



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Μελέτη μεθόδων διασταύρωσης μανδυνών σε καλώδια Μέσης Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευστράτιος Ι. Ζέππος

Επιβλέπων : Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου
Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος, 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Μελέτη μεθόδων διασταύρωσης μανδυνών σε καλώδια Μέσης Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευστράτιος Ι. Ζέππος

Επιβλέπων : Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Οκτωβρίου 2025.

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

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

.....
Βασιλική Θ. Κονταργύρη
Επίκουρη Καθηγήτρια Παν.
Δυτικής Αττικής

Αθήνα, Οκτώβριος, 2025

.....
Ευστράτιος Ι. Ζέππος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Ευστράτιος Ζέππος, 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

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τον περιορισμό των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες καλωδίων μέσης τάσης μέσω της τεχνικής αντιμετάθεσης αγωγών (cross-bonding). Με χρήση του λογισμικού ATPDraw πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις καλωδίων υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και σε περιπτώσεις μονοφασικών και τριφασικών σφαλμάτων, για διάφορες διαμορφώσεις γείωσης των μανδυνών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η γείωση των μανδυνών επηρεάζει καθοριστικά τα επαγόμενα μεγέθη, ενώ η τεχνική cross-bonding, ιδιαίτερα με δύο major sections, οδηγεί στη σημαντικότερη μείωση τόσο των τάσεων όσο και των ρευμάτων. Συμπερασματικά, η εφαρμογή του cross-bonding αναδεικνύεται ως η πλέον αποδοτική και ισορροπημένη λύση για τον περιορισμό των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων σε υπόγεια καλώδια μέσης τάσης.

Λέξεις κλειδιά: καλώδια μέσης τάσης, μανδύες καλωδίων, επαγόμενες τάσεις και ρεύματα, γείωση, ATPDraw.

Abstract

This diploma thesis investigates the reduction of induced voltages and currents in the sheaths of medium voltage cables using the cross-bonding technique. Simulations were performed in ATPDraw under normal operating conditions and during single-phase and three-phase faults, considering various sheath grounding configurations.

The results showed that sheath grounding significantly affects the induced voltages and currents, while the cross-bonding technique, particularly when applied in two major sections, provides the most effective reduction of both quantities.

In conclusion, cross-bonding emerges as the most balanced and efficient solution for controlling induced voltages and currents in medium voltage underground cables.

Key words: medium voltage cables, cable sheaths, induced voltages and currents, grounding, cross-bonding, ATPDraw.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Χρήστο Χριστοδούλου, επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την ανάθεση του θέματος και τη γενική επίβλεψη της μελέτης. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ελένη Νικολοπούλου για την καθοδήγηση, τη συνεχή υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον περιορισμό των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες υπόγειων καλωδίων μέσης τάσης, με έμφαση στην τεχνική αντιμετάθεσης αγωγών (cross-bonding) και στις διαφορετικές μεθόδους γείωσης των μανδύων. Η εργασία συνδυάζει θεωρητική ανάλυση, βιβλιογραφική ανασκόπηση και προσομοιώσεις μέσω του λογισμικού ATPDraw, εξετάζοντας την επίδραση διαφορετικών σεναρίων γείωσης και cross-bonding τόσο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας όσο και σε περιπτώσεις σφάλματος. Στόχος είναι η ανάδειξη των πιο αποδοτικών λύσεων για τον περιορισμό των επαγόμενων ηλεκτρικών μεγεθών και η απόδειξη της αποτελεσματικότητας της μεθόδου cross-bonding.

Πιο συγκεκριμένα η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει το πρόβλημα των υπόγειων καλωδίων μέσης τάσης και τις βασικές τεχνικές επίλυσης. Παρουσιάζει τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τη δομή και χρήση των υπόγειων καλωδίων, καθώς και τα προβλήματα που προκύπτουν, όπως τα επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες, υπερθέρμανση και επαγόμενες τάσεις. Επιπλέον, αναλύεται η σημασία της γείωσης και η αναγκαιότητα της τεχνικής cross-bonding, ενώ γίνεται αναφορά σε σφάλματα σε υπόγειες γραμμές και σε διεθνή πρότυπα.

Κεφάλαιο 2: Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει μια συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, περιλαμβάνοντας περισσότερα από 20 επιστημονικά άρθρα και μελέτες. Οι εργασίες αυτές εξετάζουν την εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding και των τεχνικών γείωσης σε υπόγεια καλώδια μέσης, αλλά και υψηλής τάσης, τόσο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας όσο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων. Στο τέλος του κεφαλαίου συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα και οι προσεγγίσεις που αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα και τα πλεονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το λογισμικό ATPDraw και η χρήση του για τη μοντελοποίηση καλωδίων και γραμμών. Περιγράφονται οι τύποι μοντέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και η διαδικασία προσομοίωσης. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται συνοπτική ανασκόπηση των εργαλείων και δυνατοτήτων του λογισμικού.

Κεφάλαιο 4: Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται το σύστημα προσομοίωσης των υπόγειων καλωδίων με τοποθέτηση βολτομέτρων και αμπερομέτρων κατά μήκος της γραμμής. Παρουσιάζονται τα σενάρια γείωσης των μανδύων και η εφαρμογή cross-bonding, με στόχο την αξιολόγηση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες σε κανονικές συνθήκες. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα των μετρήσεων και των προσομοιώσεων.

Κεφάλαιο 5: Το κεφάλαιο εξετάζει τη συμπεριφορά των καλωδίων υπό μονοφασικά και τριφασικά σφάλματα. Περιγράφονται τα σενάρια γείωσης και αντιμετάθεσης αγωγών και μανδύων σε συνθήκες σφάλματος, ενώ παράλληλα αναλύονται τα αποτελέσματα για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των τεχνικών cross-bonding και γείωσης.

Κεφάλαιο 6: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ανασκόπηση της συνολικής εργασίας και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Τονίζονται τα βασικά συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των διαφορετικών τεχνικών γείωσης και της μεθόδου cross-bonding. Τέλος, γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα των υπόγειων καλωδίων.

Κεφάλαιο 7: Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη συγγραφή της διπλωματικής, περιλαμβάνοντας όλες τις πηγές και μελέτες που αναφέρονται στα κεφάλαια της εργασίας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό μέρος (Εισαγωγή στο πρόβλημα και στις τεχνικές επίλυσης).....	15
1.1: Εισαγωγή στα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	15
1.2: Υπόγεια Καλώδια: Δομή, Είδη, Χρήση σε Αστικά και Ημιαστικά Δίκτυα.....	15
1.3: Προβλήματα σε Υπόγεια Καλώδια (Επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες, κυκλικά ρεύματα, υπερθέρμανση, επαγόμενες τάσεις και προβλήματα γείωσης).....	17
1.4: Τεχνικές Γείωσης και Αντιμετώπιση.....	18
1.5: Αναγκαιότητα Cross-Bonding (Λειτουργία, Μεθόδοι, Δυνατότητες, Πλεονεκτήματα, Επιπτώσεις).....	19
1.6: Σφάλματα σε Υπόγειες Γραμμές.....	20
1.7: Διεθνή Πρότυπα και Τεχνικές Οδηγίες.....	21
1.8: Σύνοψη Κεφαλαίου.....	22
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	23
2.1: Θεωρητική Τεκμηρίωση και Υπολογιστική Ανάλυση της Μεθόδου Cross-Bonding σε Καλωδιακά Συστήματα.....	23
2.2: Αντιμετώπιση Σφαλμάτων, Ρεύματα Βλαβών και Υπερτάσεις.....	27
2.3: Σύνοψη κεφαλαίου.....	31
Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Υπόβαθρο ATPDraw.....	32
3.1: Εισαγωγή.....	32
3.2: Μοντελοποίηση Καλωδίων στο ATPDraw.....	33
3.3: Τύποι Μοντέλων Καλωδίων/Γραμμών.....	37
3.4: Σύνοψη Κεφαλαίου.....	39
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση Υπόγειων Καλωδίων Υπο Κανονικές Συνθήκες Λειτουργίας...39	
4.1: Εισαγωγή.....	39
4.2: Περιγραφή Συστήματος Προσομοίωσης.....	40
4.3: Σενάρια Γείωσης Μανδύων.....	47
4.4: Σενάρια Αντιμετάθεσης Αγωγών και Μανδύων (CB).....	52
4.5: Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	58
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Επαγόμενων Τάσεων και Ρευμάτων σε Καταστάσεις Σφάλματος.....58	
5.1: Είδη Σφαλμάτων και Αντικείμενο Μελέτης.....	58
5.2: Μοντελοποίηση Μονοφασικού και Τριφασικού Σφάλματος στο ATPDraw.....	59
5.3: Σενάρια Γείωσης Μανδύων υπο Συνθήκες Σφάλματος.....	61
5.4: Σενάρια αντιμετάθεσης αγωγών και μανδύων (CB) υπο Συνθήκες Σφάλματος.....	65
5.5: Συμπεράσματα κεφαλαίου.....	70
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	71
6.1: Ανασκόπηση της Διπλωματικής.....	71
6.2: Βασικά Συμπεράσματα.....	72
6.3: Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	72
Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία.....	73

Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό Μέρος

1.1 Εισαγωγή στα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες της σύγχρονης κοινωνίας και οικονομίας. Από τη στιγμή που παράγεται σε μονάδες παραγωγής, όπως θερμοηλεκτρικά, υδροηλεκτρικά, πυρηνικά ή ανανεώσιμα εργοστάσια, πρέπει να μεταφερθεί με ασφάλεια, αξιοπιστία, διατηρώντας παράλληλα χαμηλές απώλειες απώλειες, προς τα κέντρα κατανάλωσης. Αυτή η λειτουργία επιτελείται από τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία συνδέουν την παραγωγή με την κατανάλωση μέσω ενός πολύπλοκου δικτύου γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης.

Η λειτουργία των συστημάτων αυτών περιλαμβάνει τρία κύρια επίπεδα: την μεταφορά, που πραγματοποιείται μέσω γραμμών υψηλής ή υπερυψηλής τάσης, τη διανομή, η οποία γίνεται μέσω υποσταθμών και γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης και την τελική κατανάλωση, δηλαδή τις εγκαταστάσεις των χρηστών. Στόχος των συστημάτων μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, η εξασφάλιση υψηλής αξιοπιστίας και ανθεκτικότητας σε σφάλματα, ενώ παράλληλα ο σχεδιασμός τους πρέπει να είναι τεχνικά και οικονομικά αποδοτικός.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η ποιότητα της μεταφοράς σε αστικά και πυκνοκατοικημένα περιβάλλοντα, όπου η χρήση των υπογείων καλωδίων αντικαθιστά πολλές φορές τις εναέριες γραμμές, λόγω περιορισμένου χώρου, περιβαλλοντικών περιορισμών και αισθητικής. Παρ'όλα αυτά, τα υπόγεια καλώδια, αν και προστατευμένα από εξωτερικούς παράγοντες, εμφανίζουν ιδιόμορφα προβλήματα λειτουργίας, όπως επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες, αυξημένες θερμικές απώλειες και περιπλοκές στη γείωση, που καθιστούν τον σχεδιασμό και τη διαχείριση τους απαιτητικό.

Η κατανόηση των συστημάτων μεταφοράς αποτελεί τη βάση για την περαιτέρω ανάλυση των ειδικών θεμάτων που σχετίζονται με τα υπόγεια καλώδια και ειδικότερα την τεχνική του Cross-Bonding, η οποία εφαρμόζεται για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων λειτουργικών προκλήσεων.

1.2 Υπόγεια Καλώδια: Δομή, Είδη, Χρήση σε Αστικά και Ημιαστικά Δίκτυα

Η χρήση υπόγειων καλωδίων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του σύγχρονου ενεργειακού δικτύου, ιδίως σε περιοχές με περιορισμούς χωροταξικούς, περιβαλλοντικούς ή αισθητικούς. Σε αντίθεση με τις εναέριες γραμμές, τα υπόγεια καλώδια προσφέρουν αυξημένη προστασία από εξωτερικούς παράγοντες, μειωμένο οπτικό αποτύπωμα και δυνατότητα ένταξης του δικτύου σε πυκνοδομημένες περιοχές.

1.2.1 Δομή Υπογείου Καλωδίου

- **Αγωγός:** Το κεντρικό στοιχείο του καλωδίου, συνήθως από πολύκλωνο χαλκό ή αλουμίνιο, μέσω του οποίου ρέει το ηλεκτρικό ρεύμα.
- **Εσωτερική μόνωση:** Συνήθως κατασκευασμένη από XLPE (διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο), εξασφαλίζει ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος.
- **Screen (Ημιαγωγία Στρώματα):** Τοποθετείται εσωτερικά και εξωτερικά της μόνωσης για ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου.
- **Μεταλλικός μανδύας (metallic sheath):** Συνήθως από χαλκό ή αλουμίνιο, παρέχει θωράκιση από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και διατηρεί δυνατότητα γείωσης.

- **Μηχανική προστασία και εξωτερικός μανδύας:** Προστατεύει από μηχανικές καταπονήσεις, υγρασία και χημικά στοιχεία του εδάφους.

Παρακάτω απεικονίζονται τα συστατικά στοιχεία της κατασκευής του υπογείου καλωδίου:

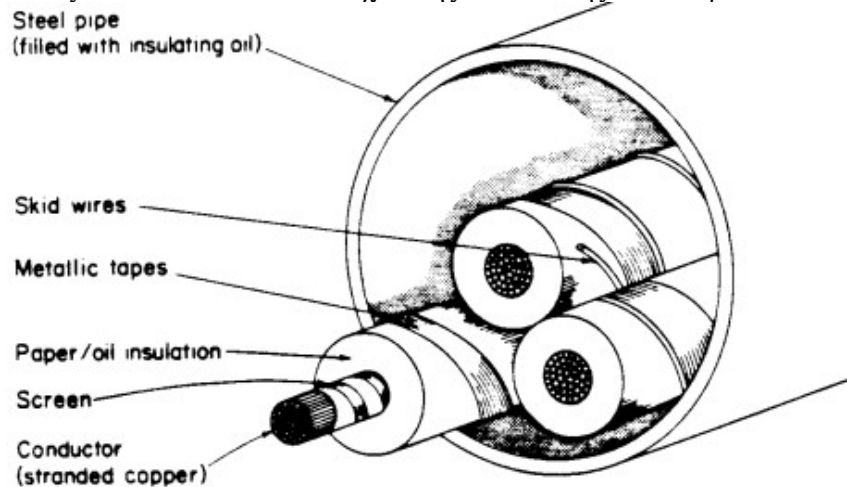


Fig. 5.3 - Pipe-type oil-filled cable [148]. © 1979 John Wiley & Sons, Ltd. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Ltd

Σχήμα 1.2.1 : Δομή υπόγειου καλωδίου.

1.2.2 Κατηγορίες Υπόγειων καλωδίων

Σύμφωνα με την πρακτική ταξινόμηση που εφαρμόζεται στην Ελλάδα, τα υπόγεια καλώδια κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με την ονομαστική τάση λειτουργίας τους:

- **Χαμηλής Τάσης (LV):** έως 1kV, χρησιμοποιείται κυρίως για την τροφοδοσία κατοικιών και μικρών καταναλωτών.
- **Μέσης Τάσης (MV):** τυπικά 20kV, εφαρμόζεται στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας από υποσταθμούς προς τοπικά φορτία, βιομηχανίες και επιχειρήσεις.
- **Υψηλής Τάσης (HV):** 150kV, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε περιφερειακό επίπεδο και τη διασύνδεση βασικών υποδομών.
- **Υπερυψηλής Τάσης (ΕVH):** 400kV, αφορά το εθνικό σύστημα μεταφοράς και τη μαζική διακίνηση ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

Σημείωση : Οι ακριβείς ονομαστικές τάσεις και τα όρια ανάμεσα στις κατηγορίες διαφοροποιούνται διεθνώς, καθώς εξαρτώνται από τα εθνικά πρότυπα, τις κανονιστικές απαιτήσεις και τις τεχνικές πρακτικές κάθε χώρας. Για παράδειγμα, σε ορισμένες περιπτώσεις, η περιοχή μεταξύ 52kV και 66kV μπορεί να θεωρείται μεταβατική μεταξύ μέσης και υψηλής τάσης.

1.2.3 Χρήση σε Αστικά και Ημιαστικά Δίκτυα

Η εφαρμογή των υπόγειων καλωδίων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε:

- **Αστικά κέντρα:** Όπου η χρήση εναέριων γραμμών είναι αδύνατη λόγω χώρου, ασφάλειας και αισθητικής.
- **Βιομηχανικές περιοχές:** Για προστασία από παρεμβολές και περιορισμό κινδύνου.
- **Υποθαλάσσιες ή υπόγειες διασυνδέσεις:** Όπως καλώδια που ενώνουν νησιά με την ηπειρωτική χώρα ή υποσταθμούς μέσα σε αστικά δίκτυα.
- **Περιοχές με περιβαλλοντική προστασία:** Όπου απαιτείται περιορισμός επεμβάσεων από τοπίο.

Παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν, όπως η απόκρυψη, η αυξημένη ασφάλεια και η μειωμένη ανάγκη συντήρησης λόγω της προστασίας από εξωτερικούς παράγοντες, τα υπόγεια καλώδια παρουσιάζουν και συγκεκριμένα τεχνικά προβλήματα. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται η θερμική συσσώρευση που οφείλεται στην περιορισμένη απαγωγή θερμότητας, τα επαγόμενα ρεύματα και τάσεις στους μεταλλικούς μανδύες, καθώς και οι προκλήσεις στη γείωση.

Η σωστή κατασκευή και γείωση των υπόγειων γραμμών, καθώς και η εφαρμογή τεχνικών όπως το Cross-Bonding, είναι ουσιώδη για την ασφαλή, αποδοτική και μακροχρόνια λειτουργία τους.

1.3 Προβλήματα σε Υπόγεια Καλώδια

Τα υπόγεια καλώδια, παρά τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα έναντι των εναέριων γραμμών, παρουσιάζουν ορισμένα τεχνικά προβλήματα και φαινόμενα, κυρίως εξαιτίας της δομής τους και της γειωμένης εγκατάστασης τους στο έδαφος. Τα προβλήματα αυτά αφορούν κυρίως ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις στους μανδύες των καλωδίων, θέρμανση, καθώς και ζητήματα στη γείωση και την προστασία.

1.3.1 Επαγόμενα Ρεύματα στους Μανδύες

Οι μεταλλικοί μανδύες των καλωδίων (συνήθως από χαλκό ή αλουμίνιο) λειτουργούν ως “ηλεκτρομαγνητικές ασπίδες”, αλλά παράλληλα είναι αγωγιμοί. Η διέλευση εναλλασσόμενου ρεύματος στις τρεις φάσεις προκαλεί μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο με τη σειρά του επάγει ρεύματα στους μανδύες μέσω του νόμου του Faraday. Τα επαγόμενα αυτά ρεύματα, ανάλογα με την τάξη μεγέθους, ενδέχεται να προκαλέσουν ανεπιθύμητες επιδράσεις στο σύστημα, όπως:

- Να κυκλοφορούν κυκλικά σε βρόχους
- Να προκαλούν απώλειες
- Να οδηγούν σε ανεπιθύμητη υπερθέρμανση
- Να επηρεάσουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής του καλωδίου.

1.3.2 Κυκλικά Ρεύματα Γείωσης

Η πολλαπλή γείωση των μεταλλικών μανδυνών σε καλώδια μεγάλου μήκους επιτρέπει τη ροή ρευμάτων μέσω του εδάφους και των μανδυνών, δημιουργώντας βρόχους κυκλοφορίας. Οι κυκλικές αυτές ροές:

- Είναι δύσκολο να εντοπιστούν με απλή επιτήρηση,
- Επάγουν τάσεις μεταξύ των άκρων των μανδυνών,
- Επιβαρύνουν την απόδοση, ενώ παράλληλα ενδέχεται να προκαλέσουν ηλεκτρικά προβλήματα (όπως θόρυβο σε συστήματα προστασίας ή μετρήσεων)

1.3.3 Υπερθέρμανση Μανδυνών και Θερμικά Προβλήματα

Τα επαγόμενα ρεύματα που αναπτύσσονται στους μανδύες κατά τη λειτουργία:

- Μετατρέπονται σε θερμότητα μέσω του φαινομένου Joule,
- Ανεβάζουν τη θερμοκρασία του καλωδίου,
- Μειώνουν την ονομαστική του ικανότητα,
- Αυξάνουν τον κίνδυνο γήρανσης της μόνωσης
- Ενδέχεται να οδηγήσουν σε πρόωρη υποβάθμιση ή ακόμα και καταστροφή του καλωδίου.

1.3.4 Επαγόμενες Τάσεις

Ακόμα και αν δεν ρέει σημαντικό ρεύμα στους μανδύες, οι διαφορές στο μαγνητικό πεδίο μεταξύ των φάσεων μπορεί να επάγουν τάσεις μεταξύ των άκρων των μανδυνών. Το γεγονός αυτό δημιουργεί διαφορικό δυναμικό μεταξύ των γειώσεων ενώ παράλληλα μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τον εξοπλισμό γείωσης ή τις μονώσεις. Γι' αυτό το λόγο απαιτούνται προστατευτικά μέτρα, όπως οι σύνδεσμοι Cross-Bonding ή προστατευτικές αποζεύξεις.

1.3.5 Προβλήματα Γείωσης

Η λανθασμένη ή ανεπαρκής γείωση των υπόγειων καλωδίων ενέχει σημαντικούς κινδύνους όπως:

- Άυξηση επαγόμενων φαινομένων
- Δημιουργία επικίνδυνων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής
- Δυσλειτουργίες σε συστήματα προστασίας
- Μειωμένη ικανότητα απόσβεσης μεταβατικών καταστάσεων (π.χ. κεραυνικών υπερτάσεων)

1.4 Τεχνικές Γείωσης και Αντιμετώπιση των Επαγόμενων Ρευμάτων

Η γείωση των μεταλλικών μανδυνών των υπόγειων καλωδίων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα τόσο για την ασφάλεια του συστήματος όσο και για την αποδοτική του λειτουργία. Η ροή ρεύματος στους αγωγούς δημιουργεί μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα οποία επάγουν ηλεκτρικές τάσεις στους μανδύες. Οι επαγόμενες αυτές τάσεις ενδέχεται να προκαλέσουν τη ροή κυκλικών ρευμάτων στους μανδύες, οδηγώντας σε αυξημένες θερμικές απώλειες και επιβάρυνση της καλωδιακής γραμμής. Η ορθή επιλογή τεχνικής γείωσης στοχεύει στον περιορισμό αυτών των φαινομένων, συμβάλλοντας στη διατήρηση της ηλεκτρικής και θερμικής σταθερότητας του συστήματος.

- Η απλούστερη τεχνική είναι η μονοσήμαντη γείωση (**Single-Point grounding**), κατά την οποία ο μανδύας κάθε φάσης γειώνεται μόνο σε ένα άκρο της γραμμής, ενώ το άλλο παραμένει ηλεκτρικά “ανοικτό”. Η διάταξη αυτή περιορίζει σημαντικά τα κυκλικά ρεύματα, με κόστος όμως, την πιθανότητα ανάπτυξης υψηλών επαγόμενων τάσεων στο μη γειωμένο άκρο, φαινόμενο το οποίο εντείνεται σε γραμμές μεγάλου μήκους. Για την προστασία των μονώσεων απαραίτητη είναι η χρήση συσκευών απόζευξης ή αντικεραυνικής προστασίας.
- Αντιθέτως, η πολυσημειακή γείωση (**Multi-Point grounding**), περιλαμβάνει τη σύνδεση των μανδυνών στη γη και στα δύο άκρα της γραμμής. Η προσέγγιση αυτή μειώνει αισθητά τις επαγόμενες τάσεις, επιτρέπει όμως τη ροή σημαντικών κυκλικών ρευμάτων μέσω των μανδυνών, με αποτέλεσμα την αύξηση θερμικών απωλειών και πιθανών κινδύνων υπερθέρμανσης.
- Για την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων και των δύο προηγούμενων τεχνικών, εφαρμόζεται ευρέως η διασταυρούμενη σύνδεση μανδυνών (**Cross-Bonding**), ιδιαίτερα σε καλωδιακές γραμμές υψηλής τάσης και μεγάλου μήκους. Η γραμμή συνήθως χωρίζεται σε τρία ισομήκη τμήματα και οι μανδύες των φάσεων επανασυνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αλληλοεξουδετερώνονται οι επαγόμενες τάσεις στο σύνολο της διαδρομής. Καθ' όλο το μήκος της γραμμής εγκαθίστανται ειδικά κιβώτια σύνδεσης, στα οποία πραγματοποιείται η αντιμετάθεση των μανδυνών. Η μέθοδος αυτή, αν και απαιτεί μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό και την εγκατάσταση, εξασφαλίζει ελαχιστοποίηση απωλειών και υψηλή λειτουργική αξιοπιστία, χωρίς την εμφάνιση σημαντικών επαγόμενων ρευμάτων.

Η επιλογή τεχνικής γείωσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη το μήκος της γραμμής, την τάση λειτουργίας, τις θερμικές απαιτήσεις και το περιβάλλον εγκατάστασης. Σε πολλές περιπτώσεις, γίνεται συνδυαστική χρήση τεχνικών, ειδικά όταν πρόκειται για περίπλοκα δίκτυα που περιλαμβάνουν διακλαδώσεις, υπόγειες συνδέσεις με εναέριες γραμμές ή σύνθετες τοπολογίες. Σε κάθε περίπτωση, ο στόχος παραμένει κοινός και είναι η εξασφάλιση

της προστασίας των υλικών, η ελαχιστοποίηση των θερμικών και ηλεκτρικών επιπτώσεων, καθώς και η ασφαλής λειτουργία του συστήματος μεταφοράς.

1.5 Αναγκαιότητα Cross-Bonding

Καθώς τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας επεκτείνονται σε αστικά και ημιαστικά περιβάλλοντα, η χρήση υπόγειων καλωδίων υψηλής τάσης (HV) γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στις προηγούμενες υποενότητες, ένα από τα κύρια προβλήματα που ανακύπτουν από τη χρήση αυτών των καλωδίων είναι οι επαγόμενες τάσεις και τα κυκλικά ρεύματα που αναπτύσσονται στους μεταλλικούς μανδύες λόγω της μαγνητικής σύζευξης μεταξύ των φάσεων.

Οι μεταλλικοί μανδύες, αν και βασικά προορίζονται για θωράκιση και προστασία, μπορούν να λειτουργήσουν ως αγωγίμες διαδρομές μέσω των οποίων ρέουν επαγόμενα ρεύματα όταν υπάρχει διαφορά δυναμικού, με αποτέλεσμα να υφίσταται υπερθέρμανση της καλωδιακής διαδρομής, αύξηση των απωλειών ισχύος, επιβάρυνση των συστημάτων γείωσης, καθώς επίσης και σε ορισμένες περιπτώσεις, επικινδυνότητα για εξοπλισμό και προσωπικό.

Για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων εφαρμόζεται η τεχνική Cross-Bonding, η οποία αποτελεί μια εξελιγμένη μέθοδο γείωσης, σχεδιασμένη για τη μείωση των επαγόμενων ρευμάτων στους μανδύες και τη βελτιστοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς της καλωδιακής γραμμής.

Λειτουργική Αρχή:

Η βασική ιδέα του Cross-Bonding στηρίζεται στον τμηματικό διαχωρισμό της καλωδιακής διαδρομής σε τρία περίπου ίσα τμήματα (minor sections). Στο τέλος κάθε τμήματος γίνεται αντιμετάθεση των συνδέσεων των μανδύων των φάσεων μέσω ειδικών κιβωτίων (link boxes), έτσι ώστε οι επαγόμενες τάσεις στους μανδύες να εξισορροπούνται και να περιορίζονται στο ελάχιστο. Με αυτόν τον τρόπο, στο τέλος μιας πλήρους ακολουθίας τριών τμημάτων (major section), οι επαγόμενες τάσεις στους μανδύες ελαττώνονται, ενώ παράλληλα τα κυκλικά ρεύματα περιορίζονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Το συνολικό κύκλωμα σχηματίζεται έτσι ώστε να αποφεύγονται τα υψηλά ρεύματα μανδύα, μειώνοντας τις απώλειες και βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος.

Υλοποιήσεις - SCB και CCB:

Υπάρχουν δύο κύριες υλοποιήσεις της τεχνικής:

- **Sectionalized Cross-Bonding (SCB):**

Το καλώδιο χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα και οι μανδύες διακόπτονται σε κιβώτια διακλάδωσης (link boxes), όπου εφαρμόζεται η αντιμετάθεση και η γείωση.

- **Continuous Cross-Bonding (CCB):**

Οι αγωγοί και οι μανδύες παραμένουν συνεχείς κατά μήκος του καλωδίου και η αντιμετάθεση των μανδύων επιτυγχάνεται μέσω κιβωτίων διακλάδωσης (link boxes), χωρίς φυσική διακοπή του καλωδίου.

Μεθοδολογία Σύνδεσης:

Στο τέλος κάθε minor section, οι μανδύες των φάσεων A,B,C συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να αντισταθμίζουν τις μαγνητικές ροές του προηγούμενου τμήματος. Δηλαδή, αν στο πρώτο τμήμα η διάταξη είναι (A,B,C), στο επόμενο οι μανδύες ενώνονται ως (B,C,A), και στο επόμενο ως (C,A,B), διαμορφώνοντας έτσι κυκλική αντιμετάθεση.

Σε κάθε σημείο σύνδεσης εφαρμόζεται γείωση μέσω ειδικών μονάδων, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με εκφόρτιση μέσω surge arresters για την εκτροπή βίαιων υπερτάσεων, με επαγωγικά πηνία για τον περιορισμό των κυκλικών ρευμάτων και των απωλειών ή με απευθείας σύνδεση με τη γη (Direct Bonding).

Πλεονεκτήματα της τεχνικής Cross-Bonding:

- Μείωση κυκλικών ρευμάτων στους μανδύες.
- Περιορισμός των θερμικών απωλειών, επιτρέποντας τη μεταφορά περισσότερης ισχύος με ασφάλεια.
- Ελαχιστοποίηση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται εξωτερικά από τα καλώδια, γεγονός σημαντικό σε αστικές περιοχές.
- Βελτιστοποίηση της ηλεκτρικής θωράκισης και περιορισμός του κινδύνου έκθεσης σε ανεπιθύμητες δυναμικές τάσεις.

Επιπτώσεις και Σχεδιαστικοί Περιορισμοί:

Η εφαρμογή της τεχνικής Cross-Bonding, αν και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη μείωση των κυκλικών ρευμάτων και της θερμικής επιβάρυνσης των μανδύων, συνοδεύεται και από ορισμένους σχεδιαστικούς περιορισμούς και επιπτώσεις. Αρχικά, απαιτείται ακρίβεια στον καθορισμό των μηκών των επιμέρους τμημάτων της γραμμής ώστε να εξασφαλίζεται η κατά το δυνατόν συμμετρική κατανομή των επαγόμενων τάσεων, καθώς και σωστός συντονισμός μεταξύ των σημείων γείωσης και των σημείων αντιμετάθεσης των μανδύων. Παράλληλα, είναι αναγκαίο να προβλεφθούν ειδικές διατάξεις προστασίας, όπως surge arresters ή καλωδιακά συστήματα μετάβασης (link boxes), για την αποτροπή υπερτάσεων και τη διατήρηση της ασφάλειας του εξοπλισμού.

Η κατασκευή των σημείων διασύνδεσης αυξάνει σημαντικά τη συνολική πολυπλοκότητα και το κόστος εγκατάστασης, ενώ απαιτείται και ιδιαίτερη προσοχή στη συντήρησή τους. Επιπλέον, σε περιπτώσεις βλαβών ή σφαλμάτων στο καλώδιο, η ανάλυση της προέλευσης της βλάβης γίνεται πιο απαιτητική λόγω της πολυπλοκότητας των διασυνδέσεων και των κυκλωμάτων γείωσης. Συνεπώς, ο σχεδιασμός ενός Cross-Bonded συστήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο τα ηλεκτρομαγνητικά πλεονεκτήματα όσο και τις πρακτικές παραμέτρους υλοποίησης και λειτουργίας.

