγω της απαίτησής της από τους converters, ενώ παράλληλα δεν υπήρχε αντίστοιχη απαίτηση από το αρχικό δίκτυο καθώς η πτώση τάσης στους ζυγούς ήταν μικρότερη λόγω των μικρότερων φορτίσεων. Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ της τοπολογίας VSC και του αρχικού μας δικτύου, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η υβριδική τοπολογία παρουσιάζει μια εξοικονόμηση ενεργούς ισχύος της τάξεως του 53,67% , και 65,96% όσον αφορά την άεργο ισχύ. Σημαντικό είναι εδώ να τονίσουμε πως αυτά τα

ποσοστά διατηρούνται και στα υπόλοιπα σενάρια που διεξήχθησαν, για παράδειγμα στο σενάριο με την μειωμένη κατανάλωση φορτίων, το υβριδικό δίκτυο είχε 42,26% λιγότερες απώλειες στην ενεργό ισχύ αλλά και ταυτόχρονα 58,78% λιγότερη κατανάλωση άεργου ισχύος. Τέλος, συγκρίνοντας τις δύο υβριδικές τοπολογίες, παρατηρούμε ότι η χρήση VSC έχει ως αποτέλεσμα την μείωση απωλειών ενεργούς ισχύος κατά 18,49% και της άεργου ισχύος κατά 76,89% στο σενάριο με τις μειωμένες καταναλώσεις, τιμές οι οποίες είναι οι μέγιστες εκ των τριών σεναρίων. Σε σενάριο τυπικής φόρτισης (base scenario) δικτύου, η χρήση LCC επιφέρει 11,44% περισσότερες απώλειες ενεργούς ισχύος και 59,65% περισσότερες απώλειες άεργου ισχύος.

2. Σφάλματα και Συμπεριφορά Δικτύου

Όσον αφορά τα αποτελέσματα σεναρίων στα οποία διεξήχθησαν τα διάφορα σφάλματα στις τρεις διαφορετικές τοπολογίες, παρατηρούμε ότι οι υβριδικές τοπολογίες στις οποίες γίνεται χρήση συνεχούς ρεύματος, επιδεικνύουν καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά την ισχύ και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που εμφανίζονται. Οι τοπολογίες αυτές, παρουσιάζουν μικρότερες τιμές αρχικού ρεύματος και ισχύος βραχυκύκλωσης, όπως επίσης και μικρότερη τιμή ρεύματος ακμής κατά το σφάλμα, συγκριτικά με το αρχικό μας δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη καταπόνηση και την επιπρόσθετη προστασία του δικτύου και των διαφόρων εξαρτημάτων του, καθώς υποβάλλονται σε μικρότερες φορτίσεις. Έτσι, επιτυγχάνεται η καλύτερη σταθερότητα του δικτύου και η αποφυγή σοβαρών βλαβών στον εξοπλισμό του. Παράλληλα, και όπως χαρακτηριστικά προέκυψε από τη διεξαγωγή σφάλματος στη γραμμή No10 του δικτύου, τόσο στη τοπολογία LCC όσο και σε αυτή όπου γίνεται χρήση VSC, ο ζυγός No2, ο οποίος βρίσκεται απομονωμένος από το υπόλοιπο δίκτυο AC, μέσω του DC δικτύου, δεν επηρεάστηκε δραστικά από το βραχυκύκλωμα. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι οι μετατροπείς απομονώνουν μεγάλο μέρος του σφάλματος, στην πλευρά όπου διεξάγεται, αφήνοντας έτσι σχεδόν ανεπηρέαστο το δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος που βρίσκεται στην άλλη πλευρά της σύνδεσής τους. Όσον αφορά τα μεγέθη του σφάλματος, η τοπολογία LCC, παρουσίασε στον ζυγό No1, 7,5% λιγότερη ισχύς και λιγότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης, καθώς και 17,6% μικρότερη τιμή μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης, ενώ για τους υπόλοιπους ζυγούς τα αντίστοιχα μεγέθη ήταν από 50% έως και 60% περίπου μικρότερα τόσο στα συμμετρικά όσο και στα μη συμμετρικά σφάλματα. Η τοπολογία VSC παρουσίασε καλύτερα ποσοστά στον ζυγό No1 (αναφορικά, στο αρχικό δίκτυο είχαμε 13% μεγαλύτερη τιμή αρχικού ρεύματος και ισχύος βραχυκύκλωσης, καθώς και 23% μεγαλύτερη

