



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση μαγνητικού πεδίου και απωλειών σε καλώδια ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ZeJun X. Ruan

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση μαγνητικού πεδίου και απωλειών σε καλώδια ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ZeJun X. Ruan

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26 Οκτωβρίου 2023.

.....
Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

.....
ZeJun X. Ruan

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

Copyright © ZeJun Ruan, 2023.

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά το μαγνητικό πεδίο και τις απώλειες Joule σε έναν τυπικό χάλκινο κυλινδρικό αγωγό, χρησιμοποιώντας αναλυτική λύση που υπάρχει στην βιβλιογραφία, προκειμένου να αναπτυχθεί κατάλληλο μοντέλο αριθμητικής ανάλυσης με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη καλωδίων ισχύος.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση των σύγχρονων εξελίξεων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και ιδιαίτερος στην τεχνολογία των καλωδίων υψηλής τάσης. Σε ένα πρώτο βήμα αναφέρονται τα τμήματα/στρώσεις που απαρτίζουν την τυπική διαμόρφωση των καλωδίων ισχύος και εν συνεχεία αναλύονται τα είδη των αγωγών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους. Επιπλέον, εξετάζονται τα είδη των απωλειών στα καλώδια ισχύος και δίνεται έμφαση στην ανάλυση του επιδερμικού φαινομένου που εμφανίζεται στους αγωγούς.

Σε ένα επόμενο βήμα, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο μελέτης της κατανομής του ρεύματος και των απωλειών στους αγωγούς και καταστρώνονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την αναλυτική λύση και η επίλυσή τους με την χρήση του λογισμικού MATLAB. Ακολουθεί η αριθμητική επίλυση του προβλήματος μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων FEMM, στο οποίο σχεδιάζεται η γεωμετρία της διατομής του χάλκινου κυλινδρικού αγωγού και προσδιορίζεται κατάλληλο πλέγμα για την ανάλυσή του. Τα αποτελέσματα κάθε λύσης αποτυπώνονται, συγκρίνονται και σχολιάζονται, ενώ προτείνεται ένα πλέγμα που εξασφαλίζει βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας των αποτελεσμάτων και ταχύτητας επίλυσης του προβλήματος.

Στη συνέχεια μελετάται τριφασικό καλώδιο 33kV, 540A, που αποτελεί την περίπτωση 4 των υποδειγματικών εφαρμογών του τεχνικού εγχειριδίου της CIGRE [1] και επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου που διαμορφώθηκε στο λογισμικό FEMM.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν σχετικά με την ορθή υλοποίηση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, ενώ παράλληλα αναφέρονται ορισμένα θέματα που προτείνονται για περαιτέρω διερεύνηση.

Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB σε συνδυασμό με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM.

Λέξεις κλειδιά: καλώδια ισχύος, χάλκινος αγωγός, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, αναλυτική λύση, αριθμητική λύση, επιδερμικό φαινόμενο, απώλειες Joule, ηλεκτρικές απώλειες, μαγνητικό πεδίο.

ABSTRACT

The present diploma thesis investigates the magnetic field and the Joule losses developed in a typical cylindrical copper conductor, by using an analytical solution available in the literature in order to tune an appropriate model based on the Finite Element Method enabling accurate numerical solution of power cables.

Firstly, a brief overview of the current trends in energy industry and power cable technologies is presented. Then the parts of a typical power cable are analyzed, focusing on the types of conductors implemented. Furthermore, the types of losses that occur in a power cable are discussed, giving a thorough explanation to the losses on the conductor governed by the skin effect.

Moreover, the physical phenomena and the equations used in the literature are analyzed and presented with the use of MATLAB. The calculation of the numerical solution is achieved by designing and modeling the layout of the solid cylindrical conductor and choosing the right mesh. The results of every solution are gathered and compared, whereas results of a different mesh are also compared with the existing one.

Also, a comparison between a 3-phase 33kV cable from the Case Study 4 of the technical brochure of Cigre with an equivalent model in FEMM is made.

Finally, conclusions are made about the correct way of modeling and the accuracy of the results and also subjects that need more in depth examination are noted. The entire analysis is carried out using MATLAB and the finite elements software FEMM.

Keywords: Power cables, copper conductor, Finite element method, analytical solution, numerical solution, skin effect, Joule losses, electrical losses, magnetic field.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες μου προς όλους αυτούς που συνέβαλαν και βοήθησαν στην επιτυχή εκπόνησή της.

Πρώτα και κύρια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της εργασίας και την πολύτιμη καθοδήγησή του καθόλη τη διάρκεια αυτής της διαδρομής. Οι συμβουλές, οι προτάσεις και η ανοιχτή του στάση απέναντί μου με βοήθησαν να εξελιχθώ ως ερευνητής και να διαμορφώσω την εργασία μου με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Επίσης, δεν θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και την κατανόηση για όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Χωρίς εκείνους σίγουρα δεν θα είχα καταφέρει όσα μπόρεσα.

Ευχαριστώ, ακόμα, όλα τα μέλη-φίλοι της μουσικής μπάντας μου LessThought, για την ικανοποίηση και εκπλήρωση των καλλιτεχνικών μου ανησυχιών, δίνοντας μία άλλη διάσταση στην ζωή μου όλα αυτά τα χρόνια.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες σε όλους του φίλους μου που ήταν στο πλευρό μου σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και με βοήθησαν να ξεπεράσω κάθε εμπόδιο. Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω ξεχωριστά όλους όσους περάσαμε ατελείωτες ώρες διαβάσματος μαζί σε αυτά τα πέντε χρόνια, καθώς κάνατε την αυτή διαδικασία πολύ πιο ευχάριστη και εύκολη.

Είμαι ευγνώμων για τη συνεργασία και την υποστήριξη που έλαβα από όλους και όλες κατά τη διάρκεια αυτής της ερευνητικής προσπάθειας. Αυτή η διπλωματική εργασία είναι αποτέλεσμα της αγάπης σας και σας την αφιερώνω.

ZeJun Ruan

Οκτώβριος 2023

Αφιερώνεται στους ανθρώπους μου

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1 Παραδοσιακά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	15
1.2 Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην εποχή μας.....	17
1.3 Καλώδια ισχύος υψηλής τάσης.....	18
1.3.1 Ημιαγώγιμα shields.....	20
1.3.2 Μονωτές.....	21
1.3.3 Μανδύας (Sheath).....	22
1.3.4 Είδη αγωγών στα καλώδια ισχύος.....	23
1.4 Απώλειες στα καλώδια ισχύος.....	26
1.4.1 Επιδερμικό φαινόμενο - Skin effect.....	27
2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.....	29
3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	33
3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM).....	33
3.2 Μοντελοποίηση χάλκινου κυλινδρικού αγωγού.....	37
3.3 Αποτελέσματα post-processing.....	40
3.3.1 Πυκνότητα ρεύματος.....	40
3.3.2 Μαγνητικό πεδίο.....	42
3.3.3 Απώλειες Joule.....	46
3.4 Μελέτη διαφορετικού πλέγματος.....	48
4. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ 33KV, 540A (CIGRE, CASE STUDY 4[15]).....	50
4.1 Εισαγωγή.....	50
4.2 Φαινόμενο γειννίαςσης (proximity effect).....	50
4.3 Διαδικασία μοντελοποίησης.....	50
4.4 Υπολογισμός απωλειών με βάση το τεχνικό εγχειρίδιο της Cigre.....	52
4.5 Μοντελοποίηση της μίας φάσης.....	55
4.6 Μοντελοποίηση τριφασικού καλωδίου.....	62
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	74
6. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ.....	75
7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	75

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	76
8.1 Επιδερμικό φαινόμενο (Skin effect)	76
8.2 Κώδικας MATLABγια υπολογισμό απωλειών σε χάλκινο κυλινδρικό αγωγό	79
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Απώλειες Joule για 0Hz, 50Hz, 300Hz, 1kHz.....	27
Πίνακας 2. Απώλειες Joule με αναλυτική και αριθμητική λύση.....	39
Πίνακας 3. Απώλειες Joule με αναλυτική και αριθμητική λύση.....	41
Πίνακας 4. Παράμετροι αγωγού.....	44
Πίνακας 5. Αντίσταση R' για το επιλεγμένο εύρος θερμοκρασιών.....	46
Πίνακας 6. Skin effect factor y_s , proximity effect factor y_p και AC αντίστασης R σε σχέση με τη θερμοκρασία.....	47
Πίνακας 7. Απώλειες πραγματικής ισχύος για το επιλεγμένο εύρος θερμοκρασιών.....	47
Πίνακας 8. Η τιμή της αντίστασης σε σχέση με την θερμοκρασία όταν λαμβάνεται υπόψη ή μη το επιδερμικό φαινόμενο με βάση τους τύπους της Cigre.....	51
Πίνακας 9. Οι απώλειες ισχύος στον αγωγό του καλωδίου σε σχέση με την θερμοκρασία.....	52
Πίνακας 10. Σφάλμα αναλυτικής με αριθμητικής λύσης με και χωρίς επιδερμικό φαινόμενο.....	53
Πίνακας 11. Απώλειες σε σχέση με την θερμοκρασία και την επίδραση του φαινομένου γειτνίασης.....	60
Πίνακας 12. Σφάλμα αναλυτικής με αριθμητικής λύσης με και χωρίς φαινόμενο γειτνίασης.....	61

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτού του μέρους είναι να παρουσιάσει στον αναγνώστη τα καλώδια ισχύος που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα μεταφοράς (HV/UHV). Πιο συγκεκριμένα, θα αναφερθούν σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ο λόγος για την αυξημένη ζήτησή τους. Επίσης, για την καλύτερη κατανόηση της δομής του καλωδίου ισχύος θα παρουσιαστεί αναλυτική εικόνα. Έπειτα, θα γίνει η ανάλυση του μαγνητικού πεδίου και των απωλειών Joule ή θερμικές απώλειες που προκύπτουν σε έναν χάλκινο αγωγό μικρού μήκους μέσω αναλυτικής και αριθμητικής προσέγγισης. Τέλος, θα μελετηθούν και θα συγκριθούν αντίστοιχα το μαγνητικό πεδίο και οι απώλειες Joule που προκύπτουν σε ένα καλώδιο ισχύος συγκεκριμένης γεωμετρίας.

1.1 Παραδοσιακά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Στο παρελθόν, ήταν προτιμητέο να χρησιμοποιείται το εναλλασσόμενο ρεύμα στην μεταφορά του ρεύματος, παρόλο που ο Edison είχε εφεύρει ένα ολοκληρωμένο DC δίκτυο. Τα πλεονεκτήματα του AC δικτύου ήταν ξεκάθαρα στους μετασχηματιστές που ήταν εύκολοι στην κατασκευή και αποδοτικοί στην χρήση. Οι μηχανές επαγωγής ενώ δεν είναι και οι αποδοτικότερες έχουν αντοχή στο χρόνο, είναι low maintenance και είναι φτηνές.