1.6 Σφάλματα σε Υπόγειες Γραμμές

Οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, αν και προσφέρουν αυξημένη προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες και αισθητικά πλεονεκτήματα, υπόκεινται σε συγκεκριμένες μορφές σφαλμάτων που μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία και την αξιοπιστία του δικτύου. Τα σφάλματα αυτά, τα οποία ενδέχεται να είναι θερμικής, ηλεκτρικής ή μηχανικής φύσης, είναι συχνά πιο δύσκολο να εντοπιστούν και να επιδιορθωθούν σε σχέση με αντίστοιχα σφάλματα σε εναέριες γραμμές.

Η πιο χαρακτηριστική κατηγορία είναι τα βραχυκυκλώματα, τα οποία συμβαίνουν, όταν η μόνωση του καλωδίου υποστεί φθορά ή καταστροφή, επιτρέποντας στο ρεύμα να περάσει από τον αγωγό προς τον μανδύα (γείωση) ή προς άλλη φάση. Στην πράξη, αυτό μπορεί να προκληθεί από διάβρωση, υπερθέρμανση, φθορά της μόνωσης λόγω παλαιότητας ή μηχανικές καταπονήσεις (π.χ. κατά την εγκατάσταση ή από σεισμική δραστηριότητα).

Οι συνηθέστεροι τύποι σφαλμάτων σε υπόγειες γραμμές περιλαμβάνουν:

- **Σφάλματα μεταξύ φάσης προς γή:** Πρόκειται για περιπτώσεις κατά τις οποίες ο αγωγός φάσης έρχεται σε άμεση ηλεκτρική επαφή με τον γειωμένο μεταλλικό μανδύα του καλωδίου ή με το περιβάλλον του εδάφους. Η επαφή αυτή προκαλεί ανεπιθύμητη διαρροή ρεύματος προς τη γή, η οποία επιφέρει σημαντικές ηλεκτρικές διαταραχές, αυξημένες θερμικές απώλειες, καθώς επίσης και κίνδυνο για τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό και το προσωπικό συντήρησης. Η έγκαιρη ανίχνευση και αποκατάσταση

τέτοιων σφαλμάτων είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας των δικτύων μεταφοράς.

- **Σφάλματα μεταξύ φάσεων:** Πρόκειται για περιπτώσεις όπου αποτυγχάνει η μόνωση ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες φάσεις του υπόγειου καλωδίου, οδηγώντας σε άμεση ή εμμεση επαφή μεταξύ τους. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να προκληθούν από μηχανικές καταπονήσεις, διάβρωση, παρουσία υγρασίας ή ανεπαρκή συντήρηση, και συνήθως παράγουν μεγάλα ρεύματα βραχυκυκλώματος, ιδιαίτερα επικίνδυνα για το δίκτυο.
- **Διαμήκη σφάλματα:** Αναφέρονται σε περιπτώσεις όπου η μόνωση ενός καλωδίου υποβαθμίζεται προοδευτικά σε σημαντικό μήκος, χωρίς απαραίτητα να υπάρχει αρχικά σημειακή αστοχία. Η φθορά μπορεί να οφείλεται σε διάχυση υγρασίας, θερμική καταπόνηση, μερικές εκκενώσεις ή χημική γήρανση των μονωτικών υλικών. Αυτού του είδους τα σφάλματα είναι δύσκολο να εντοπιστούν έγκαιρα και συχνά οδηγούν σε μη αναστρέψιμη βλάβη του καλωδίου.
- **Σφάλματα στον μανδύα:** Πρόκειται για αστοχίες που εντοπίζονται στο μεταλλικό περίβλημα των καλωδίων και σχετίζονται κυρίως με φθορές, διαβρώσεις ή διακοπές στη συνέχεια του αγωγίμου μανδύα. Τέτοια σφάλματα διαταράσσουν την ισορροπία της γείωσης, οδηγούν σε κυκλικά ρεύματα και προκαλούν ανεπιθύμητες επαγόμενες τάσεις. Σε περίπτωση πλήρους απώλειας της γείωσης, η ασφάλεια και η σωστή λειτουργία του συστήματος τίθενται σε κίνδυνο.

Οι επιπτώσεις αυτών των σφαλμάτων μπορεί να κυμαίνονται από τοπική υπερθέρμανση, αύξηση των απωλειών, δημιουργία υπερτάσεων σε κρίσιμα σημεία, μέχρι και ολική κατάρρευση τμήματος του συστήματος. Επιπλέον, σε περίπτωση ασυμμετρικών σφαλμάτων, μπορεί να δημιουργηθούν ανεπιθύμητες διαφορές δυναμικού στη γείωση, γεγονός που ενέχει κινδύνους τόσο για το σύστημα όσο και για την ασφάλεια του προσωπικού.

Η κατανόηση της συμπεριφοράς των καλωδίων σε συνθήκες σφάλματος είναι κρίσιμη για τον σωστό σχεδιασμό και την αποτελεσματική προστασία των υπόγειων δικτύων. Σε επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, θα αναλυθούν περιπτώσεις λειτουργίας υπό κανονικές και μη κανονικές συνθήκες, καθώς και τα αντίστοιχα μέτρα μετριασμού των επιπτώσεων.

Εκτός των εσωτερικών αιτιών αστοχίας, οι υπόγειες γραμμές μπορεί να επηρεαστούν και από εξωτερικά σφάλματα που συμβαίνουν στο υπόλοιπο δίκτυο. Ισχυρές κεραυνικές εκκενώσεις, μεταβατικά φαινόμενα από λειτουργικές αλλαγές ή απορρίψεις φορτίων, καθώς και απότομες υπερτάσεις που μεταδίδονται από εναέρια σε υπόγεια τμήματα, είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε βλάβες της μόνωσης ή σε αστοχία των συστημάτων θωράκισης και γείωσης. Αυτές οι εξωτερικές επιδράσεις συχνά εκδηλώνονται ως βραχυκυκλώματα στον αγωγό ή στον μανδύα και απαιτούν ιδιαίτερη μέριμνα στον σχεδιασμό των συστημάτων προστασίας.

1.7 Τυποποιήσεις και Εφαρμογές σε Διεθνές Περιβάλλον

Η τεχνική του Cross-Bonding αποτελεί βασική πρακτική σε δίκτυα μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης που βασίζονται σε υπόγεια καλώδια. Η εφαρμογή της είναι διαδεδομένη διεθνώς και τεκμηριώνεται μέσα από διεθνή πρότυπα και τεχνικούς οδηγούς που έχουν συνταχθεί από φορείς όπως η IEC, η IEEE και η CIGRE.

1.7.1 Διεθνή Πρότυπα και Τεχνικές Οδηγίες

Η μελέτη, ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση συστημάτων Cross-Bonding καθοδηγούνται από μια σειρά διεθνώς αναγνωρισμένων προτύπων και τεχνικών οδηγιών, τα οποία παρέχουν θεωρητικό υπόβαθρο, υπολογιστικές μεθόδους και τεχνικές απαιτήσεις. Ενδεικτικά, τα πλέον καθιερωμένα πρότυπα περιλαμβάνουν:

- **IEC 60287** - Υπολογισμός των ρευμάτων φορτίου σε καλώδια ισχύος υπό ονομαστικές συνθήκες, με έμφαση στις θερμικές απώλειες στους μανδύες.
- **IEC 60840 & IEC 62067** - Οδηγίες για την εγκατάσταση και δοκιμή καλωδίων υψηλής και υπερυψηλής τάσης.
- **IEEE Std 575** - Κατευθυντήριες γραμμές για τη γείωση των μεταλλικών περιβλημάτων καλωδίων περιλαμβάνοντας Single-Point (SP) και Cross-Bonding (CB) διατάξεις.
- **CIGRE 398** - Τεχνική τεκμηρίωση που εστιάζει στις εφαρμογές, τους περιορισμούς και τα πλεονεκτήματα των Cross-Bonded συστημάτων σε καλωδιακές εγκαταστάσεις μεγάλης απόστασης.

Εκτός από τα παραπάνω, μπορεί να χρησιμοποιούνται και επιμέρους τοπικά ή ιδιωτικά πρότυπα, τεχνικές οδηγίες από διαχειριστές συστημάτων (π.χ. ΑΔΜΗΕ, ΤΣΟ), καθώς και προδιαγραφές κατασκευαστών, ανάλογα με τις συνθήκες εγκατάστασης, τις απαιτήσεις αξιοπιστίας και την πολυπλοκότητα του έργου.

1.7.2 Παρατηρήσεις Εφαρμογής

Αν και δεν δημοσιεύονται πάντα αναλυτικά δεδομένα για μεμονωμένα έργα (λόγω απορρήτου ή εμπορικών συμφωνιών), η πρακτική του Cross-Bonding θεωρείται καθολική για τα εξής είδη έργων:

- **Αστικά δίκτυα υψηλής τάσης**, όπου απαιτείται περιορισμός των επαγόμενων ρευμάτων, καθώς και για λόγους πυκνής δόμησης.
- **Υποβρύχιες και χερσαίες διασυνδέσεις μεγάλου μήκους**, για τον έλεγχο των απωλειών και την αποφυγή κυκλικών ρευμάτων στους μανδύες.
- **Διασυνδέσεις σε περιοχές με ευαίσθητο περιβάλλον ή περιορισμούς εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων**, όπου η σωστή διαχείριση των γειώσεων έχει κρίσιμο ρόλο.

1.8 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τη λειτουργία και τις τεχνικές προκλήσεις των υπόγειων καλωδιακών συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Δόθηκε έμφαση στη δομή των καλωδίων, στα προβλήματα που ανακύπτουν από την παρουσία επαγόμενων ρευμάτων στους μανδύες, καθώς και στις τεχνικές γείωσης που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπισή τους.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην τεχνική του Cross-Bonding, ως μια αποτελεσματική λύση για την μείωση των επαγόμενων ρευμάτων, των επαγόμενων τάσεων και την αύξηση της θερμικής και λειτουργικής απόδοσης των γραμμών.

Παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας, οι υλοποιήσεις της τεχνικής αυτής, καθώς και οι επιπτώσεις και περιορισμοί που συνεπάγονται.

Τέλος, αναφέρθηκαν οι βασικοί τύποι σφαλμάτων που ενδέχεται να εμφανιστούν στις υπόγειες γραμμές και παρουσιάστηκαν ενδεικτικές εφαρμογές του Cross-Bonding, σε συνδυασμό με τις σχετικές προδιαγραφές και τα πρότυπα σχεδιασμού.

Το θεωρητικό αυτό υπόβαθρο αποτελεί τη βάση για την προσομοιωτική ανάλυση και την αξιολόγηση που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Θεωρητική Τεκμηρίωση και Υπολογιστική Ανάλυση της Μεθόδου Cross-Bonding σε Καλωδιακά Συστήματα

Η μέθοδος Cross-Bonding αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά τεχνικά μέσα για τον περιορισμό των απωλειών ισχύος και τη βελτίωση της απόδοσης σε υπόγεια καλωδιακά δίκτυα, ιδιαίτερα σε συστήματα υψηλής και μέσης τάσης. Βασίζεται στην αρχή της εναλλασσόμενης σύνδεσης των μεταλλικών μανδυνών των τριών φάσεων, με στόχο την εξισορρόπηση των επαγόμενων τάσεων και την αποφυγή κυκλοφορίας ρευμάτων στη γείωση. Η θεωρητική θεμελίωση της μεθόδου και η προσομοίωση της μέσω κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων είναι κρίσιμη για την επιτυχημένη της εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες, καθώς επιτρέπει την κατανόηση των φαινομένων που αναπτύσσονται και τη βελτιστοποίηση της εγκατάστασης.

Η ανάλυση των συστημάτων Cross-Bonding απαιτεί καλή κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των φάσεων και του τρόπου σχηματισμού των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες.

Τα πρώτα μοντέλα βασίζονταν σε απλοποιημένες παραδοχές για τα επαγόμενα ηλεκτρικά πεδία, ωστόσο με την πρόοδο των υπολογιστικών εργαλείων, κατέστη εφικτή η ανάπτυξη ακριβέστερων πολυπαραμετρικών μοντέλων.

Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται σε βιβλιογραφικές μελέτες που συμβάλλουν στην κατανόηση της θεωρητικής και υπολογιστικής διάστασης του cross-bonding. Οι εργασίες που ανασκοπούνται περιλαμβάνουν αναλύσεις κυκλωματικού τύπου και ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μελέτες που εξετάζουν τη σχέση μεταξύ των γεωμετρικών και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του συστήματος (μήκος καλωδίων, διατομές αγωγών και μανδύων, κλπ) και των επαγόμενων τάσεων στους μανδύες.

Επιπλέον, καταγράφονται εργασίες που προχωρούν πέραν της βασικής θεωρίας, ενσωματώνοντας τη μέθοδο cross-bonding στο συνολικό σχεδιασμό του συστήματος μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων των εξαρτημάτων όπως τα κουτιά σύνδεσης (link boxes), οι γειώσεις, οι μονωτήρες και οι ακροδέκτες.

Η παρούσα ανασκόπηση στοχεύει στην ανάδειξη των θεωρητικών βάσεων που υποστηρίζουν την τεχνική του cross-bonding, καθώς και στη συστηματική παρουσίαση των μεθόδων ανάλυσης και προσομοίωσης που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Το περιεχόμενο αυτό αποτελεί πολύτιμο υπόβαθρο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των υπόγειων καλωδιακών γραμμών και για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους με βάση επιστημονικά τεκμηριωμένα κριτήρια.

Μελέτες :

Στη μελέτη [1], παρουσιάζεται μια λεπτομερής προσομοίωση των συχνοτικών και ηλεκτρομαγνητικών παροδικών αποκρίσεων διασταυρούμενα γειωμένων καλωδίων (Cross-Bonded cables), με χρήση ενός νέου υπολογιστικού μοντέλου που βασίζεται σε ακριβείς ηλεκτρικές παραμέτρους (RLC) των καλωδίων. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τον μη ιδανικό χαρακτήρα των γειώσεων και των συνδέσεων, καθώς και τα φαινόμενα σύζευξης μεταξύ των φάσεων. Μέσω της χρήσης της νέας υπολογιστικής μονάδας LCD και της επικύρωσης με τη μέθοδο ETL, καταδείχθηκε ότι οι αυτεπαγωγές και η αλληλεπίδραση μεταξύ των φάσεων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος, ιδίως σε συνθήκες μεταβατικών φαινομένων ή σφαλμάτων.

Πέρα από τις υψηλές τάσεις, αντίστοιχες προσεγγίσεις έχουν εφαρμοστεί και σε συστήματα μέσης τάσης, όπως αναδεικνύεται στη μελέτη [3], η οποία επικεντρώνεται στην ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς υπόγειων μονοπολικών καλωδίων μέσης τάσης που

λειτουργούν σε παράλληλη διάταξη. Βασισμένοι σε πραγματική εγκατάσταση καλωδίων που συνδέει ένα αιολικό πάρκο 38MW με το δίκτυο μεταφοράς, οι συγγραφείς διερεύνησαν την επαγωγή τάσεων και ρευμάτων στους μεταλλικούς μανδύες υπό διαφορετικά σενάρια σύνδεσης, όπως γείωση στα άκρα και διασταυρούμενη γείωση (Cross-Bonding), καθώς και υπό μεταβολές σε κρίσιμες παραμέτρους όπως η αντίσταση γείωσης και ο αριθμός μεταθέσεων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω ATP/EMTP αποκάλυψαν ότι η επαγόμενη τάση στους μανδύες ενδέχεται να είναι σημαντική, ιδίως σε καλώδια μεγάλου μήκους και μπορεί να περιοριστεί μόνο με τον κατάλληλο συνδυασμό διασταυρούμενης γείωσης και χαμηλών αντιστάσεων γείωσης και στα δύο άκρα του καλωδίου. Επίσης, φάνηκε πως η εφαρμογή μόνο της γείωσης στα άκρα οδηγεί σε αυξημένα ρεύματα στους μανδύες, προκαλώντας επιπλέον απώλειες. Η μελέτη αυτή, επισημαίνει ότι για την αποτελεσματική μείωση των τάσεων υπό συνθήκες σφάλματος απαιτείται η χρήση απαγωγών υπερτάσεων (SVLs) στα σημεία cross-bonding, καθώς η απλή εφαρμογή της μεθόδου δεν είναι επαρκής σε περιπτώσεις ασύμμετρων ρευμάτων όπως τα μονοφασικά βραχυκυκλώματα.

Στο ίδιο πνεύμα η μελέτη [7] επικεντρώνεται στον υπολογισμό των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες μονοπολικών καλωδίων και σε γειτονικές μεταλλικές σωληνώσεις, τόσο σε κανονική λειτουργία όσο και υπό μεταβατικά φαινόμενα. Η ανάλυση βασίζεται σε προσομοιώσεις μέσω των λογισμικών ATP-EMTP, EMTP-RV και PSCAD/EMTDC, με στόχο την αξιολόγηση της ακρίβειας διαφορετικών μοντέλων όπως τα μοντέλα ισοδύναμου τύπου Π, ULM και TDCP. Έμφαση δόθηκε στις διατάξεις trefoil και οριζόντιας παράθεσης, καθώς και στη σημασία της αναπαράστασης των αγωγίμων ιδιοτήτων της γης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι αγωγιμες ιδιότητες του εδάφους έχουν σημαντική επίδραση στις επαγόμενες τάσεις κατά τη μόνιμη κατάσταση, ενώ σε υψηλές συχνότητες η επίδραση αυτή είναι περιορισμένη. Επιπλέον, τονίζεται ότι το μοντέλο ULM εμφανίζει υψηλή ακρίβεια τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση, σε αντίθεση με το TDCP, το οποίο παρουσιάζει σημαντικά σφάλματα. Συνολικά, η εργασία αυτή επιβεβαιώνει τη σημασία της επιλογής κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης αλλά και της σωστής αναπαράστασης των παραμέτρων γείωσης και της γεωμετρίας των καλωδίων για την ακριβή αποτίμηση των επαγόμενων τάσεων στους μανδύες.

Επεκτείνοντας την ερευνητική προσέγγιση που επικεντρώνεται στη μείωση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μεταλλικούς μανδύες καλωδίων, αξιολογείται και η εφαρμογή διασταυρούμενης γείωσης (cross-bonding) σε υπόγεια καλώδια μέσης τάσης μεγάλης απόστασης [12], τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη διασύνδεση αιολικών πάρκων με το δίκτυο μεταφοράς. Μέσα από αριθμητική ανάλυση και επαλήθευση με πραγματικά δεδομένα πεδίου, διαπιστώθηκε ότι τα επαγόμενα μεγέθη στους μανδύες συχνά υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια, προκαλώντας εν δυνάμει αστοχίες στο σύστημα. Η χρήση του λογισμικού ATP-EMTP επέτρεψε τον προσδιορισμό των επιδράσεων διαφόρων παραμέτρων, όπως το συνολικό μήκος του καλωδίου, η διατομή του και το επίπεδο τάσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ορθή υλοποίηση της διασταυρούμενης γείωσης, ειδικά σε συνδυασμό με ελαχιστοποίηση της αντίστασης γείωσης στα άκρα, μπορεί να μειώσει σημαντικά τόσο τις επαγόμενες τάσεις όσο και τα ρεύματα στους μανδύες. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι τα επαγόμενα μεγέθη παρουσιάζουν αυξητική τάση όσο αυξάνεται το μήκος και η διατομή του καλωδίου, ενώ είναι εντονότερα σε χαμηλότερα επίπεδα ονομαστικής τάσης.

Συμπληρωματικά προς τα προηγούμενα ευρήματα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση που πραγματοποιείται στη μελέτη [14], όπου εξετάζεται επίσης η δυνατότητα εφαρμογής cross-bonding σε καλωδιακά συστήματα μέσης τάσης με υψηλή ικανότητα μεταφοράς ρεύματος, ακολουθώντας πρακτικές που ως πρόσφατα ήταν κοινές κυρίως σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης. Η μελέτη εστιάζει στην αξιολόγηση των επαγόμενων ρευμάτων που εμφανίζονται στους μεταλλικούς μανδύες όταν τα καλώδια είναι απλά γειωμένα στα άκρα, και προτείνει την υιοθέτηση συνδέσεων cross-bonding ως λύση για τη μείωση των θερμικών απωλειών, της γήρανσης των μονωτικών υλικών και του κινδύνου αστοχίας λόγω υπερθέρμανσης. Μέσα από την παρουσίαση ενός νέου τύπου σύνδεσης με δυνατότητα διαχωρισμού του μανδύα, διαμορφώνονται τεχνικές προδιαγραφές για τη δοκιμή και την πιστοποίηση τέτοιων εφαρμογών σε συστήματα μέσης τάσης.

Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι ακόμα και υφιστάμενες εγκαταστάσεις μπορούν να αναβαθμιστούν με κατάλληλες επεμβάσεις χωρίς να απαιτείται αντικατάσταση του κύριου μονωτικού σώματος. Το σύνολο των παραπάνω καταδεικνύει ότι η τεχνική cross-bonding αποτελεί όχι μόνο ενεργειακά αποδοτική λύση, αλλά και τεχνικά εφαρμόσιμη σε μεγαλύτερη γκάμα καλωδιακών συστημάτων απ'ότι παλαιότερα θεωρούνταν.

Πέρα από τις γενικές αρχές και θεωρητικές αναλύσεις της μεθόδου διασταυρούμενης γείωσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και πρόσφατες εφαρμογές της σε πραγματικά καλωδιακά δίκτυα, όπου αξιολογείται η αποδοτικότητα της υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας και αυξημένων θερμικών φορτίσεων. Μια τέτοια περίπτωση αποτελεί η μελέτη της εταιρείας e-distribuzione [15], που εξετάζει την απόδοση του συστήματος cross-bonding σε καλώδια Μέσης Τάσης, υπό την επίδραση εποχιακών μεταβολών και με γνώμονα τη μείωση των επαγόμενων ρευμάτων στους μανδύες. Στο πλαίσιο του έργου Ca.Mis.Arm. Πραγματοποιήθηκε συστηματική εκστρατεία μετρήσεων σε καλωδιακές γραμμές MV για την καταγραφή της συχνότητας και έντασης των ρευμάτων στους μανδύες, με έμφαση στην περίοδο θερινής αιχμής, κατά την οποία παρατηρούνται αυξημένες θερμικές καταπονήσεις. Οι μετρήσεις ανέδειξαν τη δημιουργία θερμικών “hot-spots” σε σημεία συνδέσεων, τα οποία, υπό συνεχή καταπόνηση, ενδέχεται να εξελιχθούν σε σφάλματα φάσης-γης ή και διφασικά σφάλματα, προκαλώντας προσωρινές διακοπές στο δίκτυο. Ως τεχνική αντιμετώπισης, η εταιρεία εφάρμοσε τη μέθοδο cross-bonding μέσω ειδικών διατάξεων μεταγωγής (transposition boxes), προκειμένου να μειώσει τις επαγόμενες τάσεις και κατά συνέπεια τα επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες. Η υλοποίηση περιλάμβανε πειραματική εγκατάσταση σε τρεις τομές καλωδιακής γραμμής σε περιοχές της Νότιας Ιταλίας (Campania, Puglia), όπου και συλλέχθηκαν δεδομένα πριν και μετά την εφαρμογή του συστήματος μεταγωγής, με χρήση μετρητικών οργάνων ισχύος και ποιότητας τάσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν σαφή μείωση του ρεύματος στους μανδύες σε επιλεγμένα σημεία του συστήματος (κυρίως στο τέλος της γραμμής), γεγονός που αποδίδεται στη διαφορετική γεωμετρία και μήκος των διατομών, αλλά και στη φασική αλληλεπίδραση μεταξύ της χωρητικής και της επαγωγικής συνιστώσας του ρεύματος. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, ενώ η τεχνική cross-bonding δεν εξαλείφει πλήρως τις επαγόμενες τάσεις, αποτελεί μια αποτελεσματική τεχνική για τον περιορισμό των θερμικών καταπονήσεων και την παράταση της διάρκειας ζωής των υπογείων καλωδιακών συστημάτων. Σημειώνεται επίσης, ότι η e-distribuzione σκοπεύει να επεκτείνει τη χρήση των διατάξεων μεταγωγής και σε άλλες εγκαταστάσεις, ώστε να ενισχύσει τον σχεδιασμό των μελλοντικών καλωδίων και να τεκμηριώσει περαιτέρω τη συμπεριφορά των ρευμάτων μανδύα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Στο πλαίσιο της περαιτέρω εμβάθυνσης της τεχνικής cross-bonding, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη [17], όπου αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο για την ανάλυση των ρευμάτων στους μανδύες (sheath currents) μέσης τάσης σε καλώδια μονού αγωγού που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η χρήση τέτοιων καλωδίων, παρότι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μεταφορά υψηλών ρευμάτων, συνοδεύεται από προβλήματα, όπως αυξημένες απώλειες λόγω επαγωγικών κυκλοφορούντων ρευμάτων στους μεταλλικούς μανδύες καθώς και από την εμφάνιση υψηλών επαγόμενων τάσεων σε μη γειωμένα άκρα, που ενέχουν κινδύνους ηλεκτροπληξίας. Το μοντέλο που προτείνεται βασίζεται σε προσομοιώσεις Matlab/Simulink και αξιολογεί διαφορετικές διατάξεις σύνδεσης των μανδύων, με στόχο τη μείωση των ρευμάτων και των απωλειών που αυτά προκαλούν. Το μοντέλο που προτάθηκε αξιολογήθηκε με πραγματικά δεδομένα από υπάρχουσα υπόγεια γραμμή μέσης τάσης, αποδεικνύοντας την ακρίβεια του τόσο για μελέτες κατά τη φάση του σχεδιασμού, όσο και για την παρακολούθηση της απόδοσης σε ήδη λειτουργούντα δίκτυα. Η ανάλυση έδειξε ότι, ακόμη και υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, τα επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες είναι σημαντικά, γεγονός που επιβάλλει την επιλογή κατάλληλων διατάξεων γείωσης. Συγκεκριμένα, η τρίτη διαμόρφωση, η οποία ονομάζεται single-sheath bonding, αποδείχθηκε η πλέον αποδοτική. Σε αυτή την διάταξη μόνο μια θήκη καλωδίου (π.χ. της φάσης B) είναι σταθερά γειωμένη και στα δύο άκρα και λειτουργεί ως εναλλακτικός αγωγός για τη διέλευση ρευμάτων σφάλματος ή επαγωγών, ενώ οι υπόλοιπες δύο θήκες (των φάσεων A και C) είναι single-point bonded, εξαλείφοντας σχεδόν πλήρως την κυκλοφορία ρεύματος σε αυτές. Με αυτή την τεχνική, αποφεύγεται η ανάγκη εγκατάστασης εξωτερικού

παράλληλου αγωγού (που θα έφερε πρόσθετο κόστος), ενώ επιτυγχάνεται ουσιαστική μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των συνολικών θερμικών απωλειών. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές σε καλωδιακές γραμμές μεγάλης έντασης, καθώς προσφέρει ενεργειακά και οικονομικά οφέλη, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια ή η αξιοπιστία του συστήματος.

Επιπλέον, η εργασία [18] παρέχει μια συγκριτική προσέγγιση των βασικών μεθόδων “ειδικής σύνδεσης” που εφαρμόζονται σε γραμμές μέσης και υψηλής τάσης, τόσο υπό κανονικές όσο και υπο συνθήκες σφάλματος. Η εν λόγω μελέτη εστιάζει επίσης, στην ανασκόπηση, αξιολόγηση και προσομοίωση ειδικών τεχνικών σύνδεσης των μεταλλικών μανδύων καλωδίων μέσης και υψηλής τάσης, με στόχο τη μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων και κατ’επέκταση, των απωλειών ισχύος. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τη σύνδεση με αντιδραστικές διατάξεις (reactance bonding), τη χρήση μετασχηματιστών μανδύα (sheath bonding transformers), καθώς και υβριδικά συστήματα. Οι συγγραφείς πραγματοποιούν προσομοιώσεις στο περιβάλλον Matlab/Simulink, συγκρίνοντας τις επιδόσεις των επιμέρους διατάξεων σε καλωδιακή γραμμή μεταφοράς στην Ιταλία, τόσο σε κανονική λειτουργία όσο και κατά την εμφάνιση μονοπολικού σφάλματος γείωσης (single-line-to-ground fault). Απο τα αποτελέσματα προκύπτει πως σε συνθήκες ομαλής λειτουργίας, οι τεχνικές single-sheath bonding και mixed system bonding επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη μείωση των ρευμάτων στους μανδύες και άρα τις χαμηλότερες θερμικές απώλειες. Ωστόσο, σε καταστάσεις σφάλματος, η τεχνική single-sheath bonding παρουσιάζει αυξημένο ρεύμα σε έναν απο τους αγωγούς φάσης, γεγονός που καθιστά την τεχνική mixed system ως την πιο ισορροπημένη και αποδοτική επιλογή. Η εργασία επιβεβαιώνει ότι η σωστή επιλογή της τεχνικής σύνδεσης των μανδύων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη θερμική και λειτουργική αξιοπιστία των καλωδιακών συστημάτων και ενισχύει τη σημασία των εργαλείων προσομοίωσης στο σχεδιαστικό στάδιο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη πραγματικού καλωδιακού συστήματος μέσης τάσης, όπου αξιολογείται εμπειρικά η αποδοτικότητα και οι περιορισμοί της μη-πλήρους διασταυρούμενης γείωσης, συμβάλλοντας στην κατανόηση εναλλακτικών πρακτικών γείωσης. Συγκεκριμένα, το άρθρο [20] εξετάζει την εφαρμογή της ασύμμετρης διασταυρούμενης γείωσης (incomplete cross-bonding) σε μια υπαρκτή γραμμή μέσης τάσης, παρουσιάζοντας τόσο αριθμητικά αποτελέσματα όσο και μετρήσεις πεδίου. Αν και η πλήρης διασταυρούμενη γείωση αποτελεί συνήθη πρακτική σε καλώδια υψηλής τάσης με υψηλά φορτία, στις γραμμές μέσης τάσης εφαρμόζεται σπάνια, κυρίως λόγω του περιορισμένου φορτίου και των αντίστοιχα μικρών θερμικών απωλειών. Ωστόσο, στην περίπτωση της υπο εξέταση γραμμής, όπου καταγράφηκαν σημαντικά φορτία, διαπιστώθηκε ότι ακόμη και μονοσήμαντη διασταύρωση των μανδύων σε ένα μόνο σημείο της διαδρομής είναι ικανή να μειώσει τα επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες, να περιορίσει τις απώλειες και να αποφέρει οικονομικά οφέλη στον διαχειριστή. Η μαθηματική μοντελοποίηση σε συνδυασμό με επιτόπιες μετρήσεις επαλήθευσε ότι το προτεινόμενο σχήμα γείωσης δεν δημιουργεί υπερβολικές τάσεις στους μανδύες ακόμη και σε συνθήκες βραχυκυκλώματος. Επιπλέον, επισημάνθηκε ότι σε γραμμές με φόρτιση κοντά στο θερμικό τους όριο, η μείωση της επίδρασης των ρευμάτων στους μανδύες μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ρεύματος (ampacity). Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, παρότι τέτοιες περιπτώσεις δεν είναι συχνές, υπάρχει δυνατότητα στοχευμένης εφαρμογής μερικής διασταύρωσης σε κύριες καλωδιακές γραμμές μέσης τάσης, ιδίως όταν αυτές διασχίζουν πολλαπλούς υποσταθμούς MT/XT και παρουσιάζουν σημαντική παραλλακτικότητα τόσο στο φορτίο όσο και στη διατομή των αγωγών. Τέλος, υπογραμμίζεται ότι τέτοιες τροποποιήσεις απαιτούν μακροπρόθεσμο σχεδιασμό και συναίνεση του δαιχειριστή, δεδομένης της διστακτικότητας για επενδύσεις πέραν της καθημερινής λειτουργίας του δικτύου.

