

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

Μοντελοποίηση και Μελέτη της Επίπτωσης Προσθήκης Υπογείου Καλωδίου Μεταφοράς στο Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπινιάρης Β. Αναστάσιος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025



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

Μοντελοποίηση και Μελέτη της Επίπτωσης Προσθήκης Υπογείου Καλωδίου Μεταφοράς στο Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπινιάρης Β. Αναστάσιος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25η Ιουνίου 2025

..... Νικόλαος Χατζηαργυρίου Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Γεώργιος Κορρές Καθηγητής ΕΜΠ Άρης-Ευάγγελος Δημέας Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2025

.....

Μπινιάρης Β. Αναστάσιος

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

Copyright © Μπινιάρης Αναστάσιος, 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.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η μελέτη της επίπτωσης της προσθήκης υπογείου καλωδίου μεταφοράς στο Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης. Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάζεται η τοποθέτηση ενός υπογείου καλωδίου στη διαδρομή Ξυλοκαμάρας - Λινοπεράματα, παράλληλα με την, ήδη, υπάρχουσα γραμμή μεταφοράς.

Στην αρχή της εργασίας γίνεται αναφορά στα υπόγεια και εναέρια καλώδια υψηλής τάσης, περιγράφοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις διαφορές τους, όπως η αντοχή σε περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης.

Η ανάλυση επικεντρώνεται στις επιπτώσεις που έχει η προσθήκη του υπογείου καλωδίου στη λειτουργία και τη σταθερότητα του Συστήματος Μεταφοράς, με έμφαση στη συμπεριφορά της τάσης στους ζυγούς και τις απώλειες ισχύος. Επιπλέον, για την αντιστάθμιση των επαγωγικών επιδράσεων της νέας γραμμής, εξετάζεται η τοποθέτηση πηνίων αντιστάθμισης, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και τη διατήρηση της τάσης εντός επιθυμητών ορίων.

Η εργασία πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού Power World Simulator, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς μοντελοποίησης και ανάλυσης της γραμμής μεταφοράς. Τα αποτελέσματα της μελέτης αναμένεται να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για τη βελτίωση της σταθερότητας, της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος μεταφοράς.

Λέξεις κλειδιά: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, υπόγεια καλώδια, εναέρια καλώδια, υψηλή τάση, απώλειες ισχύος, τάση στους ζυγούς, πηνία, Power World Simulator.

Abstract

The subject of this thesis is the modeling and analysis of the impact of adding an underground transmission cable to the Transmission System of Crete. In this context, the installation of an underground cable along the route from Xylokamara to Linoperamata is examined, running parallel to the existing transmission line.

At the beginning of the thesis, reference is made to underground and overhead high-voltage cables, describing their technical characteristics, advantages, and disadvantages. Particular emphasis is placed on their differences, such as resistance to environmental conditions and the cost of construction and installation.

The analysis focuses on the effects of adding the underground cable on the operation and stability of the Transmission System, with an emphasis on the behavior of bus voltage and power losses. Additionally, to counterbalance the inductive effects of the new line, the installation of compensation reactors is examined, aiming to improve power quality and maintain voltage levels within desired limits.

The study is conducted using the Power World Simulator software, which enables accurate modeling and analysis of the transmission line. The results of the study are expected to provide valuable insights for improving the stability, efficiency, and reliability of the transmission system.

Keywords: Electrical power system, undeground cables, overhead cables, high voltage, power losses, voltage at busbars, reactors, Power World Simulator.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, Ομότιμο Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναλαμβάνοντας την επίβλεψη της πτυχιακής μου εργασίας, κατανοώντας πλήρως την κατάσταση στην οποία βρισκόμουν την χρονική περίοδο που επικοινώνησα μαζί του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Νικολακάκο, υποψήφιο Διδάκτορα, για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθώς και για την άριστη συνεργασία μας.

Ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου τους γονείς μου και τον αδερφό μου, καθώς δεν θα είχα φτάσει εδώ που είμαι σήμερα χωρίς αυτούς.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους μου για όλες τις συμβουλές, για τη βοήθεια αλλά και για την αξέχαστη εμπειρία που μου χάρισαν, από την πρώτη μέρα της φοίτησης μου μέχρι σήμερα.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη			
Abstract	7		
Ευχαριστίες	9		
Πίνακας Περιεχομένων	11		
Κατάλογος Εικόνων	13		
Κατάλογος Πινάκων	14		
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15		
1.1. Δομή της Εργασίας	15		
1.2. Σκοπός της Εργασίας	15		
1.3. Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	16		
1.4. Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης	17		
1.5. Επόμενα Κεφάλαια Εργασίας	19		
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	20		
2.1. Τα Υπόγεια Καλώδια	20		
2.1.1. Δομή Υπόγειου Καλωδίου	20		
2.1.2. Κατηγορίες Υπόγειων Καλωδίων	21		
2.1.2.1. Κατηγορίες υπόγειων καλωδίων με βάση την τάση λειτουργίας	21		
2.1.2.2. Κατηγορίες υπόγειων καλωδίων με βάση την κατασκευή του καλωδίου	22		
2.1.3. Τύποι Καλωδίων	22		
2.1.4. Μονωτικά Υλικά για Καλώδια	22		
2.1.5. Τοποθέτηση Υπόγειων Καλωδίων	23		
2.1.6. Κατηγορίες Υπόγειων Καλωδίων Υψηλής Τάσης	24		
2.1.6.1. Καλώδιο με μόνωση υγρού (Fluid Filled Cable)	24		
2.1.6.2. Καλώδιο με μόνωση από χαρτί και από πολυαιθυλένιο (Paper Polythelene			
Laminated Cable-PPL-FFC)	24		
2.1.6.3. Καλώδιο εμποτισμένο μόνιμο μη απαστραγγιζόμενο μονωτικό (Mass			
Impregnate Not Draining)	25		
2.1.6.4. Γραμμές Μόνωσης αερίου (Gas Insulated Lines)	25		
2.1.6.5. Καλώδια XLPE (Cross Linked Polyethylene Extruded)	25		
2.1.7. Μέθοδοι Γείωσης και Επαγόμενη Τάση	27		
2.1.7.1. Συγκόλληση και στα δύο άκρα (Both-End Bonding)	27		
2.1.7.2. Συγκόλληση στο ένα άκρο (Single-end Bonding)	28		
2.1.7.3. Διασταυρούμενη Γείωση (Cross – Banding)	28		
2.2. Τα Εναέρια Καλώδια	29		
2.2.1. Αγωγός	29		
2.2.1.1. Συνηθισμένα υλικά αγωγών	30		
2.2.2. Υποστηρίγματα Γραμμών	30		
2.2.3. Μονωτήρες	30		
2.2.4. Οριζόντια Στηρίγματα	31		
2.2.5. Διάφορα Εξαρτήματα	31		
2.2.6. Το Φαινόμενο "Κορώνα"	31		
2.2.6.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του φαινομένου Κορώνα	32		
2.3. Σύγκριση Υπογείων και Εναέριων Καλωδίων	32		

2.3.1.	Διαφορές Υπόγειων και Εναέριων Καλωδίων	32
2.3.2.	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Υπόγειων Καλωδίων	33
2.3.2.1	. Πλεονεκτήματα των υπόγειων καλωδίων	33
2.3.2.2	. Μειονεκτήματα των υπόγειων καλωδίων	34
2.3.3.	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Εναέριων Καλωδίων	34
2.3.3.1	. Πλεονεκτήματα της εναέριας μεταφοράς ρεύματος	34
2.3.3.2	. Μειονεκτήματα της εναέριας μεταφοράς ρεύματος	34
2.4.	Η Μετάβαση από τα Εναέρια στα Υπόγεια Καλώδια	35
2.4.1.	Αξιοπιστία των Υπόγειων Καλωδίων	35
2.4.2.	Εφαρμογές των Υπόγειων Καλωδίων	36
2.4.3.	Μελέτη Αντικατάστασης των Εναέριων Γραμμών από Υπόγειες Γραμμές	37
2.4.4.	Προφίλ Τάσης Κατά Μήκος της Μεγαλύτερης Γραμμής Μεταφοράς	40
2.4.5.	Απώλειες Ισχύος στην Εξεταζόμενη Γραμμή Μεταφοράς	44
2.4.6.	Τα Συμπεράσματα της Σύγκρισης των Διαφορετικών Τύπων Καλωδίων	46
КЕФА/	ΑΙΟ 3: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	
POWE	R WORLD SIMULATOR	48
3.1.	Σχετικά με το Power World Simulator	48
3.2.	Βασικές Παράμετροι του Power World Simulator	51
3.3.	Επιλογή Χαρακτηριστικών για το Υπόγειο Καλώδιο της Γραμμής Μεταφοράς	
Ξυλοκα	χμάρας - Λινοπεράματα	51
3.4.	Επιλογή του Κατάλληλου Καλωδίου	53
3.5.	Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά του Καλωδίου 630 mm²	53
3.6.	Υπολογισμός των Ανά Μονάδα Τιμών του Συστήματος	54
3.7.	Μοντελοποίηση της Διασύνδεσης Πελοποννήσου - Κρήτης	55
3.8.	Διαδικασία Εισαγωγής της Γραμμής Μεταφοράς στο Power World Simulator	56
КЕФА/	ΑΙΟ 4: ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΚΑΛΩΔΙΟΥ ΚΑΙ	
ΕΦΑΡΝ	ΜΟΓΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ	60
4.1.	Εισαγωγή	60
4.2.	Τα Αποτελέσματα Πριν και Μετά την Προσθήκη του Υπόγειου Καλωδίου	61
4.2.1.	Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς	61
4.2.2.	Μεταβολή της Συνολικής Άεργος Ισχύος	64
4.3.	Αποτελέσματα του Συστήματος για τις Διαφορετικές Συνθήκες Φόρτισης	65
4.3.1.	Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς	65
4.3.2.	Μεταβολή της Συνολικής Άεργος Ισχύος	67
4.4.	Αντιστάθμιση της Χωρητικής Συμπεριφοράς του Υπόγειου Καλωδίου	68
4.4.1.	Τοποθέτηση Εγκάρσιων Πηνίων στο Power World Simulator για Αντιστάθμισr	า
	68	
4.4.2.	Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς Πριν και Μετα την Αντιστάθμιση	70
4.4.3.	Μεταβολή της Συνολικής Άεργος Ισχύος Πριν και Μετα την Αντιστάθμιση	75
КЕФА/	ΑΙΟ 5: ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
5.1.	Σύνοψη	77
5.2.	Κυριότερα Συμπεράσματα	77
Βιβλιο	γραφικές Αναφορές	79

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Υπόγειο καλώδιο μεταφοράς [23]	20
Εικόνα 2: Δομή υπογείου καλωδίου [21]	21
Εικόνα 3: Τύποι υπογείων καλωδίων με βάση την τάση λειτουργίας τους [22]	.22
Εικόνα 4: Καμπύλη διάρκειας ζωής των καλωδίων XLPE [20]	26
Εικόνα 5: Εναέρια γραμμή μεταφοράς [41]	.29
Εικόνα 6: Μέγιστες τάσεις στο μελετώμενο δίκτυο ως συνάρτηση του τρόπου λειτουργία	C
με διαφορετικό ποσοστό καλωδίων [34]	.38
Εικόνα 7: Ελάγιστες τάσεις στο μελετώμενο δίκτυο ως συνάρτηση του τρόπου λειτουργία	IC
με διαφορετικό ποσοστό καλωδίων [34]	.39
Εικόνα 8: Λόγος τάσης στον κόμβο 48 ως συνάρτηση του ποσοστού καλωδίων [34]	39
Εικόνα 9: Μεταβολή της τάσης κατά μήκος της εναέριας γραμμής (OHL) σε όλα τα	
σενάρια λειτουργίας [34]	.40
Εικόνα 10: Μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος της εναέριας γραμμής (OHL) σε όλα τα	
σενάρια λειτουργίας [34]	41
Εικόνα 11: Μεταβολή της τάσης κατά μήκος της καλωδιακής γραμμής σε όλα τα σενάρια	ι
λειτουργίας [34]	.42
Εικόνα 12: Μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος της καλωδιακής νραμμής σε όλα τα	
σενάρια λειτουργίας [34]	42
Εικόνα 13: Ροή ισχύος μέσω της νοαμμής μεταφοράς με μένιστη παραγωγή και μένιστο	
φ_{00} triangle 100	43
Εικόνα 14: Ροή ισγύος μέσω της νοαμμής μεταφοράς με μένιστη παρανωνή και ελάγιστο	
φορτίο [34]	43
Εικόνα 15: Ροή ισγύος μέσω της νοαμμής μεταφοράς με ελάγιστη παραγωγή και μένιστο	
φορτίο [34]	44
Εικόνα 16: Απώλειες ισγύος μέσω της σύνδεσης που εξετάζεται, με μένιστη παραγωγή κα	αι
μένιστο φορτίο [34]	.45
Εικόνα 17: Απώλειες ισγύος μέσω της σύνδεσης που εξετάζεται, με μένιστη παραγωγή κα	αι
ελάγιστο φορτίο [34]	45
Εικόνα 18: Απώλειες ισγύος μέσω της σύνδεσης που εξετάζεται, με ελάγιστη παραγωγή	
και μένιστο φορτίο [34]	.46
Εικόνα 19: Το μενού του Power World Simulator	50
Εικόνα 20: Το Σ.Η.Ε. της Κρήτης όπως απεικονίζεται στο Power World Simulator	50
Εικόνα 21: Βασικές παράμετροι του συστήματος	51
Εικόνα 22: Τεγνικά γαρακτηριστικά καλωδίων από τον τεγνικό κατάλογο της TF Cable	52
Εικόνα 23: Τεχνικά γαρακτηριστικά του καλωδίου με διατομή 630 mm^2	53
Εικόνα 24: Παράμετροι Μοντελοποίησης της κάθε γραμμής της ΑC διασύνδεσης Κρήτη	c -
Πελοποννήσου στο Power World	55
Εικόνα 25: Επιλογή του Network στο Power World Simulator	.56
Εικόνα 26: Επιλογή της νοαμμής μεταφοράς	.56
Εικόνα 27: Εισανωνή ορίου ισχύος	57
Εικόνα 28: Υπολογισμός γαρακτηριστικών γραμμής στο Power World Simulator	58
Εικόνα 29: Η νέα νοαιμή μεταφοράς όπως αυτή απεικονίζεται στο Power World Simulat	or
	59
Εικόνα 30: Σύγκοιση Τάσης ανά Ζυγό ποιν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυν	/0í
	61
Εικόνα 31: Σύγκοιση Τάσης Ανά Ζυνό ποιν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου. Ζυ	νοί
	.61
	~ +

Εικόνα 32: Σύγκριση Τάσης Ανά Ζυγό πριν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυγοί 19-27
Εικόνα 33: Σύγκριση Τάσης Ανά Ζυγό πριν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυγοί
28-36
Εικόνα 34: Σύγκριση Τάσης Ανά Ζυγό πριν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυγοί
37-43
Εικόνα 35: Σύγκριση της συνολικής άεργης ισχύος πριν και μετά την τοποθέτηση του
Δt μεταρολη της Γασης στους $\Delta 0$ γους για Γρεις Δt αφορετικές $\Delta 0$ νοηκές
Ψορτισης. 20γοι 1-3
$\Delta = \frac{1}{2}$ Δίαφορετικές 20ν0ηκές
Ψορτισης. 20γοι 0-10
Φέστητα 7 μαζι 11 15
Ψορτισης: Συγοι 11-15
ELEVA 39: METAPONI TIL TAOIL OTOUL ZUYOUL YIA TPEL ZUAPOPETIKEL ZUVOIKEL Δf
Ψορτισης: Συγοι 10-20
Φέστισης T ωνοί 21.25
Ψορτισης: Συγοι 21-25
Eικονα 41: Η 2υνολική Αεργος Ισχυς για Καθε Σεναριο Αφαιρεσης Φορτιων
Eικονα 42: Ρυθμισεις του πηνιου στον ζυγο Retnimno (H)
Elkova 43: H a π Elkovia tou π h viou oto Power world Simulator
Εικονα 44: Συγκριση Τασης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 1-5
Εικονα 45: Συγκριση Τασης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 6-10
Εικόνα 46: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 11-15
Εικόνα 47: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 16-2072
Εικόνα 48: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 21-25
Εικόνα 49: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 26-30
Εικόνα 50: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 31-35
Εικόνα 51: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 36-39
Εικόνα 52: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 40-43
Εικόνα 53: Σύγκριση της Συνολικής Άεργης Ισχύος πριν και μετά την Αντιστάθμιση 76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1:	Επισκόπηση τ	ων μεθόδων	γείωσης		
------------	--------------	------------	---------	--	--

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας και το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργεια, γενικότερα και ειδικότερα της Κρήτης. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές θεωρητικές έννοιες που σχετίζονται με τη μελέτη καλωδίων υψηλής τάσης. Συγκεκριμένα, γίνεται εκτενής αναφορά στα χαρακτηριστικά τόσο των υπογείων όσο και των εναέριων καλωδίων υψηλής τάσης καθώς και στην μεταξύ τους σύγκριση. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η διαδικασία της προσθήκης του υπογείων καλωδίων υψηλής τάσης τασοράς της Κρήτης, τα χαρακτηριστικά των καλωδίων επιπλέον, εξετάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης, με τη βοήθεια πινάκων και γραφημάτων. Επιπλέον, εξετάζονται οι συνέπειες της προσθήκης του καλωδίου στο σύστημα, ενώ εντοπίζονται πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν και προτείνονται της μελέτης, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο πώς αυτή μπορεί να βελτιώσει την σταθερότητα και την αξιοπιστία του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης.

1.2. Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση της επίδρασης της προσθήκης ενός υπογείου καλωδίου στο σύστημα μεταφοράς της Κρήτης. Συγκεκριμένα, γίνεται λεπτομερής ανάλυση των πλεονεκτημάτων αυτής της παρέμβασης, όπως είναι η αυξημένη αξιοπιστία και οι μειωμένες απώλειες του συστήματος. Παράλληλα, εξετάζονται τα τεχνικά προβλήματα που μπορούν να προκύψουν, καθώς και οι πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης τους. Μέσω αυτής της ανάλυσης, στόχος είναι η βελτιστοποίηση του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη αξιοπιστία και ευστάθεια.

1.3. Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) ορίζουμε το σύνολο των εγκαταστάσεων, των μέσων και των υποδομών τα οποία συνεργάζονται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Το Σ.Η.Ε. περιλαμβάνει σταθμούς παραγωγής, γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς και δίκτυα διανομής τα οποία διασφαλίζουν την αξιόπιστη και αδιάλειπτη τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, προσφέροντας κάλυψη στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ενεργειακές τους ανάγκες. Οι Κύριες Λειτουργίες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας περιγράφονται στη συνέχεια:

Η Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας που συνιστά τη διαδικασία που απαιτείται για την μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Η διαδικασία πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής και αποτελεί το πρώτο και βασικότερο στάδιο ενός Σ.Η.Ε. Η σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει θεμελιωθεί σε μια σειρά εφευρέσεων και τεχνικών εξελίξεων στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων (άνθρακα ,πετρελαίου, φυσικού αερίου) και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και υδατοπτώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν διάφοροι τύποι σταθμών, όπως θερμοηλεκτρικοί, υδροηλεκτρικοί, ατμοηλεκτρικοί, πυρηνικοί και αιολικά πάρκα. Σκοπός της παραγωγής είναι η συνεχής παροχή ενέργειας με οικονομικό, ασφαλή και αποδοτικό τρόπο [1].

Η Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας που αποτελεί το στάδιο κατά το οποίο η ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς. Για να μειωθούν οι απώλειες κατά τη μεταφορά και συνεπώς για την οικονομικότερη λειτουργία, η ενέργεια μεταφέρεται σε υψηλές τάσεις, οι οποίες κυμαίνονται από 66kV έως 750kV, κατανεμημένες σε τρεις βασικές κατηγορίες: η βαθμίδα Υψηλών Τάσεων (ΥΤ) περιλαμβάνει τάσεις μέχρι 220 kV, η βαθμίδα των Υπερυψηλών Τάσεων (ΥΤ) από 275 kV έως 500kV, ενώ τάσεις πάνω από 500 kV ανήκουν στη βαθμίδα των Εξαιρετικά Υψηλών Τάσεων (ΕΥΤ). Η μεταφορά γίνεται μέσω εναέριων ή υπόγειων γραμμών, ανάλογα με τις ανάγκες και τις γεωγραφικές συνθήκες [1].