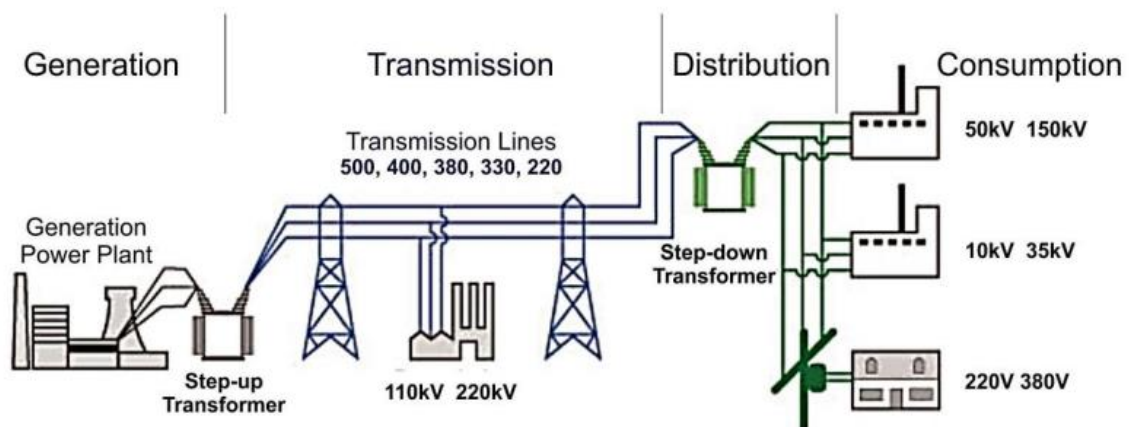
Το AC παράγεται τοποθετώντας ένα πηνίο καλωδίου σε έναν περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτή είναι η αρχή που χρησιμοποιείται στις περισσότερες από τις σύγχρονες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας: υδροηλεκτρικές, θερμικές (άνθρακας, φυσικό αέριο, πυρηνική), αιολικές και παλιρροϊκές. Χρησιμοποιώντας ένα πηνίο παράγεται μονοφασικό AC και χρησιμοποιώντας τρία πηνία παράγεται τριφασικό ρεύμα. Το μεγαλύτερο μέρος των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας παράγει τριφασικό AC. Το AC ρέει προς μία κατεύθυνση για τη μισή περίοδο και στη συνέχεια αλλάζει κατεύθυνση για το επόμενο μισό. Αυτή η συνεχής ημιτονοειδής ταλάντωση λαμβάνει χώρα με μια συγκεκριμένη συχνότητα (το πλήθος των κύκλων που συμβαίνουν σε ένα δευτερόλεπτο). Στα ευρωπαϊκά δίκτυα, η τυπική συχνότητα είναι 50 Hz.

Το DC ρέει πάντα προς την ίδια κατεύθυνση. Παράγεται από μπαταρίες, ηλιακά πάνελς και κυψέλες καυσίμου. Υπάρχουν επίσης γεννήτριες DC που λειτουργούν με βάση την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, αλλά δεν χρησιμοποιούνται συνήθως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το DC που παράγεται από φωτοβολταϊκά πάνελ (και πάρκα) μετατρέπεται σε AC ρεύμα και στη συνέχεια τροφοδοτείται στο δίκτυο.

Το είδος του ρεύματος επηρεάζει τη μετάδοσή του όσον αφορά την τάση που χρησιμοποιείται, τη χωρητικότητα της γραμμής (το ποσό μεταφερόμενης ενέργειας),

το μέγιστο μήκος της γραμμής και το ενδιαμέσο ηλεκτρικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Το πλεονέκτημα του AC έναντι του DC είναι ότι στο AC μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετασχηματιστές για την αναβάθμιση ή τη μείωση του επιπέδου τάσης (step-up–step-down). Ωστόσο, το DC είναι πιο κατάλληλο για τη μαζική μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις σε σχέση με το AC, όπου οι απώλειες είναι μεγαλύτερες.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και στη συνέχεια μεταφέρεται συχνά σε μεγάλες αποστάσεις σε υψηλές τάσεις από το δίκτυο μετάδοσης, το οποίο χαμηλώνει την τάση στο επίπεδο του δικτύου διανομής, φέρνοντας την ηλεκτρική ενέργεια στον καταναλωτή.



Εικόνα 1. Παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.

Αυτή είναι η κλασική διάρθρωση που λειτούργησε για πολλές δεκαετίες και ακόμη αντιπροσωπεύει τον κανόνα για τις περισσότερες περιοχές στον κόσμο. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μεγαλύτερο μέρος των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα ως AC, και ολόκληρο το σύστημα χρησιμοποιεί αυτόν τον τύπο ρεύματος από εκείνο το σημείο και μετά, διότι η τάση του μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί πολύ εύκολα με τη χρήση μετασχηματιστών. Συνήθως υπήρχε πάντα ένας σχετικά μικρός αριθμός εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας που βρίσκονταν κοντά στην πηγή ενέργειας (ανθρακωρυχεία, ποτάμια) ή κοντά σε μεγάλες αστικές συνοικίες, επιτρέποντας την τοπική κατανάλωση. Σταδιακά, κατασκευάστηκαν περισσότερες μονάδες παραγωγής και συνδέθηκαν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο υψηλής τάσης, που ονομάζεται σύστημα μετάδοσης. Ο ρόλος του είναι να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, μερικές φορές σε μεγάλες αποστάσεις, προκειμένου να εξισορροπήσει και να σταθεροποιήσει το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση τοπικής αύξησης της ζήτησης ή απότομης μείωσης της παραγωγής. Αυτή τη διαχείριση αναλαμβάνουν οι Οργανισμοί

Λειτουργίας Συστήματος Μετάδοσης (TransmissionSystemOperators - TSOs), στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δημόσιες επιχειρήσεις.

Όπως ο καταναλωτής χρησιμοποιεί συσκευές που λειτουργούν σε χαμηλή τάση, η μείωση της τάσης και η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας σε σπίτια, γραφεία ή εργοστάσια γίνεται με χρήση ενός πυκνού δικτύου γραμμών, τα οποία απαρτίζουν το σύστημα διανομής. Οι Διαχειριστές Συστήματος Διανομής (Distribution System Operators - DSOs) είναι υπεύθυνοι για τη λειτουργία αυτού του επιπέδου. Μπορεί να είναι ιδιωτικές, δημόσιες εθνικές ή δημοτικές επιχειρήσεις ή να έχουν κοινοπραξία.

Το τελευταίο διάστημα αυτή η δομή άρχισε να εμφανίζει προκλήσεις εξαιτίας της εμφάνισης νέων τεχνολογιών και εναλλακτικών χωρικών και λειτουργικών διατάξεων. Η άνοδος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με υψηλή αστάθεια (άνεμος, ηλιακή) και η είσοδος του έννοιας του "παραγωγού-καταναλωτή" (prosumer - παραγωγός και καταναλωτής ταυτόχρονα) έχουν αλλάξει το τεχνικό και αγοραστικό τοπίο, απαιτώντας νέες προσαρμογές στο δίκτυο. Σε αυτήν τη δομή, μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται από καθαρές πηγές μπορεί να παρέχονται στο δίκτυο σε στιγμές όπου η ζήτηση είναι χαμηλή ή η ίδια μονάδα (π.χ. ένα σπίτι με ηλιακούς συλλέκτες) δίνει αλλά και παίρνει ηλεκτρική ενέργεια από/προς το δίκτυο. Για την πρώτη περίπτωση, η λύση είναι η κατασκευή της υποδομής για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, όπου μπορεί να είναι απαραίτητο (π.χ. σε διαφορετική ζώνη ώρας ή κλιματολογική περιοχή). Για τη δεύτερη περίπτωση, η λύση είναι η ενίσχυση του δικτύου για να αντιμετωπίσει τη αμφίδρομη ροή ηλεκτρικής ενέργειας.

Δεδομένου ότι το περισσότερο μέρος των εγκαταστάσεων παραγωγής παράγει ηλεκτρικό ρεύμα ως AC, για να μεταδίδεται η ενέργεια ως DC, το ρεύμα πρέπει να μετατραπεί από τον έναν τύπο στον άλλο. Αυτό γίνεται από σταθμούς μετατροπών που τοποθετούνται σε κάθε άκρο της γραμμής μετάδοσης DC. Το κόστος οφέλους του DC έναντι του AC είναι εμφανές για γραμμές μεγαλύτερες από 600 χιλιόμετρα.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται αμέσως. Πράγματι, η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια καθοδηγεί το πρότυπο της παραγωγής, ώστε οι εγκαταστάσεις παραγωγής να ενεργοποιούνται ή να απενεργοποιούνται ανάλογα. Η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί τόσο "εύκολα" όπως το νερό ή το αέριο, έτσι απαιτείται καλή διαχείριση του δικτύου.[2], [3]

1.2 Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην εποχή μας

Ο κόσμος μας απαιτεί όλο και περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Η κατανάλωση τείνει να διαδοθεί σε όλη την υφήλιο, αλλά οι κύριες πηγές ενέργειας πιθανόν να παραμείνουν τοπικές.[2] Στην σύγχρονη εποχή, τα δίκτυα συστημάτων ηλεκτρικής

ενέργειας πλέον δεν είναι μόνο εθνικά – πολλές χώρες στην Ευρώπη είναι διασυνδεδεμένες, οι πολιτείες τις Αμερικής είναι διασυνδεδεμένες και οι επαρχίες της Κίνας επίσης –. Μεταφερόμαστε σε ένα παγκόσμιο δίκτυο που θα καλύπτει τυπικά 10 εκατομύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα και αποστάσεις 4000km και πάνω. Παρ' ολ' αυτά, τα δίκτυα έχουν γραμμές μεταφοράς 100km τη φορά. Αυτό έχει να κάνει μερικώς με τους χωρικούς και επαγωγικούς περιορισμούς και μερικώς με το γεγονός ότι δεν ήταν σχεδιασμένα για κάτι άλλο. [3]

Η αυξανόμενη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ανεμογεννήτριες) αυξάνει ακόμη περισσότερο την ανάγκη για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, που μπορεί να περιλαμβάνουν διασταυρώσεις στη θάλασσα. Ένα από τα διαθέσιμα μέσα για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις που περιλαμβάνουν εκτενή ύδατα είναι η χρήση υποθαλάσσιων καλωδίων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί ήδη ως ώριμη, με διάφορα παραδείγματα καλωδίων που λειτουργούν αξιόπιστα εδώ και δεκαετίες. Ωστόσο, η καινοτομία και η ανάπτυξη έχουν αυξηθεί με υψηλό ρυθμό τα τελευταία χρόνια, καθώς παράγονται περισσότερα καλώδια και σχεδιάζεται να παραχθούν ακόμη περισσότερα, το τοπίο των υποθαλάσσιων καλωδίων ηλεκτρικής ενέργειας διευρύνεται και ποικίλλεται συνεχώς. [2]

Λόγω της αυξημένης ανάγκης για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και την γενικότερη αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι λογικό επόμενο να χρειαστεί αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς.