τιμή μεγίστου ρεύματος έναντι του υβριδικού δικτύου). Βελτιστοποιημένες εξίσου είναι και οι τιμές στους υπόλοιπους ζυγούς, μικρότερες όμως συγκριτικά με την τοπολογία LCC. Τέλος, και συναφώς των ανωτέρω, μεταξύ των δύο υβριδικών τοπολογιών, η χρήση LCC πετυχαίνει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά όλους τους ζυγούς του δικτύου, εκτός του ζυγού No1, όπου τα βέλτιστα αποτελέσματα εντοπίζονται με τη χρήση VSC. Συμπερασματικά, η χρήση των LCC επιφέρει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα κατά την εμφάνιση σφαλμάτων.

3. Τάση Ζυγών και Ευστάθεια Δικτύου στην μεταβολή φορτίων

Είναι εμφανές, πως στο αρχικό δίκτυο, ο έλεγχος της τάσης των ζυγών με σκοπό την αντιστάθμιση της πτώσης τάσεως, μπορεί να διεξαχθεί μόνο μέσω του ελέγχου της ροής άεργου ισχύος από εξωτερικές διατάξεις (όπως είναι οι πυκνωτές σε διάφορους ζυγούς). Το ίδιο γίνεται και στην υβριδική τοπολογία όπου έχουμε LCC, καθώς δεν μας δίνεται η δυνατότητα ελέγχου των δύο διαφορετικών κύριων μεγεθών, της τάσης και του ρεύματος. Επομένως και σε αυτή την περίπτωση, δεν δύναται ο χειριστής του δικτύου να εκτελέσει άμεσο έλεγχο της τάσης με εύκολο τρόπο, αλλά κυρίως έμμεσα, μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της ισχύος ή του ρεύματος που διέρχεται από τους μετατροπείς. Ωστόσο, στην τοπολογία με τους VSCs, έχουμε πλέον αυτή την δυνατότητα, με αποτέλεσμα να μπορούμε άμεσα να ελέγξουμε τόσο τη ροή ισχύος αλλά και την τάση του δικτύου καθώς μπορούμε ταυτόχρονα να ρυθμίσουμε την ενεργό και την άεργο ισχύ που μεταφέρουν οι μετατροπείς μας. Άρα, όπως είναι εμφανές και από τις μελέτες που διεξήχθησαν, στην υβριδική τοπολογία με VSC, οι τάσεις των ζυγών βρίσκονταν πλησιέστερα στην ονομαστική τους τιμή ενώ στο αρχικό δίκτυο και στην τοπολογία LCC, παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις, καθιστώντας τα δίκτυα πιο ευάλωτα σε διαταραχές και αστάθειες που μπορούν να προκληθούν από μεταβολές φορτίων. Συνεπώς, η τοπολογία VSC, μέσω της επιπρόσθετης δυνατότητας ελέγχου που προσφέρει στον χειριστή του δικτύου, καθιστά το συνολικό δίκτυο πιο ανθεκτικό προσφέροντάς του μεγαλύτερη ευστάθεια και περιθώρια λειτουργίας κατά την μεταβολή φορτίων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου η εφαρμογή των VSCs θα μπορούσε να επιφέρει τα μέγιστα αποτελέσματα, είναι η χρήση τους σε ένα αστικό δίκτυο διανομής, όπου υπάρχει μεγάλη χρονική διακύμανση των φορτίων και των τάσεων. Τέλος, η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει το βασικό πλεονέκτημα της επαναφοράς του συστήματος μετά από ολική διακοπή ισχύος (Black start capability), κάτι που το καθιστά ακόμα πιο χρήσιμο σε ευάλωτα δίκτυα, καθώς τους αυξάνει την αξιοπιστία τους [30].