Η Διανομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι το τελικό στάδιο της μεταφοράς κατα το οποίο η ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις

γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει στους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται, ανάλογα με την τάση, σε δίκτυα υψηλής τάσης (60-150kV), δίκτυα μέσης τάσης (1-60kV) και δίκτυα χαμηλής τάσης (100-1000V). Οι αναφερόμενες τάσεις είναι οι πολικές τάσεις (μεταξύ φάσεων) τριφασικού συστήματος. Αναλόγως την κατασκευή τους, τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Τα εναέρια είναι λιγότερα δαπανηρά, ενώ η αποκατάσταση των βλαβών τους είναι ταχύτερη [1].

Η μελέτη, η ανάλυση και η βελτιστοποίηση του Σ.Η.Ε. αποτελεί βασικό θεμέλιο για την διασφάλιση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας στην παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο η ενσωμάτωση νέων υποδομών, όπως η προσθήκη υπογείων καλωδίων μεταφοράς, διαδραματίζει κομβικό ρόλο στη βελτίωση της λειτουργίας των ενεργειακών απαιτήσεων.

1.4. Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης

Το Σ.Η.Ε. της Κρήτης είναι ένα από τα μεγαλύτερα αυτόνομα ενεργειακά δίκτυα στην Ελλάδα, καλύπτοντας την παροχή ενέργειας στο νησί. Για την εξασφάλιση της ενεργειακής επάρκειας και τη μείωση του κόστους πραγματοποιήθηκαν δύο σημαντικά έργα διασύνδεσης. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο διαφορετικές διασυνδέσεις αφορούν: α) την διασύνδεση Κρήτης -Πελοποννήσου η οποία ολοκληρώθηκε το 2021. Πρόκειται για την μεγαλύτερη, σε μήκος, διασύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος στον κόσμο (174 γιλιόμετρα) και το μεγαλύτερο, έως τώρα, ενιαίο έργο σε προϋπολογισμό στην ιστορία του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Α.Δ.Μ.Η.Ε.). Το έργο αποτελείται από την κατασκευή της διασύνδεσης 150kV AC 2x200 MVA και δύο υποβρύχια καλώδια μήκους 135 χιλιομέτρων έκαστο και μεταξύ άλλων περιλαμβάνει αναβαθμίσεις των ήδη υπαρχουσών γραμμών μεταφοράς, κατασκευή νέων εναέριων γραμμών, υπόγεια καλώδια και υποσταθμούς καθώς και συστήματα σύγχρονης αντιστάθμισης άεργου ισχύς (STATCOM). Αξίζει να σημειωθεί πως πρόκειται τόσο για την μεγαλύτερη σε μήκος υποβρύχια καλωδιακή διασύνδεση υψηλής τάσης στον κόσμο, με τριπολικό καλώδιο μόνωσης ΧLPE (132χιλιόμετρα), όσο και για τη βαθύτερη (1000 μέτρα) [2] και β) τη διασύνδεση Κρήτης - Αττικής η οποία θα συμπληρώσει το παραπάνω έργο και θα εξασφαλίσει την ενεργειακή επάρκεια της Κρήτης. Η κατασκευή ολοκληρώθηκε πρόσφατα και αναμένεται να τεθεί σε ισχύ την άνοιξη του 2025. Η συγκεκριμένη διασύνδεση συγκαταλέγεται στα πέντε πιο καινοτόμα έργα διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος (VC) στην Ευρώπη. Χρησιμοποιεί τάση 500kV DC και την πλέον σύγχρονη τεχνολογία μετατροπέων τάσης Voltage Source Converter. Πρόκειται για μια τεχνολογία η οποία προσφέρει αυξημένη ευελιξία, μειωμένες απώλειες ενέργειας και διευκολύνει την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στο δίκτυο. Επιπλέον, η συγκεκριμένη διασύνδεση βρίσκεται στην πρώτη τριάδα υποβρυχίων διασυνδέσεων παγκοσμίως και αποτελεί την νησιώτικη διασύνδεση με την μεγαλύτερη ισχύ (1000 MW) μαζί με την Σαρδηνία. Αξίζει να σημειωθεί πως πρόκειται για το μεγαλύτερο και πιο σύνθετο έργο μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα με προϋπολογισμό που υπερβαίνει το 1,1 δις ευρώ. Όταν τεθεί σε λειτουργία το έργο θα σηματοδοτήσει την πλήρη ένταξη της Κρήτης στο δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας της Ελλάδας. Με το υπάρχον καλώδιο Κρήτης - Πελοποννήσου που ήδη καλύπτει το 30% των αναγκών του νησιού, η νέα διασύνδεση θα εξασφαλίζει την πλήρη κάλυψη της ζήτησης [3].

Οι παραπάνω διασυνδέσεις φέρνουν σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Εκτιμάται εξοικονόμηση έως 400 εκατομμύρια ευρώ για όλους τους καταναλωτές της χώρας μέσω των λογαριασμών ΥΚΩ (Υπηρεσίες Κοινωνικής Ωφέλειας). Ακόμα, το 2023 οι εκπομπές CO₂ της Κρήτης μειώθηκαν κατά 500.000 τόνους και συνολικά πρόκειται να μειωθούν κατά 60%. Επιπλέον, το έργο θα δημιουργήσει περίπου 300 νέες θέσεις εργασίας, συμβάλλοντας έτσι στην οικονομική ανάπτυξη της περιοχής [3].

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι μελετάται, από τον Α.Δ.Μ.Η.Ε., η προσθήκη γραμμής μεταφοράς μεταξύ των υποσταθμών των δύο διασυνδέσεων Κρήτης (Κρήτη - Πελοπόννησος και Κρήτη - Αττική) για μια σειρά από σημαντικούς λόγους, όπως: α) αύξηση αξιοπιστίας και ασφάλειας συστήματος. Η σύνδεση θα προσφέρει εναλλακτικές διαδρομές μεταφοράς ρεύματος. Σε περίπτωση βλάβης σε κάποιο από τα καλώδια ή τους μετασχηματιστές των υφιστάμενων διασυνδέσεων, το νησί θα συνεχίσει να τροφοδοτείται από το ηπειρωτικό σύστημα μέσω της εναλλακτικής γραμμής, μειώνοντας δραστικά τον κίνδυνο διακοπών [4], β) βελτίωση λειτουργικότητας και ευελιξίας δικτύου. Με τη διασύνδεση των υποσταθμών, ο Α.Δ.Μ.Η.Ε. αποκτά περισσότερες επιλογές διαχείρισης της ροής ενέργειας, τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε περιπτώσεις συντήρησης ή έκτακτων αναγκών [5], γ) ενίσχυση της δυνατότητας απορρόφησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Η Κρήτη αναπτύσσει ραγδαία έργα Α.Π.Ε. (κυρίως φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα). Η πρόσθετη γραμμή θα αυξήσει τη δυνατότητα μεταφοράς αυτής της πράσινης ενέργειας προς την ηπειρωτική χώρα, μειώνοντας φαινόμενα απόρριψης παραγωγής [6], δ) μείωση απωλειών και κόστους μεταφοράς. Η βελτιστοποίηση της κατανομής φορτίου μεταξύ

18

των δύο διασυνδέσεων μπορεί να μειώσει τις ηλεκτρικές απώλειες και άρα το συνολικό κόστος μεταφοράς [7] και ε) κάλυψη μελλοντικών αναγκών και επενδύσεων. Με την αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη (λόγω ανάπτυξης τουρισμού, ηλεκτροκίνησης κ.λπ.), απαιτείται επαρκής και εύρωστη υποδομή για να διασφαλιστεί η κάλυψη των φορτίων μακροπρόθεσμα [8]. Επίσης, στος λόγους που οδηγούν στην επιλογή των υπογείων καλωδίων έναντι των εναέριων, μπορούμε να αναφέρουμε τις αντιρρήσεις των πολιτών που αφορούν αισθητικούς και περιβαλλοντικούς λόγους, τις αντιδράσεις λόγω φόβων για την υγεία, τα διάφορα ζητήματα ασφάλειας και κίνδυνος πυρκαγιών, καθώς και την ανάγκη αντοχής τους σε ακραία καιρικά φαινόμενα, οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά στην Ενότητα 2.3.3.2 της παρούσας εργασίας.

1.5. Επόμενα Κεφάλαια Εργασίας

Στη συνέχεια της εργασίας γίνεται εκτενής αναφορά στα χαρακτηριστικά τόσο των υπογείων όσο και των εναέριων καλωδίων υψηλής τάσης, ενώ θα επιχειρηθεί σύγκριση των δύο αυτών τύπων καλωδίων. Ακολούθως, περιγράφεται η διαδικασία της προσθήκης του υπογείου καλωδίου υψηλής τάσης στο Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης, επισημαίνοντας τα χαρακτηριστικά των καλωδίων καθώς και τις μεθόδους υπολογισμού των διαφόρων παραμέτρων, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα της μελέτης μέσω πινάκων και γραφημάτων. Επιπρόσθετα, εξετάζονται οι συνέπειες από την προσθήκη του καλωδίου στο σύστημα, ενώ εντοπίζονται πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν, προτείνοντας παράλληλα τρόπους αντιμετώπισης αυτών των καταστάσεων, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της σταθερότητας καθώς και της αξιοπιστίας του Σ.Η.Ε. της Κρήτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1. Τα Υπόγεια Καλώδια

Οι υπόγειες καλωδιώσεις (Εικόνα 1) χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ηλεκτρικής ισχύος όπου είναι ανέφικτο, δύσκολο ή επικίνδυνο να χρησιμοποιηθούν εναέριες γραμμές. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται ευρέως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, σε εργοστάσια και σε εκπαιδευτικά ιδρύματα. Κατά την επιλογή της ονομαστικής τιμής του καλωδίου, ορισμένοι παράμετροι, όπως είναι η ικανότητα μεταφορά ρεύματος, η πτώση τάσης και η αντοχή σε βραχυκύκλωμα αποτελούν βασικούς παράγοντες για την επιλογή του οικονομικού και βέλτιστου μεγέθους καλωδίου. Η συνήθης διάρκεια ζωή ενός καλωδίου είναι περίπου 40 με 50 χρόνια. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου η μόνωση του καλωδίου μπορεί να υποστεί φθορές ή να εξασθενήσει λόγο γήρανσης. Λανθασμένος χειρισμός των καλωδίων, όπως ζημιές κατά τη μεταφορά ή την εγκατάσταση τους μπορεί, επίσης, να εξασθενήσει τη μόνωσή τους [9].



Εικόνα 1: Υπόγειο καλώδιο μεταφοράς [23]

2.1.1. Δομή Υπόγειου Καλωδίου

Ένα υπόγειο καλώδιο αποτελείται από τα ακόλουθα (**Εικόνα 2**): α) Πυρήνες ή αγωγοί (Cores or Conductors). Ένα καλώδιο μπορεί να έχει έναν ή περισσότερους πυρήνες αναλόγως την υπηρεσία για την οποία προορίζεται, β) Μόνωση (Insulation). Κάθε πυρήνας ή αγωγός διαθέτει κατάλληλο πάχος μόνωσης. Το πάχος της στρώσης εξαρτάται από την τάση που αντέχει το καλώδιο. Τα πιο συνηθισμένα υλικά για την μόνωση είναι το εμποτισμένο χαρτί

και το βερνικωμένο ύφασμα, γ) Μεταλλικό περίβλημα (Metallic Sheath). Εφαρμόζεται πάνω από τη μόνωση για την προστασία του καλωδίου από την υγρασία, τον αέρα ή άλλα καταστροφικά υγρά (όξινα ή αλκαλικά) στο έδαφος και την ατμόσφαιρα, δ) Υπόστρωμα (Bedding). Αποτελείται από ινώδες υλικό, όπως γιούτα ή ταινία χασί και τοποθετείται πάνω από το μεταλλικό περίβλημα. Σκοπός του είναι η προστασία του μεταλλικού περιβλήματος απο διάβρωση ή φθορά, ε) Θωράκιση (Armouring). Εφαρμόζεται πάνω από το υπόστρωμα και αποτελείται από δύο στρώματα γαλβανισμένου χαλύβδινου σύρματος. Σκοπός της είναι η προστασία του καλωδίου από μηχανικές φθορές και στ) Επένδυση (Serving). Χρησιμοποιείται για την προστασία της θωράκισης από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Τοποθετείται ένα στρώμα ινώδους υλικού παρόμοιο με το υπόστρωμα [9].



Εικόνα 2: Δομή υπογείου καλωδίου [21]

2.1.2. Κατηγορίες Υπόγειων Καλωδίων

2.1.2.1. Κατηγορίες υπόγειων καλωδίων με βάση την τάση λειτουργίας

Με βάση την τάση λειτουργίας τα καλώδια ταξινομούνται ως εξής (**Εικόνα 3**): α) LT Cables (Low Tension Cables): Καλώδια Χαμηλής Τάσης με μέγιστη χωρητικότητα τα 1000V, β) HT Cables (High Tension Cables): Καλώδια Υψηλής Τάσης με μέγιστη χωρητικότητα τα 11kV, γ) ST Cables (Super Tension Cables): Καλώδια Υπερ-τάσης με ονομαστική τάση από 22kV ως 33kV, δ) EHT Cables (Extra High Tension Cables): Καλώδια εξαιρετικής Υψηλής Τάσης από 33kV ως 66kV και ε) Extra Super Voltage Cables: Καλώδια υπερ-υψηλής τάσης με μέγιστη ονομαστική τάση πάνω από 132kV [10].



Εικόνα 3: Τύποι υπογείων καλωδίων με βάση την τάση λειτουργίας τους [22]

2.1.2.2. Κατηγορίες υπόγειων καλωδίων με βάση την κατασκευή του καλωδίου

Με βάση την κατασκευή τους τα καλώδια ταξινομούνται σε: α) Belted Cables (Καλώδια με ζώνη μόνωσης): Χρησιμοποιούνται για μέγιστη τάση έως 11kV, β) Screened Cables (Καλώδια με οθόνη δηλαδή προστατευτικό σώμα): Είναι κατάλληλα για μέγιστη Τάση τα 66kV και γ) Pressure Cables (Καλώδια υπό πίεση, με χρήση υγρών ή αερίων για υποστήριξη μόνωσης): Είναι κατάλληλα για τάση πάνω από τα 66kV.

2.1.3. Τύποι Καλωδίων

Υπάρχουν πολλοί τύποι καλωδίων, με την επιλογή του κατάλληλου καλωδίου να εξαρτάται από την τάση λειτουργίας και τις απαιτήσεις της υπηρεσίας. Γενικά, ένα καλώδιο θα πρέπει να πληροί τις εξής προϋποθέσεις: α) Ο αγωγός που χρησιμοποιείται στα καλώδια πρέπει να είναι πολύκλωνος χαλκός ή αλουμίνιο με επικάλυψη κασσιτέρου. Η πολύκλωνη κατασκευή εξασφαλίζει ευελιξία και αυξημένη ικανότητα μεταφορά ρεύματος, β) Το μέγεθος του αγωγού θα πρέπει να είναι τέτοιο έτσι ώστε το καλώδιο να μεταφέρει το κατάλληλο φορτίο ρεύματος χωρίς υπερθέρμανση και με την πτώση τάσης να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα, γ) Το καλώδιο θα πρέπει να διαθέτει κατάλληλο πάχος μόνωσης έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια για την τάση που έχει σχεδιαστεί και δ) Το καλώδιο θα πρέπει να έχει την κατάλληλη μηχανική προστασία για να μπορεί να αντέχει ακόμα και στις πιο σκληρές συνθήκες κατά την εγκατάσταση του [9].

2.1.4. Μονωτικά Υλικά για Καλώδια

Τα μονωτικά υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλή αντιστασιμότητα, υψηλή διηλεκτρική αντοχή, χαμηλό θερμικό συντελεστή, χαμηλή απορρόφηση νερού και διαπερατότητα [11]. Ακόμη, είναι μη εύφλεκτα υλικά, διαθέτουν χημική σταθερότητα και υψηλή μηχανική αντοχή. Αξίζει να σημειωθεί πως έχουν την ικανότητα να αντέχουν σε υψηλές τάσεις θραύσης καθώς και υψηλή αντοχή εφελκυσμού και πλαστικότητα [12].

Ειδικότερα, το καουτσούκ έχει διηλεκτρική αντοχή 30kV/mm, αντίσταση μόνωσης 10^17 Ω.cm και σχετική διαπερατότητα 2-3. Απορροφά εύκολα υγρασία, ενώ είναι μαλακό και ευάλωτο σε ζημιές από κακή χρήση και γήρανση. Η μέγιστη ασφάλεια θερμοκρασίας είναι 38 °C [13]. Το βουλκανισμένο καουτσούκ Ινδίας παράγεται από ανάμειξη καθαρού καουτσούκ με ορυκτές ενώσεις και θέρμανση στους 150 °C. Διαθέτει υψηλή μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα και αντοχή στην φθορά. Είναι κατάλληλο για καλώδια χαμηλής και μέτριας τάσης [14]. Επιπρόσθετα, το εμποτισμένο χαρτί, το οποίο αντικατέστησε το καουτσούκ, αποτελείται από χημικά επεξεργασμένο χαρτί εμποτισμένο με ναφθινικές και παραφινικές ενώσεις. Έχει χαμηλό κόστος και χαμηλή χωρητικότητα. Επίσης, έχει υψηλή διηλεκτρική αντοχή και αντίσταση μόνωσης, είναι προστατευτικό και απαιτεί προστατευτικό περίβλημα [15].

Από την άλλη, το βερνικωμένο ύφασμα αποτελείται από βαμβακερό ύφασμα εμποτισμένο και καλυμμένο με βερνίκι. Ακόμα είναι υγροσκοπικό και απαιτεί προστασία με διηλεκτρική αντοχή περίπου 4kV/mm και διαπερατότητα 2.5-3.8 [15]. Επίσης, το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) έχει καλή διηλεκτρική αντοχή, υψηλές θερμοκρασίες τήξης και υψηλή αντίσταση μόνωσης. Έχει κατώτερες μηχανικές ιδιότητες απ' ότι το καουτσούκ αλλά είναι αδρανές στο οξυγόνο και ανθεκτικό σε πολλά οξέα [16].

Τέλος, τα καλώδια XLPE διασταυρωμένου πολυαιθυλενίου έχουν εύρος θερμοκρασίας από 250 έως 300 °C, καλές μονωτικές ιδιότητες, μικρό βάρος, χαμηλή διηλεκτρική σταθερά, υψηλή μηχανική αντοχή και χαμηλή απορρόφηση νερού. Επιτρέπουν θερμοκρασίες αγωγού 90 °C υπό κανονικές συνθήκες και 250 °C υπό βραχυκύκλωμα [13], [15].