Με σκοπό την περαιτέρω κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τα επαγόμενα ρεύματα και τις συνολικές απώλειες σε καλωδιακά δίκτυα με cross-bonding, η μελέτη [19] προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, η μελέτη επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας υπολογισμού των επαγόμενων ρευμάτων στους μεταλλικούς μανδύες καλωδίων υψηλής τάσης, εστιάζοντας στη σύγκριση δύο τεχνικών cross-bonding: της συνεχούς (continuous cross-bonding) και της κατά τμήματα (sectionalized cross-bonding). Η

προτεινόμενη προσέγγιση υπερβαίνει τις απλοποιητικές παραδοχές του διορθωτικού συντελεστή που προτείνει το πρότυπο IEC 60287, λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες φυσικές παραμέτρους που συχνά αγνοούνται, όπως το συνολικό μήκος διαδρομής και η εναλλαγή φάσεων. Απο τις προσομοιώσεις προκύπτει ότι παρόλο που η συνεχής γείωση παρουσιάζει υψηλότερες υπολειπόμενες επαγόμενες τάσεις στους μανδύες, οδηγεί σε χαμηλότερα επαγόμενα ρεύματα, λόγω της αυξημένης συνολικής αντίστασης των διασυνδεδεμένων μανδύων σε όλο το μήκος της γραμμής. Αντίθετα, στη γείωση κατά τμήματα, οι επαγόμενες τάσεις περιορίζονται ανά τμήμα, αλλά οι επαγωγικές απώλειες είναι σημαντικά υψηλότερες. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε καλώδια εγκατεστημένα τόσο σε τριγωνική όσο και σε επίπεδη διάταξη, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα της να παρέχει ακριβέστερες εκτιμήσεις για τις ενεργειακές απώλειες, τη θερμοκρασία λειτουργίας και την ampacity (ονομαστική ικανότητα μεταφοράς ρεύματος). Αναφέρει επίσης, ότι η σύγκριση με τις τιμές που προτείνει το πρότυπο IEC για τη μέθοδο sectionalized bonding ανέδειξε αποκλίσεις που δεν μπορούν να αγνοηθούν, ενισχύοντας την ανάγκη για πιο ρεαλιστικά μοντέλα στον υπολογισμό των ρευμάτων μανδύα σε καλωδιακά συστήματα μεταφοράς.

Τέλος, επεκτείνοντας τις προηγούμενες τεχνικές θεωρήσεις, πρόσφατες μελέτες έχουν προτείνει εναλλακτικές μορφές διασταυρούμενης γείωσης [13] με σκοπό τη μείωση των απωλειών ισχύος σε καλωδιακά δίκτυα μέσης τάσης. Σε αντίθεση με τις κλασικές διατάξεις όπου απαιτείται η εγκατάσταση επιπλέον συνδέσμων και ειδικών κιβωτίων (link boxes) κατά μήκος της καλωδιακής διαδρομής, προτείνεται η υλοποίηση των συνδέσεων θωρακίσεων απευθείας στους υποσταθμούς MT/XT, δηλαδή στα σημεία τερματισμού των καλωδίων. Η προσέγγιση αυτή αποδεικνύεται συμφέρουσα από πλευράς κόστους, καθώς μειώνει σημαντικά τις απαιτούμενες επεμβάσεις στο πεδίο, χωρίς να απαιτείται εκσκαφή ή αντικατάσταση των υφιστάμενων συνδέσμων. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από τη διάταξη του δικτύου και κυρίως από το επίπεδο φορτίου των γραμμών. Όπως διαπιστώθηκε μέσω ανάλυσης τόσο θεωρητικών όσο και πραγματικών δικτύων, όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο της γραμμής, τόσο εντονότερη είναι η μείωση στις κυκλοφορούσες ρευματοφόρες θωρακίσεις και, συνεπώς στις θερμικές απώλειες. Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι σε απλές, μονοκατευθυνόμενες γραμμές χωρίς διακλαδώσεις, όπου οι θωρακίσεις γειώνονται μόνο στα άκρα της διαδρομής, παρατηρούνται τα καλύτερα αποτελέσματα. Επιπλέον, σύμφωνα με υπολογισμούς σε πραγματικό δίκτυο διανομής στην Πολωνία, η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής θα μπορούσε να οδηγήσει σε ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης των 7 MWh, που αντιστοιχεί σε περίπου 2.5 GWh ετησίως, καταδεικνύοντας τη σημαντική συνεισφορά της μεθόδου τόσο σε ενεργειακή όσο και σε οικονομική απόδοση.

Συνοψίζοντας, η θεωρητική και μαθηματική τεκμηρίωση του συστήματος cross-bonding αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο για την αξιόπιστη και αποδοτική εφαρμογή του σε σύγχρονες υποδομές μέσης και υψηλής τάσης. Οι μοντελοποιήσεις που εξετάστηκαν δεν περιορίζονται στην ανάλυση στατικών φαινομένων, αλλά επεκτείνονται και στην κατανόηση μεταβατικών καταστάσεων, ενισχύοντας τον τεχνικό σχεδιασμό και την πρόβλεψη λειτουργικών συμπεριφορών. Η διεθνής βιβλιογραφία αποτυπώνει τη συνεχή πρόοδο του πεδίου, με έμφαση στην αυτοματοποιημένη βελτιστοποίηση και την επίτευξη υψηλής ακρίβειας σε προσομοιώσεις πραγματικού χρόνου.

Η σε βάθος κατανόηση των φαινομένων που αναλύθηκαν στην παρούσα ενότητα καθίστανται ακόμη πιο κρίσιμη όταν το σύστημα καλείται να ανταποκριθεί σε ακραίες λειτουργικές συνθήκες, όπως βραχυκυκλώματα ή σφάλματα γείωσης, κατα τις οποίες αναπτύσσονται έντονα παροδικά φαινόμενα. Οι περιπτώσεις αυτές εξετάζονται εκτενώς στην επόμενη υποενότητα.

2.2: Αντιμετώπιση Σφαλμάτων, Ρεύματα Βλαβών και Υπερτάσεις

Η λειτουργία των υπόγειων καλωδιακών συστημάτων υπόκειται σε σημαντικές ηλεκτρικές καταπονήσεις, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια βλαβών και παροδικών φαινομένων. Τα σφάλματα, όπως βραχυκυκλώματα ή διακοπές στους μανδύες, μπορούν να προκαλέσουν αυξημένα ρεύματα βλαβών και υπερτάσεις που υπερβαίνουν τα όρια αντοχής των υλικών μόνωσης, των

μεταλλικών μανδυνών και των εξαρτημάτων γείωσης. Η μελέτη και η αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων είναι κρίσιμη για τη μακροχρόνια αξιοπιστία, ασφάλεια και διαθεσιμότητα του συστήματος.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις υπερτάσεις που προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως κεραυνοί, αλλά και από εσωτερικά μεταβατικά φαινόμενα όπως οι διακοπές φορτίου ή οι λειτουργίες διακοπών. Οι μεταλλικοί μανδύες των μονοπολικών καλωδίων, ειδικά σε διατάξεις διασταυρούμενης γείωσης (cross-bonding), είναι ευάλωτοι σε υπερτάσεις επαγωγικής φύσης. Επιπλέον, η ύπαρξη υψηλών ρευμάτων βλαβών εντός του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις που επιβαρύνουν την ηλεκτρική συμπεριφορά των καλωδίων.

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται τεχνικές και μεθοδολογίες, για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων, την καταγραφή και ανάλυση των ρευμάτων βλαβών, καθώς και η αξιολόγηση των υπερτάσεων υπό συνθήκες κεραυνικών πλήξεων ή λειτουργικών μεταβάσεων. Εξετάζονται σύγχρονα μοντέλα προσομοίωσης και τεχνικές προστασίας, όπως η χρήση αντικεραυνικών, η γείωση του συστήματος και η διαμόρφωση κατάλληλων γεωμετρικών εγκατάστασης. Μέσα από τη συστηματική ανάλυση, αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο οι σχεδιαστικές επιλογές και τα τεχνικά μέτρα μπορούν να περιορίσουν τις δυσμενείς επιπτώσεις των παροδικών φαινομένων και των σφαλμάτων στα καλωδιακά δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης.

Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω φαινομένων και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών τεχνικών αντιμετώπισης, ακολουθεί ανασκόπηση ενδεικτικών μελετών από τη διεθνή βιβλιογραφία. Κάθε μελέτη εστιάζει σε επιμέρους πτυχές των σφαλμάτων, των υπερτάσεων και των στρατηγικών προστασίας σε καλωδιακά δίκτυα, με στόχο τη συστηματική αποτίμηση των κρίσιμων παραμέτρων και των προτεινόμενων λύσεων.

Μελέτες:

Ένα σημαντικό ζήτημα που αναδεικνύεται στη βιβλιογραφία αφορά την εμφάνιση υπερτάσεων στους μεταλλικούς μανδύες καλωδίων κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, ιδίως σε συστήματα με cross-bonding. Σε σχετική μελέτη [2] που βασίστηκε σε προσομοιώσεις με το λογισμικό EMTP σε καλωδιακό σύστημα 154kV με παράλληλους shunt reactors, διαπιστώθηκε ότι η υπέρταση στον μανδύα είναι σημαντικά υψηλότερη σε cross-bonded καλώδια σε σύγκριση με εκείνα που διαθέτουν συμβατική γείωση. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στη σύνθετη σύζευξη μεταξύ των φάσεων και στην κυκλοφορία ρευμάτων επαγωγής στον μανδύα, που ενισχύεται υπό συνθήκες σφάλματος. Ειδικότερα, η μελέτη καταδεικνύει την εμφάνιση συντονισμένων υπερτάσεων, όταν τα καλώδια αποσυνδέονται από το σύστημα, με την περίοδο της καταπόνησης να αυξάνεται αναλογικά με τον βαθμό αντιστάθμισης του shunt reactor. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η επίδραση του αγωγού συνέχειας γείωσης (ECC-Earth Continuity Conductor), ο οποίος αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικός στη μείωση των υπερτάσεων όταν το σφάλμα εντοπίζεται στην εναέρια γραμμή που συνδέεται με το καλώδιο. Η αποτελεσματικότητα του ECC είναι σαφώς μικρότερη όταν το σφάλμα συμβαίνει εντός του ίδιου του καλωδίου. Ως βέλτιστη πρακτική προτάθηκε η τοποθέτηση του ECC και στα δύο άκρα της καλωδιακής γραμμής, εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη δυνατή απόσβεση των παροδικών τάσεων και ενίσχυση της προστασίας των μανδυνών. Τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν την ανάγκη προσεκτικού σχεδιασμού των cross-bonded συστημάτων υπό την επίδραση σφαλμάτων και την ενσωμάτωση κατάλληλων μέτρων προστασίας για τη διασφάλιση της λειτουργικής τους αξιοπιστίας.

Επιπλέον, η ανάλυση περιοδικών φαινομένων σε υπόγειες καλωδιακές γραμμές μεγάλης απόστασης αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για τη βελτιστοποίηση της μεθόδου cross-bonding, ιδίως σε συστήματα υψηλής τάσης.

Σε σύγχρονη μελέτη [10] που επικεντρώνεται στην ασφάλεια και αξιοπιστία υπόγειων καλωδιακών συστημάτων, εξετάζεται η περίπτωση σφαλμάτων σε καλώδια σήραγγας τάσης 220 kV και αναλύονται τόσο η κατανομή των ρευμάτων βλάβης όσο και η αποδοτικότητα διαφορετικών μεθόδων γείωσης. Η μελέτη βασίζεται σε αριθμητική μοντελοποίηση του

συστήματος μέσω ισοδύναμου κυκλώματος τύπου Π, ενώ για την ανάλυση των ρευμάτων στο μεταλλικό μανδύα εφαρμόζεται η μέθοδος “διπλής εξάλειψης” (double-sided elimination method), που επιτρέπει ταχεία και ακριβή υπολογιστική επίλυση. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συνεκτίμηση ταυτόχρονων σφαλμάτων μεταξύ αγωγού και μανδύα και παρέχει αναλυτική εικόνα για την κατανομή των ρευμάτων σφάλματος εντός της σήραγγας. Περαιτέρω, η εργασία προχωρά στην αξιολόγηση τριών εναλλακτικών γεωμετριών συστημάτων γείωσης για τους φρεάτιους χώρους εργασίας του δικτύου: spiral, cage, και bearing platform. Η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω πεπερασμένων στοιχείων στο περιβάλλον COMSOL Multiphysics, με σκοπό την εκτίμηση της απόδοσης απόσβεσης των ρευμάτων και του δυναμικού επαφής στην επιφάνεια του εδάφους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα όρια ασφάλειας για το ανθρώπινο σώμα (τάσεις επαφής και βήματος), με τις επιδόσεις κάθε μεθόδου να αξιολογούνται υπό διαφορετικά βάθη και αριθμούς αγωγών γείωσης. Απο τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η διάταξη τύπου cage είναι η πλέον αποδοτική, τόσο ως προς τη μείωση της πυκνότητας ρεύματος στα σημεία γείωσης όσο και ως προς τη συμμόρφωση με τα επιτρεπτά όρια δυναμικού, επιτυγχάνοντας επιφανειακή τάση κάτω από τα 955V (όριο ασφαλείας). Η συμβολή της μελέτης είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφενός μεν από την πρόταση μιας ταχείας και ακριβούς μεθοδολογίας προσομοίωσης των ρευμάτων μανδύα υπό συνθήκες σφάλματος, αφετέρου δε, από την πρόταση τεχνικών βελτιστοποίησης των συστημάτων γείωσης που προσφέρουν καλύτερη κατανομή του ρεύματος στο έδαφος, μειώνοντας τις απαιτήσεις σε χώρο και κόστος. Η πρακτική εφαρμογή της ανάλυσης σε καλωδιακή εγκατάσταση υπόγειας σήραγγας υψηλής τάσης (περιοχή Zhejiang, Κίνα) καταδεικνύει την ανάγκη ολοκληρωμένης προσέγγισης στο σχεδιασμό της γείωσης, ειδικά σε περιβάλλοντα περιορισμένου χώρου και αυξημένων απαιτήσεων ασφαλείας.

Εν συνεχεία, η μελέτη [4] που περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση ενός συστήματος 90kV μέσω του λογισμικού EMTP-RV, εξετάζει τη συμπεριφορά της εγκατάστασης υπό μεταβατικά φαινόμενα και πτώσεις κεραυνών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μεταγωγικές υπερτάσεις σπανίως προκαλούν επικίνδυνες υπερτάσεις στους μανδύες, ακόμη και χωρίς την παρουσία αντικεραυνικών (SVL). Ωστόσο, σε σπάνιες περιπτώσεις κεραυνών πολύ μεγάλης έντασης, οι υπερτάσεις μπορεί να ξεπεράσουν τα όρια ασφαλείας, ιδίως στα σημεία μετάβασης μεταξύ υπόγειου και εναέριου δικτύου. Παρά το γεγονός ότι παραδοσιακά τα SVL τοποθετούνταν σε κάθε σημείο cross-bonding, η μελέτη αποδεικνύει πως η συμβολή τους στη μείωση των υπερτάσεων είναι περιορισμένη και δεν επαρκεί για την αποφυγή του κινδύνου. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την ανάγκη για επανεξέταση των επιπέδων αντοχής των εξαρτημάτων διακοπής των μανδυνών. Τέλος, επισημαίνεται η ανάγκη για περαιτέρω πειραματική επαλήθευση μέσω δοκιμών πεδίου, καθώς και η διερεύνηση της συμπεριφοράς παρόμοιων διατάξεων σε άλλα επίπεδα τάσης, όπως τα 225kV. Η μελέτη αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της χρήσης προχωρημένων λογισμικών προσομοίωσης για την πρόβλεψη και τον έλεγχο των παροδικών φαινομένων στα σύγχρονα συστήματα cross-bonding.

Επιπρόσθετα, στην μελέτη [6] που πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού EMTP, εξετάστηκε η συμπεριφορά καλωδίου 220kV υπό κεραυνική καταπόνηση, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η διάταξη των καλωδίων (trefoil/flat), η απόσταση μεταξύ των αξόνων, το συνολικό μήκος εγκατάστασης του καλωδίου, καθώς και το μέγεθος και ο χαρακτήρας των φορτίων (με φορτίο ή χωρίς φορτίο λειτουργία). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν σε διαφορετικό βαθμό την τιμή της επαγόμενης υπέρτασης στον μανδύα, με κρίσιμη καμπή το όριο των 47.5kV, πάνω από το οποίο απαιτείται εγκατάσταση προστατευτικών διατάξεων, προκειμένου να διατηρηθεί η υπέρταση κάτω από τα όρια κρουστικής αντοχής (το μέγιστο επίπεδο τάσης που μπορεί να αντέξει για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ένα σύστημα μόνωσης, χωρίς να προκληθεί βλάβη). Συνεπώς, η μελέτη αυτή καταδεικνύει την ανάγκη για λεπτομερή ανάλυση διάταξης και συνθηκών λειτουργίας των καλωδίων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής τάσης και σε συνθήκες έκθεσης σε φυσικά φαινόμενα όπως κεραυνοί.

Στο ίδιο πνεύμα, η μελέτη [11] αναδεικνύει μια εφαρμογή της πρώτης υπόγειας διασύνδεσης 400kV στην Ολλανδία, στην οποία αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε ένα μοντέλο γραμμής μεταφοράς με επαγωγικά χαρακτηριστικά για την προσομοίωση του συνδυασμού καλωδίου-κουτιού cross-bonding. Οι παράμετροι του μοντέλου εξήχθησαν από πειραματικές μετρήσεις

με παλμική διέγερση και αξιοποιήθηκαν για την ανάλυση των υπερτάσεων σε περιβάλλον PSCAD, υπό εφαρμογή παλμών τύπου κεραυνού (1.2/50 μ s). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αιχμές υπέρτασης που εμφανίζονται στον μεταλλικό μανδύα μπορούν να μειωθούν αισθητά με την εγκατάσταση αντικεραυνικών 6.6kV στους κόμβους του μανδύα. Η εργασία υπογραμμίζει τη σημασία της μοντελοποίησης της επαγωγικής συμπεριφοράς των κουτιών γείωσης και αποδεικνύει την πρακτική αξία χρήσης αντικεραυνικών για την ενίσχυση της μονωτικής ικανότητας σε διασταυρούμενα σημεία μακρίων υπόγειων καλωδίων υψηλής τάσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η αξιοποίηση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης, και ειδικότερα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks- ANN), προσφέροντας νέες δυνατότητες στην πρόβλεψη επαγόμενων ηλεκτρικών φαινομένων σε καλωδιακές εγκαταστάσεις. Ειδικότερα, στη μελέτη [5] αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ANN για την πρόβλεψη της μέγιστης επαγόμενης τάσης στους μανδύες καλωδίων, σε συνδυασμένη γραμμή εναέριας και υπόγειας μετάδοσης 132kV, υπό την επίδραση κεραυνικής υπέρτασης. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού EMTP/RV, λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες παραμέτρους όπως η αντίσταση γείωσης του πύργου, η γεωμετρία του καλωδίου, ο τρόπος γείωσης των μανδύων και η θέση πτώσης του κεραυνού. Το προτεινόμενο μοντέλο εισήγαγε δέκα μεταβλητές εισόδου και τέσσερις εξόδους, επιτυγχάνοντας μέσο τετραγωνικό σφάλμα 0.00019 και σχετική απόκλιση μικρότερη από 8% από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τη σημασία του τρόπου γείωσης, με τις υψηλότερες επαγόμενες τάσεις να εμφανίζονται όταν οι μανδύες ήταν γειωμένοι μόνο στο ένα άκρο, κυρίως σε διατάξεις τύπου trefoil και flat. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η μείωση της αντίστασης γείωσης του πύργου οδηγεί σε περιορισμό των επαγόμενων τάσεων, ενώ η απόσταση του κεραυνού από τη γραμμή σχετίζεται αντιστρόφως με την ένταση της τάσης. Η μελέτη αυτή καταδεικνύει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης προηγμένων υπολογιστικών μεθόδων στην ανάλυση και σχεδίαση συστημάτων cross-bonding, προσφέροντας ένα χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη και αποτίμηση κινδύνων υπό παροδικά και κεραυνικά φαινόμενα.

Σύμφωνα με τη μελέτη [9], κατασκευάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο με κατανεμημένες παραμέτρους, το οποίο λαμβάνει υπόψη τη σύζευξη μεταξύ αγωγού και μεταλλικού μανδύα και αξιοποιήθηκε για την προσομοίωση ηλεκτρικών μεγεθών σε συνθήκες βλάβης. Παράλληλα, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος ταξινόμησης βλαβών με χρήση PSO-SVM, βασισμένος στη φάση και το πλάτος της τάσης και του ρεύματος του μανδύα, με ακρίβεια αναγνώρισης που υπερβαίνει το 97% για 25 διαφορετικά σενάρια κατάστασης. Για τον εντοπισμό συγκεκριμένων βλαβών, όπως ανοικτοί συνδέσμοι και τα τα βραχυκυκλώματα του εξωτερικού μανδύα, χρησιμοποιήθηκε μέθοδος εύρεσης μηδενικής τομής στις καμπύλες τάσης/ρεύματος, με πολύ υψηλή ακρίβεια (έως 99.6%) ακόμα και σε συνθήκες υψηλής αντίστασης μετάβασης (αντίσταση σφάλματος υψηλής τιμής). Η ανάλυση λαμβάνει υπόψη και την επίδραση παραγόντων όπως το ρεύμα αγωγού, η αντίσταση γείωσης και οι διαφορές μήκους των καλωδίων, καταλήγοντας ότι για διαφορές έως 100m η ακρίβεια διατηρείται, ενώ μειώνεται ελαφρώς σε μεγαλύτερες αποκλίσεις. Συνοψίζοντας, το προτεινόμενο σύστημα παρέχει ένα αποδοτικό εργαλείο για την αναγνώριση και εντοπισμό βλαβών σε καλώδια με cross-bonding, προσφέροντας τη βάση για μελλοντική πρακτική επαλήθευση των προσομοιώσεων.

Αξιοσημείωτες είναι και οι εφαρμογές μέσης τάσης μεγάλου μήκους, όπου η επιλογή της κατάλληλης διάταξης γείωσης των μεταλλικών μανδύων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη συνολική απόδοση του καλωδιακού συστήματος. Σε σχετική μελέτη [8], που εξετάζει τη σύνδεση ενός αιολικού πάρκου με το δίκτυο μέσω καλωδίου μήκους 18.37km, πραγματοποιήθηκαν αναλυτικές προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP/EMTP υπό συνθήκες τόσο ομαλής λειτουργίας, όσο και βραχυκυκλώματος. Η ανάλυση κάλυψε διάφορες τεχνικές γείωσης (μονή, διπλή, cross-bonding), με παραλλαγές στο μήκος των επιμέρους τμημάτων και στην αντίσταση γείωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνεχής διασταυρούμενη γείωση (cross-bonding) με δύο κύρια τμήματα και χαμηλή αντίσταση στα άκρα του καλωδίου προσφέρει την καλύτερη απόδοση, εξισορροπώντας τις επαγόμενες τάσεις και μειώνοντας τα ρεύματα στους μανδύες. Η μελέτη επικυρώθηκε με μετρήσεις πεδίου, ενώ επεκτάθηκε και σε

συνθήκες μεταβατικών φαινομένων (κεραυνικές και διακοπτικές υπερτάσεις), όπου φάνηκε ότι η χρήση οριακών διατάξεων τάσης στους συνδέσμους μανδύα (SVLs) συμβάλλει στον περιορισμό της καταπόνησης του συστήματος. Συνολικά, η μελέτη υπογραμμίζει ότι η ορθή εφαρμογή της μεθόδου cross-bonding μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε εγκαταστάσεις καλωδίων μεγάλης απόστασης, παρά τις αρχικές επιφυλάξεις πιθανών τεχνικών αστοχιών.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της αυξανόμενης ενσωμάτωσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) σε δίκτυα Μέσης Τάσης, η μέθοδος της διασταυρούμενης γείωσης αποκτά κρίσιμο ρόλο στον περιορισμό των επαγόμενων ρευμάτων και των απωλειών σε υπόγεια καλώδια μεγάλης έκτασης. Παράλληλα, η χρήση κατάλληλων συσκευών προστασίας όπως οι Sheath Voltage Limiters (SVLs) γίνεται αναγκαία για τη διαχείριση των υπερτάσεων στους μανδύες. Σχετική μελέτη [16] προτείνει μια νέα σχεδιαστική προσέγγιση για SVLs σε δίκτυα Μέσης Τάσης με cross-bonding, με στόχο την ενίσχυση της ηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης και τη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος σε περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων ή ηλεκτρικών σφαλμάτων. Η μελέτη παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα του συστήματος cross-bonding σε σύγκριση με τις παραδοσιακές διατάξεις συνεχούς γείωσης (solid bonding), αναδεικνύοντας τη μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων στους μεταλλικούς μανδύες, τις μειωμένες θερμικές απώλειες και την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των μονώσεων. Μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό EMTP/ATP, επιβεβαιώνονται τα οφέλη του cross-bonding ως προς την περιορισμένη θερμική καταπόνηση, αλλά ταυτόχρονα καταδεικνύεται η ανάγκη προστασίας των μανδύων από υψηλές επαγόμενες υπερτάσεις υπό συνθήκες σφάλματος. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται ένας νέος τύπος SVL βασισμένος σε τεχνολογία χαμηλής τάσης και υψηλής ενέργειας τύπου βραχυκυκλώματος (short-circuit type SPD), ο οποίος υπερτερεί έναντι των συμβατικών διατάξεων. Ο νέος σχεδιασμός συνδυάζει βελτιωμένη ενεργειακή ικανότητα, μικρότερο υπολειπόμενο δυναμικό (residual voltage) και διατήρηση της ικανότητας αντοχής σε κεραυνικές υπερτάσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν αποτελεσματική περιοριστική συμπεριφορά τόσο σε μονοφασικά σφάλματα όσο και σε απευθείας κεραυνικά πλήγματα, χωρίς υποβάθμιση της απόδοσης του εξοπλισμού. Τέλος, τονίζεται η ανάγκη περαιτέρω έρευνας και τυποποίησης για την επιλογή κατάλληλων SVLs στις εφαρμογές cross-bonding, ώστε να διασφαλιστεί η αξιόπιστη σύνδεση μεγάλων έργων ΑΠΕ σε υποσταθμούς MT/YT.

2.3 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική επισκόπηση της μεθόδου cross-bonding σε καλωδιακά συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης, καθώς και των σημαντικότερων θεμάτων που σχετίζονται με την αντιμετώπιση σφαλμάτων, τα ρεύματα βλαβών και την εκδήλωση υπερτάσεων, με έμφαση σε παροδικά φαινόμενα. Αρχικά, αναλύθηκε η θεωρητική βάση της μεθόδου cross-bonding, η οποία εφαρμόζεται για τη μείωση των επαγόμενων τάσεων και των απωλειών από ρεύματα μανδύα σε μονοπολικά καλώδια.

Συνεχίζοντας τη διερεύνηση των πρακτικών εφαρμογών της μεθόδου cross-bonding, παρουσιάστηκαν ερευνητικές εργασίες και εφαρμογές προσομοίωσης (κυρίως με χρήση EMTP/ATP και PSCAD) που εξετάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος υπό κανονικές και παροδικές συνθήκες λειτουργίας, όπως κεραυνικά πλήγματα, παροδικές υπερτάσεις και σφάλματα γείωσης. Μέσα από αυτές αναδείχθηκε η επίδραση παραμέτρων όπως η γείωση του μανδύα, η διαμόρφωση των φάσεων, η αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και το μήκος των καλωδίων στην τάση που επάγεται στους μανδύες.

Πέραν των παραδοσιακών μεθόδων προσομοίωσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάστηκε στην ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών ανάλυσης, όπως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN), μοντέλα μηχανικής μάθησης (PSO-SVM), καθώς και αναλυτικές μεθόδους εντοπισμού βλαβών βάσει χαρακτηριστικών φάσης και πλάτους του ρεύματος και της τάσης. Οι τεχνικές αυτές αποδείχθηκαν ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην πρόβλεψη επαγόμενων υπερτάσεων και στη διάγνωση βλαβών σε cross-bonded συστήματα, ακόμη και υπό υψηλή μεταβατική αντίσταση.

Επιπλέον, σε επίπεδο υλοποίησης και κατασκευαστικών λεπτομερειών, αναδείχθηκε η σημασία του σωστού σχεδιασμού των κουτιών cross-bonding, με έμφαση στη ρεαλιστική αποτύπωση των παραμέτρων τους βάσει πειραματικών μετρήσεων και η αποτελεσματικότητα των περιοριστών τάσης στην εξασθένηση των υπερτάσεων υπό κεραυνικά πλήγματα. Για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των προσομοιώσεων, η σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των μοντέλων και ενισχύει την αξία τους για τον σχεδιασμό πραγματικών εγκαταστάσεων.

Η ανάλυση που προηγήθηκε ανέδειξε ότι η βαθιά κατανόηση της συμπεριφοράς των cross-bonded συστημάτων υπό δυναμικές συνθήκες και η συστηματική αξιολόγηση των διαθέσιμων μεθόδων προστασίας αποτελούν θεμελιώδη βάση για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των υπόγειων καλωδιακών συνδέσεων. Η γνώση αυτή καθίσταται κρίσιμη ενόψει των προσομοιώσεων που θα παρουσιαστούν σε επόμενα κεφάλαια, όπου θα εξεταστεί το θεωρητικό υπόβαθρο του λογισμικού ATPDraw και η εφαρμογή του για την ανάλυση των φαινομένων που μελετήθηκαν.

Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Υπόβαθρο ATPDraw

3.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση μεταβατικών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερης σημασίας για τον σχεδιασμό, την ασφάλεια και την αξιόπιστη λειτουργία τους. Τα μεταβατικά φαινόμενα που προκύπτουν από διακοπτικές λειτουργίες, σφάλματα ή κεραυνικές εκφορτίσεις, μπορούν να οδηγήσουν σε επικίνδυνες υπερτάσεις και ρεύματα, με πιθανές συνέπειες στη μόνωση και στη μακροχρόνια αξιοπιστία του εξοπλισμού. Η ακριβής αποτύπωση και μελέτη των φαινομένων αυτών είναι εφικτή μόνο με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών εργαλείων προσομοίωσης, τα οποία επιτρέπουν την παραμετρική αναπαράσταση των στοιχείων ενός συστήματος ισχύος και τον αριθμητικό υπολογισμό της δυναμικής τους συμπεριφοράς.

Ένα από τα πλέον διαδεδομένα προγράμματα αυτού του είδους είναι το ATP (Alternative Transients Program), το οποίο αποτελεί εξέλιξη του ιστορικού EMTP (Electromagnetic Transients Program). Το ATP χρησιμοποιείται ευρέως από την ερευνητική και τη βιομηχανική κοινότητα για την προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών, χάρη στην ευελιξία και την ακρίβεια των υπολογιστικών του ρουτινών. Ωστόσο, η χρήση του σε αμιγώς κειμενικό περιβάλλον (μέσω αρχείων εισόδου *.atp) απαιτεί από τον μελετητή εξοικείωση με τη σύνταξη και τη δομή των εντολών, κάτι που συχνά καθιστά τη διαδικασία περίπλοκη και χρονοβόρα.

Για την αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών έχει αναπτυχθεί το ATPDraw, το οποίο λειτουργεί ως γραφικό περιβάλλον για το ATP. Μέσω του ATPDraw, ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί κυκλώματα με χρήση συμβολικών στοιχείων (σύμφωνα με τη λογική “drag & drop”), να καθορίζει τις παραμέτρους του, και να παράγει αυτόματα τα απαραίτητα αρχεία εισόδου για το ATP. Με τον τρόπο αυτό η διαδικασία της προσομοίωσης γίνεται πιο προσιτή, ενώ παράλληλα διατηρείται η υπολογιστική ισχύς και η ακρίβεια του υποκείμενου λογισμικού.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του ATPDraw είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης καλωδίων και γραμμών μεταφοράς μέσω της ενσωμάτωσης ειδικών αντικειμένων υπολογισμού σταθερών γραμμής (LCC- Line/Cable Constants). Η χρήση του LCC επιτρέπει στον μελετητή να εισάγει άμεσα γεωμετρικά δεδομένα και ιδιότητες υλικών, όπως ακτίνες αγωγών, πάχη μανδυνών, ηλεκτρικές ιδιότητες μονώσεων και παραμέτρους εδάφους), ενώ το πρόγραμμα

αναλαμβάνει να υπολογίσει αυτόματα τις ηλεκτρικές παραμέτρους (R, L, G, C) που περιγράφουν το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα. Με αυτό τον τρόπο, η διαδικασία της παραμετροποίησης καθίσταται ταχύτερη και απαλλαγμένη από τον χειροκίνητο χειρισμό ενδιάμεσων αρχείων.

Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, όταν πρόκειται για υπόγεια καλώδια, καθώς η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση μεταξύ των αγωγών και των μεταλλικών μανδυνών τους παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του συστήματος. Τα επαγόμενα ρεύματα και τάσεις που αναπτύσσονται στους μανδύες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση και την ασφάλεια λειτουργίας, ενώ συνδέονται άμεσα με την ανάγκη εφαρμογής τεχνικών μείωσης όπως το cross-bonding. Το ATPDraw, προσφέροντας την ακριβή γεωμετρική και υλική περιγραφή των καλωδίων, καθιστά δυνατή τη μελέτη αυτών των φαινομένων με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας.

Επιπλέον, το ATPDraw παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας προτύπων (templates), τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε πολλαπλές προσομοιώσεις ή σε διαφορετικά τμήματα καλωδίων μεταβλητού μήκους. Αυτό διευκολύνει τη συνέπεια και μειώνει τον χρόνο προετοιμασίας μεγάλων μοντέλων. Παράλληλα, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ διαφορετικών υπολογιστικών μοντέλων (π.χ. PI, Bergeon, JMarti), προσαρμόζοντας έτσι το επίπεδο ακρίβειας και την υπολογιστική πολυπλοκότητα ανάλογα με τη φύση της μελέτης.

Συνοψίζοντας, το ATPDraw σε συνδυασμό με το ATP προσφέρει ένα ισχυρό και ταυτόχρονα ευέλικτο πλαίσιο για την προσομοίωση συστημάτων ισχύος. Η ενσωμάτωση του LCC και η δυνατότητα ακριβούς παραμετροποίησης των υπόγειων καλωδίων παρέχουν στον μελετητή τα απαραίτητα εργαλεία για την ανάλυση πολύπλοκων φαινομένων, όπως αυτά που σχετίζονται με την εμφάνιση επαγόμενων τάσεων στους μανδύες. Η κατανόηση αυτών των δυνατοτήτων αποτελεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για τα επόμενα κεφάλαια, όπου θα εξεταστούν πρακτικά διάφορες τεχνικές γείωσης μέσω προσομοιώσεων στο ATPDraw.

3.2 Μοντελοποίηση Καλωδίων στο ATPDraw

Η ακριβής μοντελοποίηση των υπόγειων καλωδίων αποτελεί κρίσιμο στάδιο στη διαδικασία προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων. Σε αντίθεση με τις εναέριες γραμμές, τα υπόγεια καλώδια παρουσιάζουν ισχυρότερες ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις λόγω της μικρότερης μεταξύ τους απόστασης και της παρουσίας μεταλλικών μανδυνών, γεγονός που καθιστά την παραμετροποίηση τους πιο απαιτητική. Το ATPDraw παρέχει στον μελετητή εξειδικευμένα εργαλεία για τη μοντελοποίηση των καλωδίων, μέσω του αντικειμένου Line/Cable Constants (LCC), το οποίο αναλαμβάνει τον υπολογισμό των ηλεκτρικών παραμέτρων που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους.

Το LCC λειτουργεί ως αυτόνομο “υποσύστημα” μέσα στο ATPDraw καθώς δέχεται ως είσοδο τις γεωμετρικές και υλικές ιδιότητες των αγωγών και των μανδυνών, ενώ παράλληλα λογαριάζει τις συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. τοποθέτηση σε αέρα ή έδαφος) και υπολογίζει τις ηλεκτρικές σταθερές ανά μονάδα μήκους (αντίσταση R, αυτεπαγωγή L, αγωγιμότητα G και χωρητικότητα C). Τα αποτελέσματα αυτά μετατρέπονται σε ισοδύναμο κυκλώματα, τα οποία στη συνέχεια συνδέονται με το υπόλοιπο μοντέλο του συστήματος.

Η διαδικασία δημιουργίας ενός καλωδίου στο ATPDraw μέσω του LCC περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- 1. Ορισμός αριθμού καλωδίων και φάσεων:** Ο χρήστης καθορίζει το πλήθος των αγωγών και τον τρόπο ομαδοποίησης τους σε φάσεις (μονοφασικό, τριφασικό, με ή χωρίς ουδέτερο).
- 2. Καθορισμός γεωμετρικών παραμέτρων:** Εισάγονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε αγωγού, όπως η ακτίνα, το πάχος μόνωσης και η απόσταση τοποθέτησης.
- 3. Ενεργοποίηση και παραμετροποίηση μανδυνών:** Για κάθε αγωγό μπορεί να καθοριστεί μεταλλικός μανδύας ή θωράκιση, με δικά τους γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (εξωτερική ακτίνα, ειδική αντίσταση, μαγνητική διαπερατότητα).
- 4. Καθορισμός εδαφικών/περιβαλλοντικών συνθηκών:** Το LCC δίνει τη δυνατότητα επιλογής αν το καλώδιο βρίσκεται σε αέρα ή σε έδαφος, καθώς και την παραμετροποίηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

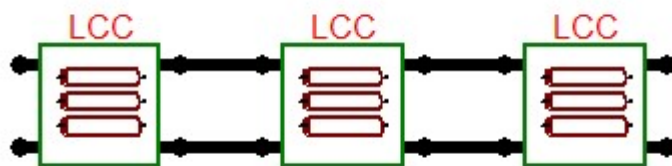
5. Υπολογισμός σταθερών γραμμής: Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, το ATPDraw εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς και αποθηκεύει τα αποτελέσματα σε αρχεία (.dat, .pch, .lib) τα οποία χρησιμοποιούνται στην κύρια προσομοίωση.

6. Οπτική απεικόνιση και έλεγχος: Μέσω της επιλογής View και ύστερα Cross-section, ο χρήστης μπορεί να δει σε τομή τη γεωμετρία των αγωγών και των μανδυνών, γεγονός που βοηθά στην αποφυγή λαθών και στην επαλήθευση των δεδομένων εισόδου.

Το πλεονέκτημα της χρήσης του LCC στο ATPDraw είναι ότι απαλλάσσει τον μελετητή από την ανάγκη χειροκίνητου υπολογισμού ή εισαγωγής πινάκων παραμέτρων, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα είναι συμβατά με το υπολογιστικό πλαίσιο του ATP. Επιπλέον, επιτρέπει τη δημιουργία προτύπων (templates) τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές προσομοιώσεις, διευκολύνοντας την ανάλυση σεναρίων με καλώδια διαφορετικού μήκους ή διατομής.

Στην επόμενη υποενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιλογές και τα πεδία δεδομένων που περιλαμβάνονται στο Line/Cable Constants template, με έμφαση στις παραμέτρους που αφορούν τους μανδύες των καλωδίων, καθώς αυτοί αποτελούν τον βασικό άξονα μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται παρακάτω μια συστοιχία του αντικειμένου LCC στο ATPDraw, όπως εμφανίζεται στο παράθυρο του κυκλώματος, προκειμένου να δοθεί οπτική αναφορά για τη διαδικασία παραμετροποίησης καλωδίων.



Σχήμα 3.1 : Το αντικείμενο LCC στο ATPDraw.

3.2.1 LCC template

Η δημιουργία και παραμετροποίηση καλωδίων στο ATPDraw γίνεται μέσω του Line/Cable Constants (LCC) template, ενός ειδικού αντικειμένου που ενσωματώνεται στο κύκλωμα, όπως κάθε άλλο στοιχείο. Το LCC επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει γεωμετρικά και ηλεκτρικά δεδομένα για κάθε αγωγό ή μανδύα, και στη συνέχεια να υπολογίσει αυτόματα τις σταθερές γραμμής ανά μονάδα μήκους, οι οποίες αποτελούν τη βάση για τη μοντελοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς του καλωδίου.

Η πρόσβαση στο εργαλείο γίνεται από το μενού Lines/Cables, LCC template, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ένα εικονίδιο που μπορεί να τοποθετηθεί στο παράθυρο του κυκλώματος. Κάνοντας δεξί κλικ στο εικονίδιο, εμφανίζεται το παράθυρο Line/Cable dialog, το οποίο χωρίζεται σε τρεις βασικές σελίδες:

- **Model page:** καθορισμός βασικού τύπου καλωδίου και επιλογών μοντελοποίησης.
- **Data page:** εισαγωγή γεωμετρικών και υλικών χαρακτηριστικών αγωγών και μανδυνών.
- **Node page:** καθορισμός της αρίθμησης και της ακολουθίας των κόμβων.

Model page

Στην Model page ο χρήστης ορίζει το είδος του συστήματος (System type). Υπάρχουν διαθέσιμες επιλογές για:

- **Overhead line** (εναέρια γραμμή)
- **Single Core cables (SC)** (μονοπολικά καλώδια)
- **Enclosing Pipe cables** (καλώδια τοποθετημένα σε μεταλλικό σωλήνα)
- **Matrix Import** (εισαγωγή προκαθορισμένων πινάκων)

Στο πλαίσιο των υπόγειων καλωδίων μονοπολικής δομής, η συνήθης επιλογή είναι το Single Core cable system, όπου καθορίζεται επίσης ο αριθμός φάσεων (#Ph). Για παράδειγμα, σε ένα τριφασικό σύστημα με καλώδια μονού πυρήνα, θα οριστούν τρεις φάσεις και ο αντίστοιχος αριθμός καλωδίων.

Η σελίδα αυτή περιλαμβάνει επίσης:

- **Ground resistivity (Rho):** ειδική αντίσταση εδάφους, κρίσιμη παράμετρος για την αλληλεπίδραση των πεδίων.
- **Starting frequency (Freq):** συχνότητα υπολογισμού σταθερών (τυπικά 50 Hz)
- **Length:** συνολικό μήκος του καλωδίου που θα μοντελοποιηθεί.
- **Internal calculation:** δυνατότητα χρήσης εσωτερικών αλγορίθμων του ATPDraw (χωρίς εξωτερική εκτέλεση ATP)
- **Template option:** δημιουργία προτύπου που μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε πολλά διαφορετικά τμήματα καλωδίων.

Επιπλέον, κρίσιμη είναι η επιλογή **Cable Constants**, όπου αν ενεργοποιηθεί, τότε ο χρήστης πρέπει να καθορίσει ποιούς αγωγοί γειώνονται, ενώ σε διαφορετική περίπτωση ο αριθμός των γειωμένων αγωγών υπολογίζεται αυτόματα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η καρτέλα **Model** στο περιβάλλον του ATPDraw:

The screenshot shows the 'Line/Cable Data: c1' dialog box with the 'Model' tab selected. The interface is divided into several sections:

- System type:** Name is 'c1'. There is an unchecked 'Template' checkbox. The 'Single Core Cable' is selected from a dropdown menu. '#Phases' is set to 6 and '#Cables' is set to 3.
- Cables in:** Three radio buttons are present: 'Air' (unchecked), 'Surface' (unchecked), and 'Ground' (checked).
- Standard data:** 'Rho [ohm*m]' is 100, 'Freq. init [Hz]' is 50, and 'Length [m]' is 100. Below these are four unchecked checkboxes: 'Internal calculation', 'Set length in icon', 'Single phase icon', and 'Embed in ATP-file'.
- Object content:** A list box containing 'Overhead line', 'Single core cables', 'Enclosing pipe', and 'Imported Z, Y', all with expandable icons.
- Model Type:** Five radio buttons: 'Bergeron' (unchecked), 'PI' (checked), 'JMartí', 'Noda', and 'Semlyen'. 'ULM' is also listed but not a radio button.
- Data:** 'Homogenous' is checked, 'Cross bonded' is unchecked, and 'Num sections' is set to 1.
- Bottom section:** Includes 'Comment:', 'Order:' (set to 0), 'Label:', and a 'Hide' checkbox. There are also navigation buttons: 'OK', 'Cancel', 'Import', 'Export', 'Run ATP', 'View', 'Verify', 'Edit defin.', and 'Help'.

Σχήμα 3.2.1.1 : Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων - Model

Data page

Η Data page είναι το πιο κρίσιμο τμήμα, καθώς εδώ καθορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε αγωγού και τα χαρακτηριστικά των υλικών. Ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό καλωδίου (Cable #) και εισάγει:

- **Ακτίνα αγωγού (Rin)**
- **Εξωτερική ακτίνα (Rout)**
- **Ηλεκτρική αντίσταση εδάφους (Rho)**
- **Σχετική διηλεκτρική σταθερά (eps(ins))**
- **Σχετική μαγνητική διαπερατότητα (mu)**

Επιπλέον, υπάρχει επιλογή ενεργοποίησης του Sheath/Armor (μανδύας ή θωράκιση). Εάν ενεργοποιηθούν ανοίγουν νέα πεδία εισαγωγής, όπου καθορίζονται αντίστοιχα η ακτίνα μανδύα, το πάχος του μεταλλικού αγωγού, ειδική αντίσταση του μετάλλου, καθώς και η μαγνητική διαπερατότητα.

Η σωστή παραμετροποίηση των μανδυνών είναι καθοριστική, καθώς αυτοί συμμετέχουν ενεργά στη ροή ρευμάτων βραχυκύκλωσης ή ρευμάτων επαγωγής, επηρεάζοντας σημαντικά τα σενάρια μεταβατικών υπερτάσεων.

Μέσω του μενού **View**, είναι επίσης δυνατή η γραφική απεικόνιση της τομής του καλωδίου, γεγονός που βοηθάει στην αποφυγή λαθών (π.χ αγωγοί που αλληλεπικαλύπτονται ή λάθος αριθμός φάσεων).

Παρακάτω παρουσιάζεται η καρτέλα Data στο περιβάλλον του ATPDraw:

	CORE	SHEATH	ARMOR
Rin [m]	0	0.02	0.04
Rout [m]	0.01	0.03	0.05
Rho [ohm*m]	1.68E-8	1.68E-8	1.68E-8
mu	1	1	1
mu (ins)	1	1	1
eps (ins)	2.3	2.3	2.3
semicon in [m]	0	0	0
semicon out [m]	0	0	0

Σχήμα 3.2.1.2 : Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων - Data

Node page

Η τελευταία καρτέλα επιτρέπει την αναδιάταξη της ακολουθίας των κόμβων του καλωδίου. Στην περίπτωση της τεχνικής crossbonding, η δυνατότητα αυτή καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει στον χρήστη να ορίσει χειροκίνητα ποιοι μανδύες γειώνονται ή αλλάζουν θέση σε συγκεκριμένα τμήματα του καλωδίου, ώστε να προσομοιωθεί σωστά η αντιμετάθεση των μανδύων ή και των φάσεων. Παράλληλα, η λειτουργία αυτή παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία για τη σύνδεση των κόμβων με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος, διασφαλίζοντας ότι τα σημεία μέτρησης ή τα major sections που έχουν οριστεί στο πείραμα ανταποκρίνονται στην πραγματική εγκατάσταση.

3.3 Τύποι μοντέλων καλωδίων/γραμμών στο ATPDraw

Η ακρίβεια μιας ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης στο ATPDraw εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την επιλογή του μοντέλου γραμμής/καλωδίου. Στην πράξη, η συμπεριφορά των υπογείων καλωδίων μπορεί να αναπαρασταθεί με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής (μελέτες σε συχνότητα ισχύος, μελέτες μεταβατικών φαινομένων, ανάλυση υπερτάσεων, κ.λπ.) και τον διαθέσιμο υπολογιστικό χρόνο.

Το ATPDraw υποστηρίζει μια σειρά από μοντέλα γραμμής, τα οποία έχουν αναπτυχθεί ιστορικά και βελτιωθεί για διαφορετικές ανάγκες. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι, μαζί με τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους.

3.3.1 Μοντέλο τύπου Π (PI model)

Το μοντέλο τύπου Π αποτελεί τη βασική επιλογή για μελέτες σε σταθερή συχνότητα, όπως η ανάλυση ροής ισχύος και οι υπολογισμοί βραχυκυκλώματος. Βασίζεται στην παραδοχή ότι οι παράμετροι της γραμμής (αντίσταση, αυτεπαγωγή, αγωγιμότητα, χωρητικότητα) υπολογίζονται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα αναφοράς (συνήθως 50 Hz) και τοποθετούνται συγκεντρωμένα σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα τύπου Π.

Για γραμμές μεγαλύτερου μήκους, το ισοδύναμο μπορεί να διασπαστεί σε πολλαπλά τμήματα ώστε να μειωθεί η επίδραση της συγκεντρωμένης χωρητικότητας και να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματική κατανομή. Στην περίπτωση των υπόγειων καλωδίων, όπου η χωρητικότητα είναι μεγαλύτερη από αυτή των εναέριων γραμμών, απαιτούνται τμήματα μήκους λίγων χιλιομέτρων για ακριβή προσομοίωση.

Το ΠΙ μοντέλο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για:

- Μελέτες στη θεμελιώδη συχνότητα.
- Υπολογισμούς μόνιμης κατάστασης.
- Απλές μελέτες βραχυκυκλώματος.

Περιορίζεται όμως σε εφαρμογές μεταβατικών υπερτάσεων ή φαινομένων υψηλών συχνοτήτων, καθώς η συγκεντρωμένη παράσταση δεν αποδίδει τη διάδοση κυμάτων.

3.3.2 Μοντέλο Bergeron

Το μοντέλο Bergeron υπολογίζει επίσης παραμέτρους σε μία σταθερή συχνότητα, αλλά κατανέμει την εγκάρσια αγωγιμότητα σε όλο το μήκος της γραμμής, σχετίζοντας έτσι ένα απλοποιημένο μοντέλο διαδιδόμενων κυμάτων. Το πλεονέκτημα του είναι η δυνατότητα προσομοίωσης κυματομορφών οδευόντων κυμάτων με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος.

Ωστόσο, το μοντέλο βασίζεται σε μετασχηματισμό στο modal domain, ο οποίος αγνοεί τη συχνοεξάρτηση του πίνακα μετασχηματισμού. Αυτό περιορίζει την ακρίβεια του σε συστήματα καλωδίων, όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αγωγών και εδάφους είναι έντονα συχνοεξαρτώμενες.

Παρά ταύτα, το μοντέλο Bergeron παραμένει χρήσιμο σε μελέτες:

- Κεραυνικών κρουσμάτων, όπου η κύρια έμφαση είναι στη μέγιστη τάση και όχι στη λεπτομερή απόσβεση.
- Προσομοιώσεις Monte Carlo, χάρη στην υψηλή ταχύτητα εκτέλεσης.

3.3.3 Μοντέλο JMarti

Το μοντέλο JMarti αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα διαδιδόμενων γραμμών μεταφοράς στο ATPDraw. Πρόκειται για συχνοεξαρτώμενο, κατανεμημένο μοντέλο παραμέτρων, το οποίο λειτουργεί επίσης στο modal domain. Σε αντίθεση με το Bergeon, το JMarti επιχειρεί να λάβει υπόψη τις απώλειες και τη συχνοεξαρτώμενη συμπεριφορά μέσω προσαρμογής (fitting) των χαρακτηριστικών.

Το κύριο μειονέκτημα του μοντέλου είναι ότι υποθέτει σταθερούς πίνακες μετασχηματισμού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα σε χαμηλές συχνότητες (50 Hz), όπου η συμπεριφορά του συστήματος αποκλίνει από τις προσεγγίσεις. Στις νεότερες εκδόσεις του ATPDraw έχει ενσωματωθεί η τεχνική Vector Fitting, η οποία βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια σε χαμηλές συχνότητες.

Το JMarti είναι ιδανικό για:

- Μελέτες μεταβατικών φαινομένων (κεραυνικά, διακοπτικά).
- Αναλύσεις όπου οι απώλειες και η απόσβεση παίζουν καθοριστικό ρόλο.

3.3.4 Μοντέλα Noda και Semlyen

Τα μοντέλα Noda και Semlyen αποτελούν εναλλακτικές υλοποιήσεις συχνοεξαρτώμενων μοντέλων, με παρόμοια φιλοσοφία με το JMarti. Εστιάζουν επίσης στην αναπαράσταση της συμπεριφοράς γραμμών σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων, με βελτιώσεις σε συγκεκριμένα

μαθηματικά σημεία (π.χ. διαφορετικοί αλγόριθμοι fitting). Στην πράξη χρησιμοποιούνται λιγότερα συχνά, καθώς το JMarti με Vector Fitting καλύπτει τις περισσότερες ανάγκες μελετών.

3.3.5 ULM (Universal Line Model)

Το ULM είναι το πιο γενικευμένο μοντέλο στο ATPDraw, προσφέροντας μεγάλη ευελιξία στην αναπαράσταση της συχνοεξαρτώμενης συμπεριφοράς. Αν και είναι το πιο ακριβές, είναι επίσης και το πιο απαιτητικό σε υπολογιστικούς πόρους. Χρησιμοποιείται κυρίως σε ερευνητικές εφαρμογές και σε περιπτώσεις, όπου απαιτείται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

3.4 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο για τη χρήση του ATPDraw ως εργαλείου προσομοίωσης υπόγειων καλωδίων μέσης τάσης. Αρχικά, έγινε εισαγωγή στις δυνατότητες του προγράμματος, τονίζοντας τη σημασία της ακριβούς μοντελοποίησης των καλωδίων για την ανάλυση μεταβατικών φαινομένων και επαγόμενων ρευμάτων στους μανδύες.

Στη συνέχεια, αναλύθηκε η διαδικασία μοντελοποίησης μέσω του αντικειμένου Line/Cable Constants (LCC), το οποίο επιτρέπει την παραμετροποίηση γεωμετρικών και υλικών χαρακτηριστικών αγωγών και μανδύων, καθώς και των συνθηκών εγκατάστασης. Τονίστηκε η σημασία της σωστής εισαγωγής δεδομένων, όπως ακτίνες αγωγών, πάχη μανδύων, ειδική αντίσταση υλικών και ιδιότητες εδάφους, για την εξαγωγή αξιόπιστων ηλεκτρικών παραμέτρων. Παρουσιάστηκε επίσης η δυνατότητα χρήσης templates για την επαναχρησιμοποίηση καλωδίων σε διαφορετικά τμήματα ή έργα, γεγονός που διευκολύνει την οργάνωση και τη συντήρηση μεγάλων προσομοιώσεων.

Τέλος, περιγράφηκαν οι διαθέσιμες επιλογές μοντέλων γραμμής/καλωδίου στο ATPDraw (PI, Bergeron, JMarti, Semlyen, Noda, ULM), με αναφορά στα πλεονεκτήματα, περιορισμούς και τις εφαρμογές τους. Επισημάνθηκε ότι η σωστή επιλογή μοντέλου εξαρτάται από τη φύση της μελέτης, τον απαιτούμενο βαθμό ακρίβειας και την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Η θεωρητική αυτή ανασκόπηση παρέχει τα απαραίτητα εφόδια για την πρακτική εφαρμογή που ακολουθεί. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία προσομοίωσης υπόγειων καλωδίων με το ATPDraw, με στόχο την ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων που αναπτύσσονται στους μανδύες και την αξιολόγηση διαφορετικών τεχνικών σύνδεσης.

Κεφάλαιο 4 : Προσομοίωση Υπόγειων Καλωδίων Υπο Κανονικές Συνθήκες Λειτουργίας

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η μετάβαση από το θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε προηγουμένως στη μελέτη πρακτικών σεναρίων προσομοίωσης υπόγειων καλωδίων μέσης τάσης με χρήση του λογισμικού **ATPDraw**. Στόχος είναι η διερεύνηση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μεταλλικούς μανδύες των καλωδίων υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας και η αξιολόγηση διαφορετικών σχημάτων γείωσης, με ιδιαίτερη έμφαση στην τεχνική **cross-bonding**, η οποία αποτελεί και τον βασικό άξονα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, παρουσιάζεται η περιγραφή του εξεταζόμενου καλωδίου, καθώς και τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο προσομοίωσης. Στη

συνέχεια παρατίθεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα που κατασκευάστηκε στο ATPDraw, με τις απαραίτητες παραμετροποιήσεις στις καρτέλες Model και Data.

Ακολουθώς, εξετάζονται τρία βασικά σενάρια γείωσης των μανδύων:

- Χωρίς γείωση,
- Γείωση στο ένα άκρο,
- Γείωση και στα δύο άκρα.

Η ανάλυση ολοκληρώνεται με την εφαρμογή της τεχνικής **cross-bonding** σε διάφορες εκδοχές (με ένα και δύο κύρια τμήματα, καθώς και σε συνδυασμό με εναλλαγή αγωγών και μανδύων), προκειμένου να αναδειχθεί η αποτελεσματικότητα της στη μείωση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων.

Η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων αποσκοπεί όχι μόνο στην ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, αλλά και στη συνολική κατανόηση της φυσικής συμπεριφοράς των μανδύων και της σημασίας της σωστής στρατηγικής γείωσης σε δίκτυα μέσης τάσης.

4.2 Περιγραφή Συστήματος Προσομοίωσης

4.2.1 Επιλογή και τεχνικά χαρακτηριστικά καλωδίου

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες, καθώς και για την αξιολόγηση της τεχνικής cross-bonding, επιλέχθηκε το καλώδιο τύπου **NA2XS**, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε υπόγειες εγκαταστάσεις μέσης τάσης (20kV) στην Ελλάδα. Το καλώδιο αποτελείται από αγωγό αλουμινίου, μόνωση από διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE) και ομόκεντρο μανδύα από χαλκό ή κράμα χαλκού, ο οποίος λειτουργεί προστατευτικά και για τη γείωση των επαγόμενων ρευμάτων.

Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου καλωδίου βασίζεται στην ευρεία χρήση του και στη διαθεσιμότητα των τεχνικών χαρακτηριστικών του, επιτρέποντας την ακριβή παραμετροποίηση στο λογισμικό ATPDraw.

Η ονομαστική αντίσταση του αγωγού υπολογίζεται με βάση την ονομαστική τάση και την επιλεγμένη ένταση λειτουργίας I_{nom} . Για ολική τάση λειτουργίας $V_{LL}=20kV$ και ένταση I_{nom} που αντιστοιχεί σε κανονική λειτουργία, η αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot I_{nom}} \approx 27.3 \, \Omega$$

όπου η ένταση $I_{nom} = 415A$ έχει επιλεγεί ώστε να αντιστοιχεί σε κανονική λειτουργία του καλωδίου σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο κατασκευαστή [21]. Η τιμή αυτή ενσωματώθηκε στα δεδομένα του LCC για την προσομοίωση, εξασφαλίζοντας ρεαλιστικά αποτελέσματα για τις τάσεις και τα ρεύματα των μανδύων. Ενδεικτικά, παρακάτω φαίνεται ο πίνακας από το τεχνικό φυλλάδιο για διατομή καλωδίου $240mm^2$:

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Διατομή Αγωγού [mm ²]	Διατομή θωράκισης [mm ²]	Βάρος (περίπου) [kg/km]	Μέγιστη ωμική αντίσταση σε DC, 20° C [Ohm/km]	Επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος στο έδαφος 15 oC - τριγωνική διάταξη [A]	Επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος στον αέρα 25 oC - τριγωνική διάταξη [A]
50	16	750	0,641	170	180
70	16	850	0,443	210	220
95	16	970	0,32	250	265
120	16	1090	0,253	280	310
150	25	1290	0,206	320	355
185	25	1460	0,164	360	410
• 240	25	1680	0,125	415	485
300	25	1880	0,1	475	550
400	35	2430	0,078	550	645
500	35	2870	0,06	610	790
630	35	3430	0,047	690	920

Σχήμα 4.2.1 : Τεχνικό φυλλάδιο κατασκευαστή [21] για το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε με διατομή 3x240mm².

4.2.2 Επιλογή μοντέλου προσομοίωσης

Στην προσομοίωση υπόγειων καλωδίων στο ATPDraw υπάρχουν διαθέσιμα διάφορα μοντέλα: Bergeron, JMarti, PI, Noda, Semlyen, ULM.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε το **PI-μοντέλο**, καθώς παρέχει :

- Ικανοποιητική ακρίβεια για στατική και ημι-στατική λειτουργία.
- Απλή παραμετροποίηση σε σύγκριση με τα πιο σύνθετα δυναμικά μοντέλα, διατηρώντας τη δυνατότητα αξιολόγησης της κατανομής των ρευμάτων στους μανδύες.
- Επαρκή ακρίβεια για τις αναλύσεις υπό πλήρες φορτίο, που αποτελούν τον κύριο στόχο των σεναρίων προσομοίωσης.

Αντίθετα, τα μοντέλα Bergeron και JMarti, αν και πιο κατάλληλα για ανάλυση μεταβατικών φαινομένων ή υψηλών συχνοτήτων, δεν προσφέρουν επιπλέον πλεονεκτήματα για την παρούσα μελέτη και απαιτούν πιο σύνθετη παραμετροποίηση.

4.2.3 Κυκλωματικό διάγραμμα

Η προσομοίωση του καλωδίου πραγματοποιήθηκε με διάσπαση σε 30 διαδοχικά LCC blocks, καθένα μήκους 100m και 200m για μήκος καλωδίου 3km και 6km αντίστοιχα. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει :

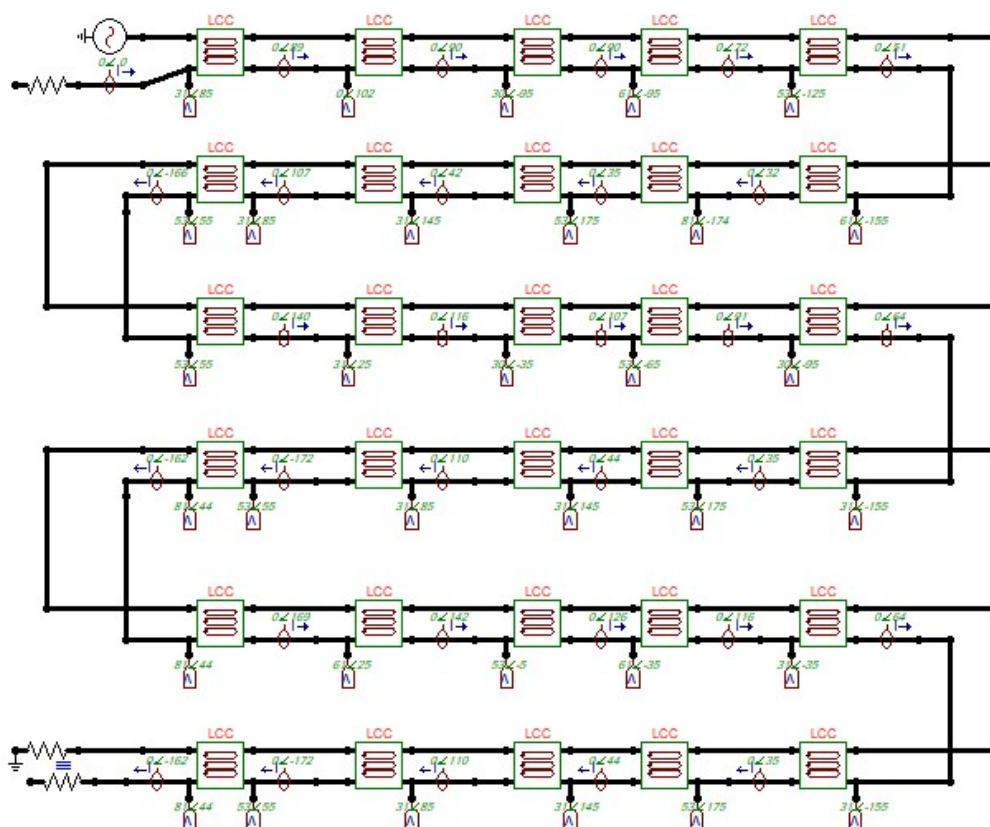
1. Μεγαλύτερη αξιοπιστία αποτελεσμάτων, καθώς κάθε τμήμα αναπαριστά με ακρίβεια μέρος του καλωδίου.
2. Δυνατότητα τοποθέτησης σημείων μέτρησης σε ενδιάμεσα σημεία για την παρακολούθηση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες.