4. Ανάκτηση δικτύου μετά από Σφάλματα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη διεξαγωγή των RMS αξιολογήσεων, παρατηρούμε ότι έχουμε την συνολική ταχύτερη αποκατάσταση των επιπτώσεων του σφάλματος στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας VSC. Βλέπουμε από τους πίνακες με τα αποτελέσματα, ότι ο χρόνος επαναφοράς της ισορροπίας του συστήματος τόσο στο κομμάτι της ισχύος της γραμμής μεταφοράς όσο και στο κομμάτι της συχνότητας είναι ο μικρότερος σε αυτήν την τοπολογία, ενώ ακολουθεί το υβριδικό δίκτυο τοπολογίας LCC και τελευταίο βρίσκεται το αρχικό μας δίκτυο. Ωστόσο, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στο φαινόμενο της αποτυχίας μεταγωγής όσον αφορά την τοπολογία με τους LCCs καθώς ο τρόπος λειτουργίας τους, τους καθιστά επιρρεπείς σε τέτοιου είδους φαινόμενα [31], επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο την σταθερότητα του υπόλοιπου δικτύου. Το ανωτέρω φαινόμενο δύναται να αντιμετωπιστεί με χρήση συγκεκριμένων μοντέλων ελέγχου και διατάξεων πυκνωτών, ωστόσο αυτά αποτελούν επιπλέον μέτρα που θα πρέπει να ληφθούν κατά τον σχεδιασμό του δικτύου και της εγκατάστασης και τα οποία είναι περιττά στην περίπτωση της τοπολογίας των VSCs. Επιπρόσθετα, στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας VSC, όπως προαναφέρθηκε, η διακύμανση των τιμών είναι η μικρότερη μεταξύ των τριών τοπολογιών, κάτι το οποίο είναι υψίστης σημασίας καθώς υπερβολική παραγόμενη ισχύ ή αντίστοιχα η απότομη μείωση της ισχύος, οδηγεί σε καταπονήσεις του δικτύου, και μπορεί να προκαλέσει ζημιά στους εξοπλισμούς του. Επομένως, η συγκεκριμένη τοπολογία έχει την ομαλότερη απόκριση, με μικρότερες ακραίες τιμές, γεγονός που θεωρείται θετικό όσον αφορά την σταθερότητα του συστήματος [23]. Για παράδειγμα, σε μια βιομηχανική ζώνη, όπου είναι απαραίτητη η συνεχής τροφοδότηση των φορτίων με ισχύ, η ταχύτητα ανάκαμψης του δικτύου μετά από την αποκατάσταση ενός σφάλματος καθώς και η γενικότερη σταθερότητα του δικτύου είναι κρίσιμη για την αποφυγή τυχόν διακοπών στην παραγωγή.

Επιπλέον, τόσο στο αρχικό μας δίκτυο όσο και στην υβριδική έκδοσή του, τοπολογίας LCC, οι καμπύλες απόκρισης των ισχύων παρουσιάζουν απότομες ακμές κατά την εκκαθάριση του σφάλματος, οι οποίες οφείλονται στην συνεργασία του ελεγκτή ισχύος του φωτοβολταϊκού πάρκου που βρίσκεται στο ζυγό No4 με το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτές οι αιχμές ωστόσο, δεν εμφανίζονται στο υβριδικό δίκτυο τοπολογίας VSC, από το οποίο συμπεραίνουμε πως η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάζει ομαλότερη απόκριση κατά τα μεταβατικά φαινόμενα ακόμα και αν υπάρχουν άλλοι ελεγκτές και ρυθμιστές ισχύος στο δίκτυο.

5. Αξιοπιστία και ευελιξία

Τέλος, από όλα όσα έχουν αναφερθεί έως αυτό το σημείο, είναι εμφανές πως η ευελιξία των υβριδικών δικτύων είναι ανώτερη από αυτή του δικτύου που λειτουργεί εξολοκλήρου με εναλλασσόμενο ρεύμα, καθώς οι υβριδικές τοπολογίες δίνουν στον διαχειριστή του δικτύου την δυνατότητα ελέγχου του ρεύματος ή/και της ισχύος που διέρχεται από τους μετατροπείς. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την ομοιόμορφη κατανομή ισχύος και φόρτιση των γραμμών μεταφοράς, ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις λειτουργίας του δικτύου, όπου για παράδειγμα απαιτείται η μεταφορά μεγάλου ποσού ισχύος. Αυτή η μεταφορά, μπορεί να καθίσταται εφικτή λόγω της ικανότητας καθοδήγησής της ισχύος δια μέσου γραμμών με λιγότερη φόρτιση, κάτι το οποίο στα συνήθη δίκτυα AC δεν δύναται να συμβεί. Ενώ λοιπόν τα εξολοκλήρου AC δίκτυα, χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες σε πληθώρα εφαρμογών, δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις γρήγορες αλλαγές του φορτίου και αδυνατούν να ελέγξουν την ισχύ που τα διαρρέει. Μεταξύ των δύο υβριδικών τοπολογιών, η τοπολογία όπου γίνεται χρήση των VSC, προσφέρει τον μεγαλύτερο έλεγχο του δικτύου καθώς οι συγκεκριμένοι μετατροπείς μπορούν να διαχειριστούν και να ελέγξουν ταυτόχρονα τα δύο ανωτέρω μεγέθη (για παράδειγμα ενεργό και άεργο ισχύ). Επιπρόσθετα, όπως παρατηρήθηκε και στις μελέτες των σφαλμάτων, τα υβριδικά δίκτυα, απομονώνοντας το σφάλμα στην περιοχή που διεξάγεται, προσφέρουν επιπλέον σταθερότητα και ασφάλεια στο υπόλοιπο δίκτυο, καθιστώντας το πιο αξιόπιστο.