2.1.5. Τοποθέτηση Υπόγειων Καλωδίων

Υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι για την τοποθέτηση των υπογείων καλωδίων. Πιο συγκεκριμένα έχουμε: α) Άμεση τοποθέτηση (Direct Laying). Σε αυτή τη μέθοδο σκάβεται μια τάφρος περίπου 1,5 μέτρου βάθους και πλάτους 45 εκ. Η τάφρος καλύπτεται με ένα στρώμα λεπτής άμμου. Όταν το καλώδιο τοποθετηθεί στην τάφρο καλύπτεται με ένα ακόμη στρώμα άμμου πάχους 10 εκ. περίπου. Κατόπιν, η τάφρος καλύπτεται με τούβλα και άλλα υλικά για να προστατεύσει το καλώδιο από τις μηχανικές βλάβες. Καθώς περισσότερα από ένα καλώδια πρόκειται να τοποθετηθούν στην ίδια τάφρο, παρέχεται, οριζόντια ή κάθετη, μεταξύ τους απόσταση τουλάχιστον 30 εκ. έτσι ώστε να μειώνεται η επίδραση της αμοιβαίας

θέρμανσης και να διασφαλίζεται ότι μια βλάβη σε ένα καλώδιο δεν θα προκαλέσει ζημιά και στο διπλανό, β) Σύστημα τοποθέτησης με αγωγούς (Draw-in System). Σε αυτή τη μέθοδο αγωγοί ή κανάλια από κατασκευασμένα από υαλώδη πέτρα, χυτοσίδηρο ή σκυρόδεμα τοποθετούνται στο έδαφος με φρεάτια σε κατάλληλες θέσεις κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου. Τα καλώδια στην συνέχεια τραβιούνται στην θέση τους μέσω των φρεατίων. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται, συνήθως, για διαδρομές καλωδίων μικρού μήκους όπως σε εργαστήρια και διασταυρώσεις δρόμων και γ) Στερεό σύστημα (Solid System). Σε αυτή τη μέθοδο το καλώδιο τοποθετείται σε ανοιχτούς σωλήνες ή αύλακες που έχουν σκαφτεί στο έδαφος κατά μήκος της διαδρομής του καλωδίου. Οι αύλακες κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο, κεραμοσκεπή, άσφαλτο ή επεξεργασμένο ξύλο. Μετά την τοποθέτηση του καλωδίου οι αύλακες γεμίζονται με μια ασφάλτινη ένωση και καλύπτονται. Αυτή η μέθοδος είναι πιο ακριβή από τη μέθοδο της Άμεσης Τοποθέτησης, αλλά προσφέρει εξαιρετική μηχανική αντοχή [10].

2.1.6. Κατηγορίες Υπόγειων Καλωδίων Υψηλής Τάσης

Οι κατηγορίες που περιγράφονται παρακάτω αφορούν τόσο τις παλαιότερες τεχνολογίες όσο και νέες αναδυόμενες τεχνολογίες. Πιο συγκεκριμένα έχουμε τις ακόλουθες κατηγορίες [17].

2.1.6.1. Καλώδιο με μόνωση υγρού (Fluid Filled Cable)

Τα καλώδια αυτά διαθέτουν μόνωση από χαρτί το οποίο τυλίγεται γύρω από τον κεντρικό χάλκινο αγωγό και εμποτίζεται με υγρό και πίεση. Μεταλλικές ταινίες τυλίγονται γύρω από τη μόνωση έτσι ώστε να ενισχύσουν τα χαρτιά και να διατηρήσουν την πίεση του υγρού. Ένα περίβλημα από μόλυβδο καλύπτει τη μόνωση. Αν εκτεθεί σε υπόγεια νερά το μόλυβδο ή το αλουμίνιο θα διαβρωθεί, επιτρέποντας την εισροή νερού. Ένα εξωτερικό πλαστικό περίβλημα παρέχει επιπλέον μόνωση και αποτρέπει τη διάβρωση. Για την εξασφάλιση της ακεραιότητας του καλωδίου, το εξωτερικό περίβλημα καλύπτεται με ένα ημιαγώγιμο υλικό, το οποίο επιτρέπει την ανίχνευση ελαττωμάτων στο εξωτερικό περίβλημα. Οι περιοχές τιμής της τάσης του είναι από 33kV έως 400kV [17].

2.1.6.2. Καλώδιο με μόνωση από χαρτί και από πολυαιθυλένιο (Paper Polythelene Laminated Cable-PPL-FFC)

Το PPL είναι παρόμοιο με τα καλώδια με μόνωση υγρού, απλώς η μόνωση αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα χαρτιού και XLPE [17].

2.1.6.3. Καλώδιο εμποτισμένο μόνιμο μη απαστραγγιζόμενο μονωτικό (Mass Impregnate Not Draining)

Το καλώδιο MIND είναι ένα καλώδιο με μόνωση από χαρτί και χρησιμοποιείται συνήθως σε υποσταθμούς για συστήματα χαμηλότερης τάσης, όπως για παράδειγμα σε αντιστάσεις υγρού ουδετέρου. Λόγω των υψηλών τεχνικών καταπονήσεων, ο συγκεκριμένος τύπος καλωδίου δεν είναι κατάλληλος για καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με τάσεις άνω των 33kV και έχει αντικατασταθεί από το XLPE. Ωστόσο, το καλώδιο MIND χρησιμοποιείται πλέον για καλώδια συνεχούς ρεύματος (DC) σε υψηλότερες τάσεις [17].

2.1.6.4. Γραμμές Μόνωσης αερίου (Gas Insulated Lines)

Αυτό το σύστημα αποτελείται από αγωγούς από αλουμίνιο ή χαλκό, οι οποίοι υποστηρίζονται από μονωτικά μέσα σε σφραγισμένους σωλήνες. Οι σωλήνες αυτοί μπορούν να εγκατασταθούν υπέργεια σε τάφρους ή σε τούνελ. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι η υψηλότερη απόδοση καλωδίου ενώ οι συνδέσεις στα άκρα του καλωδίων έχουν χαμηλότερο κόστος από τα συμβατικά συστήματα στεγανοποίησης [17].

2.1.6.5. Καλώδια XLPE (Cross Linked Polyethylene Extruded)

Πρόκειται για καλώδια με μόνωση από διασταυρούμενο πολυαιθυλένιο. Λόγω των προόδων στην τεχνολογία των καλωδίων, το XLPE χρησιμοποιείται, πλέον, αντί για τα καλώδιο με μόνωση από υγρό. Στα σύγχρονα αυτά καλώδια, ο κεντρικός αγωγός μονώνεται με υλικό από διασταυρούμενο πολυαιθυλένιο (XLPE), το οποίο εξωθείται γύρω από τον αγωγό. Η θωράκιση του καλωδίου είναι προαιρετική και μπορεί να περιλαμβάνει μεταλλική θωράκιση, όπως ταινίες ή σύρματα χαλκού, για προστασία από μηχανικές βλάβες και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Επίσης, τα καλώδια XLPE περιλαμβάνουν έναν εξωτερικό μανδύα ο οποίος είναι, συνήθως, από PVC ή άλλο πολυμερές υλικό, που προστατεύει το καλώδιο από περιβαλλοντικούς παράγοντες [18].

Η απουσία υγρού στη μόνωση του καλωδίου επιτρέπει μια πιο μηχανικά ανθεκτική συνολική κατασκευή καλωδίου. Ακόμη, τα καλώδια XLPE απαιτούν λιγότερη συντήρηση, καθώς δεν υπάρχουν επιπλέον συσκευές υγρού οι οποίες χρειάζονται παρακολούθηση και συντήρηση. Λόγω της απλότητας τους, αυτός ο τύπος καλωδίου μπορεί να εγκατασταθεί στις περισσότερες περιοχές, όπως σε τούνελ, αγωγούς και κανάλια. Περισσότερα πλεονεκτήματα τους είναι τα εξής: χαμηλές ηλεκτρικές απώλειες, υψηλός βαθμός αξιοπιστίας και ασφάλειας, ελάχιστη επίδραση στο περιβάλλον, απουσία αισθητικά ενοχλητικών πύργων σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και σύγχρονες μέθοδοι κατασκευής που εξασφαλίζουν πλήρη

25

αναφορά και ιχνηλασιμότητα σε κάθε στάδιο της διαδικασίας μόνωσης [40]. Σήμερα, σε όλο τον κόσμο λειτουργούν πολλά συστήματα καλωδίων υψηλής τάσης XLPE με ονομαστικές τάσεις έως 500 kV και μήκη κυκλωμάτων που φτάνουν τα 40 χιλιόμετρα [20].



Εικόνα 4: Καμπύλη διάρκειας ζωής των καλωδίων XLPE [20]

Για όλα τα οργανικά υλικά μόνωσης ισχύουν γενικοί κανόνες όπως: α) αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας κατά 8 έως 10 °C μειώνει τη διάρκεια ζωής στο μισό και β) αύξηση της τάσης λειτουργίας κατά 8 έως 10% μειώνει τη διάρκεια ζωής στο μισό [20]. Η επίδραση της τάσης στη διάρκεια ζωής εκφράζεται από τον ακόλουθο νόμο διάρκειας ζωής (Εικόνα 4): t · Eⁿ = const, όπου: E = Μέγιστη ένταση πεδίου στην επιφάνεια του αγωγού του καλωδίου, n = Εκθέτης που δηλώνει την κλίση και t = Χρόνος.

Άλλες λειτουργικές παράμετροι καθοριστικής σημασίας είναι οι εξής: α) το επίπεδο τάσης και παροδικές τάσεις, όπως διακοπές και κρουστικά κύματα από κεραυνό, β) το ρεύμα βραχυκυκλώματος και οι σχετικές θερμοκρασίες αγωγού, γ) η μηχανική καταπόνηση, δ) οι συνθήκες περιβάλλοντος, όπως είναι η υγρασία, οι θερμοκρασίες εδάφους και οι χημικές επιδράσεις, ε) τα τρωκτικά και οι τερμίτες στην περιοχή.

Ο καθορισμός των διαστάσεων ενός συστήματος καλωδίων υψηλής τάσης βασίζεται πάντα στις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου. Για τον υπολογισμό απαιτούνται οι ακόλουθες λεπτομέρειες: α) το είδος της μόνωσης του καλωδίου, β) η ονομαστική και μέγιστη τάση λειτουργίας, γ) η ικανότητα βραχυκυκλώματος ή το ρεύμα βραχυκυκλώματος με καθορισμό του χρόνου επίδρασης, δ) η ικανότητα μεταφοράς ή το ονομαστικό ρεύμα, ε) ο τρόπος λειτουργίας: συνεχής λειτουργία ή λειτουργία μερικού φορτίου (συντελεστές φορτίου) και στ) οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως: ο τύπος εγκατάστασης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος (συμπεριλαμβανομένων των εξωτερικών επιδράσεων) και η ειδική θερμική αντίσταση [20].

Τα καλώδια XLPE χρησιμοποιούνται ευρέως σε: α) Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, για τη μεταφορά μέσης και υψηλής τάσης, τόσο σε υπόγειες όσο και σε εναέριες εγκαταστάσεις, β) Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις για την τροφοδοσία μηχανημάτων και εξοπλισμού που απαιτούν αξιόπιστη και ανθεκτική καλωδίωση και γ) Κτίρια και Υποδομές, με χρήση σε εσωτερικές και εξωτερικές σταθερές εγκαταστάσεις, όπου απαιτείται αντοχή σε θερμοκρασίες και μηχανικές καταπονήσεις [20].

2.1.7. Μέθοδοι Γείωσης και Επαγόμενη Τάση

Τα καλώδια υψηλής τάσης διαθέτουν μεταλλικό περίβλημα, κατά μήκος του οποίου επάγεται μία τάση ως συνάρτηση του ρεύματος λειτουργίας. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η επαγόμενη τάση, τα δύο άκρα του καλωδίου πρέπει να συνδέονται επαρκώς με το σύστημα γείωσης. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 1) παρέχει μια επισκόπηση των δυνατών μεθόδων και των χαρακτηριστικών τους.

Μέθοδος γείωσης	Μόνιμη τάση στα άκρα των καλωδίων	Απαιτούνται περιοριστές τάσης στο περίβλημα	Τυπική εφαρμογή
Συγκόλληση και στα δύο άκρα	Όχι	Όχι	Υποσταθμοί, σύντομες συνδέσεις, σπάνια εφαρμόζονται για καλώδια Υψηλής Τάσης (ΥΤ), αντίθετα προτιμώνται για καλώδια Μέσης (ΜΤ) και Χαμηλής Τάσης (ΧΤ).
Συγκόλληση στο ένα άκρο	Ναι	Ναι	Συνήθως χρησιμοποιούνται μόνο για μήκη κυκλωμάτων έως 1 χλμ.
Διασταυρούμενη συγκόλληση	Μόνο στα σημεία διασταυρούμενης συγκόλλησης	Ναι	Συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων όπου απαιτούνται ενώσεις.

Πίνακας 1: Επισκόπηση των μεθόδων γείωσης

2.1.7.1. Συγκόλληση και στα δύο άκρα (Both-End Bonding)

Τα δύο άκρα του περιβλήματος του καλωδίου συνδέονται με τη γείωση του συστήματος. Με αυτή τη μέθοδο δεν δημιουργούνται τάσεις στα άκρα του καλωδίου, καθιστώντας την περισσότερο ασφαλή επιλογή. Από την άλλη πλευρά, μπορεί να ρέουν κυκλούντα ρεύματα στο περίβλημα, καθώς ο βρόχος μεταξύ των δύο σημείων γείωσης κλείνει μέσω του εδάφους. Αυτά τα κυκλούντα ρεύματα είναι ανάλογα με τα ρεύματα του αγωγού, μειώνοντας σημαντικά την ικανότητα φόρτισης του καλωδίου, καθιστώντας αυτή τη μέθοδο την πλέον μειονεκτική από οικονομική άποψη [20].

2.1.7.2. Συγκόλληση στο ένα άκρο (Single-end Bonding)

Το ένα άκρο του περιβλήματος του καλωδίου συνδέεται με τη γείωση του συστήματος, ώστε στο άλλο άκρο («ανοικτό άκρο») να εμφανίζεται η τάση που επάγεται γραμμικά κατά μήκος του μήκους του καλωδίου. Για να εξασφαλιστούν οι απαιτήσεις ασφάλειας, το «ανοικτό άκρο» του περιβλήματος πρέπει να προστατεύεται με έναν απαγωγό υπερτάσεων. Για να αποφευχθεί πιθανή ανύψωση δυναμικού σε περίπτωση βλάβης, τα δύο σημεία γείωσης πρέπει να συνδέονται επιπλέον με έναν αγωγό συνέχειας γείωσης. Ο απαγωγός υπερτάσεων (περιοριστής τάσης περιβλήματος) έχει σχεδιαστεί για να εκτρέπει τις υπερτάσεις από διακοπές και ατμοσφαιρικές εκφορτίσεις, αλλά δεν πρέπει να ενεργοποιείται σε περίπτωση βραχυκυκλώματος [20].

2.1.7.3. Διασταυρούμενη Γείωση (Cross – Banding)

Αυτή η μέθοδος γείωσης εφαρμόζεται σε μεγαλύτερα μήκη διαδρομής όπου απαιτούνται ενώσεις λόγω του περιορισμένου μήκους παράδοσης καλωδίου. Ένα σύστημα διασταυρούμενης γείωσης αποτελείται από τρεις ίσες ενότητες με κυκλική διασταύρωση περιβλήματος μετά από κάθε ενότητα. Τα σημεία τερματισμού πρέπει να είναι στερεά συνδεδεμένα με τη γείωση. Σε κάθε ενότητα, επάγεται μια σταθερή τάση. Σε ιδανικά συστήματα διασταυρούμενης γείωσης, τα μήκη των τριών ενοτήτων είναι ίσα, ώστε να μην υπάρχει υπολειμματική τάση και, επομένως, να μην ρέει ρεύμα στο περίβλημα. Οι απώλειες στο περίβλημα μπορούν να διατηρηθούν πολύ χαμηλές με αυτή τη μέθοδο, χωρίς να επηρεάζεται η ασφάλεια όπως στη γείωση και των δύο άκρων του περιβλήματος.

Πολύ μεγάλες διαδρομές μπορούν να αποτελούνται από πολλαπλά συστήματα διασταυρούμενης γείωσης στη σειρά. Σε αυτή την περίπτωση, συνιστάται η στερεά σύνδεση των άκρων του συστήματος με τη γείωση για την αποτροπή διάδοσης υπερτάσεων σε περίπτωση βλάβης. Εκτός από τη διασταυρούμενη σύνδεση των περιβλημάτων, οι φάσεις των αγωγών μπορούν να εναλλάσσονται κυκλικά. Αυτή η λύση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για πολύ μεγάλα μήκη καλωδίων ή παράλληλα κυκλώματα [20].

2.2. Τα Εναέρια Καλώδια



Εικόνα 5: Εναέρια γραμμή μεταφοράς [41]

Μια Εναέρια Γραμμή (**Εικόνα 5**) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά ή την διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο μηχανικός σχεδιασμός μιας εναέριας γραμμής παίζει σημαντικό ρόλο για την επιτυχή λειτουργία της. Κατά την κατασκευή της θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η μηχανική αντοχή της είναι τέτοια ώστε να αντέχει στις πιο πιθανές καιρικές συνθήκες. Γενικά, τα κύρια στοιχεία μιας εναέριας γραμμής είναι τα εξής: α) οι Αγωγοί που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τον σταθμό αποστολής στον σταθμό παραλαβής, β) τα Υποστηρίγματα γραμμών, τα οποία μπορεί να είναι στύλοι ή πύργοι και διατηρούν τους αγωγούς σε κατάλληλο ύψος πάνω από το έδαφος, γ) οι Μονωτήρες, που συνδέονται με τα υποστηρίγματα και μονώνουν τους αγωγούς από το έδαφος, δ) τα Οριζόντια στηρίγματα, τα οποία παρέχουν στήριξη στους μονωτήρες και ε) τα διάφορα Εξαρτήματα, όπως είναι οι πλακέτες φάσης, οι πινακίδες κινδύνου, τα αλεξικέραυνα και τα σύρματα αναρρίχησης [24].

2.2.1. Αγωγός

Ο αγωγός είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της επένδυσης κεφαλαίου κατευθύνεται σε αυτό. Έτσι, η σωστή επιλογή του υλικού και του μεγέθους του αγωγού έχει μεγάλη σημασία. Το υλικό του αγωγού θα πρέπει να διαθέτει τις εξής τέσσερις ιδιότητες: α) υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, β) υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, έτσι ώστε να αντέχει σε μηχανικές καταπονήσεις, γ) χαμηλό κόστος, έτσι ώστε να έχει μικρό

βάρος ανά μονάδα όγκου. Όλες οι απαιτήσεις δεν βρίσκονται σε ένα μόνο υλικό. Έτσι, κατά την επιλογή του αγωγού για μια συγκεκριμένη περίπτωση, γίνεται συνδυασμός μεταξύ κόστους και των απαιτούμενων ηλεκτρικών και μηχανικών ιδιοτήτων [24].

2.2.1.1. Συνηθισμένα υλικά αγωγών

Τα πλέον συνηθισμένα υλικά αγωγών για εναέριες γραμμές είναι ο χαλκός, το αλουμίνιο, το αλουμίνιο με χαλύβδινο πυρήνα, ο γαλβανισμένος χάλυβας και ο χαλκός με κάδμιο. Όλοι οι αγωγοί για εναέριες γραμμές είναι προτιμότεροι να είναι συστρεφόμενοι προκειμένου να αυξάνεται η ευκαμψία τους. Στους συστρεφόμενους αγωγούς συνήθως υπάρχει ένα κεντρικό σύρμα, γύρω από το οποίο τοποθετούνται διαδοχικά στρώματα συρμάτων που περιέχουν 6, 12, 18, 24, ... σύρματα. Έτσι αν υπάρχουν n στρώματα, ο συνολικός αριθμός των συρμάτων υπολογίζεται ως εξής: Σύνολο συρμάτων = 3n(n+1)+1. Κατά την κατασκευή των συστρεφόμενων συρμάτων, τα διαδοχικά στρώματα συρμάτων στρίβονται ή περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις με σκοπό να δεθούν μεταξύ τους και να προσφέρουν μεγαλύτερη συνοχή και αντοχή [24].

2.2.2. Υποστηρίγματα Γραμμών

Οι υποστηρικτικές δομές για τους αγωγούς εναέριων γραμμών περιλαμβάνουν διάφορους τύπους στύλων και πύργων, οι οποίοι ονομάζονται υποστηρίγματα γραμμών και θα πρέπει να έχουν τα εξής πέντε χαρακτηριστικά: α) υψηλή μηχανική αντοχή, ώστε να αντέχουν το βάρος των αγωγών, καθώς τα φορτία και τον άνεμο, β) ελαφρύ βάρος, χωρίς να χάνεται η μηχανική αντοχή τους, γ) χαμηλό κόστος και οικονομική συντήρηση, δ) μεγάλη διάρκεια ζωής και ε) εύκολη πρόσβαση στους αγωγούς για σκοπούς συντήρησης. Τα υποστηρίγματα γραμμών είναι διαφόρων τύπων όπως: ξύλινοι στύλοι, χαλύβδινοι στύλοι, στύλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα και πύργοι από χαλύβδινο πλέγμα. Η επιλογή του κατάλληλου υποστηρίγματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι το μήκος ανοίγματος της γραμμής, η διατομή του αγωγού, η τάση της γραμμής, το κόστος και οι τοπικές συνθήκες [24].