Αναλόγως την μεταφερόμενη ισχύ, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την απόσταση και άλλες απαιτήσεις χρησιμοποιούνται διαφορετικά είδη μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται συστήματα εναλλασόμενου ρεύματος (HVAC), ωστόσο τα τελευταία χρόνια λόγω ωρίμανσης της τεχνολογίας των DC καλωδίων, παρουσιάζεται αυξημένη χρήση/κατασκευή συστημάτων μεταφοράς συνεχούς ρεύματος (HVDC). Συγκεκριμένα, τα HVDC συστήματα χρησιμοποιούνται για μεγάλες αποστάσεις, καθώς είναι οικονομικότερα μετά την break-even απόσταση με τα HVAC συστήματα. Επίσης, όπως θα φάνει και παρακάτω σε ένα DC σύστημα οι θερμικές απώλειες που παρουσιάζονται στον αγωγό είναι πολύ μικρότερες από το AC. [4, p. 27]

1.3 Καλώδια ισχύος υψηλής τάσης

Οι τρεις κύριες κατηγορίες καλωδίων ισχύος υψηλής τάσης είναι τα εναέρια (overhead), τα υποβρύχια (submarine) και τα υπόγεια (underground). Τα overhead καλώδια χωρίζονται σε κοντινής, μεσαίας και μεγάλης απόστασης, με διάφορα επίπεδα τάσης από 33 kV έως και πάνω από 500 kV. Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούνται από έναν αγωγό μετάδοσης πάνω από το έδαφος (OHL), ο οποίος είναι

“αιωρούμενος” με την στήριξη από τους πύργους μετάδοσης και υποστηρίζεται από αναρτήσεις τύπου pin και μονωτές, αντέχοντας τόσο την κανονική τάση λειτουργίας όσο και τις υπερτάσεις λόγω της αλλαγής κατάστασης και τις αστραπές. Ο πιο συνηθισμένα χρησιμοποιούμενος αγωγός για τις εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι το αλουμίνιο με ενίσχυση από χάλυβα (ACSR) λόγω του βάρους και του χαμηλότερου κόστους του. Διάφοροι τύποι αγωγών μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό των εναέριων γραμμών ανάλογα με το έδαφος και τις απαιτήσεις χωρητικότητας. [5]

Τα υπόγεια καλώδια αποτελούν σημαντική επένδυση και αποτελούν ζωτικό μέρος του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ένα όλο και πιο ανταγωνιστικό και μη επιβλεπόμενο περιβάλλον, είναι απαραίτητο οι υπηρεσίες κοινής ωφέλειας να μεγιστοποιούν την κερδοφορία τους. Αυτό απαιτεί από τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας να έχουν γνώση των καλωδίων ισχύος και της διάγνυσής τους προκειμένου να λαμβάνουν τις σωστές αποφάσεις σχετικά με τον εξοπλισμό των καλωδίων και να έχουν μια γενική ιδέα για το πώς αποδίδει στην υπηρεσία, πώς γηραίνει, υποβαθμίζεται και αποτυγχάνει και πώς πρέπει να διαγνωστεί για επισκευή ή αντικατάσταση. Ένα υπόγειο καλώδιο ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζεται για να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα και να αντέχει σε συγκεκριμένη τάση λειτουργίας, που του επιτρέπει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Τα υπόγεια καλώδια, φυσικά, έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Εκτός από την καλύτερη εμφάνιση γενικά (είναι υπόγεια - δεν φαίνονται) και τη μικρότερη παρεμβολή με εξαρτήματα, τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν μικρότερες πτώσεις τάσης και μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης. Από την άλλη πλευρά, έχουν υψηλότερο κόστος παραγωγής και εγκατάστασης και, συνεπώς, χρησιμοποιούνται εκεί όπου οι αέριες γραμμές δεν είναι εφικτές λόγω πρακτικών περιορισμών ή των συνδεδεμένων κινδύνων. Επομένως, τα χρησιμοποιούμε σε συγκεκριμένα μέρη, όπως αστικές περιοχές με υψηλές πυκνότητες πληθυσμού.[6], [7]

Η ζήτηση για τα υποθαλάσσια καλώδια γίνεται όλο και μεγαλύτερη από τους παραγωγούς ενέργειας. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στη χρήση αυτών των τύπων καλωδίων και θα αναφερθούν τα βασικά πλεονεκτήματα. Αρχικά, αυτά τα καλώδια δεν επηρεάζουν την καθημερινότητα των ανθρώπων. Τα αιολικά πάρκα βρίσκονται μακριά από την ακτή και τα καλώδια φέρνουν πίσω την ενέργεια, χωρίς να επηρεάζουν τους ανθρώπους στην ξηρά όπως θα μπορούσε να κάνει ένα μεγάλο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας, πυρηνικός αντιδραστήρας ή αιολικό/ηλιακό πάρκο στην ξηρά. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, επιτρέπουν τη χρήση του εδάφους για άλλους σκοπούς. Τα θαλάσσια ζώα χρησιμοποιούν πραγματικά αυτά τα καλώδια ως τόπο διαμονής, καθώς μελέτες δείχνουν ότι τα καλώδια έχουν ελάχιστη ή καθόλου επίπτωση στη θαλάσσια ζωή και ότι ορισμένα είδη φυκιών και θαλάσσιας ζωής αναπτύσσονται κοντά ή πάνω στα καλώδια, παρέχοντας ένα υγιές υφάλιο χώρο για ανάπτυξη. Τέλος, επιτρέπουν τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που δεν θα μπορούσαν να λάβουν αυτήν την ενέργεια χωρίς αυτά. Περιοχές όπως η Νέα

Ζηλανδία, μικρά νησιά κοντά στην Ιαπωνία, η βόρεια ευρωπαϊκή περιοχή και περιοχές στην Αφρική και τη Νότια Αμερική όλοι επωφελούνται από αυτά τα καλώδια. Αυτά τα καλώδια επιτρέπουν έναν τρόπο να φτάσει η ενέργεια σε όλες αυτές τις περιοχές χωρίς πολλές παρεμβάσεις στο έδαφος και ως έναν ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο να μεταφερθεί αυτή η ενέργεια σε όλο τον κόσμο.[8]–[10]

Με την αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, αυξάνονται επίσης οι απαιτήσεις για τάσεις μεταφοράς ενέργειας. Η μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, λόγω της αυξημένης εμπορίας ηλεκτρισμού μεταξύ χωρών, θα απαιτήσει αποδοτικά συστήματα καλωδίων υψηλής τάσης, συμπεριλαμβανομένων καλωδίων για χρήση σε αστικές περιοχές και για υπόγειες και υποθαλάσσιες διασταυρώσεις. Σήμερα, η τάση λειτουργίας των καλωδίων μετάδοσης ισχύος από εξυλασμένο (extruded) υλικό έχει αυξηθεί.[11]

Το ηλεκτρικό καλώδιο με πολυμερή μόνωση αποτελείται ουσιαστικά από ένα μεταλλικό αγωγό χαμηλής αντίστασης που καλύπτεται με πολυμερή μόνωση, που απομονώνει τους αγωγούς μεταξύ τους και από το περιβάλλον τους, καθώς και ένα περίβλημα που διαμορφώνεται κυρίως με γνώμονα τις μηχανικές του ιδιότητες για την προστασία του καλωδίου από το περιβάλλον. Άλλα σημαντικά συστατικά μπορεί να περιλαμβάνουν ημιαγωγικά στρώματα, μεταλλικές ανθοφορίες, ενισχυτικό μεταλλικό σύρμα και ταινία που αποτρέπει τη διείσδυση νερού. Παρόλο που μια ενδεχόμενη επανάσταση στα υπεραγωγία υλικά θα αλλάξει δραματικά τη δομή των συστημάτων μετάδοσης ισχύος, οι ειδικοί προβλέπουν ότι η πρακτική, ευρεία εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας πιθανότατα δεν θα επέλθει εντός των επόμενων 10 έως 20 ετών. Προς το παρόν, η τεχνολογία καλωδίων υψηλής τάσης χαρακτηρίζεται από τη μετάβαση από τα παραδοσιακά καλύμματα με χαρτόνι που είναι αφυδατωμένο με έλαιο υπό πίεση, που έχει μειονεκτήματα όπως υψηλές απώλειες στο διηλεκτρικό, υψηλό κόστος λειτουργίας και ρύπανση, σε extruded συνθετικό διηλεκτρικό. Μολονότι, η διάβρωση από το νερό είναι ένας από τους πιο σημαντικούς μηχανισμούς βλάβης για καλώδια μεσαίας και υψηλής τάσης, η σχεδίαση, η κατασκευή και τα υλικά που μπορούν να αποτρέψουν τη διείσδυση του νερού και τη διάβρωση, ιδίως στην περίπτωση υπόγειων ή υποθαλάσσιων καλωδίων, είναι σημαντικά.[11]

1.3.1 Ημιαγωγία shields

Η έρευνα σχετικά με τα ημιαγωγία έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη ηλεκτρικών καλωδίων ισχύος. Στα ηλεκτρικά καλώδια, τα ημιαγωγία υλικά έχουν εφαρμοστεί προκειμένου να αποτραπούν οι μερικές εκκενώσεις στις διεπαφές μεταξύ της μόνωσης και του αγωγού και μεταξύ της μόνωσης και του εξωτερικού shielding, καθώς και για να μετριάσει την ηλεκτρική ένταση στο στρώμα μόνωσης. Τα ημιαγωγικά υλικά παρέχουν ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο γύρω από τη μόνωση του καλωδίου, μειώνοντας το δυναμικό στην επιφάνεια των

πολυκλωνικών (stranded) αγωγών και στο εσωτερικό της μεταλλικής ασπίδας, και αποτρέπουν το φαινόμενο κορόνα (Coronaeffect) στην επιφάνεια των αγωγών και της μόνωσης, διατηρώντας στενή επαφή μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας της μόνωσης. Επιπλέον, παρέχουν προστασία κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος από τις ζημιές που προκαλείται από την θέρμανση του αγωγού.

Είναι γνωστό ότι η διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης εξαρτάται από την αντίσταση (volume resistivity) του ημιαγωγίμου υλικού. Άλλοι παράγοντες, όπως η πολικότητα, ο τύπος και η ποσότητα διασταύρωσης (cross-linking) του ημιαγωγίμου υλικού, έχουν μικρή επίδραση στη διηλεκτρική αντοχή. Οι ακαθαρσίες, ωστόσο, μπορούν να αυξήσουν το φαινόμενο της διάβρωσης από το νερό.