Η τροφοδοσία του κυκλώματος πραγματοποιείται με τριφασική πηγή τάσης, όπου το πλάτος της κάθε φάσης υπολογίζεται ως:

$$V_{\text{peak}} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{LL}}{\sqrt{3}} = 16.3299 \text{ kV}$$

με $V_{LL}=20kV$. Ο τύπος αυτός διασφαλίζει ότι η πηγή παρέχει σωστά τις συνθήκες λειτουργίας για τη μέτρηση των επαγόμενων τάσεων.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το συνολικό κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, το οποίο περιλαμβάνει 30 διαδοχικά LCC, επιλεγμένα ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων των επαγόμενων ρευμάτων και τάσεων στους μανδύες. Επιπλέον, στα άκρα των μανδύων έχει τοποθετηθεί αντίσταση γείωσης $R=1\Omega$, η οποία ενεργοποιείται στις περιπτώσεις όπου εξετάζεται η γείωση, προσομοιώνοντας την αντίσταση διάχυσης του ρεύματος στο έδαφος. Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται τα σημεία όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις κατά μήκος του καλωδίου με χρήση αμπερομέτρων και βολτομέτρων.



Σχήμα 4.2.3 : Απεικόνιση της διάταξης προσομοίωσης.

4.2.4 Παραμετροποίηση στο ATPDraw

Η παραμετροποίηση του μοντέλου στο ATPDraw υλοποιήθηκε μέσω των τριών βασικών καρτελών που προσφέρει το λογισμικό, οι οποίες επιτρέπουν την πλήρη και λεπτομερή περιγραφή των χαρακτηριστικών του καλωδίου:

- Model:** Σε αυτήν την καρτέλα καθορίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά της γραμμής και του τύπου του καλωδίου. Επιλέχθηκε **Single Core Cable** για την αναπαράσταση των αγωγών, ενώ ορίστηκε **αριθμός φάσεων ίσος με 6**, ώστε να περιλαμβάνονται οι τρεις αγωγοί και οι τρεις μανδύες. Τοποθετήθηκαν τα καλώδια στο **έδαφος**, καθορίστηκε η **ειδική αντίσταση του εδάφους**, η **συχνότητα λειτουργίας**, το **μήκος της γραμμής**, ο **τύπος μοντέλου (Π)** και ο **τρόπος υπολογισμού (Cable Constants)**.

- **Data:** Στην καρτέλα Data εισάγονται οι λεπτομέρειες της γεωμετρίας και των υλικών για κάθε αγωγό και μανδύα. Συγκεκριμένα, ορίζονται οι **κατακόρυφες και οριζόντιες θέσεις** των καλωδίων κάτω από το έδαφος, ενεργοποιείται η επιλογή για ύπαρξη μανδύα και καταχωρούνται τα χαρακτηριστικά τόσο του αγωγού όσο και του μανδύα: **εσωτερική και εξωτερική ακτίνα (R_{in}, R_{out}), ειδική αντίσταση (Rho), μαγνητική διαπερατότητα (mu), μαγνητική διαπερατότητα μόνωσης (mu[ins]), διηλεκτρική σταθερά μόνωσης (eps[ins]) και συνολική ακτίνα (Total radius)**. Επιπλέον, η διάταξη φάσεων που εφαρμόστηκε είναι τριγωνική (trefoil) με την γεωμετρική τοποθέτηση των φάσεων να φαίνεται στο σχήμα **4.2.4.0**, όπου χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία “view” από το **Icc template** του λογισμικού. Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στην καρτέλα Data υπολογίστηκαν με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου NA2XSJ 3x240mm², όπως αυτά προκύπτουν από τεχνικά φυλλάδια κατασκευαστών και σχετικές μελέτες [22]. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικοί υπολογισμοί των ηλεκτρικών και γεωμετρικών παραμέτρων του καλωδίου, οι οποίοι παρουσιάζονται στη συνέχεια με τις αντίστοιχες εξισώσεις και τιμές κάθε τμήματος.

Ο **πυρήνας** (αγωγός) αποτελείται από αλουμίνιο, με εσωτερική ακτίνα **R_i=0mm** και εξωτερική ακτίνα **R_{out}=10mm (=R_c)**, ενώ η διατομή του είναι **240 mm²**. Η ειδική αντίσταση του πυρήνα διορθώθηκε με τη σχέση:

$\rho_c = \rho_{Al} \cdot \frac{R_c^2 \cdot \pi}{A} = 3.961E-8 \Omega \cdot m$, όπου ρ_{Al} είναι η ειδική αντίσταση του αλουμινίου και A η διατομή του αγωγού.

Ακολουθεί η **εσωτερική ημιαγωγίμη θωράκιση**, η οποία είναι κατασκευασμένη από ημιαγωγίμο υλικό και έχει ακτίνα **R_{out}=10.546mm**.

Η **μόνωση (XLPE)** καλύπτει την ακτίνα από **R_i=10.546mm** και **R_{out}=16.046mm**, με διορθωμένη διηλεκτρική σταθερά που υπολογίστηκε από τη σχέση:

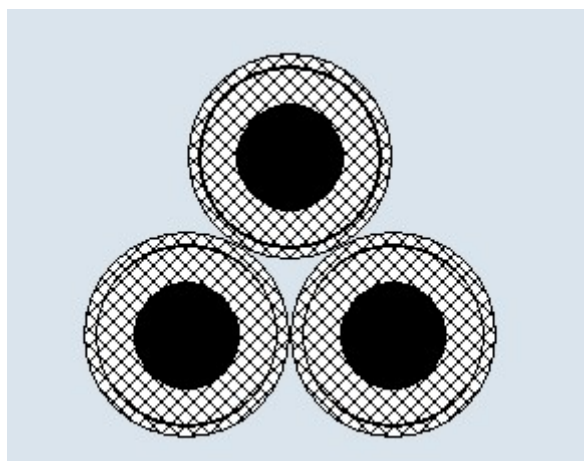
$\epsilon_{r,ins} = \epsilon_{r,XLPE} \cdot \frac{\ln(\frac{R_{semi_out}}{R_c})}{\ln(\frac{R_{xlpe_out}}{R_{semi_in}})} = 3.1135$, όπου **R_{semi_out}** η ακτίνα της εξωτερικής ημιαγωγίμης

θωράκισης, **R_c** η ακτίνα του πυρήνα, **R_{xlpe_out}** η ακτίνα μόνωσης (XLPE) και **R_{semi_in}** η ακτίνα της εσωτερικής ημιαγωγίμης θωράκισης.

Η **εξωτερική ημιαγωγίμη θωράκιση** εκτείνεται από **R_i=16.046mm** έως **R_{out}=16.866mm**. Ο **μεταλλικός μανδύας** (αλουμίνιο) έχει ακτίνα **R_{out}=17.1mm**. Τέλος, η **εξωτερική μόνωση (PVC)** καλύπτει το τμήμα από **R_i=17.1mm** έως **R_{out}=19.2mm** έχοντας διηλεκτρική σταθερά **ε_r=6**.

Αυτή η λεπτομερής παραμετροποίηση επιτρέπει στο ATPDraw να υπολογίσει με ακρίβεια τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γραμμής και να δημιουργήσει το ισοδύναμο κύκλωμα τύπου Π.

Φάση 1	Φάση 2	Φάση 3
Position Vertical (m) :1.1667	Position Vertical (m):1.2	Position Vertical (m) :1.2
Horizontal (m) : 0.0192	Horizontal (m) : 0	Horizontal (m) : 0.0384



Σχήμα 4.2.4.0 : Απεικόνιση της γεωμετρικής τοποθέτησης μέσω της λειτουργίας “view” και αντίστοιχος πίνακας με τις τιμές ενταφίασης για την κάθε φάση (όπου η φάση 1 είναι η πάνω ενώ η 2,3 κάτω αριστερά και δεξιά αντίστοιχα).

- **Nodes:** Η καρτέλα Nodes χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της ακολουθίας των κόμβων. Η σωστή διάταξη των κόμβων είναι απαραίτητη για τον ορισμό των σημείων μέτρησης των επαγόμενων ρευμάτων και τάσεων στους μανδύες, καθώς και για την εφαρμογή πιθανών τεχνικών αντιμετάθεσης (cross-bonding) στα σενάρια προσομοίωσης.

Η ολοκληρωμένη χρήση αυτών των τριών καρτελών εξασφαλίζει ότι το μοντέλο του καλωδίου στο ATPDraw αποδίδει με ακρίβεια τόσο τις ηλεκτρικές όσο και τις γεωμετρικές του ιδιότητες, προσφέροντας τη δυνατότητα λεπτομερούς παρακολούθησης των τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται οπτικά οι τρεις καρτέλες του ATPDraw (Model, Data, Nodes), καθώς και η γεωμετρική απεικόνιση των φάσεων, με τα στοιχεία που έχουν καταχωρηθεί, παρέχοντας μια πλήρη εικόνα της παραμετροποίησης του καλωδίου για τις προσομοιώσεις.

Line/Cable Data: c1

Model | **Data** | **Nodes**

System type

Name: ☐ I template

Single Core Cable #Phases:

Cables in: ☐ Air ☐ Surface ☒ Ground

#Cables: ☒ Cable Constants ☐ Matrix output

Standard data

Rho [ohm*m] Freq. init [Hz] Length [m]

☐ Internal calculation ☐ Set length in icon ☐ Single phase icon ☐ Embed in ATP-file

Object content

- ☒ Overhead line
- ☒ Single core cables
- ☒ Enclosing pipe
- ☒ Imported Z, Y

Model

Type: ☐ Bergeron ☒ PI ☐ JMarti ☐ Noda ☐ Semlyen ☐ ULM

Data

☒ Homogenous ☐ Cross bonded

Num sections

Comment: Order: Label: ☐ Hide

Σχήμα 4.2.4.1 : Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων - Model

Line/Cable Data: c1

Model Data Nodes

Cable number: 1 Paste Copy Delete ↑ Move ↓ # cables: 3

	CORE	SHEATH
Rin [m]	0	0.016866
Rout [m]	0.01	0.0171
Rho [ohm*m]	3.961E-8	2.83E-8
mu	1	1
mu (ins)	1	1
eps (ins)	3.1135	6
semicon in [m]	0	0
semicon out [m]	0	0

Total radius
Rout [m] 0.0192

Core
☒ On ☐ Ground

Sheath
☒ On ☐ Ground

Aarmor
☐ On ☐ Ground

Position
Vertical [m]
1.16674
Horizontal [m]
0.0192
TreFoil Cradle
Space: 0.1 [mm]

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Σχήμα 4.2.4.2 : Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων - Data

Line/Cable Data: c1

Model Data Nodes

Node data

NODE	PHASE	NAME
IN1-3	ABC	
IN4-6	ABC	
OUT1-3	ABC	
OUT4-6	ABC	

Assign conductor numbers to nodes

Node	Conductor
1A	1
1B	2
1C	3
2A	4
2B	5
2C	6

Only recommended for experienced users
Be aware of implications for transpositions

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Σχήμα 4.2.4.3 : Καρτέλα καθορισμού ακολουθίας κόμβων.

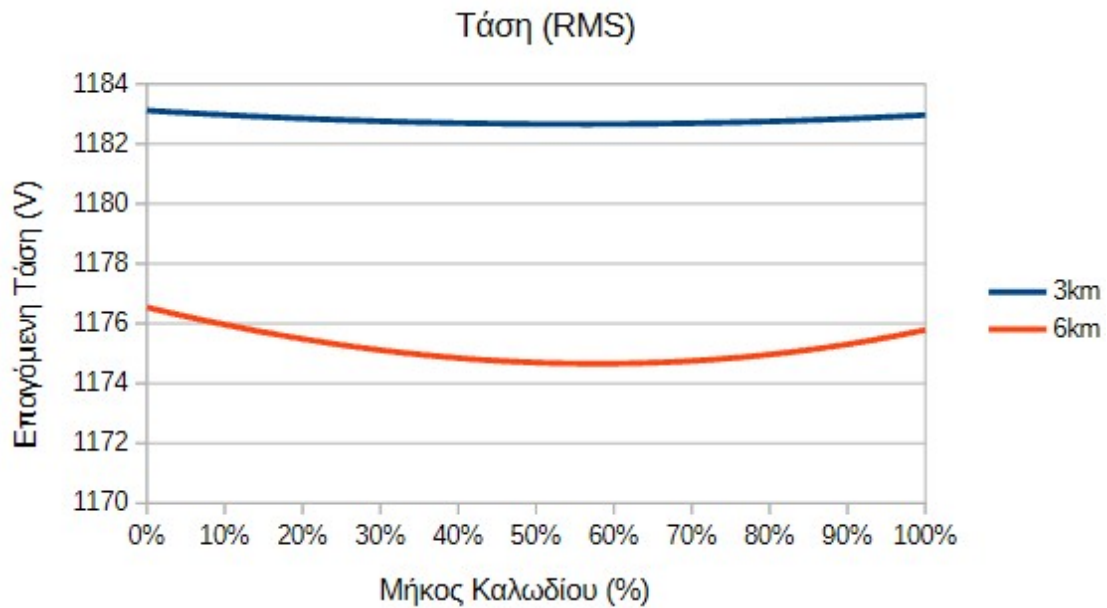
4.3 Σενάρια γείωσης μανδυνών

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται **τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας υπόγειων καλωδίων με γραμμή μήκους 3km και 6km αντίστοιχα**. Με στόχο τη μελέτη των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες, η ανάλυση ξεκινά από την περίπτωση χωρίς σύνδεση των μανδυνών με τη γη και στη συνέχεια εξετάζεται η γείωση τόσο στο ένα άκρο της γραμμής, όσο και στα δύο. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η σύγκριση της συμπεριφοράς του συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες γείωσης.

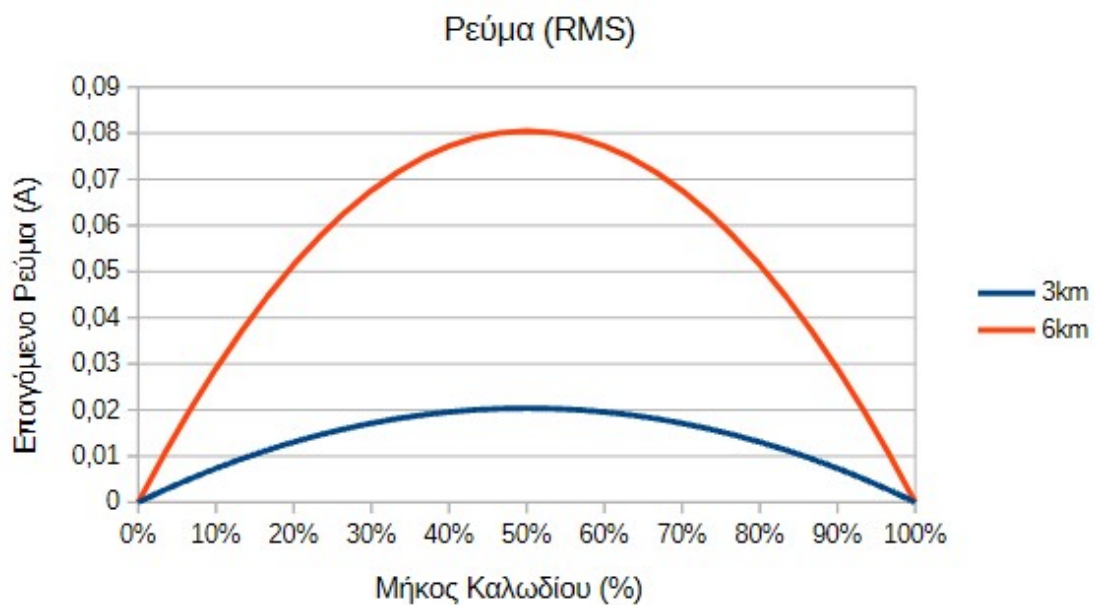
4.3.1 Χωρίς γείωση των μανδυνών

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται η λειτουργία της γραμμής, χωρίς καμία σύνδεση των μανδυνών με τη γη. Οι μανδύες παραμένουν ηλεκτρικά απομονωμένοι, δηλαδή αγείοι, γεγονός που επιτρέπει την ανάπτυξη επαγόμενων τάσεων λόγω των μαγνητικών πεδίων των αγωγών φάσης. Παρότι το σενάριο αυτό δεν εφαρμόζεται σε πραγματικές εγκαταστάσεις, είναι χρήσιμο για σκοπούς αναφοράς, καθώς αντιπροσωπεύει την ακραία περίπτωση επαγόμενων τάσεων και χρησιμοποιείται ως βάση σύγκρισης με τις επόμενες διατάξεις γείωσης.

Για κάθε σημείο μέτρησης κατά μήκος του καλωδίου καταγράφηκαν οι τάσεις και τα ρεύματα στους μανδύες μέσω των βολτομέτρων και αμπερομέτρων. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι RMS τιμές και κατασκευάστηκαν γραφικές παραστάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 4.3.1.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου.



Σχήμα 4.3.1.2 : RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου.

Στο σχήμα 4.3.1.1 παρουσιάζονται οι επαγόμενες τάσεις στους μανδύες συναρτήσει του μήκους του καλωδίου, εκφρασμένου σε ποσοστό του συνολικού μήκους. Όπως φαίνεται, λόγω της έλλειψης γείωσης των μανδύων, αναπτύσσονται επαγόμενες τάσεις που φτάνουν περίπου τα 1183V και 1175V για μήκη γραμμής 6 km και 9 km αντίστοιχα.

Στο σχήμα 4.3.1.2 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες. Αν και οι μανδύες δεν είναι γειωμένοι, παρατηρείται μικρή ροή ρεύματος (μέγιστη τιμή περίπου 20 mA και 80 mA), η οποία οφείλεται σε παρασιτικά στοιχεία του συστήματος, όπως η μικρή αγωγιμότητα του εδάφους και οι χωρητικές αγωγίμες συνδέσεις στα τμήματα του μοντέλου, που επιτρέπουν τον σχηματισμό ενός κλειστού κυκλώματος.

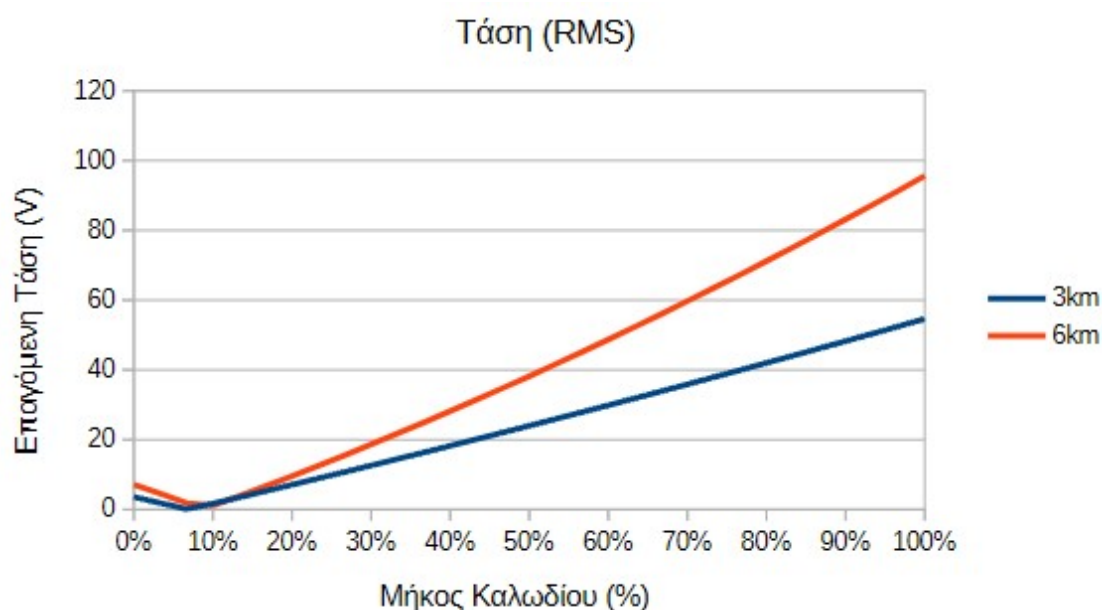
Σημείωση: Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο ο αριθμός των LCC, όσο και τα σημεία τοποθέτησης των μετρητών στην προσομοίωση μπορούν να επηρεάσουν τη μορφή των γραφικών παραστάσεων και την τοπική ακρίβεια των μετρήσεων, καθώς καθορίζουν το πόσο λεπτομερής είναι η αναπαράσταση της κατανομής των επαγόμενων ρευμάτων και τάσεων κατά μήκος του καλωδίου.

Παρά τις μικρές διαφοροποιήσεις που ενδέχεται να εμφανιστούν σε συγκεκριμένα σημεία, οι καταγεγραμμένες τιμές παραμένουν αντιπροσωπευτικές και αξιόπιστες για την εκτίμηση της τάξης μεγέθους και της συνολικής κατανομής των επαγόμενων φαινομένων.

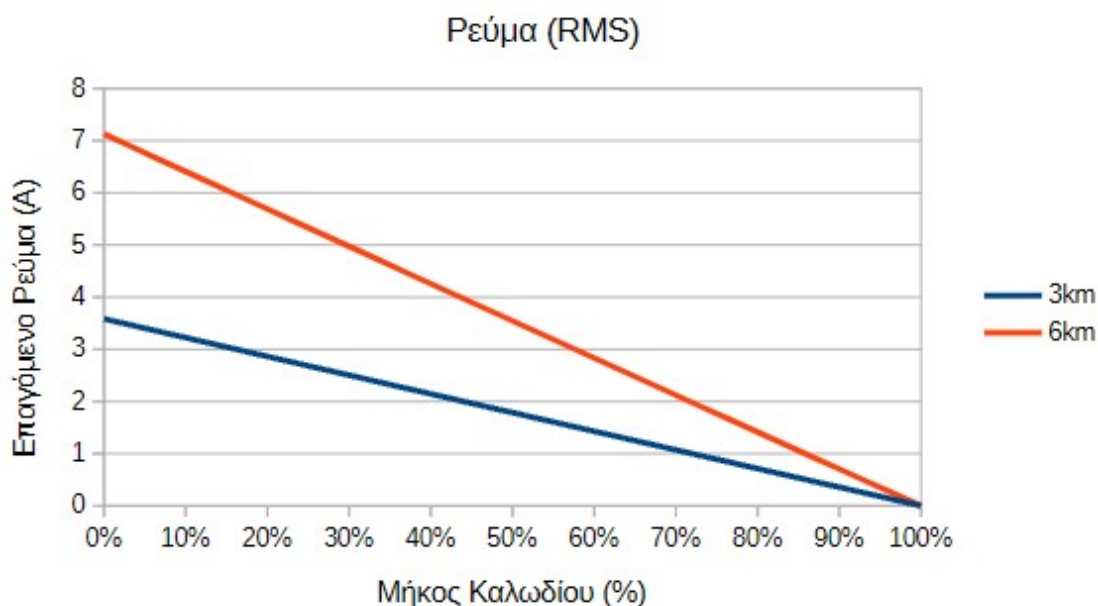
4.3.2 Με γείωση των μανδύων στο ένα άκρο της γραμμής

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται η διάταξη κατά την οποία οι μανδύες των αγωγών γειώνονται μόνο στο ένα άκρο της γραμμής (στην αρχή αυτής), ενώ στο άλλο άκρο παραμένουν ανοικτοκυκλωμένοι. Η διάταξη αυτή συναντάται σε πρακτικές εφαρμογές, καθώς μειώνει σημαντικά τις επαγόμενες τάσεις στους μανδύες σε σχέση με την περίπτωση που οι μανδύες είναι αγείωτοι. Στην προσομοίωση, η γείωση του ενός άκρου προσομοιώθηκε μέσω της σύνδεσης αντίστασης $R=1\Omega$ και στη συνέχεια καταγράφηκαν οι επαγόμενες τάσεις και ρεύματα στους μανδύες για διαφορετικά σημεία κατά μήκος της γραμμής.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα, όπου αποτυπώνεται η κατανομή των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες σε σχέση με το μήκος της γραμμής.



Σχήμα 4.3.2.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου.



Σχήμα 4.3.2.2 : RMS επαγόμενο ρεύμα κατα μήκος του καλωδίου.

Στο σχήμα 4.3.2.1 παρουσιάζεται η κατανομή της επαγόμενης τάσης κατα μήκος των καλωδίων. Παρατηρείται ότι και για τα δύο μήκη καλωδίου η τάση ξεκινάει με μία μη μηδενική τιμή, εμφανίζει μια μικρή πτώση και στη συνέχεια αυξάνεται σταδιακά. Αξιοσημείωτο είναι ότι η τάση ακολουθεί σχεδόν γραμμική ανοδική πορεία μέχρι το ανοικτό άκρο, όπου και φτάνει σε μέγιστη τιμή περίπου **55V** και **95V** για τη γραμμή μήκους **3km** και **6km** αντίστοιχα. Η μορφή αυτή αποτυπώνει τον ρόλο της γείωσης, η οποία επιβάλλει σχεδόν μηδενικό δυναμικό στο ένα άκρο και οδηγεί σε ανοδική κατανομή της τάσης κατα μήκος της γραμμής.

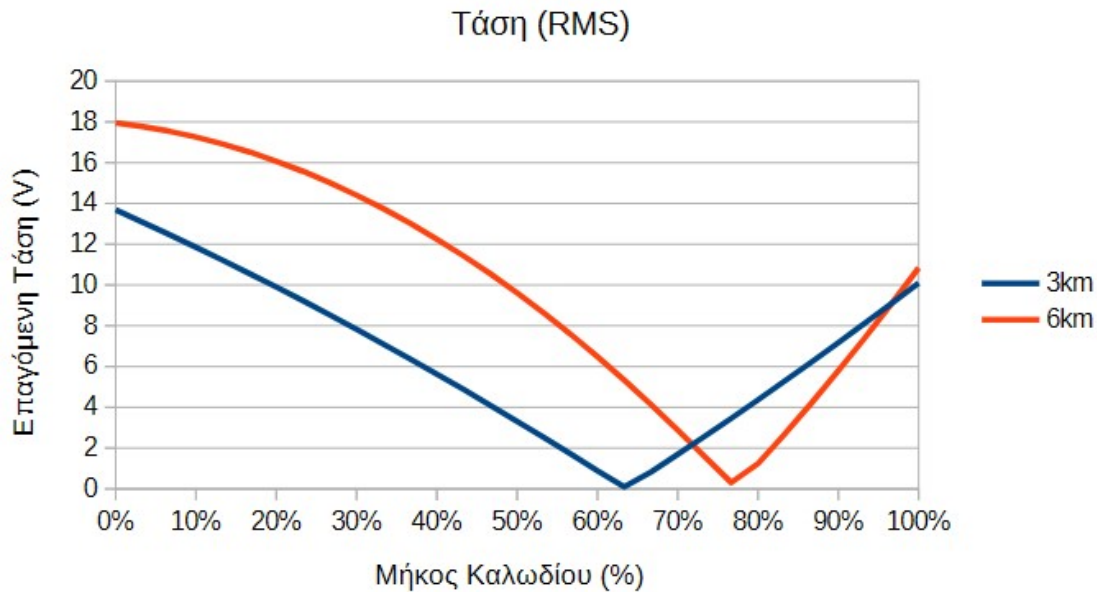
Αντίστοιχα, στο σχήμα 4.3.2.2 παρουσιάζεται η κατανομή του επαγόμενου ρεύματος στους μανδύες. Το ρεύμα ξεκινάει μέγιστο στην αρχή της γραμμής και στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά μέχρι να μηδενιστεί στο ανοικτό άκρο. Το γεγονός αυτό αντανακλά τη ροή του ρεύματος προς το γειωμένο σημείο, όπου και απορροφάται πλήρως.

Συγκρίνοντας την παρούσα περίπτωση με αυτήν των αγείωντων μανδύων, διαπιστώνεται ότι η γείωση των μανδύων στο ένα άκρο οδηγεί σε δραστηκή μείωση της επαγόμενης τάσης (απο εκατοντάδες volt σε λίγες δεκάδες), με αντάλλαγμα μια σημαντική αύξηση του ρεύματος. Ωστόσο, οι τιμές των ρευμάτων παραμένουν σχετικά χαμηλές, οπότε η διάταξη αυτή εξακολουθεί να είναι εφαρμόσιμη σε πραγματικά συστήματα.

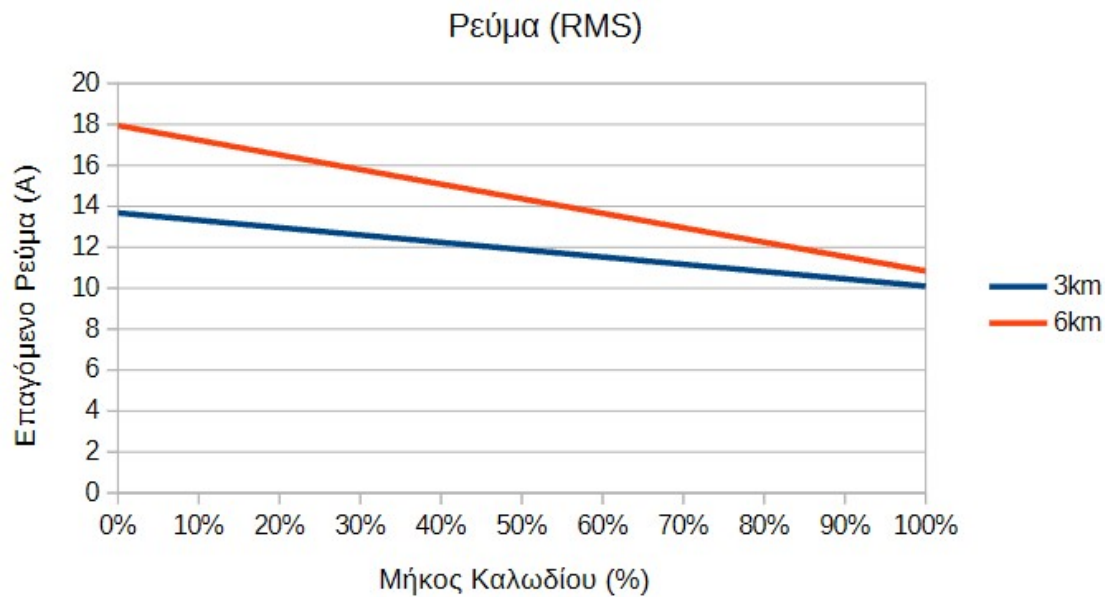
4.3.3 Με γείωση των μανδύων και στα δύο άκρα της γραμμής

Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται γείωση των μανδύων και στα δύο άκρα της γραμμής (στην αρχή και στο τέλος αυτής). Με αυτόν τον τρόπο, οι μανδύες συνδέονται άμεσα με το έδαφος, γεγονός που επιτρέπει τη δημιουργία ενός κλειστού κυκλώματος για τα επαγόμενα ρεύματα. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε πραγματικές εγκαταστάσεις, καθώς συμβάλλει στον αποτελεσματικό περιορισμό των επαγόμενων τάσεων και συνεπώς στην προστασία της μόνωσης του καλωδίου. Ωστόσο, η ύπαρξη κλειστού βρόχου ρεύματος στους μανδύες οδηγεί στην εμφάνιση ρευμάτων, τα οποία ενδέχεται να αυξήσουν σημαντικά τις απώλειες και να προκαλέσουν επιπρόσθετη θέρμανση στο καλώδιο.

Στο σχήμα 4.3.3.1 παρουσιάζεται η κατανομή της επαγόμενης τάσης κατά μήκος της γραμμής, ενώ στο σχήμα 4.3.3.2 απεικονίζονται τα αντίστοιχα επαγόμενα ρεύματα.



Σχήμα 4.3.3.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου.



Σχήμα 4.3.3.2 : RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου.

Στο σχήμα 4.3.3.1 παρουσιάζεται η κατανομή της επαγόμενης τάσης κατά μήκος της γραμμής. Η τάση ξεκινά από περίπου **13.6V** και **18V** για τα μήκη γραμμών **3km** και **6km**, μειώνεται σχεδόν γραμμικά έως ότου μηδενιστεί κοντά στο **63%** και **76%** του μήκους της γραμμής αντίστοιχα, και στη συνέχεια αυξάνεται πάλι, φτάνοντας ξανά κοντά στα **10V** και **11V** στο **100%**.