Λαμβάνοντας λοιπόν όλα τα ανωτέρω υπόψη μας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η τοπολογία με χρήση VSCs αποτελεί την βέλτιστη λύση και προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι του απλού δικτύου εναλλασσόμενης τάσης, δίνοντάς μας την ικανότητα να επεκτείνουμε τις δυνατότητες των δικτύων μέσης τάσης.

Βιβλιογραφία

- [1] Grainger John J. and William D. Stevenson Jr, “Power System Analysis”, Εκδόσεις McGraw Hill Education, 2016.
- [2] Taso E., "DC Distribution Systems", Master thesis in Master of Science, Universitet i Tromsø, avd. Narvik, 2017.
- [3] Faulkner R., "AC vs. DC Powerlines and the Electrical Grid", Energycentral, 2017, <https://energycentral.com/c/ec/ac-vs-dc-powerlines-and-electrical-grid>.
- [4] Raghavendran V., "On-Load & Off-load Tap Changer of Transformer" LinkedIn, 2015, <https://www.linkedin.com/pulse/on-load-off-load-tap-changer-transformer-v-r-v>.
- [5] Armstrong Fluid Technology, “6 Pulse vs. 12 and 18 Pulse Harmonics Effect Reduction”, White Paper, File No: 94.22, 2015.
- [6] Tutorialspoint, "Power Electronics - Types of Inverters", https://www.tutorialspoint.com/power_electronics/power_electronics_types_of_inverters.htm.
- [7] Μανιάς Σ. Ν., “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμμεών, 2017.
- [8] Zhang Lu, et al., "Converting AC Distribution Lines to DC to Increase Transfer Capacities and DG Penetration", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol 10, No 2, 2019.
- [9] Bernacchi R. "MVDC and Grid Interties: Enabling New Features in Distribution, Sub-Transmission and Industrial Networks", ABB paper, 2019.
- [10] James YU et al., "Medium Voltage DC Distribution Systems", Cigre, WG C6/B4.37 Technical Brochure, 2022.
- [11] SP Energy Networks, "ANGLE - DC", Paper for Electricity Network Innovation Competition, Project Code/Version Number: SPMEN01/V03, 2015.
- [12] Amin Mohammad M. M., "Small-Signal Stability Assessment of Power Electronics Based Power Systems: A Discussion of Impedance and Eigenvalue-based Methods", Article in IEEE Transactions on Industry Applications, 2017.
- [13] Pan J. et al. "Medium Voltage Direct Current MVDC Grid Feasibility Study", ELECTRA, Apr. 2020, <https://www.scribd.com/document/798097204/ELECTRA-309-medium-voltage-direct-current-mvdc-grid-feasibility-study>.
- [14] Hitachi, "Hallsjon: The First HVDC Light® Transmission", <https://www.hitachienergy.com/news-and-events/customer-success-stories/hallsjon-the-first-hvdc-light-transmission>.
- [15] Hitachi, "HitachiEnergy", Tjaereborg, <https://www.hitachienergy.com/news-and-events/customer-success-stories/tjaereborg>.
- [16] Liu Ying et al., "The Upgrading Renovation of an Existing XLPE Cable Circuit by Conversion of AC Line to DC Operation", Article in IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 32, Issue: 3, June 2017), 2017.
- [17] SP Energy Networks, " ANGLE-DC - The UK’s First DC Link Using Existing Distribution Network 33kV AC Circuits", Magazine “Year One Project Summary Autumn 2016”, 2016.
- [18] Qu Lu et al., "Planning and Analysis of the Demonstration Project of the MVDC Distribution Network in Zhuhai", Research article in Springer Nature, 2018.