Στα ηλεκτρικά καλώδια, συνήθως χρησιμοποιούνται ημιαγωγίμα υλικά γεμισμένα με CarbonBlack (CB), όπως η εθιλένη βινυλοακετάτη (ethylene vinyl acetate) και η εθιλένη εθυλ ακρυλάτη (ethylene ethyl acrylate), ως στρώμα ημιαγωγιμότητας. Παράγοντες όπως η περιεκτικότητα σε CB, η ποιότητα ανάμιξης και η θερμοκρασία που επηρεάζει την ανάπτυξη του δικτύου του CB, επηρεάζουν τις ιδιότητες των ημιαγωγίμων υλικών γεμισμένων με CB. [11]

1.3.2 Μονωτές

A. XLPE

Το θερμοπλαστικό πολυαιθυλένιο (PE) είναι ένα ημικρυσταλλικό πολυμερές που έχει καλές ηλεκτρικές ιδιότητες (χαμηλή σταθερή διηλεκτρική σταθερά, χαμηλή διηλεκτρική απώλεια και υψηλή αντοχή στη διάβρωση) μαζί με άλλες επιθυμητές ιδιότητες, όπως μηχανική ανθεκτικότητα και ευελιξία, καλή αντοχή στα χημικά, εύκολη επεξεργασία και χαμηλό κόστος. Αυτές οι ιδιότητες θα το έκαναν μια επιθυμητή επιλογή για την μόνωση ηλεκτρικών καλωδίων ισχύος αν δεν υπήρχε το βασικό μειονέκτημα της χαμηλής του θερμοκρασίας τήξης. Αυτό περιορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας στους 75°C. Για να βελτιώσει αυτήν την ιδιότητα, το PE υπόκειται σε cross-linking (XLPE), με αποτέλεσμα να αυξάνει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας στους 90°C, τη θερμοκρασία έκτακτης ανάγκης στους 130°C και τη μέγιστη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος στους 250°C. Το cross-linking αυξάνει επίσης την αντοχή στην κρούση, τη σταθερότητα, την αντοχή στον εφελκυσμό, τις θερμικές ιδιότητες, την αντοχή στα χημικά και βελτιώνει τις ηλεκτρικές ιδιότητες, τη γήρανση και την αντοχή στους διαλύτες του πολυαιθυλενίου. Το πολυαιθυλένιο είναι διαδεδομένο να γίνεται cross-linked με τρεις μεθόδους: με ιονίζουσα ακτινοβολία (irradiation - cross linking), με περοξειδία (peroxide - cross linking) και με σιλανικές ενώσεις (silane-cross linking). Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει κανείς όταν χρησιμοποιείται XLPE είναι η αλλοίωση της μονωτικής του ικανότητας εξαιτίας της υγρασίας. Αυτό συνήθως αντιμετωπίζεται με

1. Προσθήκη υγρών οργανικών υλικών με χαμηλό μοριακό βάρος.
2. Μίξη του XLPE με πολικά πολυμερή(PolarPolymers).
3. Χρήση πολυαιθυλενίου με πολύ χαμηλή πυκνότητα.

B. Ελαιοπολυαιθυλένιο (ethylene propylene rubber)

Το ελαιοπολυαιθυλένιο καουτσούκ (EPR) είναι ένα από τα extruded διηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα σε καλώδια μεσαίας και υψηλής τάσης. Επειδή τα συμπολυμερή (copolymers) του ελαιοπολυαιθυλενίου (EPM) είναι πλήρως κορεσμένα και αποχρωματισμένα, έχουν εξαιρετική αντοχή στο όζον, την οξειδωση, τη θερμότητα, τις καιρικές συνθήκες, το νερό και τους πολικούς διαλύτες (polarsolvents). Το EPR μπορεί να πολυμεριστεί μόνο με περοξειδία. Επειδή στη βιομηχανία του καουτσούκ υπάρχει προτίμηση για τη θείωση, αναπτύχθηκε ελαιοπολυαιθυλένιο καουτσούκ με δυνατότητα θείωσης (EPDM) με την εισαγωγή ενός διενικού μονομερούς ως το τρίτο μέρος της σύνθεσης του συμπολυμερούς, αλλά στη βιομηχανία των καλωδίων δεν χρησιμοποιείται θείωση. Τα πολυμερή με χαμηλή περιεκτικότητα σε αιθυλένιο είναι αμορφικοί και εύκολοι στην επεξεργασία. Οι πολυμερείς με υψηλή περιεκτικότητα σε αιθυλένιο είναι ημικρυσταλλικοί και έχουν καλύτερες φυσικές ιδιότητες, αλλά μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα κατά την επεξεργασία. Η εξαιρετική αντοχή στις καιρικές συνθήκες και στο νερό είναι καθοριστικά χαρακτηριστικά για την επιτυχία του EPR στις εφαρμογές του. Η αντοχή στο φαινόμενο κορώνα, η ηλεκτρική σταθερότητα σε υγρό περιβάλλον, η αντίσταση στην εμφάνιση ακτινικών διαρροών (water-tree), η απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και η ευλυγισία είναι ελκυστικά χαρακτηριστικά του EPR για ηλεκτρική μόνωση.[11]

1.3.3 Μανδύας (Sheath)

Για την προστασία από περιβαλλοντικές βλάβες, το καλώδιο καλύπτεται από ένα ή περισσότερα μεταλλικά ή πολυμερή στρώματα. Το PVC χρησιμοποιείται συνήθως για την επένδυση των καλωδίων υψηλής τάσης. Τα τελευταία 25 χρόνια, υπήρξε κάποια αντικατάσταση του PVC με LLDPE ή τα πιο σκληρά MDPE και HDPE, ειδικά για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος βλάβης της επένδυσης κατά την εγκατάσταση. Στα τελευταία 10 χρόνια, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο πολυαιθυλένιο ή αιθυλένιο βινυλοασεάτη με 60-65% τριϋδρικό αργίλιο (aluminumtrihydrate) και άλλα πρόσθετα που είναι σύμπλεγματα ελεύθερα από αλογόνο και έχουν χαμηλό κίνδυνο φωτιάς. Για καλύτερη μηχανική αντοχή και προστασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ατσάλινη ενίσχυση (wired armoring). Για να αποτραπεί η είσοδος νερού στο extruded διηλεκτρικό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μεταλλικό διαχωριστικό νερού γύρω από το καλώδιο. Αυτό το διαχωριστικό μπορεί να εφαρμοστεί ως ξεχωριστή μεταλλική ελασματοποιημένη ταινία (laminated tape), να ενσωματωθεί στο μεταλλικό στρώμα της θωράκισης (shield) ως σφραγισμένη ταινία ή το καλώδιο μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε έναν μεταλλικό σωλήνα.[11]

1.3.4 *Είδη αγωγών στα καλώδια ισχύος*

Οι αγωγοί είναι αλουμινένια ή χάλκινα καλώδια που μπορούν να είναι στερεοί ή πολυκλωνικοί. Οι πολυκλωνικοί αγωγοί χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την ευλυγισία του καλωδίου. Μπορούν επίσης να αυξήσουν τη μέγιστη ηλεκτρική καταπόνηση κατά 20%. Σε αυτούς τους αγωγούς, το νερό μπορεί εύκολα να εισέλθει (ρέει) κατά μήκος των ανοίγματος ή των χώρων μεταξύ των κλώνων. Η θωράκιση κατά του νερού κατά μήκος μπορεί να επιτευχθεί γεμίζοντας τα ανοίγματα με ένα πλαστικό υλικό ή ενσωματώντας υλικά που απορροφούν νερό (υγροσκοπικά) μέσα στους κλώνων. Ένας άλλος τρόπος για να επιτευχθεί αυτός ο αποκλεισμός είναι η χρήση συμπαγών αγωγών που δεν έχουν ανοίγματα. Για το χαλκό, οι συμπαγείς αγωγοί δεν είναι πολύ πρακτικοί για αγωγούς μεγέθους. Στο τραβηγμένο αλουμίνιο, η κατάσταση συνήθως είναι πλήρως σκληρή, όταν το αλουμίνιο έχει υποστεί θερμική επεξεργασία-συγκόληση είναι μαλακότερο. Τα πρότυπα των Ηνωμένων Πολιτειών δεν αναγνωρίζουν συμπαγείς αγωγούς αλουμινίου, αλλά αυτοί οι αγωγοί είναι σύνηθεις στην Ευρώπη. Τα καλώδια υψηλής τάσης μπορούν να έχουν έναν ή περισσότερους αγωγούς στον πυρήνα τους. Σε καλώδια με πολλούς πυρήνες, η κατάλληλη απόσταση μεταξύ των αγωγών πρέπει να υπολογιστεί από τους σχετικούς τύπους ηλεκτρικής καταπόνησης. Η διαμόρφωση του αγωγού περιλαμβάνει διαδικασίες όπως το τράβηγμα, η συμπίεση, η ανόπτηση (annealing), η επικάλυψη (coating), το στρώσιμο (bunching) και η κλωστοποίηση (stranding).[11]

Τα καλώδια ισχύος έχουν καθιερωθεί να έχουν κυκλική διατομή, καθώς παρέχουν το βέλτιστο συμβιβασμούς μεταξύ των απωλείων εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου και την επιφάνεια. Για τις απώλειες το θέμα είναι προφανώς τα λειτουργικά έξοδα – χάνεται ενέργεια – , ενώ όσον αφορά την επιφάνεια το πρόβλημα έγκειται στα κατασκευαστικά έξοδα. Για παράδειγμα σε έναν σωληνοειδή αγωγό θα χρειαστούν στρώσεις μόνωσης για την εξωτερική, αλλά και για την εσωτερική επιφάνεια. Επιπλέον, οι κυλινδρικοί αγωγοί είναι ευκολότεροι στην διαχείριση και παρέχουν ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο στο διηλεκτρικό περιβάλλον του αγωγού.[4]

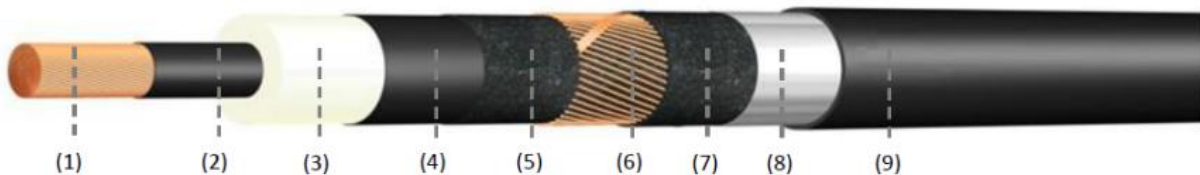
Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, το πρόβλημα που προέκυπτε από το επιδερμικό φαινόμενο δεν ήταν υπαρκτό, καθώς οι διατομές των αγωγών ήταν συγκρητικά μικρές. Με την ανάγκη για επέκταση της χωρητικότητας του δικτύου οι διατομές των αγωγών αυξήθηκαν, προκαλώντας μεγαλύτερες απώλειες λόγω μεγαλύτερης αντίστασης και δυσκολίες στην παραγωγή και διαχείριση (π.χ. στην συστροφή). Αυτό οδήγησε σε νέους σχεδιασμούς αγωγών, όπως η ομαδοποίηση πολλών αγωγών μικρότερης διατομής που δεν μονώνονται μεταξύ τους, πετυχαίνοντας μεγαλύτερη ευλυγισία και ευκολότερη παραγωγή. Από πλευράς απωλείων, είναι περιπού ίδιες με αυτή του κυλινδρικού αγωγού. [4]