Στο σχήμα 4.3.3.2 απεικονίζονται τα αντίστοιχα επαγόμενα ρεύματα. Τα ρεύματα ξεκινάν περίπου στα **14A** και **18A** στην αρχή της γραμμής και παρουσιάζουν σταδιακή πτώση, καταλήγοντας σε τιμές περίπου **10A** για το μήκος γραμμής **3km** και **11A** για το μήκος γραμμής **6km** στο **100%** του μήκους.

Συγκρίνοντας με τις προηγούμενες περιπτώσεις γείωσης, παρατηρείται ότι με γείωση των μανδύων και στα δύο άκρα της γραμμής, η επαγόμενη τάση περιορίζεται ακόμα περισσότερο,

ενώ το επαγόμενο ρεύμα γίνεται πολλαπλάσιο των προηγούμενων σεναρίων. Παρότι η αύξηση του ρεύματος μπορεί να συνεπάγεται υψηλότερες απώλειες, η τάση παραμένει σε πολύ χαμηλό επίπεδο, το οποίο δεν δημιουργεί ουσιαστικό κίνδυνο για τη μόνωση ή τον εξοπλισμό.

4.4 Σενάρια αντιμετάθεσης αγωγών και μανδύων (CB)

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται διάφορα σενάρια εφαρμογής τεχνικών αντιμετάθεσης, με σκοπό τη μείωση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες υπόγειων καλωδίων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην τεχνική cross-bonding, η οποία βασίζεται στη διαίρεση του καλωδίου σε τμήματα και στην αντιμετάθεση των μανδύων, ώστε να επιτυγχάνεται εξισορρόπηση των επαγόμενων τάσεων. Παράλληλα, εξετάζεται και η τεχνική αντιμετάθεσης αγωγών, η οποία παρότι δεν αποτελεί cross-bonding με την στενή έννοια, αποσκοπεί κι αυτή, σε μείωση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων κατά μήκος της γραμμής.

Συγκεκριμένα μελετώνται τρία διαφορετικά σενάρια:

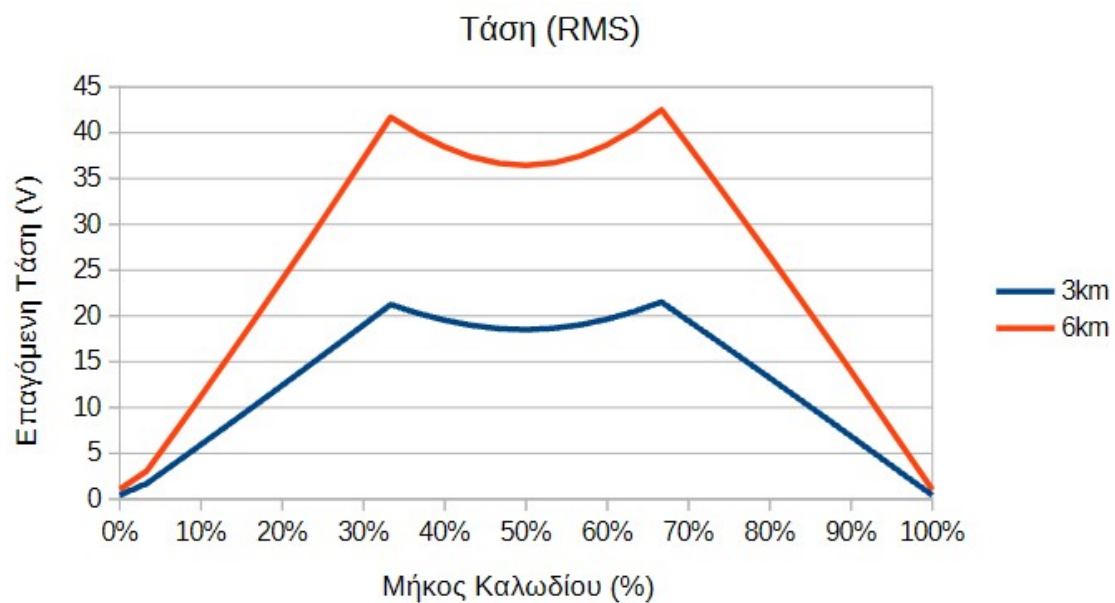
1. Εφαρμογή της κλασικής τεχνικής **cross-bonding** σε **1 major section**,
2. Εφαρμογή της κλασικής τεχνικής **cross-bonding** σε **2 major sections**,
3. Εφαρμογή **αντιμετάθεσης αγωγών και συνδυασμένης αντιμετάθεσης** (αγωγών + μανδύων)

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας κάθε διάταξης και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά της γραμμής σε διαφορετικές συνθήκες.

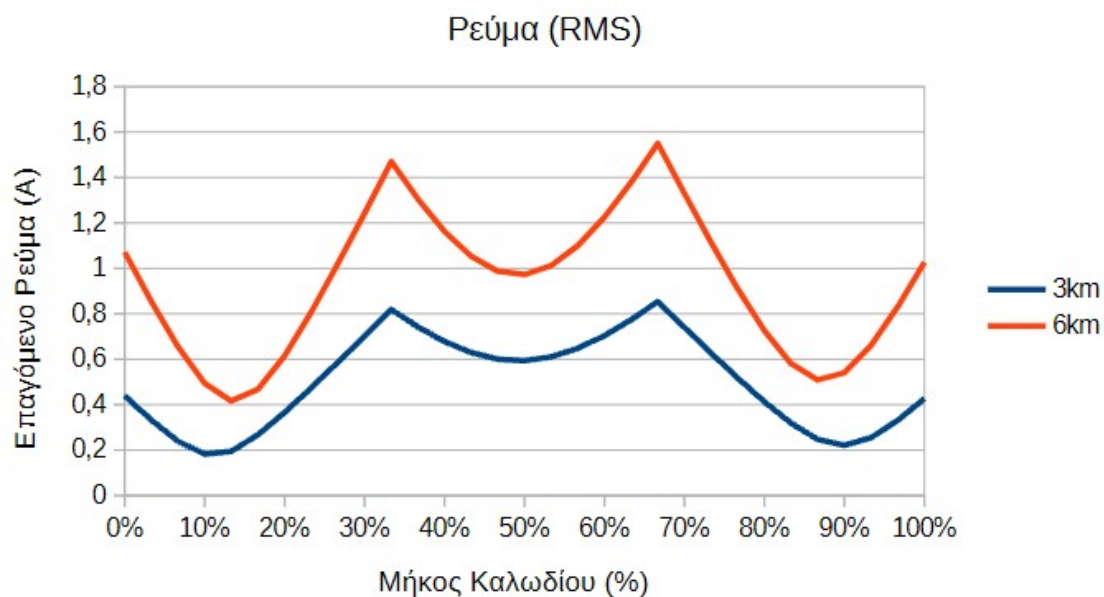
4.4.1 Αντιμετάθεση των μανδύων (CB) με ένα major section

Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η κλασική τεχνική cross-bonding με ένα **major section**, το οποίο διαιρείται σε τρία ίσα υποτμήματα. Στο τέλος κάθε υποτμήματος πραγματοποιείται η αντιμετάθεση των μανδύων, ώστε να επιτυγχάνεται σταδιακή εξισορρόπηση των επαγόμενων τάσεων κατά μήκος του καλωδίου. Η γείωση των μανδύων γίνεται στην αρχή και στο τέλος της γραμμής, ώστε να κλείνει το κύκλωμα για τα επαγόμενα ρεύματα.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι κόμβοι μέτρησης όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις, καταγράφοντας τις τιμές των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες σε επιλεγμένα σημεία της γραμμής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα, όπου απεικονίζεται η κατανομή των μεγεθών συναρτήσει του ποσοστού του μήκους του καλωδίου.



Σχήμα 4.4.1.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου για 1 major section.



Σχήμα 4.4.1.2 : RMS επαγόμενο ρεύμα κατα μήκος του καλωδίου για 1 major section.

Στο σχήμα 4.4.1.1 παρουσιάζεται η κατανομή της επαγόμενης τάσης για τα δύο διαφορετικά μήκοι γραμμών. Διαπιστώνεται ότι οι επαγόμενες τάσεις έχουν αρχικά σχεδόν μηδενική τιμή, οι οποίες αυξάνονται με σχετικά γραμμικό τρόπο έως το 33% του μήκους των καλωδίων. Στη συνέχεια σημειώνεται μια ελαφρά πτώση για περίπου το επόμενο 20% της γραμμής, ενώ αμέσως μετά η τάση αυξάνεται εκ νέου, φτάνοντας μέγιστες τιμές 21V και 42V στο 66% του μήκους για τα δύο διαφορετικά μήκη καλωδίων αντίστοιχα. Απο το σημείο αυτό και έπειτα, η καμπύλη ακολουθεί καθοδική πορεία και μειώνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι το τέλος της γραμμής, όπου και μηδενίζεται.

Στο σχήμα 4.4.1.2 απεικονίζονται τα αντίστοιχα επαγόμενα ρεύματα. Παρατηρείται ότι, τα επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες ακολουθούν παρόμοια κυματομορφή με αυτή της

επαγόμενης τάσης, ενώ αξιοσημείωτο είναι ότι η τιμές διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από **0.8A** και **1.3A** αντίστοιχα, παρουσιάζοντας μόνο μικρές διακυμάνσεις στην αρχή και στο τέλος της γραμμής.

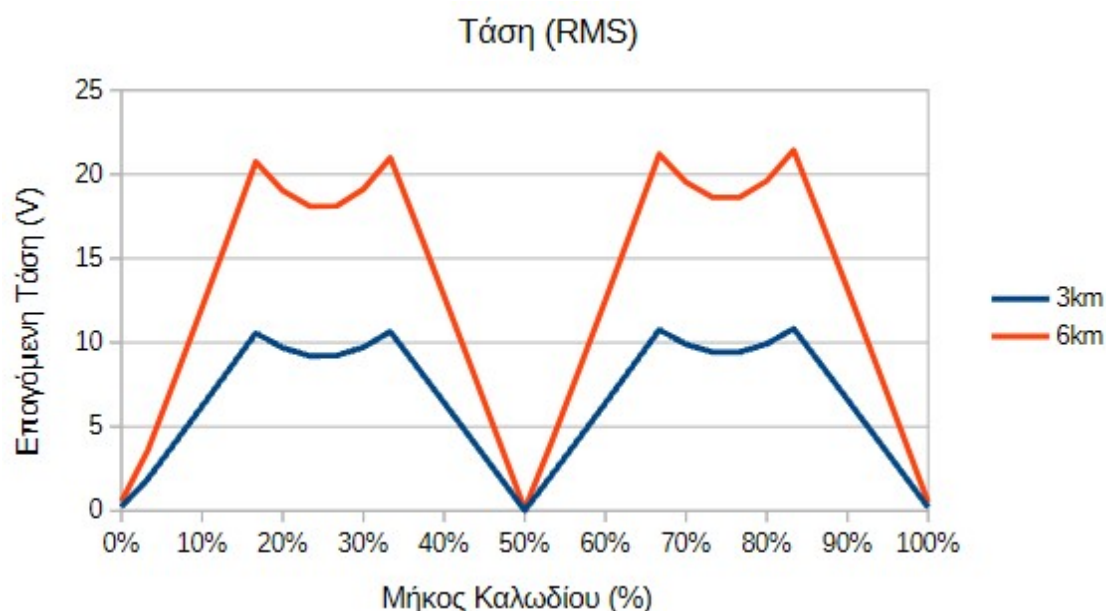
Σε σύγκριση με τα προηγούμενα σενάρια προσομοίωσης, όπου τα επαγόμενα μεγέθη εμφάνιζαν σημαντικά υψηλότερες τιμές, η εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding επιτυγχάνει αισθητή μείωση του επαγόμενου ρεύματος ενώ ταυτόχρονα “κρατάει” σε χαμηλά επίπεδα την επαγόμενη τάση. Συνολικά, οι τάσεις και τα ρεύματα περιορίζονται πλέον σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές, γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

4.4.2 Εφαρμογή cross-bonding με 2 major sections (κύρια τμήματα)

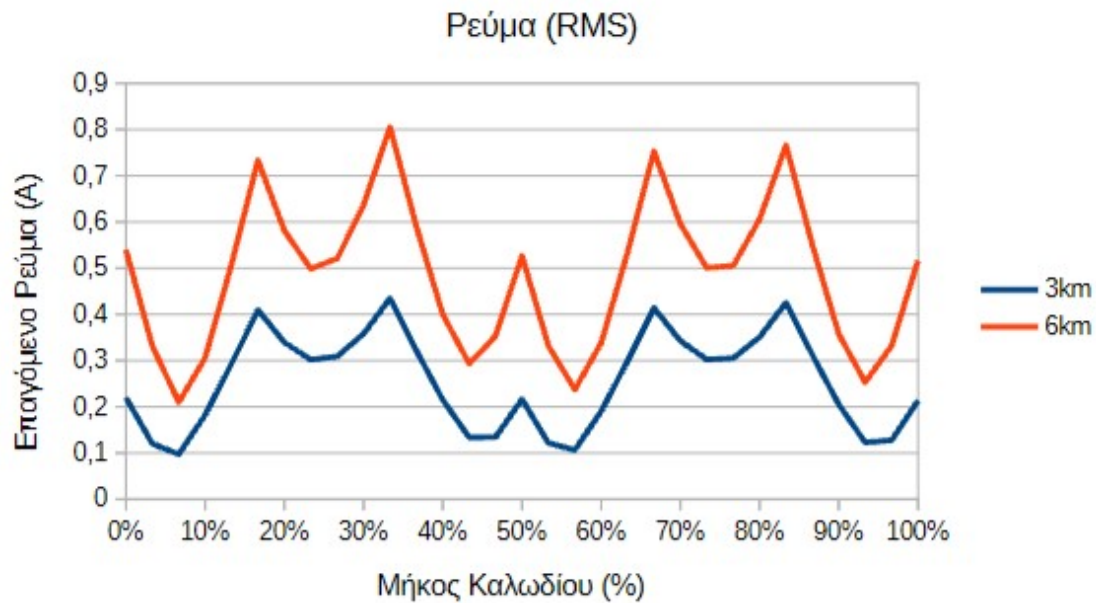
Στη συνέχεια εξετάζεται η εφαρμογή της τεχνικής **cross-bonding** με περισσότερα από ένα major section, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της αύξησης των σημείων αντιμετάθεσης στην κατανομή των επαγόμενων μεγεθών. Συγκεκριμένα, μελετάται η περίπτωση όπου το καλώδιο χωρίζεται σε δύο major sections, με κάθε section να αποτελείται από τρία ίσα υποτμήματα.

Στην περίπτωση αυτή, οι μανδύες γειώνονται στην αρχή και στο τέλος του κάθε major section, ενώ σε κάθε υποτμήμα πραγματοποιείται η αντίστοιχη αντιμετάθεση.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την καλύτερη εξισορρόπηση των επαγόμενων τάσεων και τη μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων στους μανδύες, προσφέροντας πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα για γραμμές μεγάλης απόστασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα, όπου αποτυπώνεται η κατανομή των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων συναρτήσει του μήκους του καλωδίου.



Σχήμα 4.4.2.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου για 2 major sections.



Σχήμα 4.4.2.2 : RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου για 2 major sections.

Απο τις γραφικές παραστάσεις των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων για την εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding με δύο major sections παρατηρούνται τα εξής :

Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή της επαγόμενης τάσης εμφανίζει περαιτέρω περιορισμό σε σχέση με το σενάριο ενός major section. Η μορφή της γραφικής παραμένει ίδια, ωστόσο επαναλαμβάνεται δύο φορές κατά μήκος της γραμμής, με μηδενισμό της τάσης στο τέλος κάθε major section λόγω της γείωσης που εφαρμόζεται στο τέλος του κάθε τμήματος. Αντίστοιχα, η κατανομή του επαγόμενου ρεύματος ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά, ενώ οι τιμές των ρευμάτων εμφανίζουν περαιτέρω μείωση σε σχέση με το σενάριο ενός major section.

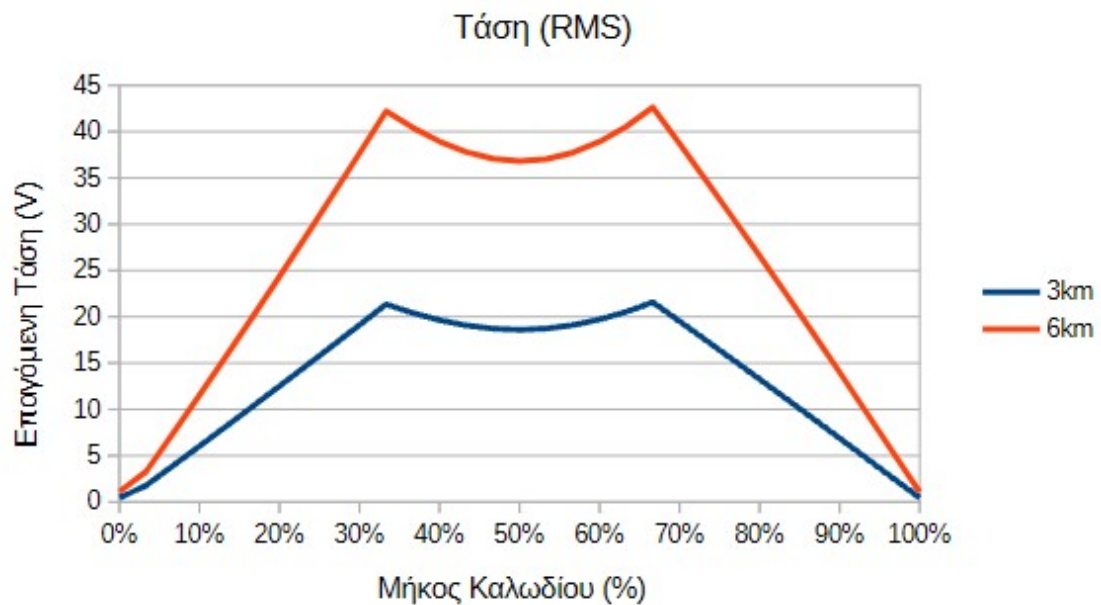
Συνολικά, η αύξηση του αριθμού των major sections οδηγεί σε σαφή βελτίωση στον περιορισμό των επαγόμενων μεγεθών, διατηρώντας ταυτόχρονα την συνοχή με τις προηγούμενες αναλύσεις και παρέχοντας χρήσιμα συμπεράσματα για την κατανομή τάσεων και ρευμάτων κατά μήκος του καλωδίου.

4.4.3 Σενάρια αντιμετάθεσης αγωγών και συνδυασμένης αντιμετάθεσης

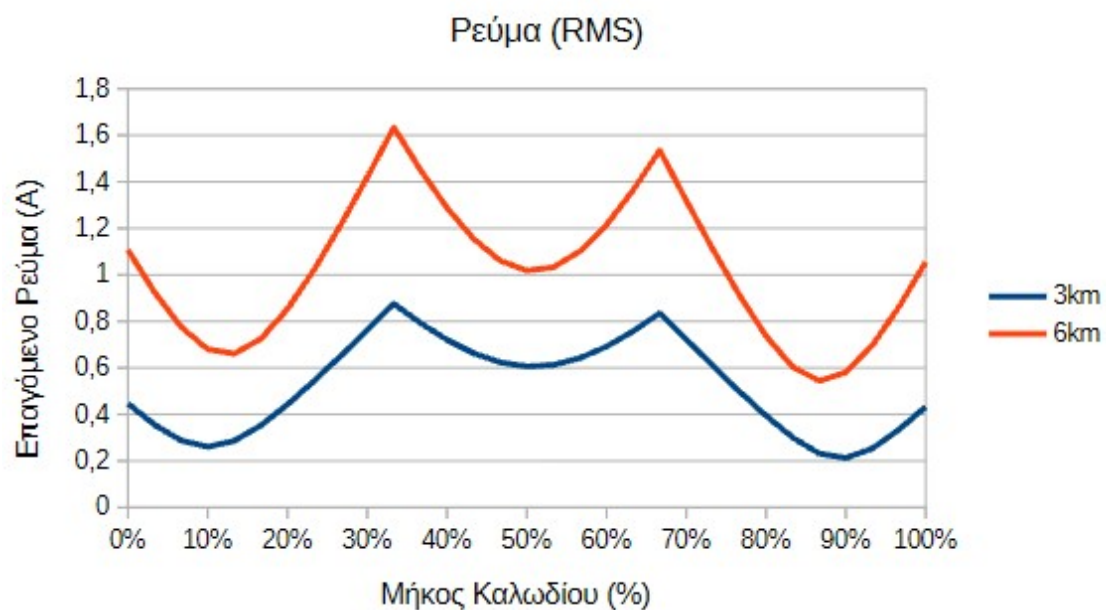
Στο επόμενο στάδιο της μελέτης εξετάζονται δύο εναλλακτικά σενάρια αντιμετάθεσης, τα οποία εφαρμόζονται πέρα από την κλασική τεχνική cross-bonding. Στο πρώτο σενάριο πραγματοποιείται μόνο η αντιμετάθεση των αγωγών φάσης κατά μήκος του καλωδίου, χωρίς καμία τροποποίηση στη σύνδεση των μανδυνών. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η περιοδική εναλλαγή των φάσεων, που στοχεύει σε πιο ισορροπημένη κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου γύρω από το καλώδιο. Στο δεύτερο σενάριο εφαρμόζεται συνδυασμένη αντιμετάθεση τόσο των αγωγών όσο και των μανδυνών, με σκοπό να διερευνηθεί εάν η ταυτόχρονη υλοποίηση των δύο τεχνικών μπορεί να οδηγήσει σε πιο ευνοϊκή κατανομή των επαγόμενων μεγεθών, σε σχέση με τις μεμονωμένες εφαρμογές.

Για την αξιολόγηση των δύο περιπτώσεων, χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη μετρήσεων όπως και στα προηγούμενα σενάρια, ώστε να καταγραφούν οι επαγόμενες τάσεις και τα

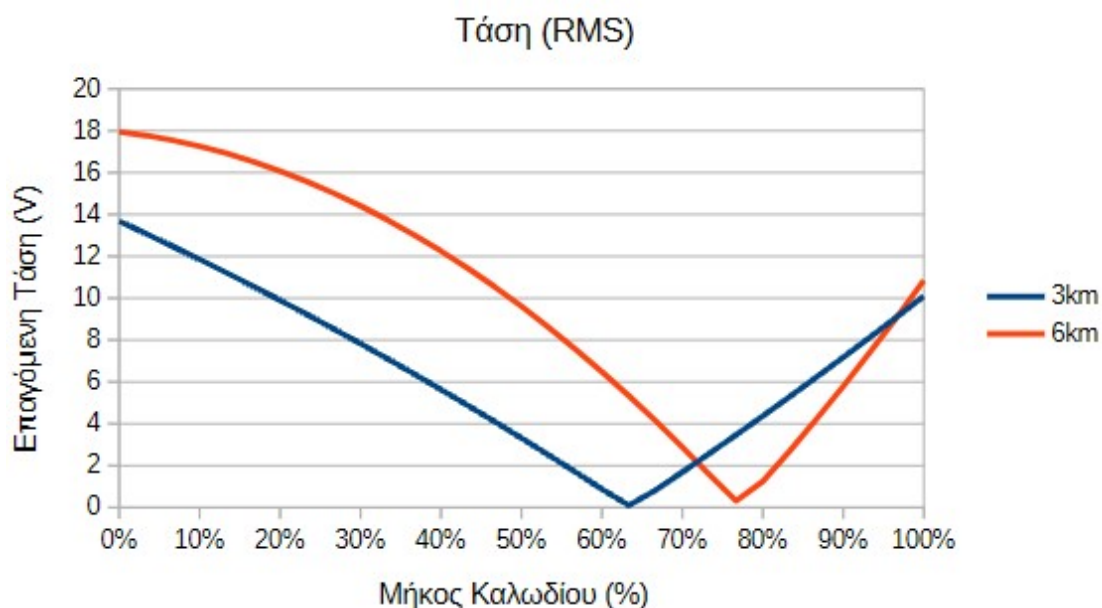
ρεύματα στους μανδύες σε χαρακτηριστικά σημεία της γραμμής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα, απεικονίζοντας την κατανομή των μεγεθών αυτών συναρτήσει του μήκους του καλωδίου.



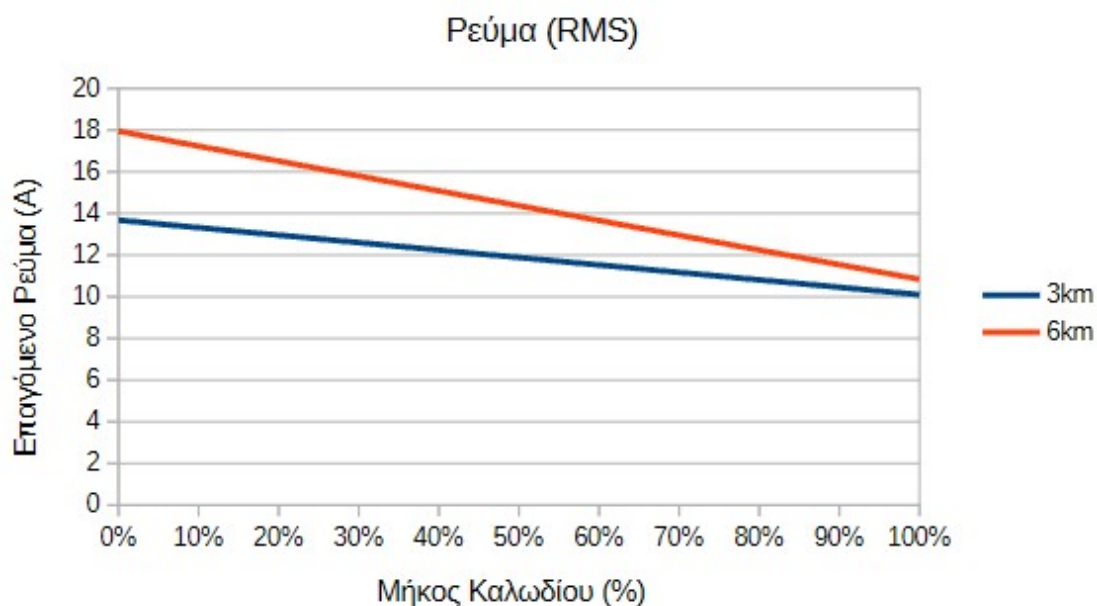
Σχήμα 4.4.3.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου. Εφαρμογή αντιμετάθεσης μόνο των αγωγών φάσης.



Σχήμα 4.4.3.2 : RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου. Εφαρμογή αντιμετάθεσης μόνο των αγωγών φάσης.



Σχήμα 4.4.3.3 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου. Εφαρμογή συνδυασμένης αντιμετάθεσης.



Σχήμα 4.4.3.4 : RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου. Εφαρμογή συνδυασμένης αντιμετάθεσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνεται ότι η αντιμετάθεση μόνο των αγωγών φάσης οδηγεί σε κατανομές των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες που είναι πολύ παρόμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν στην κλασική τεχνική cross-bonding με ένα major section. Δηλαδή, η απλή αντιμετάθεση των φάσεων δεν επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με την προηγούμενη διάταξη.

Στην περίπτωση της συνδυασμένης αντιμετάθεσης αγωγών και μανδυνών, θα μπορούσε κανείς να αναμένει περαιτέρω μείωση των επαγόμενων μεγεθών. Ωστόσο, τα αποτελέσματα

δείχνουν ότι οι τιμές και οι κυματομορφές είναι ουσιαστικά όμοιες με αυτές που προκύπτουν από τη βασική διάταξη με γείωση των μανδύων στα δύο άκρα, χωρίς καμία αντιμετάθεση.

4.5: Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η μελέτες που προηγήθηκαν έδειξαν με σαφήνεια τις επιδράσεις που έχουν οι διαφορετικές τεχνικές σύνδεσης και διαχείρισης των μανδύων στη συμπεριφορά της καλωδιακής γραμμής. Ξεκινώντας από την περίπτωση αγείωτων μανδύων, παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες τιμές επαγόμενης τάσης, γεγονός που καταδεικνύει τον έντονο χαρακτήρα του φαινομένου, απουσία οποιασδήποτε διάταξης περιορισμού. Η εισαγωγή γειώσεων, είτε στο ένα άκρο είτε και στα δύο άκρα, οδήγησε σε αισθητή μείωση των επαγόμενων τάσεων, συνοδευόμενη όμως σε αρκετές περιπτώσεις από αύξηση των ρευμάτων στους μανδύες.

Η εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding απέδειξε την αποτελεσματικότητα της, καθώς επιτυγχάνει ταυτόχρονη μείωση τόσο των επαγόμενων τάσεων όσο και των ρευμάτων, σε επίπεδα σαφώς χαμηλότερα από εκείνα που παρατηρήθηκαν στις προηγούμενες διατάξεις. Η αύξηση του αριθμού των major sections ενίσχυσε περαιτέρω την αποδοτικότητα της τεχνικής, δείχνοντας ότι περισσότερα major sections οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή απαιτεί συμβιβασμό, αφού η υπερβολική αύξηση των major sections συνεπάγεται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και κόστος εγκατάστασης, χωρίς πάντοτε ανάλογο όφελος.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις και συνθήκες του εκάστοτε έργου. Σε περιπτώσεις με αυξημένες ανάγκες περιορισμού των επαγόμενων μεγεθών, η τεχνική cross-bonding, με τον κατάλληλο αριθμό major section, συνιστά τη βέλτιστη λύση. Αντίθετα, για εφαρμογές με λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις, απλούστερες τεχνικές γείωσης μπορούν να παρέχουν αποδεκτά αποτελέσματα με μικρότερο κόστος και ευκολότερη υλοποίηση.

Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Επαγόμενων Τάσεων και Ρευμάτων σε Καταστάσεις Σφάλματος

Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση και προσομοίωση της συμπεριφοράς υπόγειων καλωδίων μέσης τάσης υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, με στόχο την κατανόηση των φαινομένων που σχετίζονται με τις επαγόμενες τάσεις και τα ρεύματα στους μανδύες. Στο παρόν κεφάλαιο, η μελέτη επεκτείνεται σε καταστάσεις σφάλματος, καθώς τα βραχυκυκλώματα αποτελούν κρίσιμες καταπονήσεις για το σύστημα μεταφοράς και μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές ηλεκτρικές και θερμικές επιβαρύνσεις. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τόσο μονοφασικά όσο και τριφασικά σφάλματα, τα οποία μοντελοποιούνται με τη βοήθεια του λογισμικού ATPDraw. Παράλληλα, διερευνάται η επίδραση διαφορετικών τεχνικών γείωσης στη συμπεριφορά των καλωδίων κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων, με στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και εξάγονται συμπεράσματα που θα αξιοποιηθούν στη συνολική θεώρηση της εργασίας.

5.1 Είδη σφαλμάτων και αντικείμενο μελέτης

Η εμφάνιση σφαλμάτων στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αιτίες καταπόνησης του συστήματος. Στην πράξη, τα πιο χαρακτηριστικά σενάρια που εξετάζονται είναι τα μονοφασικά και τα τριφασικά σφάλματα.

Τα **μονοφασικά σφάλματα** συμβαίνουν όταν μία μόνο φάση έρχεται σε επαφή με τη γη ή με τον μανδύα του καλωδίου. Αποτελούν το πιο συνηθισμένο είδος σφάλματος στα δίκτυα μέσης τάσης, με ποσοτά εμφάνισης που ξεπερνούν τα άλλα είδη βραχυκυκλωμάτων. Έχουν ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι επαγόμενες τάσεις και τα ρεύματα στους μανδύες μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένες θερμικές καταπονήσεις και πιθανούς κινδύνους για την ασφάλεια λειτουργία του συστήματος.

Τα **τριφασικά σφάλματα**, αντίθετα, προκύπτουν όταν όλες οι φάσεις βραχυκυκλωθούν μεταξύ τους, δηλαδή, όταν έρθουν σε επαφή μεταξύ τους ή με τη γη. Παρόλο που η πιθανότητα εμφάνισης τους είναι σαφώς μικρότερη, τα ρεύματα που αναπτύσσονται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύ μεγαλύτερα, με αποτέλεσμα να απαιτείται σωστός σχεδιασμός και διαστασιολόγηση των καλωδίων και των συστημάτων προστασίας.