2.2.3. Μονωτήρες

Οι αγωγοί εναέριων γραμμών πρέπει να στηρίζονται σε στύλους ή πύργους έτσι ώστε τα ρεύματα από τους αγωγούς να μην διαρρέουν στη Γη μέσω των υποστηριγμάτων, δηλαδή οι αγωγοί γραμμής πρέπει να είναι κατάλληλα μονωμένοι από τα υποστηρίγματα. Αυτό γίνεται με την σύνδεση των αγωγών γραμμής στα υποστηρίγματα με την βοήθεια των μονωτήρων. Γενικότερα, οι μονωτήρες θα πρέπει να έχουν τις εξής τέσσερις ιδιότητες: α) υψηλή μηχανική αντοχή, ώστε να αντέχουν τα φορτία των αγωγών, β) υψηλή ηλεκτρική αντίσταση του υλικού του μονωτήρα, για την αποφυγή διαρροών ρευμάτων ως προς τη Γη, γ) υψηλή σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού του μονωτήρα, ώστε να παρέχεται υψηλή διηλεκτρική αντοχή και δ) το υλικό του μονωτήρα πρέπει να είναι μη πορώδες, χωρίς ακαθαρσίες και ρωγμές, διαφορετικά θα μειωθεί η διηλεκτρική σταθερά [24].

2.2.4. Οριζόντια Στηρίγματα

Τα οριζόντια στηρίγματα είναι δομικά στοιχεία που τοποθετούνται στους στύλους ή στους πύργους στήριξης των εναέριων γραμμών. Ο κύριος ρόλος τους είναι η υποστήριξη των μονωτήρων, διατηρώντας τους αγωγούς σε σταθερή θέση και εξασφαλίζοντας την αντοχή σε μηχανικά φορτία, όπως το βάρος των αγωγών και οι δυνάμεις του ανέμου. Επιπλέον, συμβάλλουν στη διατήρηση της σωστής απόστασης μεταξύ των αγωγών, μειώνοντας τον κίνδυνο ηλεκτρικών σφαλμάτων ή βραχυκυκλωμάτων [25].

2.2.5. Διάφορα Εξαρτήματα

Τα διάφορα εξαρτήματα των εναέριων γραμμών περιλαμβάνουν: α) Πλακέτες φάσης που χρησιμοποιούνται για την ένδειξη των διαφορετικών φάσεων μιας γραμμής, διευκολύνοντας τους τεχνικούς κατά τη συντήρηση και την επισκευή, β) Πινακίδες κινδύνου οι οποίες τοποθετούνται σε εμφανή σημεία στους στύλους ή στους πύργους, προειδοποιώντας για τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας, γ) Αλεξικέραυνα που τοποθετούνται στην κορυφή των πυλώνων ή των στύλων και προστατεύουν την εναέρια γραμμή από κεραυνούς, εκτρέποντας την ηλεκτρική εκκένωση προς το έδαφος μέσω ενός συστήματος γείωσης και δ) Σύρματα αναρρίχησης τα οποία συνιστούν προστατευτικά σύρματα που χρησιμοποιούνται για την ασφαλή αναρρίχηση των τεχνικών κατά τη συντήρηση ή την επιθεώρηση της γραμμής. Όλα αυτά τα στοιχεία συμβάλλουν στη λειτουργικότητα, την ανθεκτικότητα και την ασφάλεια των εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [25].

2.2.6. Το Φαινόμενο "Κορώνα"

Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο αγωγών, οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση σε σχέση με τη διάμετρο τους, δεν παρατηρείται αλλαγή στην κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα γύρω από τους αγωγούς, εφόσον η τάση είναι χαμηλή. Ωστόσο, όταν η τάση φτάσει μια καθορισμένη τιμή, που ονομάζεται κρίσιμη διαταρακτική τάση, οι αγωγοί περιβάλλονται από μια αχνή μωβ λάμψη, γνωστή ως κορώνα. Το φαινόμενο αυτό, συνοδεύεται από έναν χαρακτηριστικό συριστικό ήχο, από παραγωγή όζοντος, από απώλειες ισχύος και από παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων. Όσο αυξάνεται η τάση,

31

τόσο η φωτεινή ζώνη εντείνεται ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται ο ήχος, οι απώλειες ισχύος και ο θόρυβος ραδιοσυχνοτήτων. Εάν η τάση φτάσει την τιμή της διάσπασης, τότε θα σημειωθεί υπερπήδηση μεταξύ των αγωγών λόγω διάσπασης της μόνωσης του αέρα [24].

2.2.6.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του φαινομένου Κορώνα

Το Φαινόμενο της Κορώνας έχει αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα, για τα οποία θα πρέπει να επιτευχθεί ισορροπία για τον σωστό σχεδιασμό μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, ως πλεονεκτήματα έχουμε: α) την αύξηση της αγώγιμης διαμέτρου του αγωγού. Λόγω του σχηματισμού Κορώνας, ο αέρας γύρω από τον αγωγό γίνεται αγώγιμος, αυξάνοντας την εικονική διάμετρο του αγωγού. Έτσι, μειώνονται οι ηλεκτροστατικές τάσεις μεταξύ των αγωγών και β) μείωση της επίδρασης των μεταβατικών φαινομένων. Η Κορώνα μειώνει τις επιδράσεις των μεταβατικών φαινομένων που προκαλούνται από υπερτάσεις.

Από την άλλη, τα μειονεκτήματα του φαινομένου επικεντρώνονται στα ακόλουθα: α) απώλειες ενέργειας. Η Κορώνα συνοδεύεται από απώλειες ενέργειας, οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση μεταφοράς της γραμμής, β) παραγωγή όζοντος. Η Κορώνα παράγει όζον, το οποίο μπορεί να προκαλέσει διάβρωση των αγωγών λόγω χημικής δράσης και γ) μη ημιτονοειδές ρεύμα και τάση. Το ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή λόγω κορώνας δεν είναι ημιτονοειδές, έτσι προκαλείται μη ημιτονοειδής πτώση τάση στη γραμμή. Αυτό μπορεί να προκαλέσει επαγωγικές παρεμβολές σε γειτονικές γραμμές επικοινωνίας [24].

2.3. Σύγκριση Υπογείων και Εναέριων Καλωδίων

2.3.1. Διαφορές Υπόγειων και Εναέριων Καλωδίων

Τα υπόγεια καλώδια είναι πιο ακριβά και η κατασκευή τους είναι πιο περίπλοκη σε σύγκριση με τις εναέριες γραμμές, οι οποίες είναι πιο απλές στην κατασκευή και δεν απαιτούν μόνωση και θωράκιση. Οι εναέριες γραμμές έχουν λιγότερες απαιτήσεις και είναι φθηνότερες στην κατασκευή. Από την άλλη, τα υπόγεια καλώδια έχουν μεγαλύτερο μέγεθος αγωγών σε σχέση με τις εναέριες γραμμές για την ίδια ποσότητα ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εναέριες γραμμές ψύχονται φυσικά και έχουν μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος χωρίς να υπερθερμαίνονται. Επίσης, οι εναέριες γραμμές είναι καλύτερα προσαρμοσμένες για μεταφορά υψηλότερων τάσεων σε σύγκριση με τα υπόγεια καλώδια, τα οποία περιορίζονται λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και της περιορισμένης διάχυσης θερμότητας. Ωστόσο, οι εναέριες γραμμές επηρεάζουν τις γραμμές επικοινωνίας που βρίσκονται κοντά, έχουν φαινόμενα εκκένωσης (κορώνα) και προκαλούν παρεμβολές σε ραδιόφωνα και τηλεοράσεις, κάτι που δεν συμβαίνει με τα υπόγεια καλώδια. Επιπρόσθετα, υπάρχει μεγαλύτερη πτώση τάσης στις εναέριες γραμμές λόγω του μικρότερου διαμέτρου των αγωγών τους σε σύγκριση με τα υπόγεια καλώδια για την ίδια ισχύ. Τέλος, είναι ευκολότερο να εντοπιστούν και να επισκευαστούν βλάβες στις εναέριες γραμμές, ενώ στα υπόγεια συστήματα, ο εντοπισμός και η επισκευή είναι πιο περίπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία [10].

Οσον αφορά τη διάρκεια ζωής, οι υπόγειες γραμμές υψηλής τάσης, συνήθως, χρειάζονται αντικατάσταση μετά από περίπου 50 χρόνια, με τις εναέριες γραμμές να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, που ξεπερνά τα 80 χρόνια. Σχετικά με τις **απαιτήσεις** χωρητικότητας, οι υπόγειες γραμμές απαιτούν περισσότερα καλώδια και πρόσθετα εξαρτήματα όπως αγωγούς, θαλάμους σύνδεσης και τερματισμούς, αυξάνοντας έτσι το κόστος και μειώνοντας τη συνολική αξιοπιστία. Σε ότι αφορά τη διάχυση της θερμότητας, οι εναέριες γραμμές ψύχονται φυσικά με τον αέρα. Οι υπόγειες γραμμές εγκαθίστανται σε αγωγούς PVC με επένδυση σκυροδέματος, με τη θερμότητά τους να διαχέεται μέσω του εδάφους, κάτι που περιορίζει την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος. Τέλος, αναφορικά με το θόρυβο και το φωτισμό, οι εναέριες γραμμές υψηλής τάσης μπορούν να παράγουν ήχους όπως σφύριγμα ή βόμβο. Αντιθέτως, οι υπόγειες γραμμές είναι αθόρυβες, εκτός από τις περιοχές κοντά στους μεταβατικούς υποσταθμούς [26].

2.3.2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Υπόγειων Καλωδίων

2.3.2.1. Πλεονεκτήματα των υπόγειων καλωδίων

Ως πλεονεκτήματα των υπόγειων καλωδίων μπορούμε να αναφέρουμε τη μειωμένη συντήρηση μιας και προστατεύονται από ζημιές που σχετίζονται με καιρικές συνθήκες, όπως καταιγίδες, κεραυνούς ή πάγο, ενώ απαιτούν λιγότερες επιθεωρήσεις και επισκευές σε σύγκριση με τις εναέριες γραμμές. Επίσης, διακρίνονται από αυξημένη ασφάλεια, μιας και μειώνεται ο κινδύνους ηλεκτροπληξίας λόγω εκτεθειμένων ή κατεστραμμένων καλωδίων. Από την άλλη, διακρίνονται από μεγαλύτερη αξιοπιστία, μιας και είναι λιγότερο επιρρεπή σε διακοπές που προκαλούνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες ή ανθρώπινες παρεμβάσεις. Επίσης, είναι ιδανικά για περιοχές με περιορισμένο χώρο, όπως πόλεις και βιομηχανικές ζώνες., ενώ διακρίνονται από χαμηλή ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, εξασφαλίζοντας ελάχιστες παρεμβολές με κοντινά ηλεκτρονικά και συστήματα επικοινωνίας [27].

2.3.2.2. Μειονεκτήματα των υπόγειων καλωδίων

Σχετικά με τα μειονεκτήματα των υπόγειων καλωδίων αυτά αφορούν κυρίως το υψηλό κόστος εγκατάστασης μιας και απαιτούν δαπανηρές εκσκαφές, προηγμένα υλικά και εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό. Επίσης, διακρίνονται από πολύπλοκη συντήρηση αφού ο εντοπισμός και η επισκευή βλαβών μπορεί να είναι χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία. Από την άλλη, χαρακτηρίζονται από περιορισμένη ευελιξία, από την στιγμή που είναι δύσκολο να τροποποιηθούν ή να μετακινηθούν αφού εγκατασταθούν. Επιπρόσθετα, έχουμε προβλήματα απώλειας θερμότητας μιας και τα υπόγεια καλώδια μπορεί να υπερθερμανθούν λόγω περιορισμένης κυκλοφορίας αέρα. Τέλος, η εκσκαφή και η εγκατάσταση μπορεί να διαταράζουν το έδαφος και τα υπόγεια οικοσυστήματα [27].

2.3.3. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Εναέριων Καλωδίων

2.3.3.1. Πλεονεκτήματα της εναέριας μεταφοράς ρεύματος

Τα εναέρια καλώδια έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως είναι η εύκολη επισκευή και συντήρησή τους μιας και οι εναέριες γραμμές είναι πιο εύκολο να επισκευαστούν και να συντηρηθούν. Επιπλέον, τα εναέρια καλώδια μπορούν να εγκατασταθούν εύκολα πάνω από ποτάμια, αυτοκινητόδρομους ή σε ορεινές περιοχές. Επίσης, μειωμένος είναι ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας, δεδομένου ότι βρίσκονται σε μεγάλο ύψος από το έδαφος. Τέλος, τα εναέρια καλώδια διακρίνονται έχουν χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης συγκριτικά με την υπόγεια μεταφορά ρεύματος [28].

2.3.3.2. Μειονεκτήματα της εναέριας μεταφοράς ρεύματος

Σε ότι αφορά τα μειονεκτήματα των εναέριων καλωδίων, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι ακόλουθοι λόγοι είναι σημαντικοί προκειμένου να μην επιλεγούν τα εναέρια καλώδια. Πιο συγκεκριμένα, είναι: α) Αισθητικοί λόγοι. Τα εναέρια καλώδια και οι πυλώνες θεωρούνται οπτικά παρεμβατικά και αντιαισθητικά, ειδικά σε περιοχές φυσικού κάλλους, τουριστικές περιοχές, οικισμούς ή ιστορικά κέντρα [29]. Υπάρχει αντίδραση από κατοίκους, δήμους και τοπικούς φορείς που θέλουν να διατηρηθεί η τοπική αισθητική και το περιβάλλον "ανέπαφο", β) Περιβαλλοντικοί λόγοι. Τα εναέρια καλώδια μπορεί να επηρεάσουν οικοσυστήματα, ειδικά πτηνά (π.χ. προσκρούσεις ή ηλεκτροπληξίες) [30]. Επηρεάζεται η χλωρίδα και πανίδα κοντά στα ίχνη διέλευσης. Οι περιβαλλοντικές αντιδράσεις συχνά ασκούν πίεση για υπόγεια καλώδια σε ευαίσθητες περιοχές, γ) Κοινωνικές αντιδράσεις λόγω φόβων για την υγεία. Υπάρχει ανησυχία για την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMF), παρόλο ασφαλείας [31]. Ο φόβος αυτός, έστω και αν δεν στηρίζεται πάντα σε τεκμηριωμένα επιστημονικά δεδομένα, μπορεί να προκαλέσει έντονη αντίδραση των τοπικών κοινωνιών, δ) Ασφάλεια και κίνδυνος πυρκαγιών. Τα εναέρια καλώδια μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές σε περιοχές με έντονη βλάστηση, ειδικά σε συνθήκες καύσωνα ή ισχυρών ανέμων [32]. Το υπόγειο καλώδιο μειώνει δραστικά τέτοιους κινδύνους, ε) Αντοχή σε ακραία καιρικά φαινόμενα. Τα εναέρια δίκτυα είναι πιο ευάλωτα σε βλάβες από θυελλώδεις ανέμους, χιονοπτώσεις, πάγο κ.λπ. [31]. Οι πολίτες, ειδικά σε περιοχές που πλήττονται από ακραία φαινόμενα, μπορεί να πιέζουν για υπογειοποίηση ώστε να αυξηθεί η ανθεκτικότητα του δικτύου και στ) Αξία γης και ακινήτων. Η παρουσία εναέριων καλωδίων μπορεί να μειώσει την αξία ακινήτων που βρίσκονται κοντά στις γραμμές, κάτι που προκαλεί αντιδράσεις από ιδιοκτήτες και επενδυτές [29].

2.4. Η Μετάβαση από τα Εναέρια στα Υπόγεια Καλώδια

2.4.1. Αξιοπιστία των Υπόγειων Καλωδίων

Τα υπόγεια καλώδια έχουν την δυνατότητα να μειώσουν τις διακοπές, το κόστος συντήρησης και τις απώλειες μετάδοσης. Γενικά, οι απώλειες είναι μικρότερες με τα υπόγεια καλώδια σε σύγκριση με τις εναέριες γραμμές. Επιπλέον, η νέα τεχνολογία υπόγειων καλωδίων, με τα μοναδικά χαρακτηριστικά της χαμηλής εμπέδησης και της ωμικής απώλειας, επιτρέπει μια σημαντική αύξηση στη δυναμικότητα μετάδοσης ισχύος. Τα υπόγεια καλώδια προσφέρουν, επίσης, οικονομικά οφέλη καθώς μειώνουν τις εργασίες εκσκαφής και τις δαπάνες κοπής δέντρων από τις τοπικές αρχές. Αν και τα οφέλη αξιοπιστίας που σχετίζονται με τα υπόγεια καλώδια είναι σε ορισμένες περιπτώσεις ασαφή, σε πολλές χώρες η κατασκευή νέων εναέριων γραμμών μεταφοράς συναντά έντονη αντίδραση από τις τοπικές αρχές και τους κατοίκους, φτάνοντας στο σημείο να μην χορηγείται άδεια ή να απαιτούνται πολλά χρόνια για έγκριση. Αντίθετα, τα υπόγεια καλώδια δεν αντιμετωπίζουν τέτοια αντίσταση. Άλλα σημαντικά οφέλη περιλαμβάνουν τη διασύνδεση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, τη βελτίωση του περιβάλλοντος, τη μείωση κινδύνου πυρκαγιών και τη μείωση θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων [33].

Η αυξανόμενη ζήτηση των καταναλωτών για πιο αξιόπιστη και ασφαλή παροχή ρεύματος θα τονίσει την ανάγκη για υπόγεια καλωδίωση του υπάρχοντος δικτύου. Βάσει του Δείκτη Μέσης Διάρκειας Διακοπών Συστήματος από μια τοπική εταιρεία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, προβλέπεται ότι το 70% των διακοπών αφορά στο εναέριο δίκτυο, ενώ

35

το 30% στο υπόγειο δίκτυο. Ο μέσος χρόνος διακοπής για βλάβη στο εναέριο δίκτυο είναι 50 λεπτά, ενώ για βλάβη στο υπόγειο δίκτυο είναι περίπου 65 λεπτά. Ο μεγαλύτερος χρόνος επισκευής των υπόγειων καλωδίων αντανακλά τον επιπλέον χρόνο που απαιτείται για την αποκατάσταση της βλάβης, με τις επισκευές στο υπόγειο δίκτυο να απαιτούν περίπου 10 φορές περισσότερο χρόνο σε σύγκριση με το εναέριο (και με παρόμοια αναλογία κόστους) [33].

Οι κυριότερες αιτίες διακοπών, που αποτελούν πάνω από το 50% των συνολικών διακοπών, είναι εξωτερικές, όπως είναι οι ζημιές από δέντρα και οι αστοχίες αγωγών. Η βελτίωση της αξιοπιστίας είναι εφικτή με τη μείωση των ελεγχόμενων, μη προγραμματισμένων διακοπών, όπως αυτές που προκαλούνται από δέντρα, απροσδιόριστες αιτίες και αστοχίες εξοπλισμού. Με άλλα λόγια, η χρήση υπόγειων καλωδίων μπορεί να μειώσει τις διακοπές ρεύματος κατά τη διάρκεια φυσιολογικών καιρικών συνθηκών και να περιορίσει τις ζημιές κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων. Ωστόσο, σε περίπτωση βλάβης, η αποκατάσταση της παροχής ενέργειας απαιτεί περισσότερο χρόνο. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των υπόγειων καλωδίων, ως προς την αξιοπιστία, είναι η δυνατότητα μείωσης του κόστους συντήρησης και των απωλειών που προκαλούνται από διακοπές ρεύματος, καθώς και των απωλειών στη μετάδοση. Το κόστος συντήρησης ισούται με το άθροισμα της προληπτικής συντήρησης, της διαχείρισης βλάστησης και της αντιδραστικής συντήρησης [33].