- Το πρώτο είδος αγωγού που χρησιμοποιείται ευρέως είναι ο πολυκλωνικός (stranded). Για μηχανικούς λόγους προτιμάται το πλήθος των μικρών αγωγών να συστρέφεται ελικοειδώς γύρω από τον άξονα του αγωγού. Οι στρώσεις συστραμμένων αγωγών μπορεί να είναι μονής κατεύθυνσης/ unidirectional (όλες οι στρώσεις στρέφονται στην ίδια κατεύθυνση) ή διπλής κατεύθυνσης/ bidirectional (οι στρώσεις στρέφονται με εναλλασσόμενη κατεύθυνση). Όταν οι αγωγοί είναι μονωμένοι μεταξύ τους η αντίσταση και η αντίδραση είναι ελαφρώς μικρότερες από αυτές που θα είχε ένας κυλινδρικός αγωγός με την ίδια DC αντίσταση. Στην περίπτωση που δεν είναι μονωμένοι και έχουν άμεση επαφή, προκαλούνται μεγαλύτερες απώλειες για μικρά μήκη. Η συστροφή καταστρέφει την συμμετρία, προσθέτοντας ακτινική συνιστώσα στο ηλεκτρικό πεδίο και z-συνιστώσα στο μαγνητικό πεδίο κατά μήκος του αγωγού. Τέλος, οι πολλαπλοί αγωγοί εισάγουν υψηλόβαθμες συναρτήσεις Bessel στους υπολογισμούς.
- Το δεύτερο είδος που χρησιμοποιείται είναι ο αγωγός Milliken ή M-type. Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σε αγωγούς διατομής μεγαλύτερης των 1000mm^2 , για να μειωθούν οι απώλειες. Η βασική αρχή είναι να κατανεμηθούν οι αγωγοί με τρόπο τέτοιο, ώστε η συνολική επαγωγή στον καθένα να είναι ίδια. Αυτό στην θεωρία εγγυάται ότι το ρεύμα δεν έχει επιθυμητό μονοπάτι και ότι το μέτρο και η φάση είναι ίδια για κάθε αγωγό. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίζοντας τον αγωγό σε κομμάτια που έχουν την μορφή πύλας και είναι μονωμένα μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Εξαιτίας των πολλών επιφανειών επαφής, αναμένεται η αντίσταση επαφής να είναι διαφορετική για μονής ή διπλής κατεύθυνσης συστροφές και μπορεί να διαφέρουν στην διάρκεια ζωής του καλωδίου λόγω μακροχρόνιας οξείδωσης, λυγίσματος και μηχανικής καταπόνησης. Κάθε στρώση τμήματος συστρέφεται γύρω από τον πυρίνα του τμήματος για να έχουν όλοι οι αγωγοί το ίδιο ρεύμα. Για μηχανικούς λόγους, όλα τα τμήματα στρέφονται γύρω από τον πυρίνα για να ομογενοποιηθεί περαιτέρω το φαινόμενο γειτνίασης – που προκαλείται από άλλους αγωγούς στην ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 2. Διατομή καλωδίου με αγωγό τύπου Milliken. (1) πυρίνας τμήματος/μονός αγωγός, (2) πυρίνας καλωδίου, (3) πυρίνας αγωγού, (4) τμήμα μορφής πίτας, (5) στρώση τμήματος.

Παρακάτω παρατίθενται ένα τυπικό καλώδιο ισχύος.



Εικόνα 3. Σχηματική αναπαράσταση τυπικού καλωδίου ισχύος: (1) εσωτερικός αγωγός, (2) εσωτερικό ημιαγώγιμο, (3) μόνωση, (4) εξωτερικό ημιαγώγιμο, (5) ημιαγώγιμη υδροφοβική ταινία, (6) metallic screen-shield, (7) ημιαγώγιμη υδροφοβική ταινία, (8) αλουμινένια ταινία, (9) εξωτερικός πολυμερικός μανδύας

Ο εσωτερικός αγωγός (1) είναι φτιαγμένος συνήθως από μέταλλο υψηλής αγωγιμότητας όπως χαλκό ή αλουμίνιο και έχει επικρατήσει να αποτελείται από πολλές συστραμμένες μεταλικές βέργες. Αυτό ελαττώνει το επιδερμικό φαινόμενο κατά την μεταφορά του ρεύματος -άρα και τις απώλειες- και καθιστά το καλώδιο ευλύγιστο. Το εσωτερικό και εξωτερικό ημιαγώγιμο (2 & 4) επιτρέπουν την δημιουργία ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου στο μονωτικό υλικό (3). Τα (2) και (4) συνήθως είναι φτιαγμένα από γραφίτη (ημιαγώγιμο).

Η μόνωση (3) παρασκευάζεται από εμποτισμένο χαρτί ή εξωθημένο πολυμερές και είναι το κύριο στοιχείο που καθορίζει την διάρκεια ζωής του καλωδίου. Το metallic screen (6) είναι συνήθως αλουμινένιος ή χάλκινος και οι κύριες χρήσεις του είναι :

- Η επιστροφή του ρεύματος βραχυκύκλωσης
- Η επιστροφή των χωρητικών ρευμάτων

➤ Και η μείωση της ηλεκτρικής επίδρασης στο περίγυρο της βραχυκύκλωσης

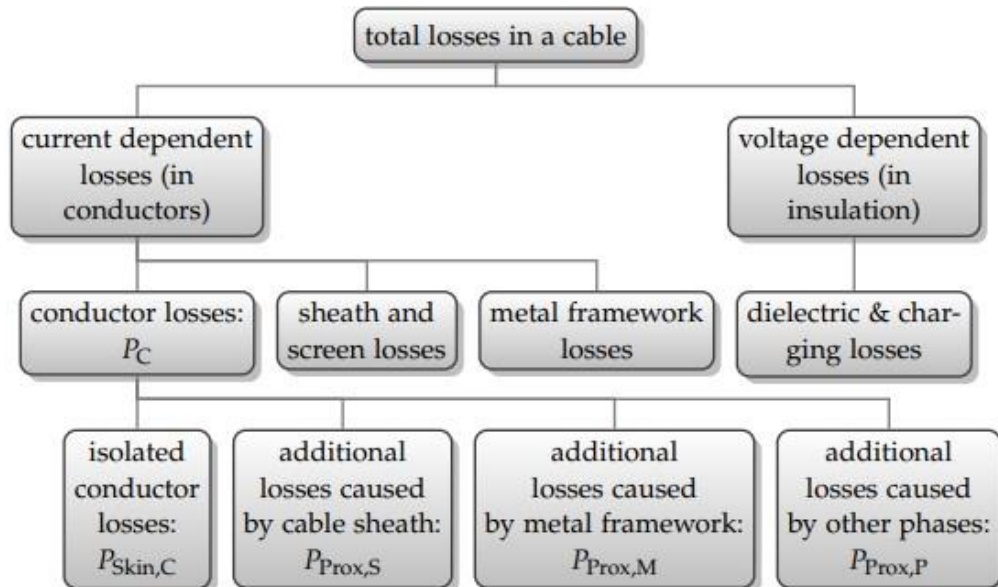
Οι ημιαγώγιμες υδροφοβικές ταινίες (5 & 7) έχουν σκοπό τον περιορισμό της περαιτέρω εισχώρησης του νερού σε περίπτωση που υπάρξει υγρασία ή διαρροή. Η ελασματοποιημένη (laminated) αλουμινένια ταινία (8) επίσης χρησιμοποιείται για την αποτροπή της εισχώρησης νερού στο υπόλοιπο καλώδιο.

Ο εξωτερικός πολυμερικός μανδύας (9) λειτουργεί κυρίως για την προστασία του μεταλλικού μανδύα από μηχανικές καταπονήσεις και διαβρώση που προκαλεί το νερό. Για την περαιτέρω προστασία από το νερό (υποβρύχια καλώδια) μπορεί να τυλιχτούν υδροφοβικές ταινίες γύρω από τον εσωτερικό αγωγό αποτρέποντας την ακτινική εισροή του νερού και για την κατά μήκος εισροή χρησιμοποιείται μία υδροφοβική “κόλλα” που γεμίζει τα κενά που προκύπτουν στον εσωτερικό αγωγό. [4]

1.4 Απώλειες στα καλώδια ισχύος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι απώλειες Joule (Joule effect) ευθύνονται για το κύριο ποσοστό των απωλειών στα καλώδια ισχύος. Συγκεκριμένα, ένα ποσοστό του 2.5 % της μεταφερόμενης ισχύς χάνεται χάνετε εξαιτίας του φαινομένου αυτού, που σημαίνει ότι μία βελτίωση της τάξεως του 0.1 % για ένα σύστημα 10GW,θα μεταφερθούν 10MW παραπάνω στους καταναλωτές, αναλογώντας σε παροχή 1000-2000 περισσότερων νοικοκυριών.[12]

Εμβαθύνοντας, οι απώλειες σε καλώδια ισχύος υψηλής τάσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4. Κατηγοριοποιημένες απώλειες καλωδίων ισχύος

Έτσι, οι συνολικές απώλειες, χωρίζονται στις απώλειες που εξαρτώνται από την τάση (voltage dependent) και προκύπτουν στην μόνωση – οι λεγόμενες διηλεκτρικές απώλειες – και στις απώλειες που εξαρτώνται από το ρεύμα (current dependent). Οι τελευταίες υποκατηγοριοποιούνται σε απώλειες αγωγού, sheath και screen και μεταλλικού σκελετού. Στην συγκεκριμένη διπλωματική διατριβή, θα ασχοληθούμε μόνο με τις απώλειες αγωγού που εξαρτώνται κυρίως από το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) που προκύπτει στον εσωτερικό αγωγό. [4]

Υπάρχουν και επιπλέον απώλειες όπως αυτές που προκαλούνται από το φαινόμενο γειτνίασης μεταξύ του εσωτερικού αγωγού και των sheath, screen, μεταλλικού σκελετού και των άλλων 2 φάσεων, αλλά δεν θα συμπεριληφθούν στην μελέτη. Θα γίνει μόνο μία επιφανειακή αναφορά στο φαινόμενο γειτνίασης για την πληρότητα της μελέτης του καλωδίου στο κεφάλαιο 4.

1.4.1 Επιδερμικό φαινόμενο - Skin effect

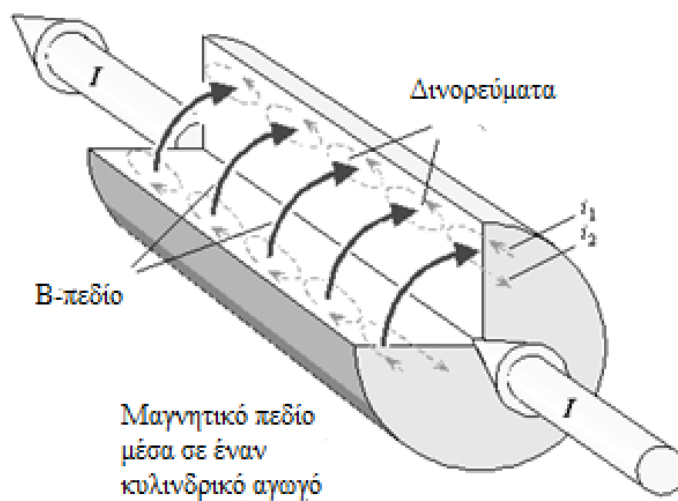
Ο Maxwell ήταν αυτός που ανακάλυψε ότι η τάση (V) που απαιτείται για να επιβάλλει ένα επιθυμητό ρεύμα (I) μέσω ενός καλωδίου αυξάνεται περισσότερο από ό,τι θα μπορούσε να εξηγηθεί από την επαγωγική αντίσταση. Αυτό το εξήγησε ως αποτέλεσμα μιας απόκλισης από την ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας ρεύματος. Αυτή η ανακάλυψη ακολούθηθηκε από τους Heaviside, Rayleigh και Kelvin. Ονομάστηκε "επιδερμικό φαινόμενο" επειδή το ρεύμα συγκεντρώνεται στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού. Ο λόγος της αντίστασης υψηλής συχνότητας προς

την αντίσταση της συνεχούς τάσης για ένα ευθύ καλώδιο (R_{AC}/R_{DC}) υπολογίστηκε σε όρους συναρτήσεων Bessel και μειώθηκε σε πίνακες.