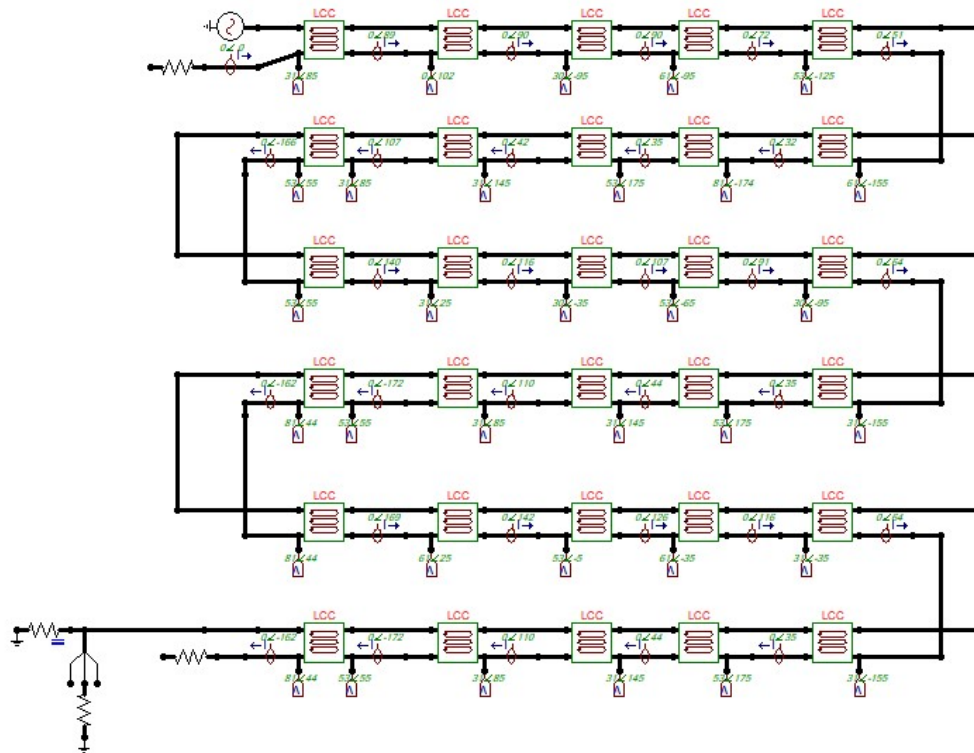
Στην παρούσα εργασία εξετάζονται και τα δύο είδη σφαλμάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στα μονοφασικά λόγω της συχνότερης εμφάνισης τους, ενώ τα τριφασικά αναλύονται για να δοθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς του συστήματος σε ακραίες συνθήκες.

5.2 Μοντελοποίηση μονοφασικού και τριφασικού σφάλματος

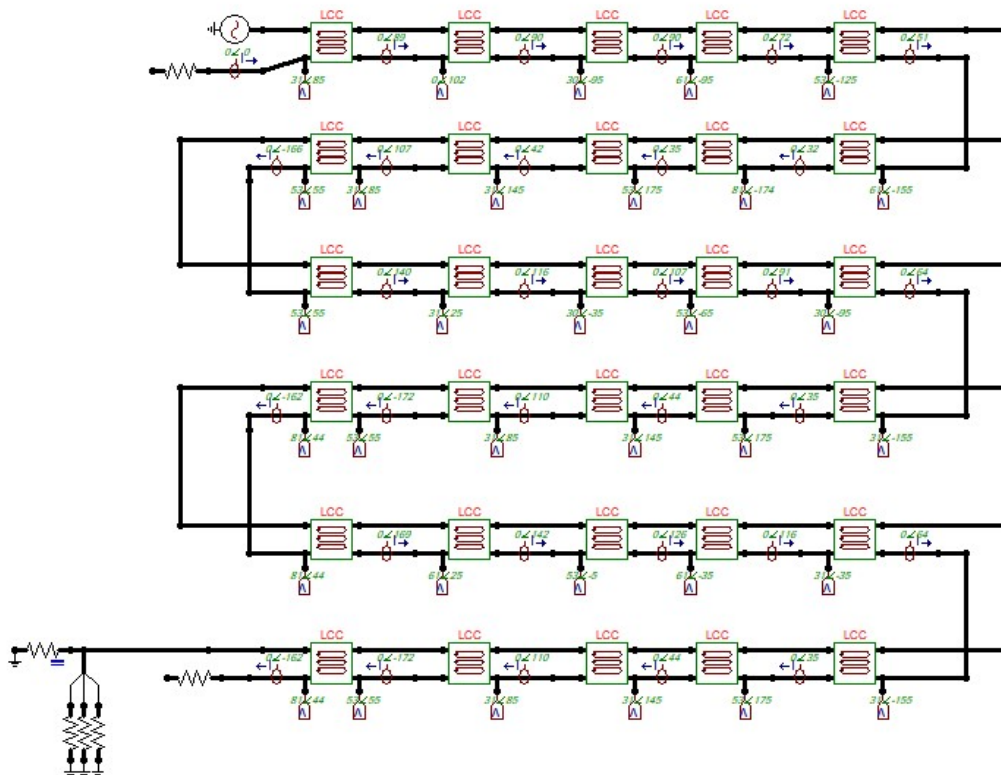
Η παραμετροποίηση των καλωδίων, ο αριθμός των μετρητικών σημείων καθώς και οι θέσεις αυτών παραμένουν ίδια με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 4, όπου εξετάστηκαν οι κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ύπαρξη ενός ξεκάθαρα μέτρου σύγκρισης ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο κεφαλαίων, ώστε να αποτιμηθεί με σαφήνεια η διαφορά στη συμπεριφορά των καλωδίων μεταξύ φυσιολογικής λειτουργίας και κατάστασης σφάλματος.

Η μοντελοποίηση των σφαλμάτων υλοποιείται στο περιβάλλον του ATPDraw, με την εισαγωγή μιας αντίστασης σφάλματος ίσης με 1Ω . Η αντίσταση αυτή συνδέεται σε κατάλληλο σημείο του κυκλώματος, διαφοροποιώντας τον τρόπο σύνδεσης ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος. Συγκεκριμένα, για το μονοφασικό σφάλμα, μία μόνο φάση συνδέεται με τη γη μέσω της αντίστασης, ενώ για το τριφασικό σφάλμα και οι τρεις φάσεις συνδέονται ταυτόχρονα με τη γη μέσω της ίδιας διάταξης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα κυκλώματα προσομοίωσης για τα δύο είδη σφαλμάτων, τα οποία θα αποτελέσουν τη βάση για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση με τα σενάρια κανονικής λειτουργίας.



Σχήμα 5.2.1 : Απεικόνιση της διάταξης προσομοίωσης 1φ-σφάλματος.



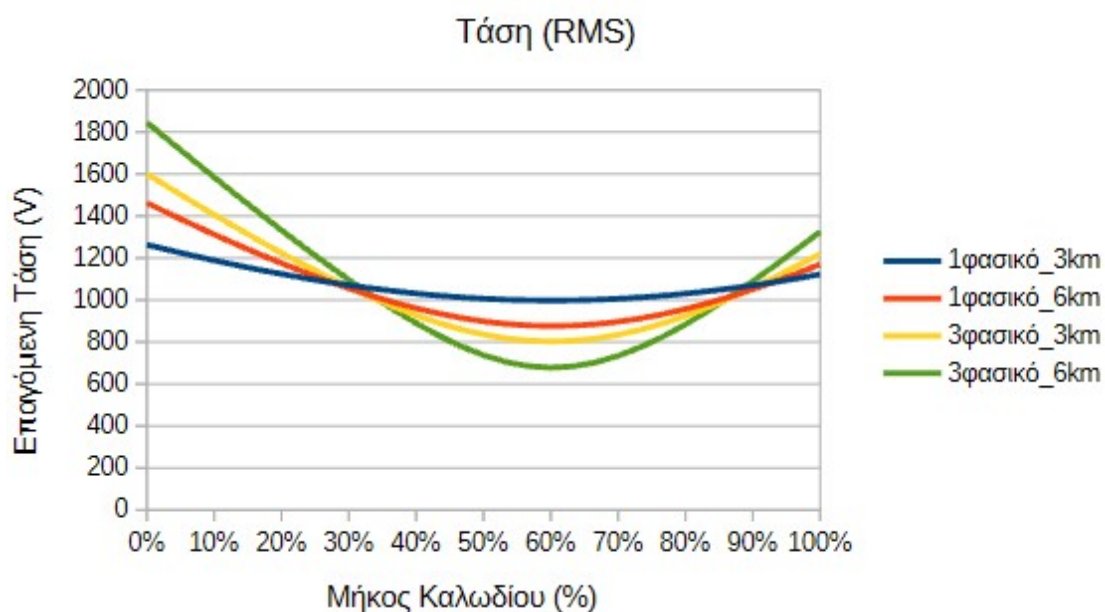
Σχήμα 5.2.2 : Απεικόνιση της διάταξης προσομοίωσης 3φ-σφάλματος.

5.3 Σενάρια Γείωσης Μανδύων Υπο Συνθήκες Σφάλματος

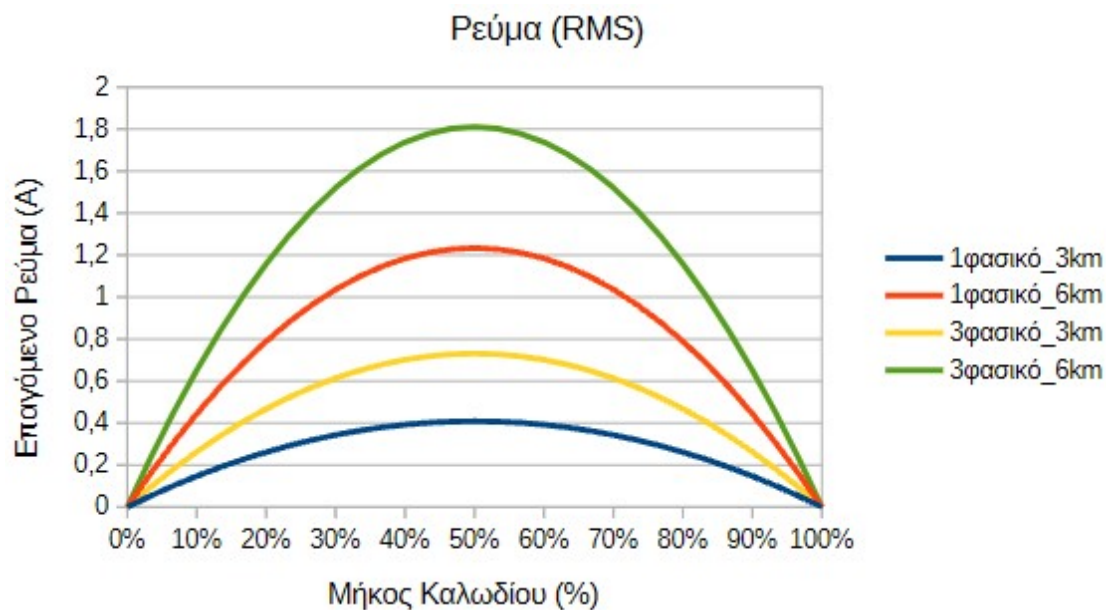
Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται οι επαγόμενες τάσεις και τα ρεύματα στους μανδύες των υπόγειων καλωδίων κατά την εμφάνιση μονοφασικών και τριφασικών σφαλμάτων. Η ανάλυση ακολουθεί την ίδια μεθοδολογική σειρά που εφαρμόστηκε και στο Κεφάλαιο 4, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα και να αναδεικνύονται πιο καθαρά οι διαφορές μεταξύ κανονικής λειτουργίας και συνθηκών σφάλματος.

5.3.1 Χωρίς Γείωση των Μανδύων

Στην περίπτωση αυτή οι μανδύες παραμένουν αγείοι, γεγονός που οδηγεί στην εμφάνιση των μέγιστων επαγόμενων τάσεων. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι επαγόμενες τάσεις και τα επαγόμενα ρεύματα για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος και για την περίπτωση τριφασικού σφάλματος αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.1.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου.

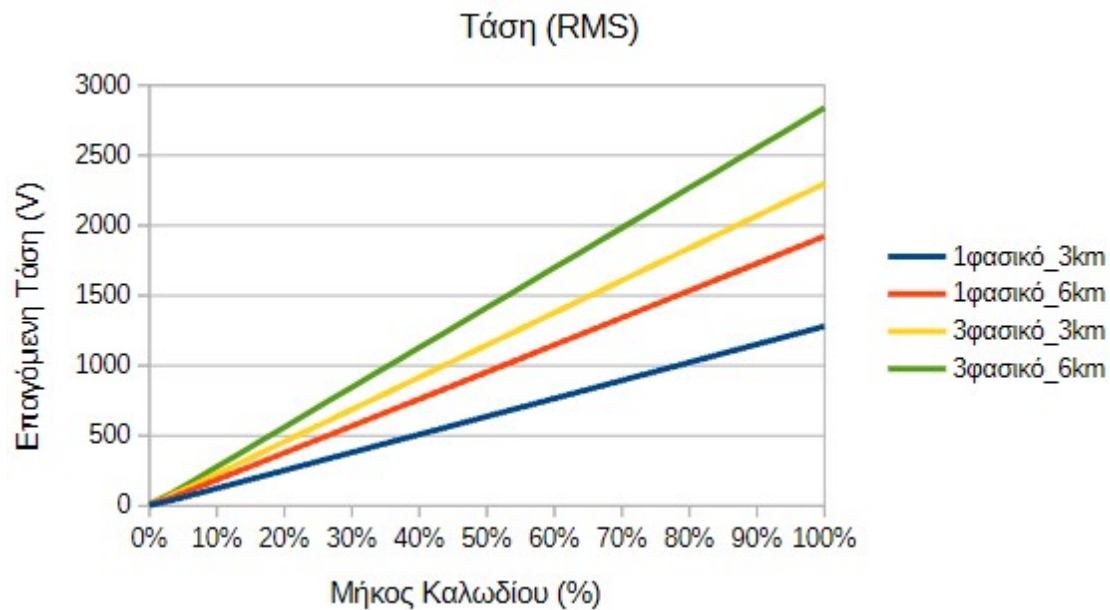


Σχήμα 5.3.1.2 : RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου.

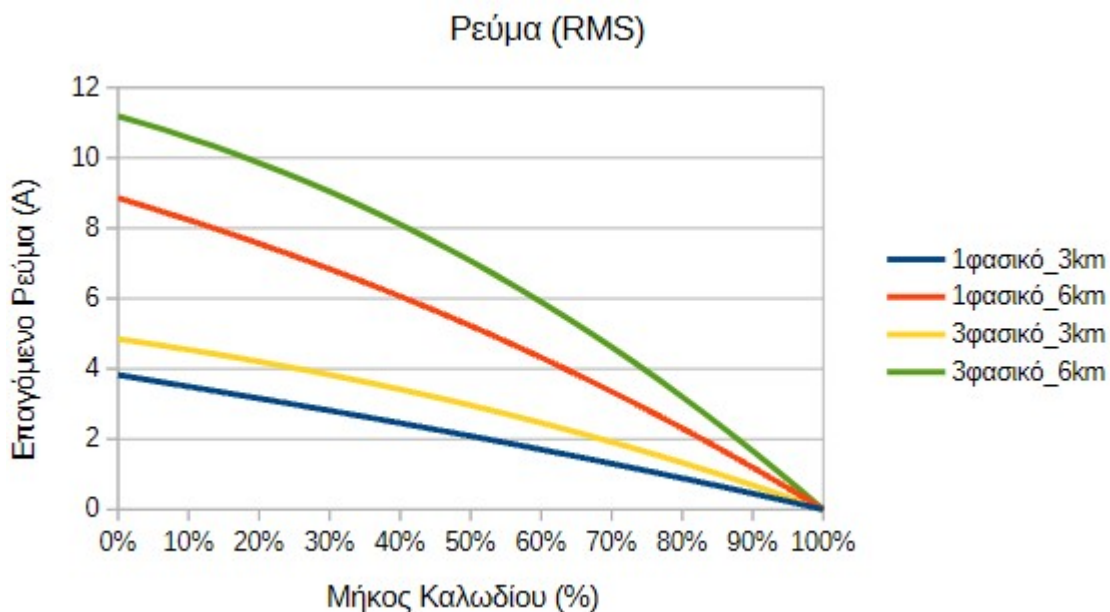
Από τις γραφικές παραστάσεις της τάσης και του ρεύματος παρατηρείται ότι, τόσο στο μονοφασικό όσο και στο τριφασικό βραχυκύκλωμα, οι κυματομορφές παραμένουν παρόμοιες με αυτές που καταγράφηκαν σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Η κύρια διαφορά εντοπίζεται στις τιμές των μεγεθών και ιδίως σε αυτές του ρεύματος. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το μήκος της γραμμής τόσο στο μονοφασικό όσο και στο τριφασικό σφάλμα εμφανίζονται μεγαλύτερες βυθίσεις της τάσης, ενώ τα ρεύματα που αναπτύσσονται είναι πολλαπλάσια σε σχέση με τη κανονική μόνιμη κατάσταση. Συγκριτικά μεταξύ των δύο τύπων σφαλμάτων, το **μέγιστο ρεύμα** στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα φτάνει τα **0.4A** και **1.2A** για την γραμμή **3km** και **6km** αντίστοιχα, ενώ στο τριφασικό τα **0.73A** και **1.8A**.

5.3.2 Με γείωση των μανδύων στο ένα άκρο της γραμμής

Στο σενάριο αυτό οι μανδύες γειώνονται μόνο στο ένα άκρο της γραμμής. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι επαγόμενες τάσεις και τα επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες για μονοφασικό και τριφασικό σφάλμα αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.2.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου.

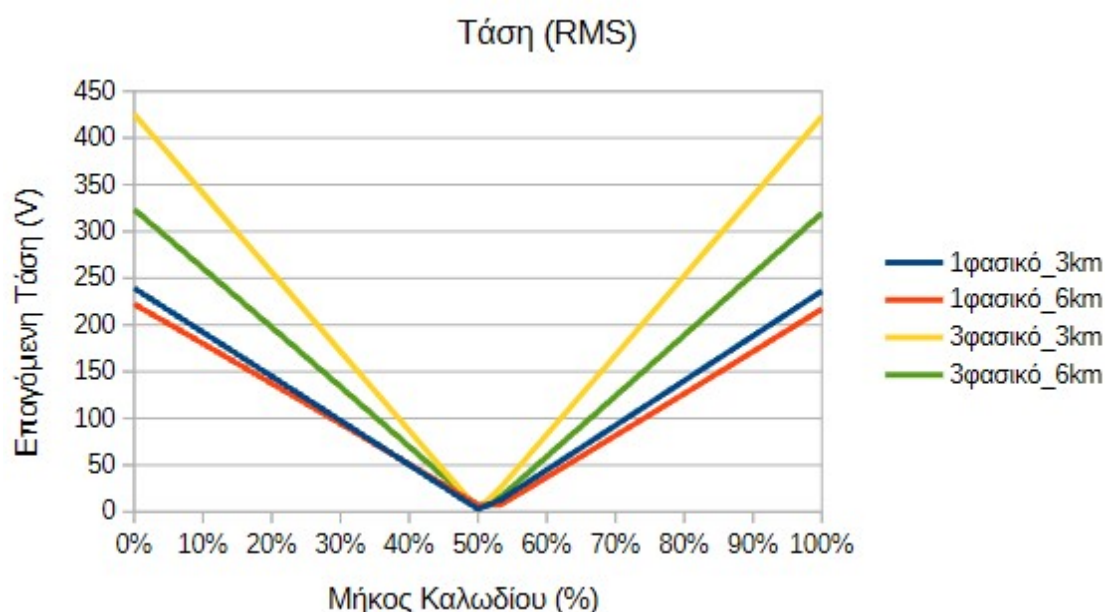


Σχήμα 5.3.2.2: RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου.

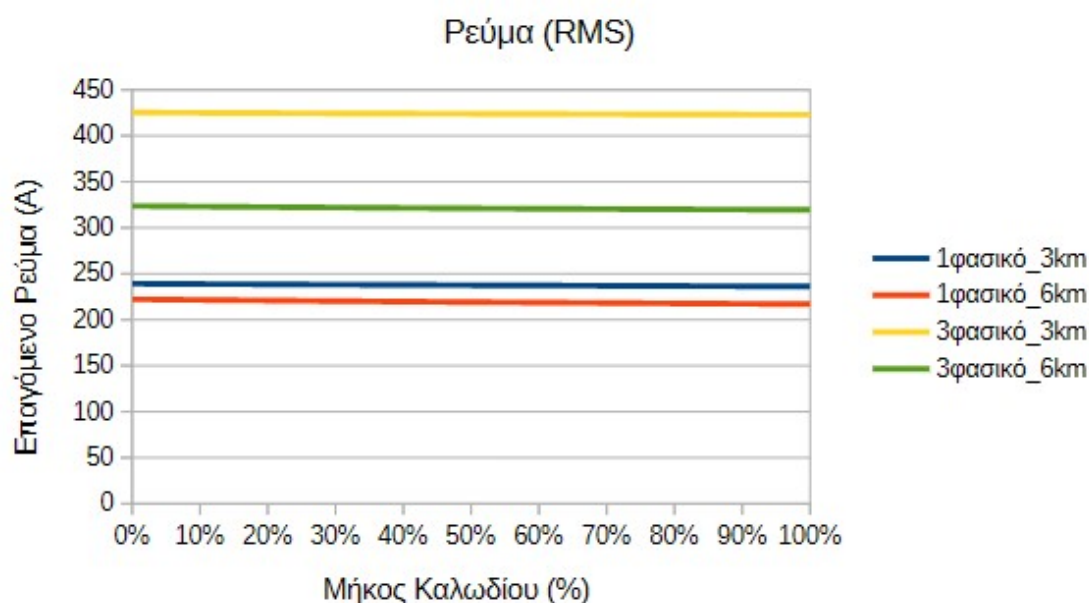
Απο τις γραφικές παραστάσεις της τάσης παρατηρείται ότι, τόσο στο μονοφασικό όσο και στο τριφασικό σφάλμα, η μορφή της κυματομορφής παραμένει παρόμοια με εκείνη που καταγράφηκε σε κανονικές συνθήκες. Ωστόσο, οι τιμές είναι σημαντικά αυξημένες, φτάνοντας τα **1280V** και **1922V** στο ανοικτοκυκλωμένο άκρο για το μονοφασικό σφάλμα και τα **2298V** και **2838V** για το τριφασικό για γραμμή μήκους **3km** και **6km** αντίστοιχα. Επιπλέον, τα ρεύματα διατηρούν την ίδια μορφή με εκείνα της κανονικής λειτουργίας, παρουσιάζοντας όμως αύξηση, με μέγιστες τιμές της τάξης των **4-11A** ανάλογα το μήκος της γραμμής και τον τύπο του σφάλματος.

5.3.3 Με γείωση των μανδύων και στα δύο άκρα της γραμμής

Σε αυτήν την περίπτωση οι μανδύες γειώνονται και στα δύο άκρα της γραμμής, δημιουργώντας έτσι ένα κλειστό κύκλωμα. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι επαγόμενες τάσεις και τα επαγόμενα ρεύματα στους μανδύες για μονοφασικό και τριφασικό σφάλμα αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.3.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου.



Σχήμα 5.3.3.2: RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου.

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι τόσο η επαγόμενη τάση όσο και το επαγόμενο ρεύμα διατηρούν παρόμοια μορφή με εκείνη της κανονικής λειτουργίας. Ωστόσο, οι τιμές τους είναι σημαντικά αυξημένες. Η διαφορά μεταξύ μονοφασικού και τριφασικού βραχυκυκλώματος είναι εμφανής, καθώς στο τριφασικό και για τα δυο διαφορετικά μήκη γραμμών οι τιμές είναι σχεδόν διπλάσιες. Συγκεκριμένα, η τάση στο μονοφασικό φτάνει τα **239V** και **217V** ενώ στο τριφασικό τα **425V** και **323V** αντίστοιχα. Επιπλέον, το ρεύμα

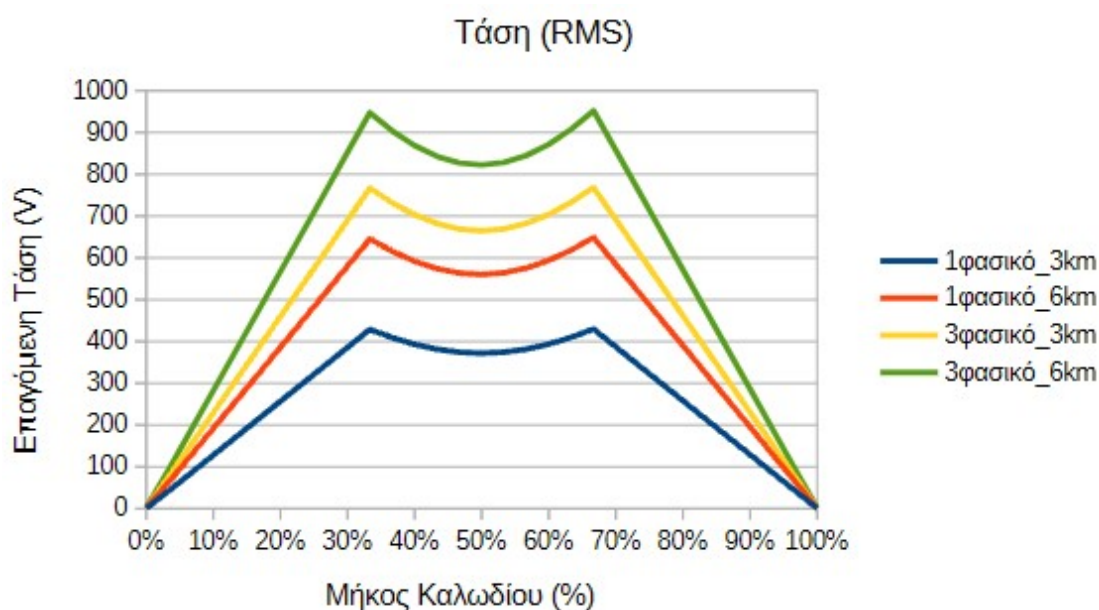
κυμαίνεται στα **237A** και **220A** για το μονοφασικό και στα **423** και **320A** για το τριφασικό σφάλμα για τα διαφορετικά μήκη γραμμών αντίστοιχα.

5.4 Σενάρια αντιμετάθεσης αγωγών και μανδυνών (CB) υπο συνθήκες σφάλματος

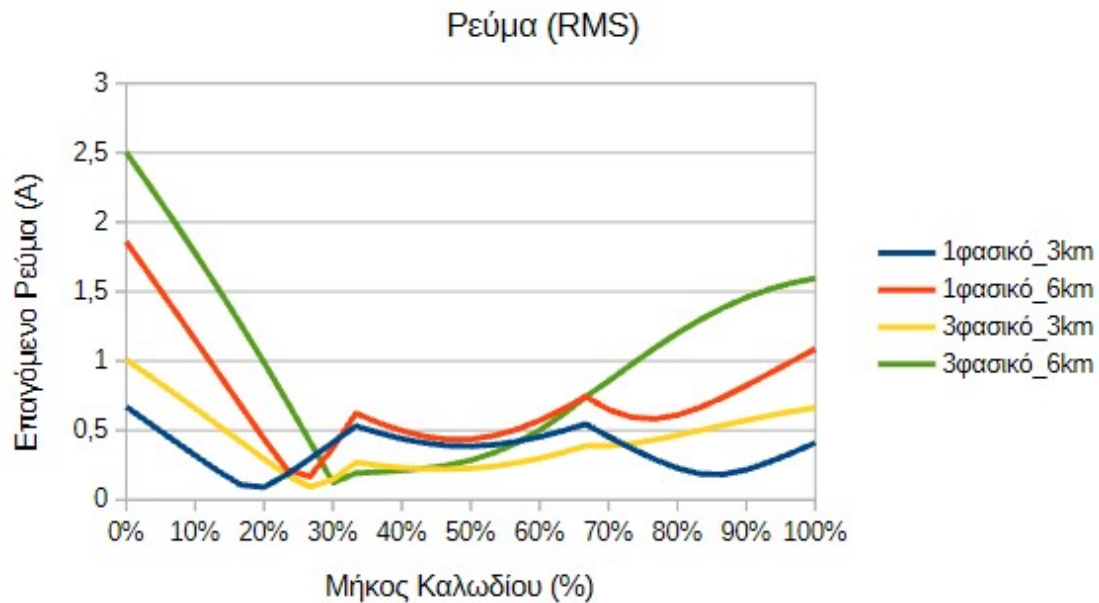
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η συμπεριφορά των επαγόμενων τάσεων στους μανδύες των υπόγειων καλωδίων σε περίπτωση μονοφασικού και τριφασικού σφάλματος, όταν εφαρμόζεται η τεχνική γείωσης cross-bonding. Η ανάλυση περιλαμβάνει διαδοχικά σενάρια, ώστε να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε διαφορετικές διατάξεις. Αρχικά μελετάται η κλασική τεχνική cross-bonding με ένα major section, στη συνέχεια η περίπτωση με δύο major sections, έπειτα η αντιμετάθεση μόνο των αγωγών και τέλος, η συνδυασμένη αντιμετάθεση τόσο των αγωγών όσο και των μανδυνών. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή μια ολοκληρωμένη συγκριτική αξιολόγηση της τεχνικής υπό συνθήκες σφάλματος.

5.4.1 Αντιμετάθεση των μανδυνών (CB) με ένα major section

Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται η κλασική τεχνική cross-bonding με ένα major section. Οι μανδύες των τριών φάσεων χωρίζονται σε 3 τμήματα και συνδέονται κατάλληλα, ώστε να επιτευχθεί η μείωση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων κατά μήκος της γραμμής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σχήματα με τα αποτελέσματα για μονοφασικό και τριφασικό σφάλμα.



Σχήμα 5.4.1.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου για 1 major section.



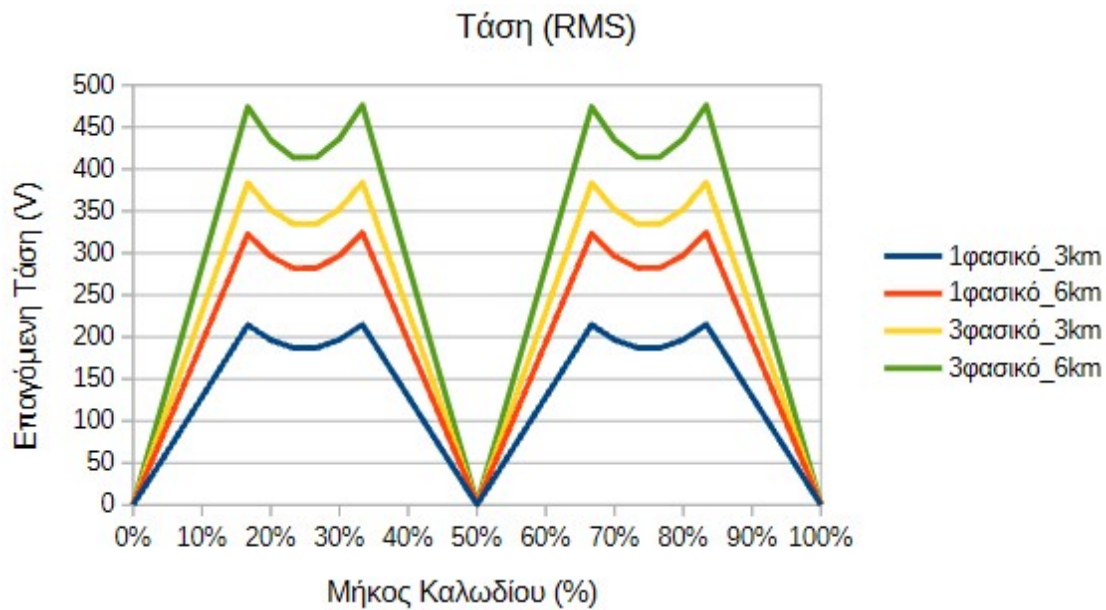
Σχήμα 5.4.1.2: RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου για 1 major section.