- [19] Lee M., "The First MVDC Station Project in Korea", Electra, Cigre, 2023, <https://electra.cigre.org/326-february-2023/technology-e2e/the-first-mvdc-station-project-in-korea.html>.
- [20] Xue Y., "Modelling and Control of Hybrid LCC HVDC System", Thesis in School of Electronic, Electrical and Systems Engineering, University of Birmingham, 2016.
- [21] Saadeh Osama et al., "Power System Analysis of Moving from HVAC to HVDC in the Presence of Renewable Energy Resources", Article in the Journal of Electrical and Computer Engineering, 2023.
- [22] Coffey Sophie et al., "Review of MVDC Applications, Technologies, and Future Prospects", Article in Energies, Volume: 14 – Issue: 24, 2021.
- [23] Li Gen et al., "Comparisons of MVAC and MVDC Systems in Dynamic Operation, Fault Protection and Post-Fault Restoration", IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019.
- [24] DIgSILENT, "PowerFactory 15 User Manual", 2014.
- [25] Nexans, "ACSR – ΔEH GR-86", Technical Brochure, 2024.
- [26] DIgSILENT, "Technical Reference Documentation Synchronous Machine", 2011.
- [27] DIgSILENT, "Technical Reference Documentation Rectifier / Inverter", 2011.
- [28] DIgSILENT, "Technical Reference Documentation PWM Converter", 2011.
- [29] Gopinath T. R. O., "Reactive Power and AC Voltage Control of LCC HVDC System with Digitally Tunable Controllable Capacitors", Article in International Journal for Modern Trends in Science and Technology, 2017.
- [30] Gerhard Jambrich et al., "DC Networks on the Distribution Level – New Trend or Vision?", International Conference on Electricity Distribution, Working Group Final Report, 2021.
- [31] Coffey Sophie et al., "Review of MVDC Applications, Technologies, and Future Prospects." 2021.
- [32] Chapman S. J., "Ηλεκτρικές Μηχανές AC – DC", Εκδόσεις Τζιόλα, 2022.
- [33] Huesca P. P., "MVDC Networks: Study of Different Architectures", Master Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2022.
- [34] Sweeting D., "Applying IEC 60909, Fault Current Calculations", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 48 - Issue: 2, 2012.
- [35] DIgSILENT, "Technical Reference Documentation PV System", 2011.
- [36] Simiyu P., "A Review of the DC Voltage Coordinated Control Strategies for Multi-terminal VSC MVDC", Article in The Journal of Engineering, 2018.
- [37] Páez J. D. et al., "Overview of DC–DC Converters Dedicated to HVDC Grids", Article in IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 34 - Issue: 1, 2019.
- [38] Dankoff W., "How to Choose an Inverter for an Independent Energy System", Article in Home Power, Volume: 82, 2001.
- [39] Salonen Pasi et al., "An LVDC Distribution System Concept", Article in Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 2008.
- [40] Boutsika Thekla N. and S. A. Papathanassiou., "Short-Circuit Calculations in Networks with Distributed Generation", Article in Electric Power Systems Research, Volume: 78 – Issue: 7, 2008.

- [41] Jovcic D. and N. P. a. M. Z, "Analytical Modelling of HVDC-HVAC Systems", Article in IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 14 - Issue: 2, 1999.
- [42] Yi D. et al., "Modeling and Simulation of DC Distribution Network Based on Distributed Energy", 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), 2013.
- [43] Starke M. et al., "AC vs. DC Distribution: A Loss Comparison", University of Tennessee, Article in IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008.
- [44] Liu Z. and M. L., "Research on Energy Efficiency of DC Distribution System", Paper in AASRI Procedia, Volume 7, 2014.
- [45] May W. et al., "Comparative Evaluation of Power Loss in HVAC and HVDC Transmission Systems", IEEE Region 10 Conference (TENCON) - Proceedings of the International Conference, 2016.
- [46] Fotopoulou M. et al., "State of the Art of Low and Medium Voltage", Article in Energies, Volume: 14 – Issue:18, 2021.
- [47] Bucher M. K. et al., "Multiterminal HVDC Networks – What is the Preferred Topology?", Article in IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 29 - Issue: 1, 2014.
- [48] Dujic D. "Medium Voltage Direct Current Technologies", COBEP/SPEC 2023, Florianopolis, Brazil, 2023.
- [49] Novoa Juan P. and M. A. R., "Conversion of HVAC Lines into HVDC in Transmission Expansion Planning", Article in International Journal of Energy and Power Engineering, Vol:11, No:12, 2017.
- [50] Alassi Abdulrahman et al., "Innovative Energy Management System for MVDC Networks with Black-Start Capabilities", Article in Energies, Volume: 14 - Issue: 8, 2021.
- [51] Jovcic Dragan et al., "Feasibility of DC Transmission Networks", 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, 2011.