Ο Steinmetz καθόρισε το βάθος διείσδυσης χωρίς περιορισμό όσον αφορά το σχήμα του αγωγού. Εφάρμοσε αυτή την έννοια τόσο σε ελασματοποιημένους πυρύνες σιδήρου, όσο και σε αγωγούς. Δυστυχώς, έδωσε δύο ορισμούς που διαφέρουν ελαφρώς, έναν για τους σιδηροκεραμικούς πυρήνες και έναν για τους αγωγούς. Ο δεύτερος ορισμός είναι αυτός που έχει γενικώς υιοθετηθεί. Οι πιο πρόσφατοι συγγραφείς έχουν απλοποιήσει τη μελέτη επιδερμικού φαινομένου και έχουν γενικεύσει την εφαρμογή του. Οι Schelkunoff και Stratton έχουν δώσει την πιο σφαιρική μεταχείριση του θέματος, συμπεριλαμβανομένου του βάθους διείσδυσης σε όλα τα είδη προβλημάτων που αφορούν αγωγούς. Έχουν εισάγει την έννοια της επιφανειακής επαγωγής, από την οποία προκύπτει η επιφανειακή αντίσταση.

Αναλυτικότερα, στα κυκλώματα εναλλασόμενου ρεύματος και ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες, παρουσιάζεται ένα φαινόμενο όπου το ηλεκτρικό ρεύμα τείνει να ρέει στην κοντά στην επιφάνεια του αγωγού και όχι σε όλη την διατομή του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο και οφείλεται στα δινορεύματα (eddy currents) που δημιουργούνται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που προκύπτει από την ροή του εναλλασόμενου ρεύματος στον αγωγό. Το βάθος διείσδυσης δ (depth of penetration) είναι μία χρήσιμη διάσταση, που εξαρτάται από την συχνότητα, την ειδική αγωγιμότητα ή αντίσταση και την μαγνητική διαπερατότητα. Αν η ακτίνα του αγωγού γίνει πολύ μεγαλύτερη από το βάθος διείσδυσης τότε στο εναλλασόμενο πεδίο ειδικά σε υψηλές συχνότητες, τείνει να γίνει ένα επιφανειακό φαινόμενο και όχι χωρικό.

Πιο συγκεκριμένα, εάν σε ένα κυλινδρικό αγωγό τροφοδοτήσουμε ρεύμα I όπως στην παρακάτω εικόνα, θα δημιουργηθεί ένα πεδίο B , δινορεύματα όπως το i_1 που έχει ίδια φορά με το ρεύμα I και δινορεύματα όπως το i_2 που έχει την αντίθετη φορά. Έτσι, στο κέντρο του αγωγού θα υπάρξει μειωμένη ροή ρεύματος - αφού το i_2 αντιστέκεται της φοράς του I -, ενώ κοντά στην επιφάνεια θα υπάρξει επιπλέον ροή, καθώς το i_1 έχει ίδια φορά με το I .



Εικόνα 5. Πεδιακή αναπαράσταση του επιδερμικού φαινομένου σε κυλινδρικό αγωγό που τροφοδοτείται με ρεύμα I .

Κατά συνέπεια, η χρησιμοποιούμενη επιφάνεια της διατομής (effective cross-sectional area) μειώνεται, προκαλώντας αύξηση της αντίστασης και κατ' επέκταση αύξηση απωλειών.

Το φαινόμενο αυτό λαμβάνεται υπόψη για την σχεδίαση και την επίδοση υψηλής συχνότητας κυκλωμάτων τηλεπικοινωνιών – πομποί ραδιοφώνου και τηλεόρασης – και στα καλώδια ισχύος υψηλής τάσης. Για να περιοριστεί το φαινόμενο αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται αγωγοί με μεγάλη αγωγιμότητα – χαλκός, αλουμίνιο – για να μειωθεί η αντίσταση.

Για περισσότερη εμβάθυνση και κατανόηση σε αυτά που προαναφέρθηκαν, ανατρέξτε στην ενότητα του παραρτήματος *skin effect*. [13], [14]

2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

Ο υπολογισμός των απωλειών Joule βασίζεται στον γνωστό τύπο από την θεωρία

$$P_{conductor\ loss} = P_{copper\ loss} = R \cdot I^2 \quad (2.1)$$

και κατ' επέκταση

$$P_{conductor\ loss} = \iiint \rho \cdot J^2 = \frac{1}{\sigma} \iiint J^2 \cdot r \, dr d\theta dz \quad (2.2)$$

, για συχνότητες διάφορες του μηδενός, όπου ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού και σ η ειδική αγωγιμότητα.

Από την πεδιακή ανάλυση μιας κυλινδρικής γεωμετρίας γνωρίζουμε ότι η DC ρευματική πυκνότητα ισούται με

$$J_{z,DC} = \frac{I}{\pi r_c^2} \quad (2.3)$$

,ενώ στην περίπτωση AC η ρευματική πυκνότητα εξαρτάται και από την απόσταση r από το κέντρο του αγωγού

$$J_{z,AC}(r) = \frac{\underline{m}I}{2\pi r_c} \frac{J_0(\underline{m}r)}{J_1(\underline{m}r_c)} \quad (2.4)$$

$$\text{,όπου } \underline{m} = \sqrt{-j\omega\mu_0\mu_r\sigma} = (1-j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r\sigma}{2}} = (1-j)\frac{1}{\delta}.$$

Παραπάνω, ο όρος r_c είναι η ακτίνα του κυλινδρικού αγωγού, ο J_0 είναι η συνάρτηση Bessel 1^{ου} είδους μηδενικής τάξης και ο J_1 αντίστοιχα 1^{ης}. Τα μ_0 και μ_r είναι η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα και του χαλκού αντίστοιχα και το δ είναι το βάθος διείσδυσης (δείτε **8.1**).

Επιπλέον, με τον Νόμο του Ampere

$$\oint H dl = \int J dS \quad (2.5)$$

και με την σχέση μεταξύ έντασης ρεύματος I και πυκνότητας ρεύματος J

$$I_c = \int J_{z,AC} dS = J_{z,AC} \cdot \pi r_c^2. \quad (2.6)$$

Έτσι η (2.5) γίνεται

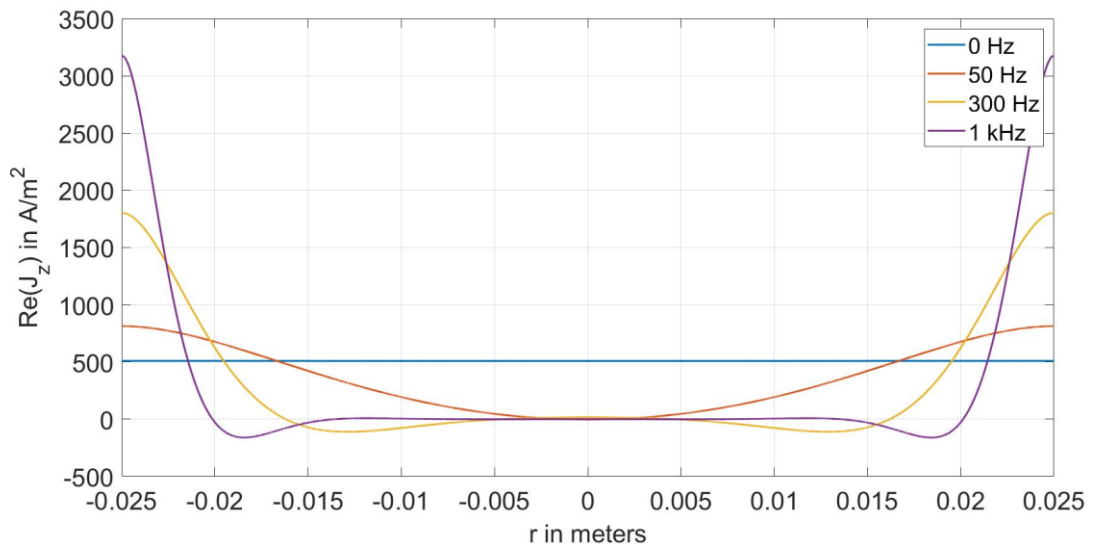
$$H \cdot 2\pi r = J_{z,AC} \cdot \pi r^2 \quad (2.7)$$

και μπορεί να υπολογιστεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και κατά συνέπεια η μαγνητική επαγωγή B από τον τύπο

$$B = \mu_r H \Leftrightarrow B = \frac{\mu_r}{2\pi} J_{z,AC} \cdot \pi r \quad , \text{για } r < r_c \quad (2.8)$$

$$B = \mu_0 H \Leftrightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad , \text{για } r > r_c \quad (2.9)$$

Εφαρμόζοντας τους τύπους(2.3), (2.4) για ένα πλήθος συχνοτήτων έχουμε τα εξής αποτελέσματα:



Εικόνα 6. Η κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος ακτινικά στον αγωγό για συχνότητες 0Hz, 50Hz, 300Hz και 1kHz και ρεύμα 1A.

Από την παραπάνω εικόνα, παρατηρούμε το επιδερμικό φαινόμενο (skineffect) που προκύπτει έχοντας εναλλασσόμενο ρεύμα. Η πυκνότητα ρεύματος J , όσο αυξάνεται η συχνότητα του, τόσο περισσότερο κατανέμενται το πραγματικό μέρος

αυτής κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Στην DC περίπτωση το ρεύμα κατανέμεται ομοιόμορφα στον αγωγό.

Εφαρμόζοντας τους τύπους (2.1), (2.2) έχουμε:

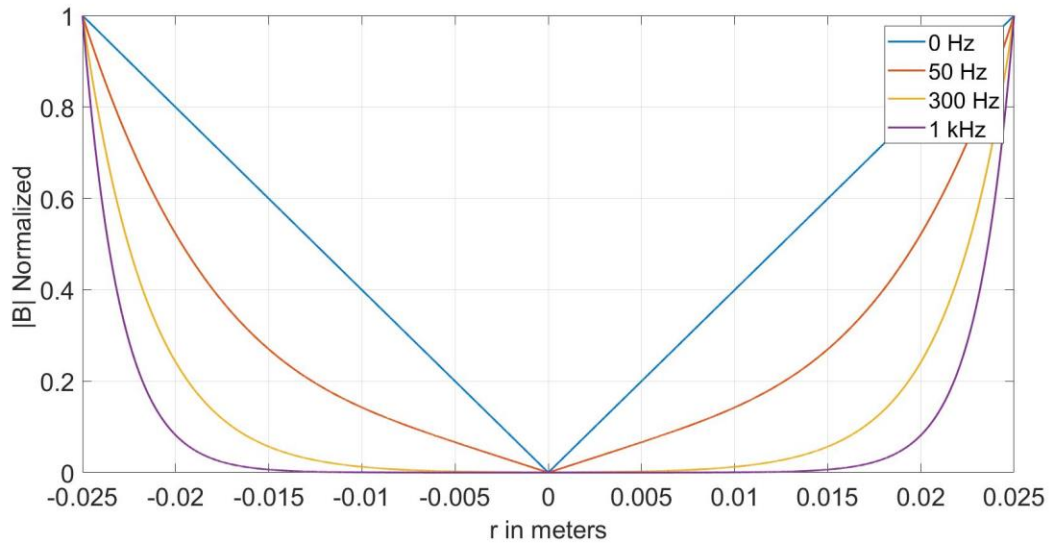
Frequency (Hz)	$P_{\text{conductor}}$ (μW)
0	8.781
50	14.025
300	31.106
1000	54.851

Πίνακας 1. Απώλειες Joule για 0Hz, 50Hz, 300Hz, 1kHz για ρεύμα 1A.