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρείται ότι τόσο στο μονοφασικό όσο και στο τριφασικό βραχυκύκλωμα, οι κυματομορφές της τάσης παραμένουν παρόμοιες με εκείνες της κανονικής λειτουργίας. Ωστόσο, διαπιστώνεται ότι, είτε όσο ανεβαίνει το μήκος της γραμμής, είτε όταν εμφανίζεται τριφασικό σφάλμα, οι γραφικές παραστάσεις των επαγόμενων ρευμάτων αρχίζουν να αποκλίνουν από αυτές της κανονικής κατάστασης λειτουργίας παρουσιάζοντας λιγότερες διακυμάνσεις κατά μήκος της γραμμής. Παράλληλα, καταγράφεται σημαντική αύξηση των τιμών των τάσεων, ανάλογα το μήκος της γραμμής και τον τύπο του σφάλματος, με τιμές που αγγίζουν τα **400V**, **650V** για το μονοφασικό και τα **770V**, **950V** για το τριφασικό σφάλμα. Αντίστοιχα, τα ρεύματα εμφανίζουν σημαντική αύξηση συγκριτικά με την κανονική κατάσταση, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ **0.6-1.85A** στο μονοφασικό και **1-2.5A** στο τριφασικό σφάλμα.

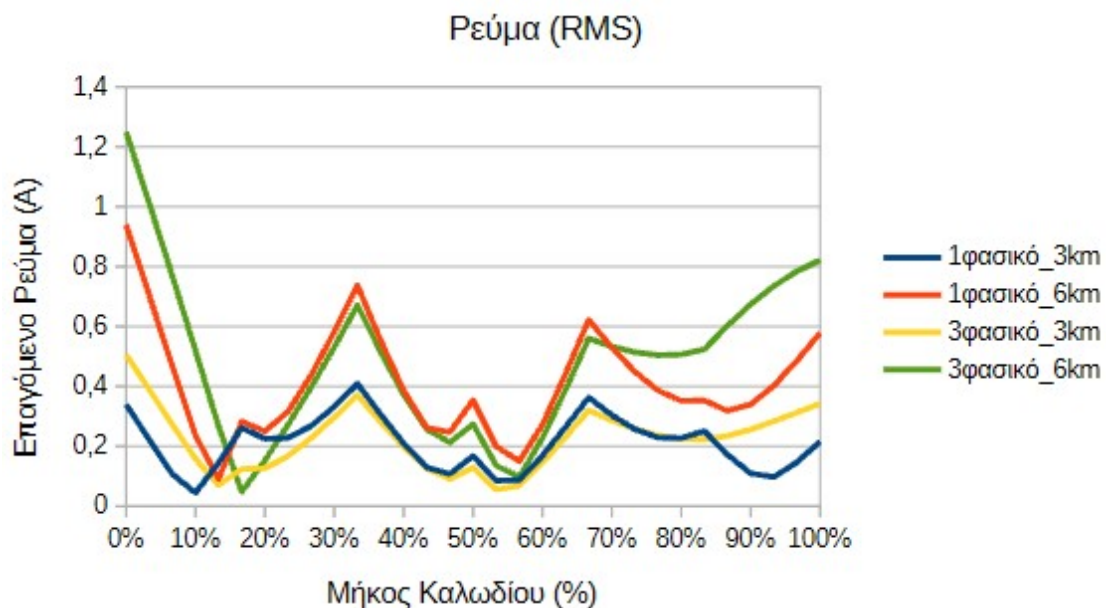
5.4.2 Εφαρμογή cross-bonding με 2 major sections (κύρια τμήματα)

Σε αυτήν την υποενότητα εφαρμόζεται η τεχνική cross-bonding με δύο major sections, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση του μεγαλύτερου αριθμού τμημάτων στη συμπεριφορά των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων. Η ανάλυση καλύπτει τόσο τα μονοφασικά όσο και τα τριφασικά σφάλματα, επιτρέποντας τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με την περίπτωση ενός μόνο major section και την κανονική λειτουργία.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σχήματα με τα αποτελέσματα για μονοφασικό και τριφασικό σφάλμα.



Σχήμα 5.4.2.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου για 2 major sections.



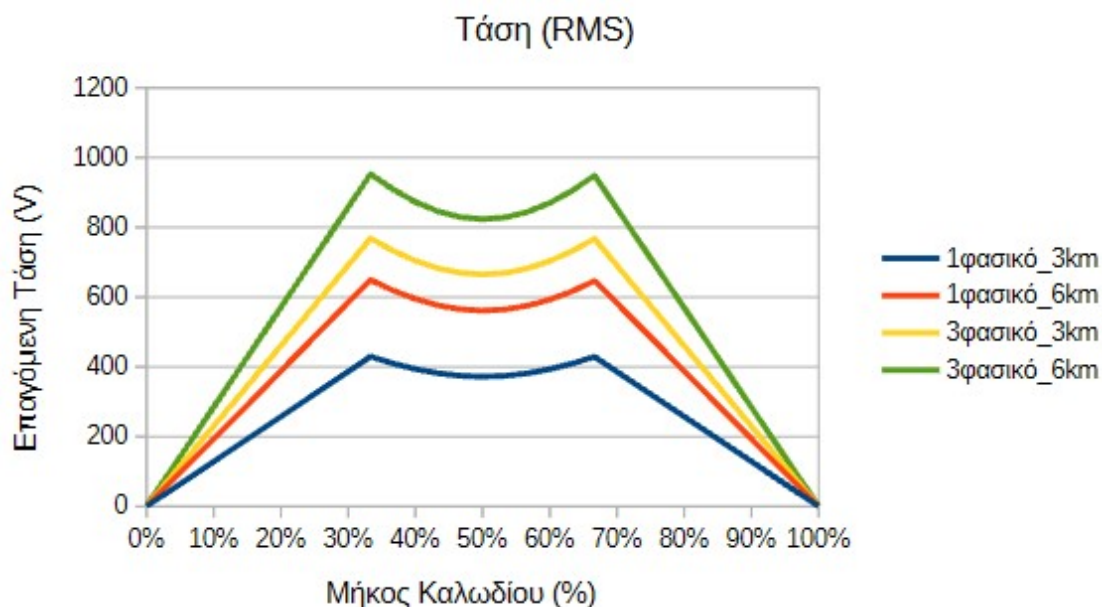
Σχήμα 5.4.2.2: RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου για 2 major sections.

Οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν ότι, όπως και στην κανονική κατάσταση λειτουργίας, η εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding οδηγεί σε δραστική μείωση τόσο της επαγόμενης τάσης όσο και του επαγόμενου ρεύματος. Με την υλοποίηση με δύο major sections παρατηρείται περαιτέρω μείωση στα επίπεδα της τάσης (σχεδόν υποδιπλασιασμό αυτής), ενώ ταυτόχρονα, το ίδιο παρατηρείται και στα επαγόμενα ρεύματα, όπου σε σχέση με την περίπτωση ενός major section είναι σημαντικά μικρότερα. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της τάσης ανέρχεται στα **215V**, **325V** για το μονοφασικό σφάλμα και στα **384V**, **475V** για το τριφασικό στα δύο διαφορετικά μήκη γραμμής αντίστοιχα. Όσον αφορά τα ρεύματα,

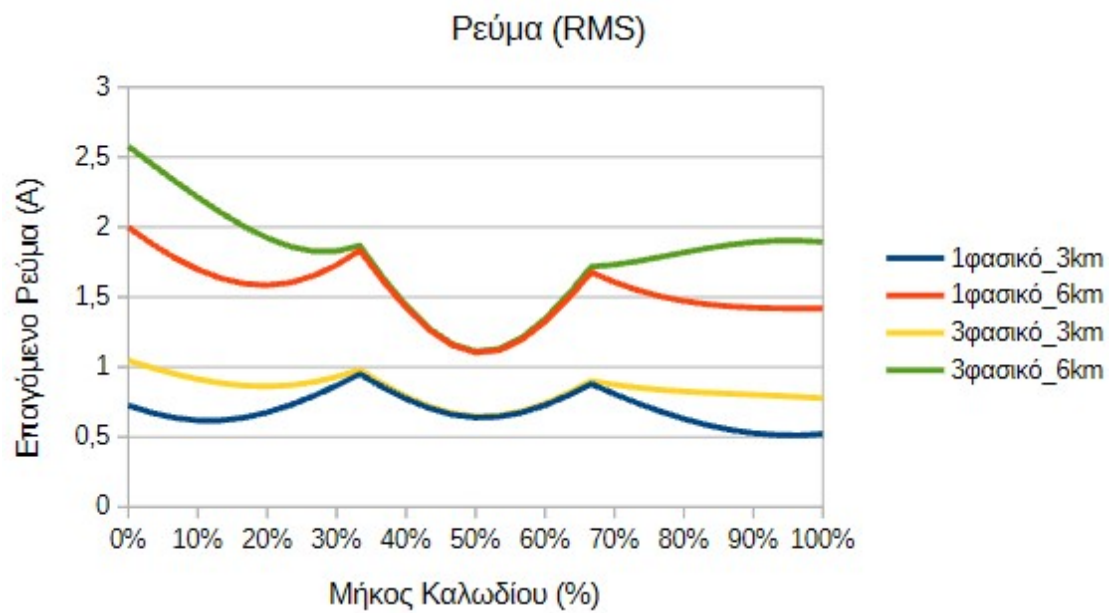
καταγράφηκε συμπεριφορά με έντονο το στοιχείο της διακύμανσης, με μέγιστες τιμές τα **0.4A, 0.94A** για το μονοφασικό σφάλμα και **0.5A, 1.25A** για το τριφασικό στα διαφορετικά μήκη αντίστοιχα.

5.4.3 Σενάρια αντιμετάθεσης αγωγών και συνδυασμένης αντιμετάθεσης

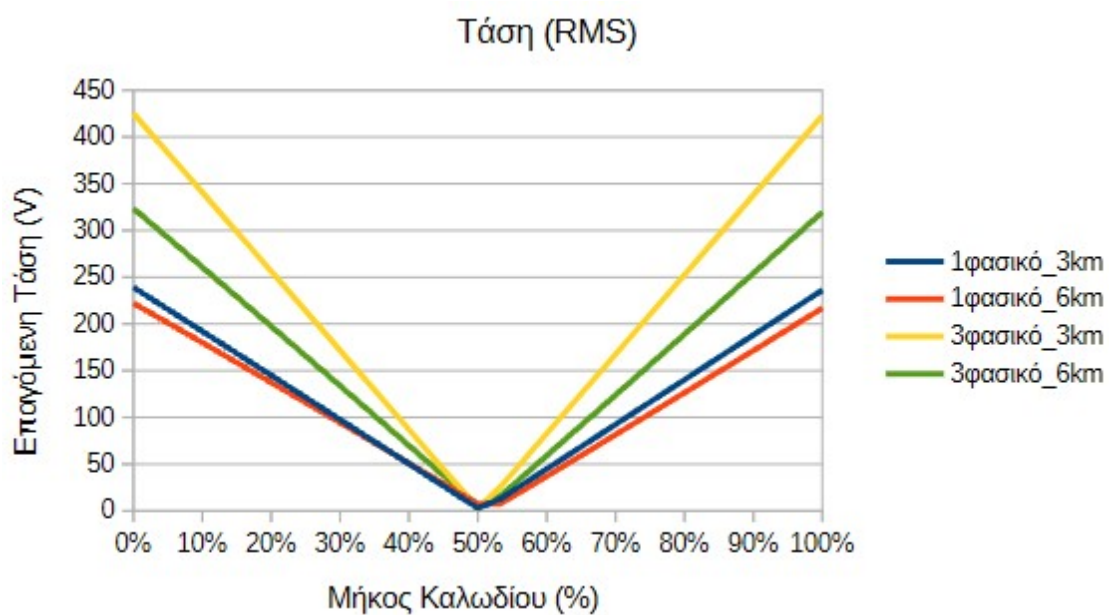
Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η εφαρμογή της τεχνικής αντιμετάθεσης, αρχικά μόνο στους αγωγούς φάσης και στη συνέχεια στην ταυτόχρονη αντιμετάθεση αγωγών φάσης και μανδυνών. Στόχος είναι να διερευνηθεί πώς οι διαφορετικοί αυτοί τρόποι σύνδεσης επηρεάζουν τις επαγόμενες τάσεις και τα ρεύματα υπό εμφάνιση μονοφασικών και τριφασικών σφαλμάτων, με μέτρο σύγκρισης τα αποτελέσματα των προηγούμενων περιπτώσεων απλής αντιμετάθεσης των μανδυνών (κλασικό Cross-bonding). Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχήματα με τα αποτελέσματα για μονοφασικό και τριφασικό σφάλμα πρώτα στην περίπτωση μόνο αντιμετάθεσης των αγωγών φάσης και ύστερα για την περίπτωση συνδυασμένης αντιμετάθεσης τόσο των αγωγών φάσης όσο και των μανδυνών των αγωγών.



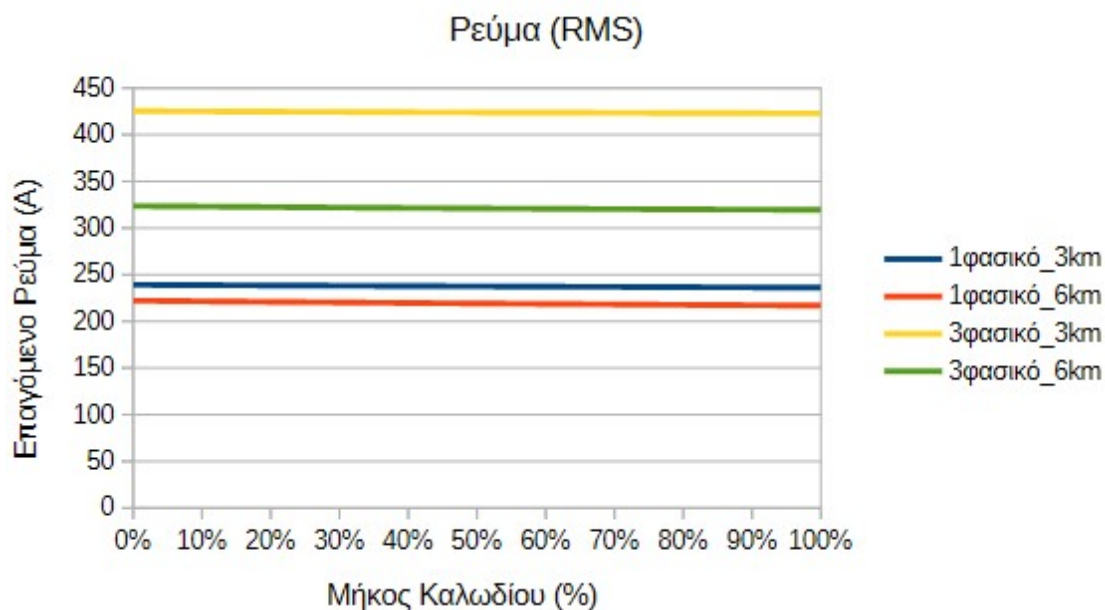
Σχήμα 5.4.3.1 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου. Εφαρμογή αντιμετάθεσης μόνο των αγωγών φάσης.



Σχήμα 5.4.3.2: RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου. Εφαρμογή αντιμετάθεσης μόνο των αγωγών φάσης.



Σχήμα 5.4.3.3 : RMS επαγόμενη τάση κατά μήκος του καλωδίου. Εφαρμογή συνδυασμένης αντιμετάθεσης.



Σχήμα 5.4.3.4: RMS επαγόμενο ρεύμα κατά μήκος του καλωδίου. Εφαρμογή συνδυασμένης αντιμετάθεσης.

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται μόνο αντιμετάθεση αγωγών, οι γραφικές παραστάσεις της επαγόμενης τάσης και του επαγόμενου ρεύματος εμφανίζονται ουσιαστικά ταυτόσημες με εκείνες που προκύπτουν από την εφαρμογή αντιμετάθεσης μανδυνών, τόσο για το μονοφασικό όσο και για το τριφασικό σφάλμα. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της συνδυασμένης αντιμετάθεσης αγωγών και μανδυνών, οι μορφές της επαγόμενης τάσης και του ρεύματος είναι πανομοιότυπες με αυτές που καταγράφηκαν όταν εφαρμόστηκε γείωση και στα δύο άκρα των μανδυνών της γραμμής. Οι αριθμητικές τιμές που προκύπτουν είναι επίσης πολύ κοντινές και στα δύο είδη σφαλμάτων τόσο για την γραμμή μήκους 3km όσο και για αυτήν των 6km.

5.5: Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η συμπεριφορά των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες υπόγειων καλωδίων σε συνθήκες σφάλματος, με την εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών γείωσης και για δύο μήκη γραμμών (3km και 6km). Η ανάλυση ακολούθησε τη δομή του προηγούμενου κεφαλαίου, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα μεταξύ κανονικής λειτουργίας και κατάστασης σφάλματος.

Απο την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Η σειρά εφαρμογής των τεχνικών γείωσης έδειξε ότι, μέχρι και την περίπτωση του cross-bonding με δύο major sections, επιτυγχάνεται σαφής βελτίωση στα επίπεδα των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται μείωση της επαγόμενης τάσης με ταυτόχρονη αύξηση του επαγόμενου ρεύματος, γεγονός που αναδεικνύει τον συμβιβασμό που απαιτείται ανάμεσα στην ηλεκτρική ασφάλεια και τη λειτουργικότητα.
- Η τεχνική cross-bonding με ένα major section προσφέρει συνδυαστικό περιορισμό τόσο της επαγόμενης τάσης όσο και των επαγόμενων ρευμάτων, με τις τιμές των ρευμάτων να μειώνονται αισθητά. Παρόλα αυτά οι επαγόμενες τάσεις παραμένουν σχετικά υψηλές.

- Με την εφαρμογή cross-bonding με 2 major sections, τόσο οι τάσεις όσο και τα ρεύματα μειώνονται σχεδόν στο μισό, έναντι των τιμών που έχουν κατά την εφαρμογή της μεθόδου με 1 major section, καθιστώντας την τεχνική αυτή σαφώς αποτελεσματικότερη.
- Η αντιμετάθεση μόνο των αγωγών παρουσιάζει αποτελέσματα σχεδόν ταυτόσημα με αυτά της αντιμετάθεσης των μανδυνών, ενώ η συνδυασμένη αντιμετάθεση αγωγών και μανδυνών (στα ίδια σημεία) δεν βελτίωσε περαιτέρω την κατάσταση, καθώς οδήγησε σε αποτελέσματα παρόμοια με το σενάριο γείωσης και στα δύο άκρα.

Συνοψίζοντας, προκύπτει ότι η επιλογή της τεχνικής γείωσης έχει καθοριστική επίδραση στις επαγόμενες τάσεις και ρεύματα των μανδυνών και στα δύο είδη σφαλμάτων που μελετήθηκαν. Ιδιαίτερα η εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding με περισσότερα από ένα major section αναδεικνύεται ως η πιο αποτελεσματική λύση επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση και των δύο μεγεθών.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

6.1 Ανασκόπηση της Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες υπόγειων καλωδίων μέσης τάσης, τόσο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας όσο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων. Στόχος ήταν η κατανόηση των φαινομένων που εμφανίζονται και η αξιολόγηση διαφορετικών τεχνικών γείωσης και του cross-bonding, με σκοπό τον περιορισμό των δυσμενών επιπτώσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, η δομή και οι ιδιαιτερότητες των υπογείων καλωδίων, καθώς και τα κύρια προβλήματα που σχετίζονται με την εμφάνιση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες τους. Παράλληλα, αναλύθηκαν οι βασικές τεχνικές γείωσης και η αναγκαιότητα εφαρμογής της μεθόδου cross-bonding, ενώ έγινε αναφορά στα διεθνή πρότυπα και οδηγίες που πλαισιώνουν τον σχεδιασμό και τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση, με στόχο την αποτύπωση των κυριότερων μεθοδολογιών που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς για την ανάλυση και αντιμετώπιση του προβλήματος, καθώς και τη σύγκριση διαφορετικών τεχνικών σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο.

Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώθηκε στο λογισμικό ATPDraw, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της προσομοίωσης. Αναλύθηκαν οι βασικές δυνατότητες του, οι τρόποι μοντελοποίησης καλωδίων και τα είδη μοντέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καλωδιακά δίκτυα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η προσομοίωση υπόγειων καλωδίων σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια γείωσης μανδυνών, καθώς και η εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding, με στόχο την αποτίμηση της επίδρασης κάθε μεθόδου στα επίπεδα επαγόμενης τάσης και ρεύματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετήθηκε η συμπεριφορά των υπόγειων καλωδίων σε συνθήκες σφάλματος, τόσο μονοφασικού όσο και τριφασικού. Εφαρμόστηκαν και πάλι διαφορετικά σενάρια γείωσης και η τεχνική cross-bonding, ώστε να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα τους υπό δυσμενείς καταστάσεις. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά της κανονικής λειτουργίας, αναδεικνύοντας τις κρίσιμες διαφοροποιήσεις.

Τέλος, σε κάθε κεφάλαιο παρατέθηκαν τα επιμέρους συμπεράσματα, τα οποία συνέλαβαν στη διαμόρφωση των συνολικών παρατηρήσεων και παρουσιάζονται στο παρόν έκτο κεφάλαιο.

6.2 Βασικά Συμπεράσματα

Από την υλοποίηση της διπλωματικής προκύπτουν ορισμένα βασικά συμπεράσματα που αφορούν τη συμπεριφορά των υπογείων καλωδίων και την αποτελεσματικότητα των διαφορετικών τεχνικών γείωσης και του cross-bonding.

Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι η γείωση των μανδύων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στη διαμόρφωση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων. Η απουσία γείωσης οδηγεί σε υψηλές τιμές τάσεων, ενώ η απλή γείωση στο ένα ή στα δύο άκρα μειώνει μεν τις επαγόμενες τάσεις, αλλά μπορεί να προκαλέσει αυξημένες ροές ρευμάτων, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη ισορροπίας μεταξύ των δύο μεγεθών.

Η εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding απέδειξε τη σημαντική συμβολή της στον περιορισμό τόσο των επαγόμενων τάσεων όσο και των επαγόμενων ρευμάτων. Στην περίπτωση ενός μόνο major section, παρατηρήθηκε σαφής βελτίωση και στα δύο μεγέθη, ιδιαίτερα όμως ως προς τα ρεύματα, ενώ με δύο major section επιτεύχθηκε ακόμα μεγαλύτερη μείωση στις τιμές και των τάσεων και των ρευμάτων, φτάνοντας σε επίπεδα περίπου τα μισά σε σχέση με το αρχικό σενάριο.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η αντιμετάθεση μόνο των αγωγών ή μόνο των μανδύων οδηγεί σε παρόμοια αποτελέσματα, χωρίς ουσιαστική διαφοροποίηση. Ωστόσο, η συνδυασμένη αντιμετάθεση αγωγών και μανδύων (στα ίδια σημεία) δεν βελτίωσε περαιτέρω την κατάσταση, καθώς τα αποτελέσματα ήταν συγκρίσιμα με εκείνα της απλής γείωσης και στα δύο άκρα.

Η ανάλυση σε συνθήκες σφάλματος, τόσο μονοφασικού όσο και τριφασικού, έδειξε ότι οι τάσεις και τα ρεύματα αυξάνονται σημαντικά σε σχέση με την κανονική λειτουργία. Παρ' όλα αυτά, η αποτελεσματικότητα των τεχνικών γείωσης και του cross-bonding παραμένει εμφανής, με την τεχνική των δυο major section να προσφέρει τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ περιορισμού τάσεων και ρευμάτων.

Συνοψίζοντας, η εργασία ανέδειξε ότι η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής γείωσης δεν είναι μοναδική, αλλά εξαρτάται από την εκάστοτε προτεραιότητα (περιορισμός τάσεων ή ρευμάτων) και τις λειτουργικές ανάγκες του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, η τεχνική cross-bonding με ένα ή και περισσότερα major sections αναδείχθηκε ως η πιο ισορροπημένη και αποδοτική λύση.

6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην ανάλυση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων σε υπόγεια καλώδια μέσης τάσης υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και σε συνθήκες σφάλματος, εξετάζοντας διαφορετικές τεχνικές γείωσης και του cross-bonding. Παρά τα χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν, υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω διερεύνηση και επέκταση της μελέτης. Ενδεικτικά, προτείνονται τα εξής:

- 1. Διερεύνηση διαφορετικών τιμών αντίστασης σφάλματος:** Στην εργασία θεωρήθηκε σταθερή τιμή αντίστασης σφάλματος. Μια μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξετάσει την επίδραση διαφορετικών τιμών στην κατανομή των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων.
- 2. Μελέτη διαφορετικών μηκών καλωδίων:** Η επέκταση της ανάλυσης σε μεγαλύτερα ή μικρότερα μήκη, καθώς και σε πιο σύνθετες διατάξεις δικτύου, θα παρείχε πληρέστερη εικόνα της συμπεριφοράς των συστημάτων.
- 3. Πειραματική επιβεβαίωση προσομοιώσεων:** Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του ATPDraw με πραγματικά μετρητικά δεδομένα από λειτουργούντα συστήματα θα ενίσχυε την αξιοπιστία των συμπερασμάτων.
- 4. Διερεύνηση νέων τεχνικών γείωσης και έξυπνων συστημάτων προστασίας:** Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξετάσει βελτιωμένες ή υβριδικές τεχνικές, ενδεχομένως με χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου, για περαιτέρω μείωση των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων.

5. **Συνδυασμός γειώσεων σε ενδιάμεσα σημεία με τις μεθόδους cross-bonding:** Μια προέκταση της παρούσας μελέτης θα μπορούσε να αφορά την εφαρμογή των τεχνικών που μελετήθηκαν, αλλά με προσθήκη περισσότερων σημείων γείωσης κατά μήκος του καλωδίου. Η διερεύνηση της επίδρασης αυτών των πρόσθετων γειώσεων στην συμπεριφορά των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων στους μανδύες των καλωδίων, θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο αποδοτικές μειώσεις των φαινομένων αυτών.

6. **Εφαρμογή της τεχνικής cross-bonding σε καλώδια που χωρίζονται σε περισσότερα από δύο major sections:** Μια τέτοια μελέτη θα μπορούσε να εξετάσει αν τα περισσότερα major sections συμβάλουν στην περαιτέρω μείωση των επιπέδων των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων.

7. **Διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του εδάφους:** Η αγωγιμότητα, η ειδική αντίσταση και η υγρασία του εδάφους επηρεάζουν σημαντικά τη κατανομή των ρευμάτων και των επαγόμενων τάσεων. Μια μελλοντική ανάλυση που θα λαμβάνει υπόψη διαφορετικούς τύπους εδάφους θα συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς των υπόγειων καλωδίων.

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

[1] H.Xue, J. Mahseredjian, J. Morales and I.Kocar, “Analysis of Cross-Bonded Cables Using Accurate Model Parameters,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 1, pp. 46-55, Feb. 2023.

[2] K. Kawamura, A.Ametani, and U.S. Gudmundsdottir, “Surge Analysis on a Long Underground Cable System,” Journal of International Council on Electrical Engineering, vol. 3, no. 2, pp. 158-163, 2013.

[3] K.V. Gouramanis, Ch. G. Kaloudas, T. A. Papadopoulos, G. K. Papagiannis, and K. Stasinou, “Sheath Voltage Calculations in Long Medium Voltage Power Cables,” in 2011 IEE Trondheim PowerTech, 2011.

[4] A. Naud, G. Gutierrez, W. Frelin, and M. Nguyen Tuan, “Sheath over-voltages in cross-bonded underground transmission lines,” in EMTP User Group Meeting, Paris, June 21, 2013.

[5] S. Abdollahzadeh Ledari and M. Mirzaie, “Sheath induced voltage prediction of high voltage cable based on artificial neural network,” Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

[6] B. Li, H. Cui, Z. An, H. Rui, and T. Zhao, “Sheath Induced Over-Voltage Characteristic in 220 kV Power Cable Under Lightning Over-Voltage,” in Advances in Engineering Research, 2nd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2017), vol. 86, 2017.

[7] T. A. Papadopoulos, A. I. Chrysochos, D. I. Doukas, G. K. Papagiannis, and D.P. Labridis, “Induced voltages and currents: Overview and evaluation of simulation models and methodologies,” Department of Electrical & Computer Engineering, Democritus University of Thrace and School of Electrical & Computer Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

- [8] C. G. Kaloudas, T. A. Papadopoulos, K.V. Gouramanis, K. Stasinis, and G. L. Papagiannis, "Methodology for the selection of long-medium-voltage power cable configurations," IET Generation, Transmission & Distribution, 2012.
- [9] Q. Zhang, K. Li, L. Chen, J. Luo, and Z. Zhao, "Identification and Localization Study of Grounding System Defects in Cross-Bonded Cables," College of Engineering and Technology, Southwest University and College of Electrical Engineering, Chongqing University, China.
- [10] E. Wang, X. Chen, T. Zhang, K. Yin, and A. Paramane, "Fault current calculation and grounding scattering optimization of 220kV tunnel cable systems," College of Electrical Engineering Zhejiang University, China, and Electrical Engineering Department, National Institute of Technology, India.
- [11] J. J. de Regt, G. Hogendorp, P. Wagenaars, P. A. A. F. Wouters, M. Popov, L. van der Sluis, and E.F. Steennis, "Cross-bonding cable and box model based on pulse reflection measurement," IET Science, Measurement & Technology, The Netherlands, 2014.
- [12] E. Kalogrianitis, K. Damianaki, C. Christodoulou, T. Papadopoulos, and I. Gonos, "Case study of the implementation of cross-bonding to underground long medium voltage cables in wind parks," NTUA and DUTH, Greece.
- [13] J. Klucznik, "A new approach to cross-bonding in medium voltage cable lines," Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering.
- [14] L. Kehl, R. Meier, and D. Quaggia, "Cross-bonding for MV cable systems: Advantages and impact on accessories design," in 25th International Conference on Electricity Distribution, EUROPACABLE, Germany and Italy.
- [15] L. Spitilli, L. D'Orazio, N. Corsi, R. Calone, G. DI Felice, and F. P. Palazzotto, "Cables' Sheath Cross Bonding: an Overview of the Technique for The Medium Voltage Network of e-distribuzione," e-distribuzione s.p.a and Enel Grids, Rome, Italy.
- [16] O. Vlachokyriakou, G. Peppas, A. Kagiannas, P. Raptis, Z. Politis, E. Pyrgioti, and I. Gonos, "A New Approach for Sheath Voltage Limiters in Medium Voltage Systems," Raycap S.A., Athens, Greece, and University of Patras and National Technical University of Athens, Greece.
- [17] R. Candela, A. Gattuso, M. Mitolo, E. Riva Sanseverino, and G. Zizzo, "A Model for the Study of Sheath Currents in Medium Voltage Cables for Industrial Application," Prysmian Electronics srl and Universtita di Palermo, Italy, and Irvine Valley College, USA.
- [18] R. Candela, A. Gattuso, M. Miloto, E. Riva Sanseverino, and G. Zizzo, "A Comparison of Special Bonding Techniques for Transmission and Distribution Cables Under Normal and Fault Conditions," IEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no.1, Jan./Feb. 2021, pp. 101-110.
- [19] J. E. Guevara Asorza, R. A. de Araujo, and J. Pissolato Filho, "Methodology for Assessing Induced Currents in Cable Sheaths: Comparative Analysis of Sectionalized and Continuous Cross-Bonding," in 9th Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS 2024), University of Campinas and Federal University of Lavras, Brazil.
- [20] K. Dobrzynski, Z. Lubosny, J. Klucznik, J. Grala, and D. Falkowski, "Incomplete Cross-Bonding in the MV Line: Experience from the Operation of MV Single Cable Lines," Faculty

of Electrical and Control Engineering, Gdansk University of Technology and ENERGIA-OPERATOR SA, Poland, 2020.

[21] Nexans, “A2XSY 12-20 kV IEC - Medium Voltage Cable ,” Product datasheet, Available : <https://www.nexans.gr/.rest/catalog/v1/family/pdf/5211/A2XSY-12-20KV-IEC> , Accessed: October 6, 2025.

[22] Δήμου Αναστάσιος και Μακρή Ελευθερία, “Διερεύνηση των αναπτυσσόμενων τάσεων και ρευμάτων σε μανδύες καλωδίων ισχύος στη στάσιμη κατάσταση και σε βραχυκυκλώματα”, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Μάρτιος 2012