2.4.2. Εφαρμογές των Υπόγειων Καλωδίων

Τα υπόγεια καλώδια χρησιμοποιούνται σε διάφορες περιπτώσεις, όπως για τη διανομή ενέργειας σε αστικές περιοχές, οπότε και προτιμώνται σε πόλεις και πυκνοκατοικημένες περιοχές για την αποφυγή χωρικών περιορισμών και τη βελτίωση της αισθητικής. Επίσης, προτιμώνται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις μιας και παρέχουν αξιόπιστη παροχή ρεύματος σε εργοστάσια, διυλιστήρια και μονάδες παραγωγής. Από την άλλη, χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υδάτινων σωμάτων, όπως θάλασσες, ποτάμια και ωκεανοί. Παραδείγματα περιλαμβάνουν διασυνδέσεις μεταξύ νησιών και συνδέσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Επίσης, τα υπόγεια καλώδια συνδέουν φωτοβολταϊκά πάρκα, ανεμογεννήτριες και υδροηλεκτρικούς σταθμούς με το δίκτυο, ενώ τροφοδοτούν συστήματα σιδηροδρόμων, δίκτυα μετρό και εγκαταστάσεις αεροδρομίων. Επιπρόσθετα, διασφαλίζουν ασφαλή και αδιάλειπτη παροχή ρεύματος σε ευαίσθητες εγκαταστάσεις και παρέχουν αξιόπιστη παροχή ενέργειας και συνδεσιμότητα σε εγκαταστάσεις υψηλών απαιτήσεων [27].
2.4.3. Μελέτη Αντικατάστασης των Εναέριων Γραμμών από Υπόγειες Γραμμές

Πριν από χρόνια υπήρχε ένα ζήτημα με τις εναέριες γραμμές υψηλής τάσης (OHL), οι οποίες μετατράπηκαν από ένα δίκτυο που περίβαλλε τις πόλεις σε μέρος του αστικού τοπίου. Αυτό έγινε πρόβλημα με μια μοναδική λύση, την αντικατάστασή τους με υπόγεια καλώδια. Οι καλωδιακές γραμμές εξελίσσονται σταδιακά στην επιθυμητή επιλογή, ακόμα και στην περιοχή που παραδοσιακά κατέχονται από OHL, δηλαδή στο δίκτυο μεταφοράς εκτός πόλεων. Οι λόγοι σχετίζονται κυρίως με τη μείωση του χώρου που καταλαμβάνουν οι OHL και την απομάκρυνση της λεγόμενης «οπτικής ρύπανσης». Εκτός από το γεγονός ότι η αντικατάσταση των OHL με καλώδια είναι μια πολύ μεγάλη επένδυση, όσον αφορά τη λειτουργία, τα υπόγεια δίκτυα μεταφοράς συνεπάγονται αλλαγή στους τρόπους λειτουργίας του συστήματος, καθώς τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτά των OHL [34].

Τα δίκτυα υψηλής τάσης εμφανίζουν συχνά ανεπιθύμητες ροές ενεργού ισχύος, ειδικά όταν συνδέονται με δίκτυα υπερυψηλής τάσης. Αυτή η ανεπιθύμητη ροή ενισχύεται λόγω της χαμηλότερης αντίδρασης των καλωδίων, κάτι που διευκολύνει το φαινόμενο. Μελέτες αναλύουν τη μέγιστη δυνατή υπογείωση των δικτύων, τον υπολογισμό της κατανομής φορτίου και της τάσης, καθώς και ζητήματα όπως είναι η αντιστοίχιση ισχύος μεταξύ εναέριων και καλωδιακών γραμμών, η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και η επιλογή αντικεραυνικών [34].

Όλες αυτές οι μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα πως οι παράμετροι των καλωδίων διαφέρουν σημαντικά. Για παράδειγμα, σε μια εναέρια γραμμή 1000A με αγωγούς ACSR 400 mm², συγκρινόμενη με μια καλωδιακή γραμμή σχεδιασμένη με καλώδια A2XS (FL) 2Y διατομής 1600 mm² και την ίδια ονομαστική ικανότητα ρεύματος 1000A, ο λόγος αντίστασης θετικής ακολουθίας (a.c.) είναι 3,3 (εναέρια γραμμή/καλώδιο), ο λόγος επαγωγικής αντίστασης είναι 1,7 και, τέλος, ο λόγος δεκτικότητας είναι 30 υπέρ των καλωδίων. Το συνολικό μήκος των γραμμών είναι 838,42 χλμ., με τη μεγαλύτερη γραμμή να έχει μήκος 57,8 χλμ. και τη μικρότερη γραμμή να είναι 0,1 χλμ. [34].

Η Εικόνα 6 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ του μεριδίου καλωδιακών γραμμών και των μέγιστων τάσεων στο δίκτυο. Στον οριζόντιο άξονα (X) απεικονίζεται το ποσοστό των καλωδιακών γραμμών σε σχέση με τις εναέριες γραμμές (OHL) στο δίκτυο, ενώ στον κάθετο άξονα (Y) εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις που παρατηρούνται στο δίκτυο. Το διάγραμμα δείχνει ότι οι μέγιστες τάσεις αυξάνονται όσο αυξάνεται το ποσοστό καλωδιακών γραμμών.

37

Λογικά, με το ελάχιστο φορτίο και τη μέγιστη παραγωγή ισχύος στο σύστημα, οι τάσεις φτάνουν στο υψηλότερο σημείο σε όλες τις διαμορφώσεις. Αντίθετα, οι χαμηλότερες τάσεις καταγράφονται όταν το φορτίο είναι μέγιστο (Lmax) και η παραγωγή ισχύος ελάχιστη (Gmin). Η αύξηση της τάσης σχετίζεται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των καλωδίων σε σχέση με τις εναέριες γραμμές, καθώς τα υπόγεια καλώδια έχουν χαμηλότερη αντίδραση και υψηλότερη χωρητικότητα [34].



Εικόνα 6: Μέγιστες τάσεις στο μελετώμενο δίκτυο ως συνάρτηση του τρόπου λειτουργίας με διαφορετικό ποσοστό καλωδίων [34]

Η Εικόνα 7 δείχνει ότι οι ελάχιστες τάσεις είναι κοντά στην τάση του κόμβου αναφοράς (slack bus). Σε αντίθεση με τις εναέριες γραμμές (OHL), όπου οι ελάχιστες τάσεις καταγράφονται σε κόμβους που βρίσκονται ηλεκτρικά μακριά από τον κόμβο αναφοράς, με την αύξηση του ποσοστού καλωδίων, οι ελάχιστες τάσεις μετρούνται σε κόμβους που βρίσκονται κοντά στον κόμβο αναφοράς. Δηλαδή, δεν αντικατοπτρίζουν την αλλαγή της τάσης σε ολόκληρο το δίκτυο [34].



Εικόνα 7: Ελάχιστες τάσεις στο μελετώμενο δίκτυο ως συνάρτηση του τρόπου λειτουργίας με διαφορετικό ποσοστό καλωδίων [34]

Η Εικόνα 8 δείχνει την αύξηση της τάσης στον κόμβο 48 σε σχέση με το ποσοστό των καλωδιακών γραμμών στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, στον οριζόντιο άξονα (X), απεικονίζεται το ποσοστό των υπόγειων καλωδιακών γραμμών (σε σχέση με τις εναέριες γραμμές) στο δίκτυο. Από την άλλη, στον κάθετο άξονα (Y), απεικονίζεται η αναλογία της τάσης στον συγκεκριμένο κόμβο (κόμβος 48) ως ποσοστό σε σχέση με την τιμή της τάσης σε ένα δίκτυο που είναι πλήρως εναέριο (0% καλώδια) [34].



Εικόνα 8: Λόγος τάσης στον κόμβο 48 ως συνάρτηση του ποσοστού καλωδίων [34]

Το διάγραμμα δείχνει ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό καλωδίων, η τάση στον κόμβο αυτό αυξάνεται περίπου κατά 7%. Αυτή η αύξηση σχετίζεται με την παραγωγή άεργης ισχύος από τις καλωδιακές γραμμές, η οποία οδηγεί σε υψηλότερες τάσεις, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το φορτίο είναι ελάχιστο και η παραγωγή είναι μέγιστη. Η άεργη ισχύς που παράγεται από την καλωδιακή γραμμή μεταφοράς οδηγεί σε αύξηση των τάσεων στους κόμβους καθώς αυξάνεται το ποσοστό καλωδίων, με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται όταν το φορτίο είναι ελάχιστο και η παραγωγή μέγιστη [34].

2.4.4. Προφίλ Τάσης Κατά Μήκος της Μεγαλύτερης Γραμμής Μεταφοράς

Μία σημαντική και ενδιαφέρουσα παράμετρος για την παρούσα μελέτη είναι το μέγεθος της τάσης κατά μήκος των καλωδίων. Για να προσδιοριστεί, είναι απαραίτητη η χρήση ισοδύναμου κυκλώματος με κατανεμημένες παραμέτρους και μη γραμμικές εξαρτήσεις μεταξύ ρευμάτων και τάσεων. Η μεγαλύτερη γραμμή του δικτύου (60 χλμ.) μελετήθηκε ξεχωριστά. Οι μεταβολές του ρεύματος και της τάσης απεικονίζονται για όλα τα προαναφερόμενα σενάρια.

Η Εικόνα 9 απεικονίζει τη μεταβολή της τάσης κατά μήκος μιας εναέριας γραμμής (OHL) σε όλα τα καθεστώτα λειτουργίας που έχουν περιγραφεί. Παρά το μικρό μήκος της γραμμής, η τάση παρουσιάζει μη γραμμική μεταβολή κατά μήκος της, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της μεταδιδόμενης ισχύος σε σχέση με το φορτίο του κυματοφόρου [34].



Εικόνα 9: Μεταβολή της τάσης κατά μήκος της εναέριας γραμμής (OHL) σε όλα τα σενάρια λειτουργίας [34]

Η Εικόνα 10 παρουσιάζει τη μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος μιας εναέριας γραμμής (OHL) σε όλα τα καθεστώτα λειτουργίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το ρεύμα παραμένει, σε γενικές γραμμές, γραμμικό κατά μήκος της εναέριας γραμμής, κάτι που δεν ισχύει για τις καλωδιακές γραμμές του ίδιου μήκους υπό τις ίδιες συνθήκες Σχήμα.



Εικόνα 10: Μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος της εναέριας γραμμής (OHL) σε όλα τα σενάρια λειτουργίας [34]

Η Εικόνα 11 δείχνει τη μεταβολή της τάσης κατά μήκος μιας καλωδιακής γραμμής (σε όλα τα λειτουργικά καθεστώτα). Συγκεκριμένα, το διάγραμμα τάσης εδώ παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με την εναέρια γραμμή (OHL) και δεδομένου ότι το φορτίο σύνθετης αντίστασης ενός καλωδίου είναι περίπου οκτώ φορές μεγαλύτερο από αυτό μιας εναέριας γραμμής (OHL). Η μέτρηση της τάσης κατά μήκος της καλωδιακής γραμμής πραγματοποιείται υπό την προϋπόθεση ότι η γραμμή μεταφοράς είναι ανεξάρτητα συνδεδεμένη με την παροχή ισχύος και το τελικό φορτίο, ισοδύναμο με το ρεύμα όλων των λειτουργικών καθεστώτων ενός πραγματικού συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, λόγω του μικρού μήκους της γραμμής, η τάση είναι υψηλότερη στα άκρα της, κάτι που δεν προκαλεί ανησυχία για την μόνωση, καθώς η γραμμή δεν υπερβαίνει τις επιτρεπτές τάσεις σε κατάσταση ηρεμίας [34].



Εικόνα 11: Μεταβολή της τάσης κατά μήκος της καλωδιακής γραμμής σε όλα τα σενάρια λειτουργίας [34]

Η Εικόνα 12 παρουσιάζει την μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος της καλωδιακής γραμμής σε όλα τα λειτουργικά καθεστώτα. Σε αντίθεση με τις εναέριες γραμμές (OHL), το ρεύμα στις καλωδιακές γραμμές εμφανίζει σημαντική διαφορά μεγέθους στα δύο άκρα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η χωρητικότητα των καλωδίων είναι πολλαπλάσια σε σύγκριση με τις OHL, γεγονός που επηρεάζει τη διανομή του ρεύματος κατά μήκος της καλωδιακής γραμμής [34].



Εικόνα 12: Μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος της καλωδιακής γραμμής σε όλα τα σενάρια λειτουργίας [34]

Η Εικόνα 13 δείχνει ότι, σε όλες τις διαμορφώσεις του δικτύου, η ενεργός ισχύς παραμένει σχετικά αμετάβλητη. Αντίθετα, στο ποσοστό 25% καλωδίων, η άεργος ισχύς αλλάζει κατεύθυνση και αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση των καλωδίων στο δίκτυο. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη παραγωγή άεργης ισχύος από τις καλωδιακές γραμμές [34].



Εικόνα 13: Ροή ισχύος μέσω της γραμμής μεταφοράς με μέγιστη παραγωγή και μέγιστο φορτίο [34]

Σε αντίθεση με την παραπάνω εικόνα, η Εικόνα 14 δείχνει μείωση της ροής άεργης ισχύος στο ποσοστό 25% καλωδίων, ως αποτέλεσμα της ανακατανομής της ροής άεργης ισχύος στο δίκτυο για αυτό το σενάριο.



Εικόνα 14: Ροή ισχύος μέσω της γραμμής μεταφοράς με μέγιστη παραγωγή και ελάχιστο φορτίο [34]

Η Εικόνα 15 δείχνει τη ροή ισχύος μέσω της γραμμής μεταφοράς με ελάχιστη παραγωγή και μέγιστο φορτίο. Η ενεργή ισχύς εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη, περίπου πέντε φορές χαμηλότερη από άλλες καταστάσεις λειτουργίας, κάτι που αποδίδεται σε δύο πιθανούς λόγους, τους εξής: α) η ροή ισχύος μπορεί να έχει μεταφερθεί σε γειτονικές συνδέσεις λόγω της μικρότερης διατομής της γραμμής και β) η σημαντική ροή άεργης ισχύος, η οποία μειώνει τη δυνατότητα μετάδοσης της γραμμής [34].



Εικόνα 15: Ροή ισχύος μέσω της γραμμής μεταφοράς με ελάχιστη παραγωγή και μέγιστο φορτίο [34]

2.4.5. Απώλειες Ισχύος στην Εξεταζόμενη Γραμμή Μεταφοράς

Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν τις απώλειες ισχύος για τη γραμμή που εξετάζεται στα τέσσερα σενάρια λειτουργίας. Η παραγωγή άεργης ισχύος στη γραμμή (Qloss + Qgen) παρουσιάζεται, επίσης, ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι απώλειες περιλαμβάνονται σε αυτήν την παραγωγή.

Η Εικόνα 16 δείχνει ότι οι απώλειες ενεργού ισχύος μειώνονται στο ποσοστό καλωδίων 25% και αυξάνονται απότομα όταν το ποσοστό καλωδίων ξεπερνά το 50%. Η αυξημένη παραγωγή άεργης ισχύος και η ανακατανομή της ροής ισχύος λόγω της αλλαγής των παραμέτρων του κυκλώματος στις γειτονικές συνδέσεις οδηγούν σε αύξηση των απωλειών ενεργού ισχύος, ως αποτέλεσμα της αυξημένης μεταφοράς ενεργού και άεργης ισχύος [34].



Εικόνα 16: Απώλειες ισχύος μέσω της σύνδεσης που εξετάζεται, με μέγιστη παραγωγή και μέγιστο φορτίο [34]

Στην Εικόνα 17 τα αποτελέσματα δείχνουν ενδιαφέρον γιατί με την εναέρια γραμμή (OHL) οι απώλειες άεργης ισχύος είναι διπλάσιες από τις απώλειες ενεργού ισχύος, λόγω της κατανομής της ροής. Στη συνέχεια, στα ποσοστά καλωδίων 25% και 50%, παρατηρείται τάση μείωσης των απωλειών και πάλι λόγω της συγκεκριμένης κατανομής της ροής. Πρέπει να σημειωθεί ότι στη διαμόρφωση με 100% καλώδια, η γραμμή σε αυτό το σενάριο είναι σχεδόν διπλά υπερφορτωμένη [34].



Εικόνα 17: Απώλειες ισχύος μέσω της σύνδεσης που εξετάζεται, με μέγιστη παραγωγή και ελάχιστο φορτίο [34]



Εικόνα 18: Απώλειες ισχύος μέσω της σύνδεσης που εξετάζεται, με ελάχιστη παραγωγή και μέγιστο φορτίο [34]

Στην Εικόνα 18, με ελάχιστη παραγωγή και μέγιστο φορτίο, η ροή ενεργού ισχύος μέσω της γραμμής είναι μικρή και μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του ποσοστού καλωδίων. Η ροή άεργης ισχύος (Q) αυξάνεται απότομα στο ποσοστό 50% καλωδίων στη διαμόρφωση του δικτύου και μαζί με αυτήν παρατηρείται απότομη αύξηση στις απώλειες ενεργού ισχύος (P), οι οποίες οφείλονται κυρίως στη ροή άεργης ισχύος (Q) [34].

2.4.6. Τα Συμπεράσματα της Σύγκρισης των Διαφορετικών Τύπων Καλωδίων

Όπως αναμενόταν, η μετάβαση από τις εναέριες γραμμές υψηλής τάσης (OHL) σε υπόγεια καλώδια υψηλής τάσης απαιτεί επανεξέταση των καθεστώτων λειτουργίας του συστήματος, λόγω της σημαντικής αύξησης της παραγόμενης άεργης ενέργειας [35]. Οι τάσεις στους κόμβους του συστήματος, ανεξαρτήτως καθεστώτος λειτουργίας, είναι 7% υψηλότερες από αυτές στο δίκτυο μεταφοράς με εναέριες γραμμές [29].

Τα δύο παραπάνω γεγονότα καθιστούν απαραίτητη την αντιστάθμιση των μεγάλων ροών άεργης ισχύος μέσω της εφαρμογής κατάλληλων μέσων και μέτρων, όπως η χρήση πηνίων αντιστάθμισης ή συστημάτων FACTS [31]. Η τάση κατά μήκος των νέων καλωδιακών γραμμών δεν προκαλεί ανησυχίες για αστοχία, δεδομένου ότι οι γραμμές μεταφοράς είναι σύντομες, με τη μεγαλύτερη να έχει μήκος 60 χλμ. Όπως σημειώνεται στην αρχή της εργασίας, ενώ για τις εναέριες γραμμές ο όρος "μακρές γραμμές" αφορά μήκη άνω των 300 χλμ., για τα καλώδια υψηλής τάσης αυτός ο όρος αφορά μήκη 40 χλμ., ενώ για τα καλώδια εξαιρετικά υψηλής τάσης (EHV) μήκη 20 χλμ. [36].

Η εισαγωγή καλωδίων υψηλής τάσης πρέπει να συνοδεύεται από ενδελεχή μελέτη ολόκληρου του δικτύου στο οποίο εγκαθίστανται, ώστε να αποκτηθεί μια πλήρης εικόνα της επίδρασης της εισαγωγής τους [32]. Οι απώλειες ενεργού ισχύος μειώνονται φυσιολογικά λόγω των χαμηλότερων αντιστάσεων των καλωδίων, αλλά είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ενεργή απώλεια ισχύος που προκαλείται από την αύξηση της ροής άεργης ισχύος [35]. Δηλαδή, η επίδραση των μικρότερων τιμών της αντίστασης των καλωδιακών γραμμών μπορεί να μειωθεί λόγω των αυξημένων απωλειών που προκύπτουν από τις ροές άεργης ισχύος, οι οποίες οδηγούν σε ενεργές απώλειες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ POWER WORLD SIMULATOR

3.1. Σχετικά με το Power World Simulator

Το Power World Simulator είναι ένα πακέτο προσομοίωσης συστημάτων ισχύος που σχεδιάστηκε από την αρχή ώστε να είναι φιλικό προς τον χρήστη και ιδιαίτερα διαδραστικό. Διαθέτει την απαραίτητη ισχύ για σοβαρές τεχνικές αναλύσεις, ενώ ταυτόχρονα είναι τόσο διαδραστικό και γραφικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγεί τη λειτουργία συστημάτων ισχύος ακόμη και σε μη τεχνικό κοινό.