Οι απώλειες αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας. Αυτό όπως εξηγήθηκε στην εισαγωγή έχει να κάνει με την αύξηση της αντίστασης που προκαλείται από την μείωση της χρησιμοποιούμενης επιφάνειας A, όντας αντιστρόφως ανάλογα.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Τέλος, από τους τύπους (2.5), (2.6), (2.7) γίνεται μελέτη της μαγνητικής επαγωγής μέσα στον αγωγό



Εικόνα 7. Κανονικοποιημένη κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στον αγωγό για συχνότητες 0Hz, 50Hz, 300Hz και 1kHz και ρεύμα 1A.

Το μαγνητικό πεδίο όσο αυξάνεται η συχνότητα παύει να αυξάνεται γραμμικά και τείνει να αυξάνεται εκθετικά όσο πλησιάζει στην επιφάνεια του αγωγού. Όπως φάνηκε στην *Εικόνα 6* το ρεύμα κατανέμεται κοντά στην επιφάνεια όσο αυξάνεται η συχνότητα, πράγμα που εξηγεί το αδύναμο πεδίο κοντά στο κέντρο του αγωγού και την απότομη αύξησή του στην επιφάνεια.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Παρόλο που η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) είναι λεπτομερώς αναλυμένη και περιγράφεται εκτενώς στη βιβλιογραφία, για λόγους πληρότητας παρέχεται μια σύντομη εισαγωγή.

3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μία γνωστή αριθμητική μέθοδος για την λύση μερικών διαφορικών εξισώσεων (Partial Differential Equations) που προκύπτουν σε φυσικά και μηχανολογικά προβλήματα σε δισδιάστατους ή τριαδιάστατους χώρους, όπως έχουμε στην δικιά μας περίπτωση. Η λύση των PDEs είναι πολύ πολύπλοκη ακόμα και για απλές γεωμετρίες, γι' αυτό είναι αποδοτικότερη η προσέγγιση της πραγματικής λύσης με απλότερες πολυωνυμικές εξισώσεις.

Με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, η γεωμετρία του προβλήματος διαιρείται σε μικρότερα τμήματα δημιουργώντας ένα πλέγμα (mesh) στο χώρο. Στη συνέχεια, τα επιμέρους προβλήματα επιλύονται για κάθε τμήμα, και οι

λύσεις συνδυάζονται ώστε να προκύψει η συνολική λύση. Σε ένα συνεχές πρόβλημα όπου δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί, απαιτείται η δημιουργία τεχνητών διαχωρισμών σε στοιχεία, τα οποία συνδέονται κατά μήκος των άκρων (ή των πλευρών) τους. Αυτά τα τεχνητά στοιχεία, γνωστά ως πεπερασμένα στοιχεία, συνήθως είναι τετράγωνα ή εξαγωνικά στην περίπτωση τρισδιάστατης γεωμετρίας και τρίγωνα στην περίπτωση δισδιάστατης. Αυτός ο τρόπος διακριτοποίησης μετατρέπει το συνεχές πρόβλημα σε πολλά πιο απλά διακριτά προβλήματα που είναι πιο εύκολο να επιλυθούν.

Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιείται το λογισμικό FEMM (Finite Element Method Magnetics) για την επίλυση δισδιάστατων μαγνητοστατικών προβλημάτων. Το FEMM είναι ένα δωρεάν λογισμικό που μπορεί να αντιμετωπίσει τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες προβλημάτων: μαγνητοστατικά, ηλεκτροστατικά, θερμικά, και προβλήματα μόνιμων ρευμάτων. Αν και μπορεί να επιλύσει μόνο προβλήματα δισδιάστατης γεωμετρίας με την επιλογή του βάθους στη γεωμετρία, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για την τρέχουσα μελέτη, καθώς ο χρόνος επίλυσης είναι πολύ γρήγορος και η γεωμετρία παραμένει αμετάβλητη κατά μήκος του άξονα z. Η κατηγορία που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση είναι το Μαγνητοστατικό Πρόβλημα (Magnetostatic problem). Το FEMM χρησιμοποιεί τριγωνικά στοιχεία για τη διακριτοποίηση της περιοχής του προβλήματος, δημιουργώντας ένα πλέγμα (mesh) στον χώρο. Σε κάθε τρίγωνο γίνεται η επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών διαφορικών εξισώσεων. Αυτό μετατρέπει το πρόβλημα σε ένα πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας με χιλιάδες αγνώστους σε μορφή πινάκων, καθώς η λύση σε κάθε τρίγωνο προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή του διανυσματικού δυναμικού A στις κορυφές του τριγώνου (κόμβους - nodes). Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος Newton-Raphson λόγω της ταχύτητάς και της ικανότητας σύγκλισής της. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το μέτρο του σφάλματος να είναι ελάχιστο και να φτάσει σε μια καθορισμένη τιμή.

Περίληπτικά, η μέθοδος FEM ακολουθεί τα παρακάτω βήματα για να λύσει ένα πρόβλημα:

1. Υποδιαίρεση του υπολογιστικού πεδίου

Μετά την διαδικασία υλοποίησης της γεωμετρίας, την ανάθεση υλικών και των οριακών συνθηκών, το υπολογιστικό πεδίο διαιρείται σε μικρότερα πεδία - το λεγόμενο πλέγμα (mesh) -. Στις χαμηλές συχνότητες για τα δισδιάστατα προβλήματα χρησιμοποιούνται τριγωνικά τμήματα, ενώ σε τρισδιάστατα τετράεδρα κομμάτια.

2. Δημιουργία των βασικών (basic) συναρτήσεων και κατασκευή συστήματος εξισώσεων

Οι συναρτήσεις αυτές προσεγγίζουν πολυωνμικά τις PDEs και ,συγκεκριμένα, ανάλογα με τον βαθμό τους προσδιορίζουν και την ακρίβεια της λύσης. Όσο μεγαλύτερος ο βαθμός τόσο περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας για το κάθε στοιχείο που οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και περισσότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Ακολούθως, οι συναρτήσεις που δημιουργούνται, αποτελούν ένα σύστημα εξισώσεων που μπορεί να επιλυθεί ορίζοντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες.

3. Εφαρμογή των οριακών συνθηκών

Μετά την εφαρμογή των οριακών συνθηκών, το σύστημα των εξισώσεων μπορεί να λυθεί για να υπολογιστεί οι κάθε βασική συνάρτηση. Πιο συγκεκριμένα, η επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος απαιτεί την επίλυση μιας σειράς διαφορικών εξισώσεων. Σύμφωνα με τη θεωρία των μερικών διαφορικών εξισώσεων, για να υπάρξει μοναδική λύση σε ένα τέτοιο πρόβλημα, πρέπει να καθοριστούν οριακές συνθήκες που να περιγράφουν τη συμπεριφορά του προβλήματος στα όρια του χώρου του. Οι οριακές συνθήκες χωρίζονται συνήθως ως εξής:

➤ Συνθήκη Dirichlet

$$A = 0.$$

Σε αυτή την κατηγορία, καθορίζεται η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A κατά μήκος ενός συγκεκριμένου συνόρου της γεωμετρίας. Εάν η τιμή του A είναι μηδέν ($A=0$), τότε πρόκειται για ομογενή συνθήκη Dirichlet, ενώ σε διαφορετική περίπτωση πρόκειται για μη ομογενή συνθήκη Dirichlet. Συνήθως, η συνθήκη $A=0$ εφαρμόζεται στην στα όρια του αέρα που περιβάλλει τον αγωγό.

➤ Συνθήκη Neumann

$$\frac{\partial A}{\partial u} = 0.$$

Σε αυτή την περίπτωση, καθορίζεται η κάθετη παράγωγος του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού κατά μήκος του ορίου. Συνήθως χρησιμοποιείται η

ομογενής συνθήκη Neumann, που σημαίνει ότι η παράγωγος είναι μηδέν ($\partial A/\partial n=0$). Αυτό επιβάλλει στις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το όριο κάθετα.

➤ *Συνθήκη Robin*

$$aA + b \frac{\partial A}{\partial u} = 0$$

Αυτή η συνθήκη αποτελεί συνδυασμό των συνθηκών Dirichlet και Neumann και καθορίζει μια σχέση μεταξύ των τιμών του A και της παραγώγου του. Συνήθως χρησιμοποιείται σε προβλήματα διάδοσης θερμότητας.

- *Περιοδικές συνθήκες:* Η συνθήκη αυτή συνδέει δύο όρια μεταξύ τους καθορίζοντας ότι οι τιμές του πεδίου είναι ίσες στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων. Χρησιμοποιείται συνήθως στα άκρα του προβλήματος όταν επιλύεται ένα ζεύγος πόλων στη μηχανή.
- *Αντιπεριοδικές συνθήκες:* Αυτή η συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά καθορίζει ότι οι τιμές του πεδίου είναι αντίθετες στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων.

Τέλος, τα βασικά σφάλματα που προκύπτουν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEMM είναι :

1. *Σφάλμα μοντελοποίησης*

Η μετατροπή ενός σύνθετου φυσικού προβλήματος σε ένα μαθηματικό μοντέλο είναι πάντοτε απλοποίηση του πραγματικού προβλήματος και αγνοούνται συγκεκριμένες λεπτομέρειες λόγω μοντέλου, ιδιότητες υλικών και άλλες φυσικές επιδράσεις.

2. *Γεωμετρικό σφάλμα*

Το μοντέλο περιγράφει την προσέγγιση μίας πραγματικής γεωμετρίας με πεπερασμένο αριθμό στοιχείων. Το σφάλμα αυτό βελτιώνεται με την αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων (πυκνότερο πλέγμα). Τα περισσότερα λογισμικά έχουν μία αυτοματοποιημένη διαδικασία (FEMM-smartmesh) που μειώνει αυτά τα σφάλματα.

3. Αριθμητικό σφάλμα

Είναι το σύνολο των σφαλμάτων που προκύπτουν από στρογγυλοποιήσεις που γίνονται σε δεκαδικά, σε ολοκληρώματα και σε σφάλματα ευστάθειας πινάκων. Να σημειωθεί ότι για τα περισσότερα σύγχρονα λογισμικά θεωρείται γενικά ότι το σφάλμα αυτό είναι αμελητέο.[4], [15]

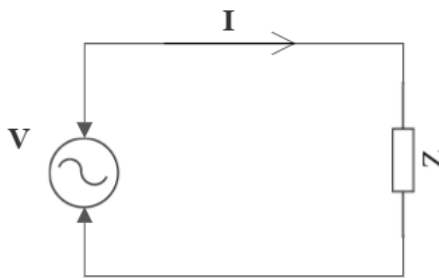
3.2 Μοντελοποίηση χάλκινου κυλινδρικού αγωγού

Για την αριθμητική ανάλυση των απωλειών του αγωγού, μοντελοποιήθηκε ένας χάλκινος κυλινδρικός αγωγός μικρού μήκους (1m) ακτίνας $r = 0.025\text{m}$ στο πρόγραμμα FEMMόπως φαίνεται παρακάτω στην *Εικόνα 9*. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα όρια του αέρα επιλέχθηκαν $r_{\text{air}} = 0.5\text{m}$, καθώς έπειτα από διερεύνηση για διάφορες αποστάσεις, παρατηρήθηκε ότι δεν επηρεάζει τις απώλειες Joule, αλλά αυξάνει την ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου.