Το Power World Simulator αποτελείται από μια σειρά ενσωματωμένων προϊόντων. Στην "καρδιά" του βρίσκεται μια ολοκληρωμένη, ισχυρή μηχανή επίλυσης ροής φορτίου, ικανή να επιλύει αποδοτικά συστήματα έως 60.000 ζυγών. Αυτό καθιστά το Simulator εξαιρετικά χρήσιμο ως αυτόνομο πακέτο ανάλυσης ροής φορτίου. Ωστόσο, σε αντίθεση με άλλα εμπορικά διαθέσιμα πακέτα ροής φορτίου, το Simulator επιτρέπει στον χρήστη να οπτικοποιεί το σύστημα μέσω διαγραμμάτων μίας γραμμής με πλήρη χρωματική απεικόνιση και δυνατότητα ζουμ και μετακίνησης. Επιπλέον, τα μοντέλα συστημάτων μπορούν να τροποποιούνται σε πραγματικό χρόνο ή να δημιουργούνται από την αρχή χρησιμοποιώντας τον πλήρως εξοπλισμένο γραφικό επεξεργαστή περιπτώσεων του Simulator. Οι γραμμές μεταφοράς μπορούν να ενεργοποιούνται ή να απενεργοποιούνται, νέες γραμμές μεταφοράς ή γεννήτριες μπορούν να προστεθούν, και νέες συναλλαγές μπορούν να καθοριστούν, όλα με λίγα μόνο κλικ [37].

Η εκτεταμένη χρήση γραφικών και κινούμενων απεικονίσεων στο Simulator αυξάνει σημαντικά την κατανόηση του χρήστη σχετικά με τα χαρακτηριστικά, τα προβλήματα και τους περιορισμούς του συστήματος, καθώς και για το πώς να τα αντιμετωπίσει. Επιπλέον, το Simulator παρέχει ένα βολικό μέσο για την προσομοίωση της εξέλιξης του συστήματος ισχύος με την πάροδο του χρόνου. Μπορούν να καθοριστούν μεταβολές φορτίου, παραγωγής και προγραμμάτων ανταλλαγής και να οπτικοποιηθούν οι αντίστοιχες αλλαγές στις συνθήκες του συστήματος ισχύος. Αυτή η λειτουργικότητα μπορεί, για παράδειγμα, να φανεί χρήσιμη για την απεικόνιση των πολλών θεμάτων που σχετίζονται με την αναδιάρθρωση της βιομηχανίας [37]. Η έκδοση 23 του Power World Simulator περιλαμβάνει σημαντικές νέες δυνατότητες και εκατοντάδες μικρότερες βελτιώσεις για την ενίσχυση της απόδοσης και της ευχρηστίας του πακέτου. Μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρει είναι οι ακόλουθες [38]:

- Ενσωμάτωση δεδομένων καιρού, με δυνατότητα χρήσης ιστορικών δεδομένων για προσομοιώσεις.
- Προσομοίωση βηματικού χρόνου (Time Step Simulation) χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα καιρού.
- Αυτόματη δημιουργία γραφημάτων που απεικονίζουν παραβιάσεις βάσει των μηχανισμών παρακολούθησης ορίων μεταβατικής κατάστασης (Transient Limit Monitors) ή της λογικής ορίων μεταβατικής κατάστασης (Transient Limit Logic).
- Εργαλείο Voltage Conditioning που επιτρέπει την τροποποίηση της περίπτωσης ροής ισχύος για την επίτευξη των προγραμματισμένων τάσεων σε ζυγούς ή υποσταθμούς.
- Χωρική απεικόνιση (Spatial View Onelines) για αυτόματη δημιουργία μονογραμμικών διαγραμμάτων ζυγών και υποσταθμών χρησιμοποιώντας γεωγραφικές πληροφορίες.

Το Power World Simulator διαθέτει δύο διακριτές λειτουργίες: α) τη λειτουργία επεξεργασίας (Edit Mode) για τη δημιουργία νέων ή την τροποποίηση υπαρχουσών περιπτώσεων προσομοίωσης, και β) τη λειτουργία εκτέλεσης (Run Mode) για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης του συστήματος ισχύος. Η εναλλαγή μεταξύ των modes γίνεται από το αντίστοιχο tab στο GUI. Επιπλέον, προσφέρει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης μέσω του Sim Auto, επιτρέποντας την εκτέλεση και τον έλεγχο του λογισμικού από άλλες εφαρμογές. Αυτό επιτρέπει την πρόσβαση στα δεδομένα μιας περίπτωσης του Simulator, την εκτέλεση καθορισμένων λειτουργιών και άλλων επεξεργασιών δεδομένων, καθώς και την αποστολή αποτελεσμάτων πίσω στην αρχική εφαρμογή, σε αρχείο βοηθητικών προγραμμάτων του Simulator ή σε υπολογιστικό φύλλο Microsoft Excel [38].

"] ~ (\$ 🖥 👯 (X • •							ptyxiaki3 - Case: ptyxiaki3	.PWB S	tatus: Initialize	d Simulat	or 23 Edu	icational
File	Case Inform	nation Drav	w Onelin	es Tools	Options Add	Ons Win	dow								
Edit Mode Run Mode	Model	Dependency	P Area/Zone	85% 110% Limit	Network × Aggregation ×	$\overrightarrow{\Delta X}$ Difference	V Data	Simulator	Case Description Case Summary	Power Flow List Quick Power Flow List	®↑† 1 1	Substation	Oneline	Data	₩ Open
Mode	Explorer	Explorer	Filters Case Inform	Monitoring nation		Case 🗸	Check	Options	Case Data	Kon Export Format Desc	View	View	Viewer Views	View	Windows Y

Εικόνα 19: Το μενού του Power World Simulator

Όλα τα παραπάνω καθιστούν το Power World Simulator ιδανικό για την μοντελοποίηση του Σ.Η.Ε. της Κρήτης, όσο για την πραγματοποίηση αναλύσεων για την βελτιστοποίηση του συστήματος και για την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων.

Παρακάτω φαίνεται το Σ.Η.Ε. της Κρήτης όπως αυτό απεικονίζεται στο Power World Simulator. Το δίκτυο αποτελείται από 47 ζυγούς (buses), 70 γραμμές μεταφοράς (transmission lines), 62 γεννήτριες (generators) και 20 φορτία (loads). Τα επίπεδα της ονομαστικής τάσης στο δίκτυο είναι 11 kV, 15,75 kV, 20 kV, 21kV, 66kV και 150 kV.



Εικόνα 20: Το Σ.Η.Ε. της Κρήτης όπως απεικονίζεται στο Power World Simulator

Το Power World Simulator χρησιμοποιεί δύο κύριους τύπους αρχείων: α) .pwb (Power World Binary File) όπου αποθηκεύονται τα δεδομένα του μοντέλου και β) .pwd (Power World Drawing) όπου περιέχεται το γραφικό μονογραμμικό διάγραμμα. Αξίζει να σημειωθεί πως οι αλλαγές στο .pwd δεν επηρεάζουν το μοντέλο στο .pwb, οπότε συνιστάται να βρίσκονται στον ίδιο φάκελο με το ίδιο όνομα [38].

3.2. Βασικές Παράμετροι του Power World Simulator

Οι βασικές παράμετροι έτσι όπως έχουν οριστεί στο Power World Simulator είναι οι εξής: α) η **βάση ισχύος** (Power Base) έχει οριστεί στα 100MVA, β) η **βάση τάσης** (voltage base) είναι στα 150 kV, γ) η **βάση σύνθετης αντίστασης** (Impedance Base) προκύπτει: Zb

 $=\frac{Vb^2}{Sb}=\frac{150^2}{100}=225 \ \Omega \ \text{και } \delta) \ \eta \ \beta \dot{a} \sigma \eta \ \sigma \dot{v} \theta \varepsilon \tau \eta \varsigma \ a \gamma \omega \gamma \iota \mu \dot{o} \tau \eta \tau \alpha \varsigma \ (\text{Admittance Base}) \ \varepsilon \dot{v} \upsilon \alpha \tau \sigma$

αντίστροφο της σύνθετης αντίστασης, δηλαδή: Yb = $\frac{1}{Zb} = \frac{1}{225} = 0,004444$ Mhos. Παρατηρούμε, ακόμη, ότι η μονάδα μήκους που έχει επιλεγεί για το Power World Simulator είναι τα **μίλια (miles)**, ενώ το **μέγιστο επιτρεπτό φορτίο ισχύος Smax** έχει οριστεί στα 170 MVA.



Εικόνα 21: Βασικές παράμετροι του συστήματος

3.3. Επιλογή Χαρακτηριστικών για το Υπόγειο Καλώδιο της Γραμμής Μεταφοράς Ξυλοκαμάρας - Λινοπεράματα

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η τοποθέτηση ενός υπογείου καλωδίου μεταφοράς, μεταξύ των περιοχών Ξυλοκαμάρας – Λινοπεράματα, το οποίο θα είναι παράλληλο με την ήδη υπάρχουσα γραμμή. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκαν διάφορα datasheets καλωδίων, όπου όλα είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την εταιρεία Tele-Fonika Cable ή TF Cable. Πρόκειται για μια εταιρεία που κατασκευάζει καλώδια ισχύος. έχοντας παρουσία σε πάρα πολλές χώρες του κόσμου. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από τον τεχνικό κατάλογο της εταιρείας [39]. Για την επιλογή του κατάλληλου υπογείου καλωδίου αναλύονται χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων καλωδίων που προσφέρονται από την συγκεκριμένη εταιρεία.

	Conductor	resistance	Copper scree	en resistance	Field	Max. short c	ircuit current		In duction of	Amp	acity
Cross-					strengthat			C	0 ⁰ 0 ^{/1}	In ground	In air
conductor	DC20°C	AC90 °C	DC20 °C	AC80 °C	screen /	Conductor	Copper	Capacitance	000/2	SPB, CB /4	000/00
					insulation				000/3	Both-ends /4	000/00
mm ²		Ω/	km		kV / mm	kA /	1 sec	μF / km	mH / km	A	
4	0.425	0.4707	0.245	0.277	7.24 (2.22	22.62	40.20		0.500 (00.67	445 / 420	583 / 504
1 x 240 KM	0.125	0.1606	0.215	0.266	7.3172.29	22.68	19.29	0.11	0.500.680.67	416 / 416	541/499
1 x 300 PM	0.100	0.1288	0.215	0.266	7 10 / 2 50	78.35	10.20	0.12	0.470.660.64	495 / 475	656 / 578
1 X 300 FMI	0.100	0.1200	0.215	0.200	7.1772.30	20.33	17.27	0.12	0.470.000.04	445 / 460	593 / 567
1 x 400 RM	0.0778	0 1008	0.215	0.266	7 11 / 2 75	37.8	19 29	013	0 450 630 61	565 / 540	751/672
1 × 100 1011	0.0770	0.1000	0215	0.200	7.1172.73	57.0	17.27	0.15	0.150.050.01	500 / 525	672/656
1 x 500 RM	0.0605	0.0791	0.215	0.266	7.09/3.01	47.25	19.29	0.15	0.430.610.59	645 / 620	877 / 782
										555 / 595	761/756
1 x 630 RM	0.0469	0.0620	0.215	0.266	6.75 / 3.13	59.54	19.29	0.17	0.410.600.57	740 / 710	1024/908
_										610 / 670	861/872
1 x 800 RM	0.0367	0.0496	0.215	0.266	6.55 / 3.20	75.6	19.29	0.18	0.400.580.55	845 / 805	118//1045
										000 / 000	1360 / 1102
1 x 1000 RM	0.0291	0.0405	0.215	0.266	6.32 / 3.29	94.5	19.29	0.20	0.380.570.53	720 / 820	1055 / 1108
										1025 / 970	1491 / 1297
1 x 1200 RM	0.0247	0.0355	0.215	0.266	6.21/3.34	113.4	19.29	0.21	0.370.560.52	755 / 870	1124 / 1197
										1025 / 970	1491 / 1297
1 x 1200 RMS	0.0247	0.0324	0.215	0.266	6.10/3.39	113.4	19.29	0.22	0.370.550.51	755 / 870	1124 / 1197
4 4400 0045	0.0343	0.0204	0.245	0.244	(0.12.11	(22.2	40.20	0.22	0.3/0.550.54	1100 / 1040	1622 / 1402
1 x 1400 KMS	0.0212	0.0281	0.215	0.266	6.0/3.44	132.3	19.29	0.23	0.360.550.51	785 / 915	1181 / 1281
1 × 1000 DMC	0.0196	0.0249	0.215	0.266	5 00 / 2 40	101.0	10.20	0.24	0.240 540 50	1165 / 1095	1733 / 1491
1 X 1000 KM2	0.0186	0.0248	0.215	0.200	5.90/3.49	151.2	19.29	0.24	0.300.540.50	815 / 955	1229 / 1349
1 x 1900 PMC	0.0165	0.0224	0.215	0.266	5 82 / 3 52	170.1	10.20	0.25	0 350 530 40	1220 / 1145	1832 / 1570
1 X 1000 M/IS	0.0105	0.0224	0.215	0.200	3.02/ 3.33	1/0.1	19.29	0.25	0.000.000.49	835 / 985	1271 / 1407
1 x 2000 RMS	0.0149	0.0204	0.215	0.266	578/355	189.0	19.29	0.26	0 340 530 48	1275 / 1190	1932 / 1649
	0.0112	0.0201	0.215	0.200	5.075.55	107.0	17.27	0.20	0.510.550.10	855 / 1015	1313 / 1465

Εικόνα 22: Τεχνικά χαρακτηριστικά καλωδίων από τον τεχνικό κατάλογο της TF Cable

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 22), παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των καλωδίων, όπως είναι η αντίσταση του αγωγού, η χωρητικότητα, η αυτεπαγωγή και η επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος σε διαφορετικές συνθήκες εγκατάστασης. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται η επιλογή του κατάλληλου καλωδίου λαμβάνοντας υπόψιν το Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης αλλά και τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.

3.4. Επιλογή του Κατάλληλου Καλωδίου

Για την επιλογή του κατάλληλου υπογείου καλωδίου θα πρέπει, πρώτα, να υπολογιστεί το μέγιστο ρεύμα φόρτισης Imax.Το ρεύμα αυτό υπολογίζεται με βάση το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο ισχύος (Smax) και την ονομαστική τάση του συστήματος (Vb).

Πιο συγκεκριμένα, έχουμε: Imax
$$=\frac{Smax}{\sqrt{3} \cdot Vb} = \frac{170 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 150 \text{ KV}} = 654,33\text{ A}$$

Επομένως το καλώδιο που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να έχει ικανότητα μεταφοράς ρεύματος μεγαλύτερη από την παραπάνω τιμή, για να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος σε όλες τις πιθανές συνθήκες.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, η μέθοδος Cross-Bonding (CB) αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή για περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων, όπως είναι η γραμμή Ξυλοκαμάρας – Λινοπεράματα, η οποία θα είναι περίπου στα 100 χιλιόμετρα. Από τα δεδομένα του τεχνικού καταλόγου, η καταλληλότερη επιλογή είναι το καλώδιο με διατομή αγωγού **630mm²**(1 × 630 mm²), το οποίο έχει επιτρεπόμενο ρεύμα **740 A / 710 A** στην κατηγορία Cross-Bonding (CB), καλύπτοντας με ασφάλεια το απαιτούμενο όριο.

	Conductor	resistance	Copper scree	in resistance	Field	Max. short ci	rcuit current		Inductance	Amp	acity	
Cross-					strengthat			Conscitorico	0 ⁰ 0 ^{/1}	In ground	In air	
conductor	DC20 °C	AC90 °C	DC20°C	AC80 °C	screen /	Conductor	Copper screen	Capacitance	000/2	SPB, CB /4	0 0 0 / 0 ⁰ 0	
					insulation				000**	Both-ends /4	0 0 0 / 0°0	
mm ²		Ω/	km		kV / mm	kA /	1 sec	μF / km	mH / km	A		
1×620 PM	0.0460	0.0620	0.215	0.266	675/212	CO CA	10.20	0.17	0 410 600 57	740 / 710	1024 / 908	
I X UCO KIM	0.0409	0.0020	0.215	0.200	0./0/0.13	37.34	19.29	0.17	0.410.000.57	610/670	861/872	

Εικόνα 23: Τεχνικά χαρακτηριστικά του καλωδίου με διατομή 630 mm²

3.5. Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά του Καλωδίου 630 mm²

Δεδομένου ότι η γραμμή μεταφοράς λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), οι βασικές ηλεκτρικές παράμετροι του καλωδίου είναι οι εξής:

- Αντίσταση αγωγού (Resistance, R): 0.0620 Ω/km (για AC 90 °C)
- Επαγωγή (Inductance, L): 0.57 mH/km
- Χωρητικότητα (Capacitance, C): 0.17 μF/km

Η επαγωγική αντίσταση Χ ενός καλωδίου ορίζεται ως εξής:

 $\mathbf{X} = \mathbf{2} \cdot \mathbf{\pi} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{L} = \mathbf{2} \cdot \mathbf{\pi} \cdot \mathbf{50} \cdot \mathbf{0.00057} = \mathbf{0.17907} \, \Omega/\mathbf{km}$, όπου \mathbf{f} είναι η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος (50 Hz για το δίκτυο μεταφοράς) και \mathbf{L} είναι η επαγωγή σε Henry ανά χιλιόμετρο (H/km).

Από την άλλη, η εγκάρσια αγωγιμότητα Β ενός καλωδίου ορίζεται ως εξής:

B = 2 · π · **f** · **C** = 2 · π · 50 · 0.00000017 = 53.407 μS/km, όπου C είναι η χωρητικότητα του καλωδίου σε Farad ανά χιλιόμετρο F/km.

Στο λογισμικό Power World Simulator, οι παράμετροι των γραμμών μεταφοράς εκφράζονται σε μονάδες **ανά μίλι** αντί για **ανά χιλιόμετρο**. Για να γίνει η σωστή εισαγωγή των δεδομένων, οι τιμές μετατρέπονται χρησιμοποιώντας τον εξής συντελεστή: **1km** = **0.621371 miles** \Rightarrow **1** Ω/km = **1.60934** Ω/mile.

Επομένως για την μετατροπή των τιμών ανά χιλιόμετρο σε ανά μίλι τιμές γίνονται οι εξής πράξεις:

Αντίσταση (R): 0.0620 · 1.60934 = 0.099779 Ω/mile

Επαγωγική αντίσταση (X): $0.17907 \cdot 1.60934 = 0.28818$ Ω/mile

Εγκάρσια Αγωγιμότητα (B): 53.407 · 1.60934 = 85.95002 μS/mile

3.6. Υπολογισμός των Ανά Μονάδα Τιμών του Συστήματος

Από την ήδη υπάρχουσα παράλληλη γραμμή, το μήκος της θα είναι 101,772 χιλιόμετρα ή 63,238 μίλια. Επίσης, έχουμε ότι $Zb = 225 \Omega$ και Yb = 0.004444 Mhos.

Ο τύπος για την αντίσταση R ανά μονάδα είναι:

 $\mathbf{Rpu} = \frac{R \cdot miles}{Zb} = \frac{0.099779 \cdot 63.238}{225} = \mathbf{0}, \mathbf{0}\mathbf{2}\mathbf{7}\mathbf{12} \ \mathbf{p.u.}$

Ενώ, ο τύπος για την επαγωγική αντίδραση Χ ανα μονάδα είναι:

$$Xpu = \frac{X \cdot miles}{Zb} = \frac{0.28818 \cdot 63.238}{225} = 0,07982 \text{ p.u.}$$

Από την άλλη, για την εγκάρσια αγωγιμότητα Β έχουμε:

B = 85.95002 μS/mile · 63.238 miles = 0.0054353 S. Επομένως: Bpu = $\frac{B}{Yb} = \frac{0.0054353}{0.004444} =$ 1,2331 p.u.

3.7. Μοντελοποίηση της Διασύνδεσης Πελοποννήσου - Κρήτης

Η διασύνδεση Κρήτης - Πελοποννήσου στο μοντέλο του συστήματος έχει αναπαρασταθεί με δύο παράλληλες γραμμές μεταφοράς τάσης 150 kV, που συνδέουν τον ζυγό της Πελοποννήσου με τον ζυγό της Κρήτης. Η κάθε γραμμή διαθέτει ονομαστική ικανότητα μεταφοράς 200 MVA, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της πραγματικής διασύνδεσης.

Στην ανάλυση ροής φορτίου, παρατηρείται ότι **η καθεμία από τις δύο γραμμές** μεταφέρει περίπου 71 MW ενεργού ισχύος και συνολική φαινόμενη ισχύ της τάξης των 136 MVA, λειτουργώντας στο 68,2% της ονομαστικής της ικανότητας. Η ροή ισχύος μέσω της διασύνδεσης πραγματοποιείται από τον ζυγό της Πελοποννήσου προς τον ζυγό της Κρήτης, συμβάλλοντας στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του νησιού.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 24) παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά της μίας εκ των δύο γραμμών μεταφοράς, όπως αυτή έχει μοντελοποιηθεί στο λογισμικό Power World Simulator. Να σημειωθεί πως τα χαρακτηριστικά είναι τα ίδια και για τις δύο γραμμές.

🔘 Branch Info	rmation Dialog									×
Line	From Bus	To B	us Circi	uit						
Number	221	229	1		Find E	By Number				
Name	Peloponissos	Crete (1	2)		Find	By Name				
Area	1 (1)	1 (1)			Find .					
Nominal kV	150,0	150,0			From End N	4etered				
Voltage Angle	1,05000 -4,22	24 1,04969	-4,4022							
Labels	no labels									
Parameters OF	PF Fault Info A	rea, Zone, Owne	r, Sub, PTDF	Custom	Stability	Geography	GIC			
Status	Per Unit Ir	mpedance Param	eters		4VA Limits					
Open	Series Res	sistance (R)	0,001122		imit A	200,000	^			
Closed	Series Rea	actance (X)	0,004705	L	imit B	0,000				
Energized	Shunt Cha	arging (B)	1,931063	Li	imit C	0,000				
YES (Online	Shunt Cor	nductance (G)	0,000349	Li	imit D	0,000				
Branch Device T	ype Has Lir	ne Shunts	Line Shunts	; L	imit E	0,000				
Line	~			Li	imit F	0,000				
Allow Consoli	idation			Li	imit G	0,000				
Length 74,5	56 🚖			L	imit H	0,000				
Nermal Status				L	imit I	0,000				
				Li	imit J	0,000				
Closed				L	imit K	0,000	~			
Line Flow at Fro	om Bus	Line Flow	at To Bus		Line Loss	es				
Peloponissos (2	221)	Crete (T2) (229)							
Sign Convention From> To	n: 71,15 M	W -71,06	Sign Conventi To> From	on:	0,09	1 MW				
	-116,44 M	Ivar -96,17			-212,61	/ Mvar				
% MVA 6	8,23 136,46 M	IVA 119,58	59,79 %	MVA						
% Amps 6	4,98 500,23 A	mps 438,46	56,96 %	Amps						
Has D-FACTS	D-FACTS I	Devices on the Lir	ie i	las Multi-	-Section Lir	viev	v Multi-S	Section Lir	ne Dialog	
ОК	Save	Save to Aux		Can	ncel	Help	Pri	int		

Εικόνα 24: Παράμετροι Μοντελοποίησης της κάθε γραμμής της ΑC διασύνδεσης Κρήτης - Πελοποννήσου στο Power World

3.8. Διαδικασία Εισαγωγής της Γραμμής Μεταφοράς στο Power World Simulator

Για την προσθήκη της γραμμής Ξυλοκαμάρας - Λινοπεράματα στο Power World Simulator, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, επιλέγεται η λειτουργία επεξεργασίας (Edit Mode). Στη συνέχεια, από το μενού επιλέγεται η καρτέλα **Draw**. Ακολούθως, επιλέγεται το **Network**, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η εισαγωγή νέων στοιχείων.



Εικόνα 25: Επιλογή του Network στο Power World Simulator

Στη συνέχεια, από το μενού **Transmission Line**, εισάγεται η γραμμή και συνδέεται χειροκίνητα μεταξύ των υποσταθμών Ξυλοκαμάρας - Λινοπεράματα.



Εικόνα 26: Επιλογή της γραμμής μεταφοράς

Αφού τοποθετηθεί η γραμμή μεταφοράς, κάνουμε διπλό κλικ πάνω στη γραμμή. Στο παράθυρο που ανοίγει, μεταβαίνουμε στην καρτέλα **Parameters**. Εκεί ορίζουμε το **μήκος της γραμμής σε μίλια**, και βάζουμε το όριο ισχύος για το MVA.

MVA Limits	;
Limit A	170,000
Εικόνα 3.9 Εισο	ιγωγή μήκους γραμμής
Display Statu O O Branch	Parameters F; s pen osed Device Type
Line Allo Length	✓ Consolidation 63,24 ↓ Calculate bedances >

Εικόνα 27: Εισαγωγή ορίου ισχύος

Στο επόμενο βήμα, επιλέγοντας στην καρτέλα Parameters το Calculate Impedances, το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα τις τιμές αντίστασης (R), επαγωγικής αντίδρασης (X) και εγκάρσιας αγωγιμότητας (B), τόσο σε πραγματικές μονάδες (Ω/mile, Mhos/mile) όσο και σε ανά μονάδα (pu). Αφού ελέγξουμε τις τιμές, πατάμε OK για να ολοκληρώσουμε τη διαδικασία.

Line Per Unit Im	npedance Calculator			×
Line Per Unit Im Actual Impedar R (Ohms/mile) X (Ohms/mile) B (Mhos/mile) G (Mhos/mile) Limit A (Amps) Limit B (Amps)	$0,099777$ $0,288184$ $85,949869$ $\times 10^{-6}$ $654,330$ $0,000$	Line Length 63,238 miles When changing convert: PU/MVA> < Electrical Length Units miles kilometers	Per Unit Impeda R (pu) X (pu) B (pu) G (pu) Limit A (MVA) Limit B (MVA)	× ance and MVA Limits 0,027127 0,079821 1,233146 0,000000 170,000 0,000
Limit C (Amps) Limit D (Amps) Limit E (Amps) Limit F (Amps) Limit G (Amps) Limit H (Amps) Limit I (Amps) Limit J (Amps) Limit K (Amps) Limit L (Amps) Limit M (Amps)	0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000	System Base Values Power Base (MVA) 100,0000 Voltage Base (kV) 150,000 Impedance Base (Ohms) 225,000 Admittance Base (Mhos) 0,00444444	Limit C (MVA) Limit D (MVA) Limit E (MVA) Limit F (MVA) Limit G (MVA) Limit G (MVA) Limit I (MVA) Limit J (MVA) Limit K (MVA) Limit L (MVA) Limit N (MVA)	0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000
🗸 ок]		? Help	X Cancel

Εικόνα 28: Υπολογισμός χαρακτηριστικών γραμμής στο Power World Simulator

Στην παρακάτω εικόνα (

Εικόνα 29) παρουσιάζεται η γραμμή μεταφοράς που προστέθηκε, όπως αυτή απεικονίζεται στο λογισμικό του Power World Simulator. Η γραμμή ξεκινάει από τον ζυγό της **Xilokamara** (H) (κάτω αριστερά) και καταλήγει στον ζυγό Linoperamata (πάνω δεξιά). Πρόκειται για ένα υπόγειο καλώδιο τύπου **XLPE**, το οποίο σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί παράλληλα με την ήδη υπάρχουσα γραμμή μεταφοράς. Με την προσθήκη της νέας γραμμής, μέρος της ισχύος που περνούσε μόνο από την υπάρχουσα γραμμή, τώρα περνάει και από το νέο καλώδιο. Αυτό οδηγεί σε αλλαγές στην κατανομή της ροής ισχύος, προκαλώντας διαφοροποιήσεις στα επίπεδα τάσης και στην άεργη ισχύ σε διάφορα σημεία του δικτύου.



Εικόνα 29: Η νέα γραμμή μεταφοράς όπως αυτή απεικονίζεται στο Power World Simulator

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΚΑΛΩΔΙΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

4.1. Εισαγωγή

Στην συγκεκριμένη ενότητα εξετάζεται η συμπεριφορά του Σ.Η.Ε. της Κρήτης μετά την προσθήκη του υπόγειου καλωδίου, με ανάλυση των μεταβολών της τάσης στους ζυγούς και της συνολικής άεργης ισχύος του συστήματος, μέσω διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας. Ειδικότερα, στην Ενότητα 4.2 παρουσιάζεται η σύγκριση των τάσεων στους ζυγούς και της συνολικής άεργης ισχύος του συστήματος πριν και μετά την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου, με στόχο τη διαπίστωση της επίδρασής του στη λειτουργία του Σ.Η.Ε. της Κρήτης. Από την άλλη, η Ενότητα 4.3 επικεντρώνεται στη μελέτη της σταδιακής αφαίρεσης επαγωγικών φορτίων από συγκεκριμένους ζυγούς, μέσα από τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση αφαιρείται διαδοχικά ένα επιπλέον επαγωγικό φορτίο, ξεκινώντας με την απομάκρυνση του πρώτου φορτίου και προχωρώντας στην σταδιακή αφαίρεση και των τριών επαγωγικών φορτίων συνολικά. Στόχος είναι η καταγραφή των επιπτώσεων στην συμπεριφορά της τάσης και της συνολικής άεργης ισχύος του συστήματος. Τέλος, στην Ενότητα 4.4 εξετάζεται η διαδικασία αντιστάθμισης της χωρητικής συμπεριφοράς του υπόγειου καλωδίου. Αρχικά, τοποθετείται ένα πηνίο σε κατάλληλο σημείο του συστήματος, ενώ στη συνέγεια προστίθεται δεύτερο πηνίο για περαιτέρω βελτίωση της σταθερότητας του συστήματος.

Η ανάλυση όλων των σεναρίων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Power World Simulator, με χρήση της προεπιλεγμένης μεθόδου επίλυσης ροής φορτίου Newton-Raphson. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα δεδομένα του συστήματος, όπως είναι η ζήτηση, η παραγωγή και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του δικτύου, παρέμειναν σταθερά.

4.2. Τα Αποτελέσματα Πριν και Μετά την Προσθήκη του Υπόγειου Καλωδίου

4.2.1. Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς

Η μεταβολή των τάσεων στους ζυγούς απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες, πριν και μετά την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου. Με γαλάζιο χρώμα έχουμε τις ανα μονάδα τιμές της τάσης πριν την τοποθέτηση του υπογείου καλωδίου, ενώ με κίτρινο χρώμα είναι οι τιμές μετά την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου.



Εικόνα 30: Σύγκριση Τάσης ανά Ζυγό πριν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυγοί 1-9



Εικόνα 31: Σύγκριση Τάσης Ανά Ζυγό πριν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυγοί 10-18



Εικόνα 32: Σύγκριση Τάσης Ανά Ζυγό πριν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυγοί 19-27



Εικόνα 33: Σύγκριση Τάσης Ανά Ζυγό πριν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυγοί 28-36



Εικόνα 34: Σύγκριση Τάσης Ανά Ζυγό πριν και μετά την Τοποθέτηση του Καλωδίου: Ζυγοί 37-43

Παρατηρείται ότι μετά την προσθήκη του υπόγειου καλωδίου, παράλληλα με την ήδη υπάρχουσα γραμμή μεταφοράς, η τάση στους περισσότερους ζυγούς σημειώνει σημαντική αύξηση. Σε αυτό συμβάλλει η χωρητική συμπεριφορά του υπόγειου καλωδίου. Τα υπόγεια καλώδια λειτουργούν ως πηγές χωρητικής άεργης ισχύος, την οποία παρέχουν στο σύστημα. Η παραγόμενη άεργη ισχύς δίνεται από τη σχέση: $\mathbf{Q} = -\mathbf{V}^2 \cdot \mathbf{\omega} \cdot \mathbf{C}$

Όπου Q είναι η άεργη ισχύς (σε VAr), V είναι η τάση, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, η κυκλική συχνότητα, C είναι η χωρητικότητα του καλωδίου (σε Farad), ενώ το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η άεργη ισχύς τροφοδοτείται προς το σύστημα. Αυτή η περίσσεια άεργης ισχύος προκαλεί αύξηση της τάσης στους ζυγούς.

4.2.2. Μεταβολή της Συνολικής Άεργος Ισχύος

Παρακάτω φαίνεται με γαλάζιο χρώμα η τιμή της συνολικής άεργου ισχύος πριν την τοποθέτηση του υπογείου καλωδίου, ενώ με κίτρινο είναι η τιμή μετά από την τοποθέτηση.





Πριν την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου, το σύστημα είχε θετικό φορτίο άεργης ισχύος (18 MVar), το οποίο αντιστοιχεί σε κατανάλωση επαγωγικής ισχύος. Μετά την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου, η συνολική άεργη ισχύς απέκτησε αρνητική τιμή (-324,2 MVar), γεγονός το οποίο αντιστοιχεί σε παραγωγή χωρητικής άεργης ισχύος από το καλώδιο. Αυτό συμβαίνει λόγω της χωρητικής συμπεριφοράς που εμφανίζει το υπόγειο καλώδιο και έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή άεργης ισχύος ως προς το σύστημα. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως τα δεδομένα τόσο για την συνολική άεργο ισχύ, όσο και για την τάση στους ζυγούς του συστήματος, για την αρχική και για όλες τις επόμενες περιπτώσεις, βασίστηκαν αποκλειστικά στα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από το λογισμικό Power World Simulator, με τις τιμές να μεταφέρονται και να επεξεργάζονται στο πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων Microsoft Excel.

4.3. Αποτελέσματα του Συστήματος για τις Διαφορετικές Συνθήκες Φόρτισης

4.3.1. Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς

Σε αυτή την υποενότητα εξετάζεται πώς επηρεάζεται η τάση του συστήματος όταν αφαιρούνται σταδιακά επαγωγικά φορτία από συγκεκριμένους ζυγούς. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αφαίρεσης φορτίων.

Στην πρώτη περίπτωση, αφαιρείται επαγωγικό φορτίο από τον ζυγό Ηράκλειο Ι, ισχύος 19,26 MW και 4,82 MVar. Η περίπτωση αυτή απεικονίζεται με πορτοκαλί χρώμα στις παρακάτω εικόνες. Στη δεύτερη περίπτωση, εκτός από το φορτίο του ζυγού Ηρακλείου Ι, αφαιρείται επιπλέον επαγωγικό φορτίο από τον ζυγό Ηράκλειο ΙΙ, ισχύος 35,63 MW και 8,92 MVar. Η περίπτωση αυτή απεικονίζεται με πράσινο χρώμα στις παρακάτω εικόνες. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση, αφαιρείται ένα ακόμα επαγωγικό φορτίο από τον ζυγό Ηράκλειο ΙΙΙ, ισχύος 16,81 MW και 4,21 MVar, με αποτέλεσμα το σύστημα να λειτουργεί με σημαντικά μειωμένη συνολική επαγωγική κατανάλωση. Η περίπτωση αυτή απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα.

Να σημειωθεί πως η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται ως προς τις τιμές που προκύπτουν μετά την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου (μπλε χρώμα στις εικόνες). Στη συνέχεια παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταβολής της τάσης σε κάποιους ζυγούς του συστήματος, καθώς η λογική του φαινομένου παραμένει η ίδια σε όλο το σύστημα.







Εικόνα 37: Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς για Τρεις Διαφορετικές Συνθήκες Φόρτισης: Ζυγοί 6-10



Εικόνα 38: Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς για Τρεις Διαφορετικές Συνθήκες Φόρτισης: Ζυγοί 11-15



Εικόνα 39: Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς για Τρεις Διαφορετικές Συνθήκες Φόρτισης: Ζυγοί 16-20



Εικόνα 40: Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς για Τρεις Διαφορετικές Συνθήκες Φόρτισης: Ζυγοί 21-25

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα, η τάση στους ζυγούς αυξάνεται σταδιακά όσο αφαιρούνται επαγωγικά φορτία από το σύστημα. Σύμφωνα με το θεωρητικό μέρος της εργασίας, η άεργη ισχύς που παράγεται από την καλωδιακή γραμμή μεταφοράς, λόγω της υψηλής χωρητικότητας των υπόγειων καλωδίων, οδηγεί σε αύξηση των τάσεων στους κόμβους του δικτύου. Πράγματι, όσο μειώνεται το φορτίο του συστήματος, λόγω της σταδιακής αφαίρεσης επαγωγικών φορτίων, τα υπόγεια καλώδια παράγουν όλο και περισσότερη χωρητική άεργο ισχύ, με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στους ζυγούς [34]. Επιπλέον, καθώς αφαιρούνται επαγωγικά φορτία, μειώνεται η κατανάλωση άεργης ισχύος από το σύστημα, ενώ το υπόγειο καλώδιο συνεχίζει να παρέχει χωρητική άεργο ισχύ. Έτσι, δημιουργείται μια περίσσεια άεργης ισχύος προς το σύστημα, η οποία προκαλεί αύξηση της τάσης στους ζυγούς.

4.3.2. Μεταβολή της Συνολικής Άεργος Ισχύος

Στην συγκεκριμένη υποενότητα εξετάζεται η μεταβολή της συνολικής άεργης ισχύος του συστήματος κατά την σταδιακή αφαίρεση επαγωγικών φορτίων από συγκεκριμένους ζυγούς. Η ανάλυση στηρίζεται στις ίδιες περιπτώσεις αφαίρεσης φορτίου που περιγράφηκαν προηγουμένως. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικής άεργης ισχύος για κάθε σενάριο αφαίρεσης φορτίου.



Εικόνα 41: Η Συνολική Άεργος Ισχύς για Κάθε Σενάριο Αφαίρεσης Φορτίων

Η συνολική άεργος ισχύς του συστήματος γίνεται ολοένα και πιο αρνητική, καθώς αφαιρούνται σταδιακά τα επαγωγικά φορτία. Από -324,2 MVar με όλα τα φορτία, φτάνει τα -398,5 MVar χωρίς τα τρία επαγωγικά φορτία. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη υποενότητα, τα υπόγεια καλώδια παράγουν περισσότερο χωρητική άεργο ισχύ, όσο μειώνεται το φορτίο του συστήματος.

4.4. Αντιστάθμιση της Χωρητικής Συμπεριφοράς του Υπόγειου Καλωδίου

4.4.1. Τοποθέτηση Εγκάρσιων Πηνίων στο Power World Simulator για Αντιστάθμιση

Στην συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία τοποθέτησης επαγωγικών πηνίων (Switched Shunts) στο λογισμικό του Power World Simulator, με στόχο την αντιστάθμιση της περίσσειας χωρητικής άεργης ισχύος που προκαλείται από την προσθήκη του υπόγειου καλωδίου. Αρχικά, χρησιμοποιώντας την επιλογή **Draw** \rightarrow **Network** \rightarrow **Switched Shunt** στο περιβάλλον του Power World Simulator γίνεται η εισαγωγή του πρώτου πηνίου το οποίο τοποθετείται στον ζυγό **Rethimno** (**H**). Η ονομαστική τιμή του πηνίου ορίζεται στα -75,0 **MVar**, ενώ η πραγματική απορρόφηση του είναι -71,0 **MVar**. Να σημειωθεί πως κατά το στάδιο εισαγωγής του στοιχείου στο Power World Simulator, το αρνητικό πρόσημο της άεργης ισχύος (π.χ. –75 MVar) υποδεικνύει στο λογισμικό ότι το στοιχείο είναι επαγωγικό, δηλαδή πηνίο. Αντίστοιχα, το θετικό πρόσημο δηλώνει χωρητικό στοιχείο, δηλαδή πυκνωτής. Ακόμα, το πηνίο έχει οριστεί σε λειτουργία **Fixed**, κάτι που σημαίνει ότι παραμένει μόνιμα ενεργό και απορροφά σταθερά άεργη ισχύ, ανεξάρτητα από τις τιμές των τάσεων, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 42).

Bus Number Status Energized View Bus Dialog Bus Name Rethimno (H) Find By Name NO (Offline) Terminal Voltage Voltage (p.u) Shunt ID 1 Find Status Branch 0,9726 Nom. Voltage (p.u) Labels no labels Choose Branch Remove 150,000 Parameters Control Options Faults Owners, Area, Zone Custom Stability GIC Nominal Mvar -71,0 -71,0 - - Mvar Blocks Number Mvars of Steps pr Steps 1 -100 -	Switched Shunt Information	for Present				—		×
Parameters Control Options Faults Owners, Area, Zone Custom Stability GIC Nominal Mvar -75,0 ↓ Actual Mvar -71,0 Auto Control? Control Regulation Settings Image: Stress NO Control Mode Generator Mvar Low Value 0,990 ↓ pu Stress Outrol Mode Generator Mvar Low Value 0,990 ↓ pu Stress Outrol Mode Generator Mvar Low Value 0,990 ↓ pu Obscrete Wind Mvar Target Value 1,000 ↓ pu Image: Stress Image: Stress Bus Shunt (Fixed) Control Options Reg. Bus # 6 Image: Stress <	Bus Number 5 Bus Name Rethimno (H) Shunt ID 1 Labels no labels	Find By Find By Find By Find	Number y Name	Status Open Oclosed Status Branch	Energized NO (C YES (N	d Offline) Online)	View Bus D Terminal V Voltage (p 0,9726 Nom. Volta	ialog oltage .u.) ge
Nominal Mvar -75,0 ★ Actual Mvar -71,0 Auto Control? O • YES • NO • Oltage High Value 1,000 ★ pu • Oltage • Sizete • Othrol Mode • Oliscrete • Othrol Mode • Sizete • Othrol Mode • Othrol O	Parameters Control Options Fa	ults Owners, Area, Zone	Custom St	tability GIC			130,000	
Control Options I,00 ▼ ✓ Area Shunt Control Enabled Reg. Bus PU Voltage to Mvar Sensitivity 0,000751 ✓ Case Shunt Control Enabled Voltage Control Group Not in a Group ✓ Add New	Nominal Mvar Actual Mvar Auto Control? VES NO Control Mode Fixed Discrete Continuous Bus Shunt (Fixed) SVC	Control Regulation Setti Voltage Generator Mvar Wind Mvar Custom Control	ngs High Value Low Value Target Value Reg. Value Reg. Bus #	1,000 × 0,990 × 1,000 × 0,9726 6	pu pu pu pu	Mvar Bloc Number of Steps	ks Mvars per Step -100	
	Control Options Area Shunt Control Enabled Case Shunt Control Enabled	Var Regu Reg. Bus PU Voltage to M Voltage Control Group	lvar Sensitivity	1,00 - 0,000751	l New			

Εικόνα 42: Ρυθμίσεις του πηνίου στον ζυγό Rethimno (Η)

Παρακάτω (Εικόνα 43) φαίνεται το πώς απεικονίζεται το πηνίο στο Power World Simulator:

-JN
•

Εικόνα 43: Η απεικόνιση του πηνίου στο Power World Simulator

Στη συνέχεια, τοποθετείται και δεύτερο επαγωγικό πηνίο στον ζυγό Linoperamata (H), το οποίο λειτουργεί συμπληρωματικά με το πρώτο πηνίο στον ζυγό Rethimno (H). Το πηνίο αυτό έχει ονομαστική τιμή -48 MVar, ενώ η πραγματική του απορρόφηση είναι -46,6 MVar.

4.4.2. Μεταβολή της Τάσης στους Ζυγούς Πριν και Μετα την Αντιστάθμιση

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται πώς επηρεάζεται η τάση στο σύστημα μετά την τοποθέτηση των επαγωγικών πηνίων, τα οποία έχουν στόχο να αντισταθμίσουν τη χωρητική άεργη ισχύ που προκαλείται από το υπόγειο καλώδιο. Επιπλέον, παρουσιάζονται και οι περιπτώσεις πριν και μετά την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου, ώστε να υπάρχει μια συνολική σύγκριση της τάσης στο σύστημα. Οι τέσσερις περιπτώσεις που εξετάζονται είναι οι εξής:

- Πριν την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου (μπλε χρώμα)
- Μετά την τοποθέτηση του καλωδίου (πορτοκαλί χρώμα)
- Με την προσθήκη πηνίου στον ζυγό Rethimno (H) (πράσινο χρώμα)
- Με την προσθήκη πηνίων στους ζυγούς Rethimno (H) και Linoperamata (H) (κόκκινο χρώμα)

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης για τους ζυγούς του συστήματος, υπό τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας. Για γίνει πιο εύκολη η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, έχουν προστεθεί δύο οριζόντιες γραμμές στις τιμές **0.95 p.u.** και **1.05 p.u.**, οι οποίες αντιστοιχούν στους γενικούς στόχους ρύθμισης της τάσης. Το 0.95 p.u. λειτουργεί ως κατώτερο όριο, ενώ το 1.05 p.u. ως ανώτερο [42].



Εικόνα 44: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 1-5



Εικόνα 45: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 6-10



Εικόνα 46: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 11-15



Εικόνα 47: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 16-20



Εικόνα 48: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 21-25


Εικόνα 49: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 26-30



Εικόνα 50: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 31-35



Εικόνα 51: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 36-39



Εικόνα 52: Σύγκριση Τάσης πριν και μετά την Αντιστάθμιση: Ζυγοί 40-43

Από τις εικόνες που παρουσιάστηκαν παραπάνω φαίνεται ότι, μετά την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου, η προσθήκη των επαγωγικών πηνίων επηρεάζει σημαντικά την τάση στο δίκτυο της Κρήτης. Όταν έχει τοποθετηθεί μόνο το πηνίο στον ζυγό **Rethimno** (**H**), παρατηρείται ότι η τάση στους ζυγούς Crete T1 και Crete T2 φτάνει τα **1.0592 p.u.**, ξεπερνώντας το όριο των 1.05 p.u. Η συγκεκριμένη υπέρβαση του άνω ορίου της τάσης είναι ένας από τους λόγους που γίνεται η προσθήκη και δεύτερου πηνίου στον ζυγό **Linoperamata** (**H**). Μετά την τοποθέτηση και του δεύτερου πηνίου, παρατηρείται ότι όλες οι τιμές τάσης στους ζυγούς παραμένουν εντός των ορίων ρύθμισης, μεταξύ **0.95 και 1.05 p.u.**

Η μείωση της τάσης που παρατηρείται μετά την προσθήκη των πηνίων, οφείλεται στο γεγονός πως τα πηνία παρουσιάζουν επαγωγική συμπεριφορά, απορροφώντας άεργη ισχύ από το σύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αντιστάθμιση της χωρητικής άεργης ισχύος που παράγεται από το καλώδιο, οδηγώντας στην σταθεροποίηση και στη μείωση των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος.

4.4.3. Μεταβολή της Συνολικής Άεργος Ισχύος Πριν και Μετα την Αντιστάθμιση

Στην συγκεκριμένη υποενότητα εξετάζεται η μεταβολή της συνολικής άεργης ισχύος του συστήματος για τις ίδιες περιπτώσεις λειτουργίας που περιγράφηκαν στην προηγούμενη υποενότητα. Οι περιπτώσεις αυτές αφορούν τη λειτουργία του συστήματος πριν και μετά την τοποθέτηση του υπόγειου καλωδίου, καθώς και την εφαρμογή πηνίων αντιστάθμισης στους ζυγούς **Rethimno** (**H**) και **Linoperamata** (**H**). Παρακάτω παρουσιάζεται η συνολική μεταβολή της άεργης ισχύς.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τη μεταβολή της συνολικής άεργης ισχύος του συστήματος στις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η τοποθέτηση ενός πηνίου στον ζυγό **Rethimno** (**H**) μειώνει σημαντικά τη χωρητική άεργη ισχύ, όμως η τιμή της παραμένει ακόμα σε υψηλά επίπεδα (-162,2 MVar). Για το λόγο αυτό, επιλέγεται η προσθήκη και δεύτερου πηνίου στο ζυγό Linoperamata (H). Με τη διπλή αντιστάθμιση, η άεργη ισχύς γίνεται -26 MVar, αντισταθμίζοντας σε μεγάλο ποσοστό τη χωρητική συμπεριφορά του υπόγειου καλωδίου.



Εικόνα 53: Σύγκριση της Συνολικής Άεργης Ισχύος πριν και μετά την Αντιστάθμιση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1. Σύνοψη

Κατά τον σχεδιασμό της νέας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας Χανιά -Δαμάστα, εκδηλώθηκαν σημαντικές αντιδράσεις από κατοίκους και τοπικούς φορείς, οι οποίοι εξέφρασαν την έντονη αντίθεσή τους στην κατασκευή εναέριας γραμμής. Οι αντιδράσεις εστιάστηκαν, κυρίως, στις πιθανές επιπτώσεις που θα είχε το έργο τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στην αισθητική του τοπίου της περιοχής. Έτσι, προέκυψε η ανάγκη να εξεταστεί η λύση της υπογειοποίησης της γραμμής μεταφοράς, προκειμένου να καλυφθούν τόσο οι ανάγκες του Σ.Η.Ε. της Κρήτης όσο και οι ανησυχίες της τοπικής κοινωνίας.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με τη μελέτη της επίδρασης που θα έχει στο Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης η ένταξη ενός υπόγειου καλωδίου στη διαδρομή Ξυλοκαμάρα - Λινοπεράματα. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Power World Simulator, μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκαν οι σχετικές προσομοιώσεις. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί πως οι προσομοιώσεις με λογισμικά όπως είναι το Power World Simulator ενδέχεται να απαιτούν ενισχυμένη υπολογιστική ισχύ ή/και εξειδικευμένες ρυθμίσεις για σταθερή σύγκλιση και ακριβή αποτελέσματα.

5.2. Κυριότερα Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης που υλοποιήθηκε, η προσθήκη του υπόγειου καλωδίου στη γραμμή Ξυλοκαμάρα - Λινοπεράματα είχε σημαντικές επιπτώσεις στη συμπεριφορά του συστήματος μεταφοράς. Πράγματι, μετά την τοποθέτηση του καλωδίου, παρατηρήθηκε αύξηση των επιπέδων τάσης στους ζυγούς του δικτύου, με ορισμένες τιμές να υπερβαίνουν το επιτρεπτό όριο του 1,05 ανά μονάδα. Ακόμα, σημειώθηκε αύξηση της άεργου ισχύος με αρνητική επίδραση στη συνολική λειτουργία του συστήματος.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση της σταδιακής αφαίρεσης επαγωγικών φορτίων από συγκεκριμένους ζυγούς του συστήματος. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, όπου σε κάθε στάδιο αφαιρούνταν διαδοχικά ένα επιπλέον επαγωγικό φορτίο, ξεκινώντας από τον ζυγό Herakleio I για το πρώτο φορτίο, συνεχίζοντας με τον ζυγό Herakleio II για το δεύτερο και ολοκληρώνοντας με την αφαίρεση του τρίτου φορτίου από τον ζυγό Herakleio III. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής ήταν ότι, καθώς αφαιρούνταν σταδιακά τα επαγωγικά φορτία, η τάση στους ζυγούς παρουσίαζε συνεχή αύξηση, φτάνοντας σε αρκετές περιπτώσεις σε επίπεδα υψηλότερα από το επιτρεπτό όριο του 1,05 ανά μονάδα. Παράλληλα, η συνολική άεργος ισχύς του συστήματος αυξανόταν επίσης, επηρεάζοντας αρνητικά τη συνολική λειτουργία του συστήματος. Όσο τα υπόγεια καλώδια είναι λιγότερο φορτισμένα, παράγουν περισσότερη χωρητική άεργο ισχύ, οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση της τάσης στους ζυγούς.

Είναι προφανές, ότι για να καταστεί δυνατή η υλοποίηση της προσθήκης του υπόγειου καλωδίου και να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος, είναι απαραίτητη η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων αντιστάθμισης, εγκάρσιων πηνίων στην περίπτωση μας. Το πρώτο πηνίο τοποθετείται στον ζυγό Rethimno H, με ονομαστική τιμή -75,0 MVar και πραγματική απορρόφηση -71,0 MVar. Η τοποθέτησή του οδηγεί σε αισθητή μείωση της συνολικής άεργου ισχύος του συστήματος, ωστόσο, οι τιμές της τάσης σε όλους τους ζυγούς δεν επανέρχονται πλήρως εντός των επιτρεπτών ορίων. Επιπλέον, παρά τη βελτίωση, η άεργος ισχύς του συστήματος εξακολουθεί να παραμένει σε υψηλά αρνητικά επίπεδα. Γι' αυτό το λόγο, τοποθετείται, επιπλέον, ένα επαγωγικό πηνίο στον ζυγό Linoperamata (H), το οποίο λειτουργεί συμπληρωματικά με το πρώτο πηνίο στον ζυγό. Το νέο πηνίο διαθέτει ονομαστική τιμή -48 MVar και πραγματική απορρόφηση -46,6 MVar. Με την προσθήκη του δεύτερου πηνίου, οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς επανέρχονται εντός των αποδεκτών ορίων, ενώ η συνολική άεργος ισχύς του συστήματος μειώνεται και σταθεροποιείται σε φυσιολογικά επίπεδα.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Βουρνάς, Κ. & Κονταξής, Γ. (2010). Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.
 Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2] ΑΔΜΗΕ Διασύνδεση της Κρήτης με την Πελοπόννησο [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://www.admie.gr/erga/erga-diasyndeseis/diasyndesi-tis-kritis-me-tin-peloponniso</u> [Πρόσβαση: 27/02/2025].
- [3] ΑΔΜΗΕ Διασύνδεση της Κρήτης με την Αττική [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://www.admie.gr/erga/erga-diasyndeseis/diasyndesi-tis-kritis-me-tin-attiki</u>
 [Πρόσβαση: 21/03/2025].
- [4] ΑΔΜΗΕ. (2023α). Επισκόπηση του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://www.admie.gr</u> [Πρόσβαση: 21/03/2025].
- [5] ΑΔΜΗΕ. (2024). Πρόγραμμα Ανάπτυζης Συστήματος Μεταφοράς 2025-2034 [Online].
 Διαθέσιμο σε: <u>https://www.admie.gr/enimerosi/programma-anaptyxis-systimatos</u>
 [Πρόσβαση: 27/02/2025].
- [6] PAAEY. (2024). Στρατηγική για την Απορρόφηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Κρήτη. Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων Ενέργειας και Υδάτων [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://www.rae.gr</u> [Πρόσβαση: 15/02/2025].
- [7] ΑΔΜΗΕ. (2023β). Μελέτη Επάρκειας Συστήματος Μεταφοράς 2023-2032 [Online].
 Διαθέσιμο σε: <u>https://www.admie.gr</u> [Πρόσβαση: 15/02/2025].
- [8] ΑΔΜΗΕ. (2025). Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυζης 2025–2034 [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://www.admie.gr</u> [Πρόσβαση: 27/02/2025].
- [9] Author Unknown. (n.d.). *PS-I UNIT-4: Underground cables*. https://aec.edu.in/aec/Instruction_Material/PS-I%20UNIT-4.pdf
- [10] Electrical Power System. Underground Cables. https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2020_04_04!07_49_13_PM.pdf
- [11] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.). Wiley.
- [12] Kasap, S. O. (2017). Principles of Electronic Materials and Devices (4th ed.). McGraw-Hill.

- [13] Dakin, T. W. (2008). Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. IEEE Press/Wiley.
- [14] Nelson, J. K. (1995). Dielectric Polymer Nanocomposites. Springer.
- [15] Alston, L. L., & Gilmour, A. S. (2012). *High Voltage Technology*. Oxford University Press.
- [16] Böckh, P., & Anders, G. (2014). Electrical Engineering: Principles and Applications. Springer.
- [17] National Grid. (2015). Undergrounding high voltage electricity transmission lines: The technical issues (Issue 4). https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/39111-
 Undergrounding high_voltage_electricity_transmission_lines_The_technical_issues_I
 NT.pdf
- [18] Nexans. (2025) [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://www.nexans.gr/el/products/Medium-Voltage-Underground-Unarmored-cables/2XSY-12-204817.html</u> [Πρόσβαση: 24/03/2025].
- [19] TF Kable (χ.χ.). High and extra high voltage cables. Connecting globally. https://www.tfkable.com/download/files/upload/files/High and extra high voltage c ables.pdf
- [20] Brugg Cables. (2006). High Voltage XLPE Cable Systems Technical User Guide. https://bruggcables.com/fileadmin/site/documents/Hochspannungsanlagen/Technical_ User_Guide_HV_XLPE_Cable_Systems_EN.pdf
- [21] Construction And Properties Of Underground Cables. Electrical Encyclopedia. A Website about ELECTRICAL and ELECTRONICS Engineering [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://beingelectricalengineer.blogspot.com/2019/03/underground-cable.html</u> [Πρόσβαση: 22/02/2025].
- [22] L. Ashrit. Underground Power Cables Architecture, Applications and Advantages [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://electricalfundablog.com/underground-power-cables-architecture/</u> [Πρόσβαση: 22/02/2025].
- [23] J. Mirza. (2024). Underground cabling project faces delays [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://tribune.com.pk/story/2507213/underground-cabling-project-faces-delays</u> [Πρόσβαση: 14/03/2025].

- [24] Overhead transmission lines, lecture 9. <u>https://www.benardmakaa.com/wp-</u> content/uploads/2018/10/Lecture-9-Overhead-transmission-lines.pdf
- [25] Ταξινόμηση των εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://bizpro.techinfus.com/el/klassifikatsiya-vozdushnyih-liniy-elektroperedach.html</u> [Πρόσβαση: 17/03/2025].
- [26] Overhead Vs. Underground, Information About Burying High-Voltage Transmission Lines. <u>https://xcelenergylacombetobarkersubstation.com/wp-content/uploads/2024/09/Xcel_Energy_Overhead_vs_Underground_Transmission_Line_Information_Sheet.pdf</u>
- [27] What is Underground Cable? Construction, Types, Advantages, Disadvantages & Applications. *Electrical and Electronics Blog*, 2025 [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://howelectrical.com/underground-cable/</u> [Πρόσβαση: 24/03/2025].
- [28] Advantages and disadvantages Underground
- transmission
 & Overhead
 transmission.

 https://files.schudio.com/ashtoncommunitysciencecollege/files/files/Literacy/Science/
 KS3_and_KS4.pdf
- [29] European Commission. (2017). *Technical Study on the Benefits of Undergrounding Electricity Cables*. Publications Office of the European Union.
- [30] Cigré Working Group B1.06. (2005). *Economical and Technical Assessment of Alternatives to Overhead Lines*. Cigré.
- [31] IEEE Power & Energy Society. (2015). Underground Transmission Systems Reference Book (2nd ed.). IEEE Press.
- [32] ΑΔΜΗΕ. (2023). Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Έργων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://www.admie.gr</u> [Πρόσβαση: 15/02/2025].
- [33] Al-Khalidi, H. & Kalam, A. (2006). 'The Impact of Underground Cables on Power Transmission and Distribution Networks', *First International Power and Energy Conference (PECon)*, Putrajaya, Malaysia, 28-29 November, pp. 575-579.
- [34] Georgiev, D., Rangelov, Y. & Kamenov, Y. (2019). 'Power Flows in High-Voltage Transmission Systems with a Large Share of Underground Cables', *IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2019.

- [35] Cigré Working Group B1.19. (2010). Update of service experience of HV underground and submarine cable systems. Cigré.
- [36] Cigré Technical Brochure No. 338. (2008). Economical Comparison of Overhead Lines and Underground Cables for Power Transmission. Cigré.
- [37] Power World Corporation. Power World Simulator User's Guide (Version 10.0).
 Champaign, IL, USA [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://www.powerworld.com</u>
 [Πρόσβαση: 12/02/2025].
- [38] Power World Corporation, Power World Simulator [Online]. Διαθέσιμο σε: https://www.powerworld.com [Πρόσβαση: 28/03/2025].
- [39] *TF Cable*, "*High Voltage XLPE Cables* 87/150 161(170) *kV*. <u>https://www.tfcable.com/files/upload/files/6-HVP-High-Voltage-161kV(1).pdf</u>
- [40] Καλώδια ισχύος XLPE/PVC/SWA/PVC. <u>https://vopcables.com/wp-content/uploads/2019/07/XLPE_PVC_SWA_PVC.pdf</u>
- [41] Australia, New Zealand Infrastructure Pipeline. (2025). Gippsland Offshore Wind Transmission Project [Online]. Διαθέσιμο σε: <u>https://infrastructurepipeline.org/project/greater-gippsland-transmission-project</u> [Πρόσβαση: 14/03/2025].
- [42] Γεωργιλάκης, Σ. Π. (2015). Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015. Διαθέσιμο σε: <u>http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013</u> [Πρόσβαση: 24/03/2025].