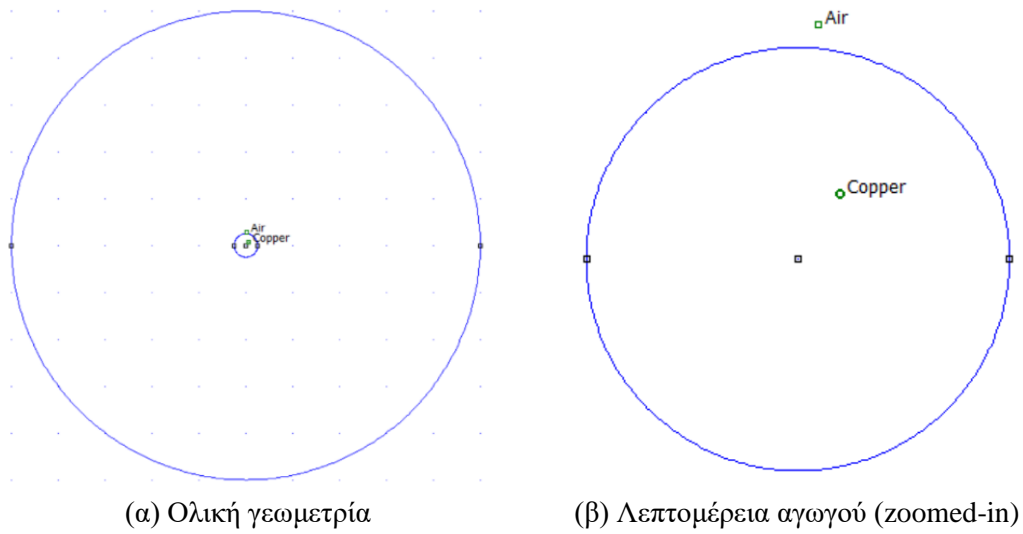
Πιο συγκεκριμένα, από την παρακάτω αναπαράσταση του κυκλώματος που μελετάμε, έχουμε ότι

$$\hat{V} = \hat{Z} \cdot \hat{I} \text{ και } \hat{Z} = R + j\omega L$$

όπου ο όρος R έχει να κάνει με την ενεργό ισχύ P που αντιστοιχεί στις απώλειες Joule, ενώ ο όρος ωL έχει να κάνει με την άεργο ισχύ Q και έχει άμεση σχέση με την ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου, αφού $w = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$. Έτσι, αυξάνοντας την απόσταση του ορίου του αέρα, ουσιαστικά αυξάνουμε την συνολική ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου – περισσότερη επιφάνεια - και της άεργου ισχύος – αυξάνεται η αυτεπαγωγή – και δεν επηρεάζουμε τον υπολογισμό των απωλειών Joule που εξαρτάται μονό από το R όπως είδαμε στην σχέση 2.1.

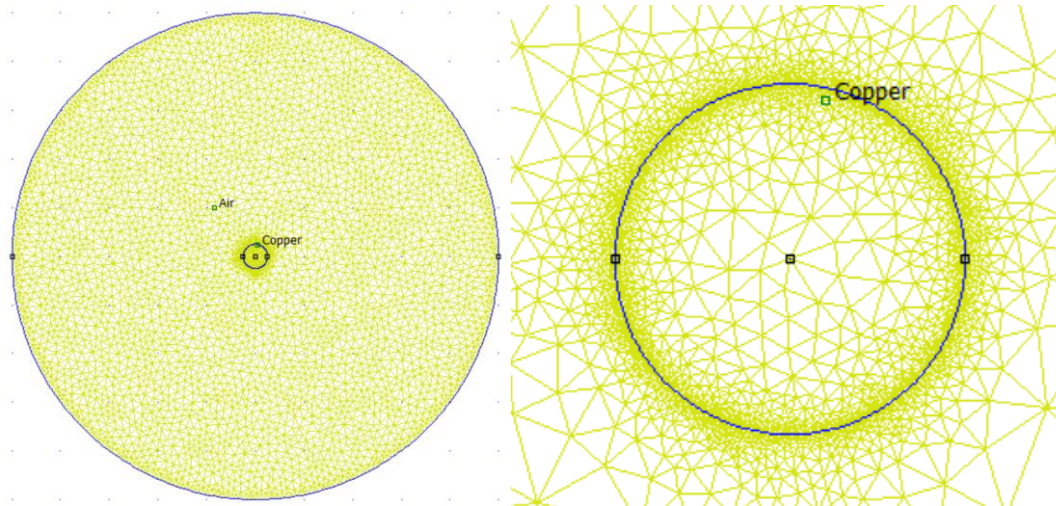


Εικόνα 8. Αναπαράσταση του κυκλώματος.



Εικόνα 9. Αναπαράσταση της γεωμετρίας του κυλινδρικού αγωγού στο FEMM.

Στην συνέχεια επιλέγεται κατάλληλο πλέγμα, με διάσταση ενός τριγώνου του πλέγματος (mesh size) στα 0.001m στον αγωγό και για τον αέρα επιλέχθηκε η αυτόματη επιλογή διάστασης.



Εικόνα 10. Αναπαράσταση του συνολικού πλέγματος 6485 κόμβων.

Στις αναλυτικές εξισώσεις ορίστηκε συνολικό ρεύμα $I = 1A$. Στην αριθμητική μέθοδο, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη τα δινορεύματα. Το πρόγραμμα FEMM δέχεται σαν είσοδο J_{source} και στο post-processing εμφανίζει το συνολικό ρεύμα που διέπει τον

αγωγό $I_{total,max}$. Γι' αυτό το λόγο, πρέπει να εφαρμοστεί ένα κατάλληλο J_{source} , ώστε το J_{total} να αντιστοιχεί σε συνολικό μέτρο του ρεύματος $I_{total,rms} = 1A$, όπου $J_{total} = J_{source} + J_{eddy}$.

Εμφανώς, όπως έχει φάνει και στην αναλυτική λύση, με την αύξηση της συχνότητας αυξάνονται και τα δινορεύματα και επομένως χρειάζεται διαφορετικό J_{source} για κάθε περίπτωση.

Αναλυτικότερα, για να βρεθεί το επιθυμητό J_{source} που πρέπει να εφαρμόσουμε στον αγωγό για την κάθε συχνότητα, πρέπει να ακολουθηθεί η εξής διαδικασία-αλγόριθμος:

1. Εισάγουμε μια πυκνότητα ρεύματος J_{source} της επιλογής μας
2. Ελέγχουμε αν το συνολικό μέτρο του ρεύματος που διέπει τον αγωγό είναι το επιλεγμένο.
3. Αν δεν είναι το επιθυμητό τότε εφαρμόζουμε την παρακάτω μέθοδο και βρίσκουμε το κατάλληλο J_{source} .

Από την εξίσωση (2.6) έχουμε ότι

$$I_{new} = \pi r_c^2 J_{new} \quad (1)$$

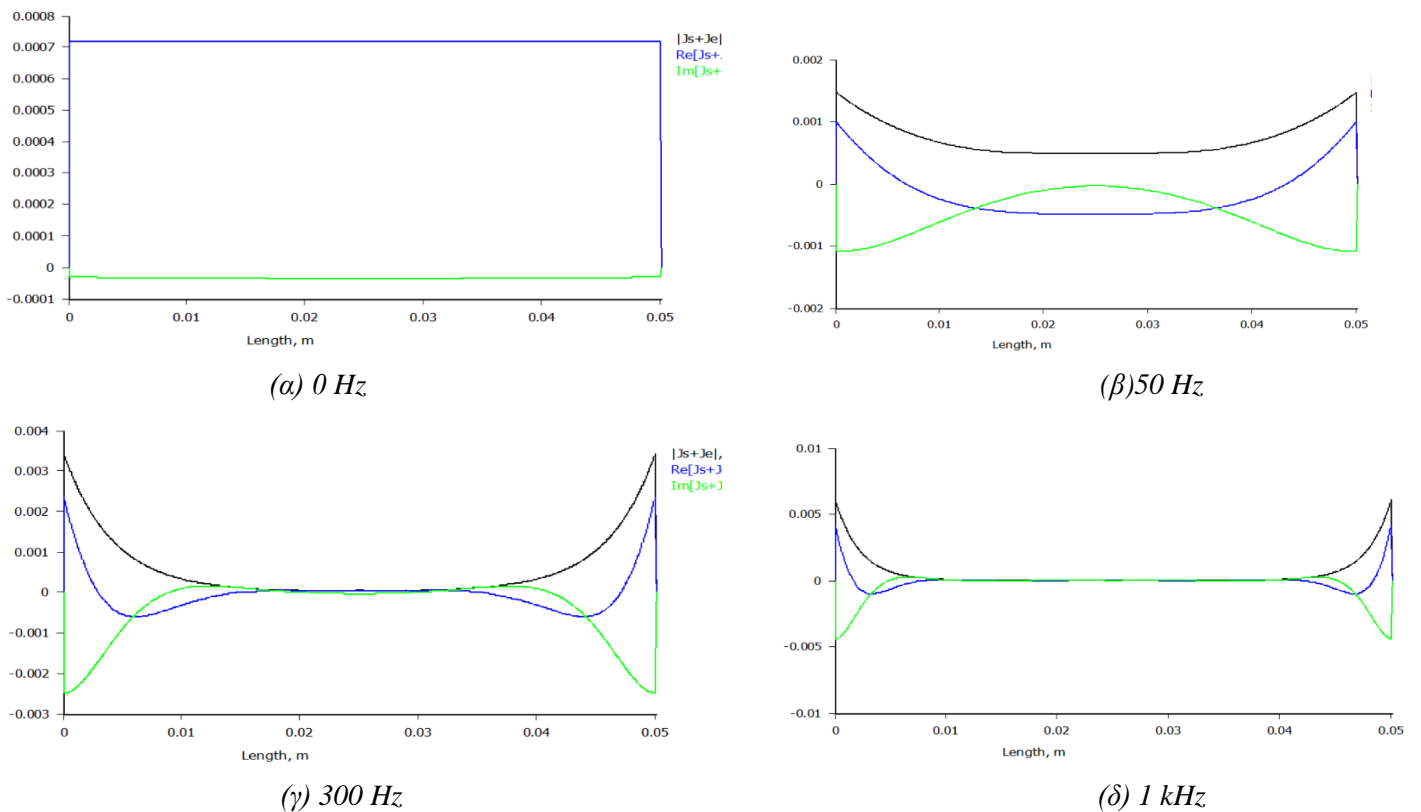
$$I_{old} = \pi r_c^2 J_{old} \quad (2)$$

$$(1), (2) \Rightarrow \frac{I_{new}}{J_{new}} = \frac{I_{old}}{J_{old}} \Leftrightarrow J_{new} = \frac{I_{new}}{I_{old}} \cdot J_{old}$$

όπου J_{old} η πυκνότητα ρεύματος που χρησιμοποιήσαμε ήδη, $I_{new} = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2}$ και I_{old} το ρεύμα που περνάει τον αγωγό όταν παρέχουμε J_{old} στον αγωγό.

3.3 Αποτελέσματα post-processing

3.3.1 Ποκνότητα ρεύματος

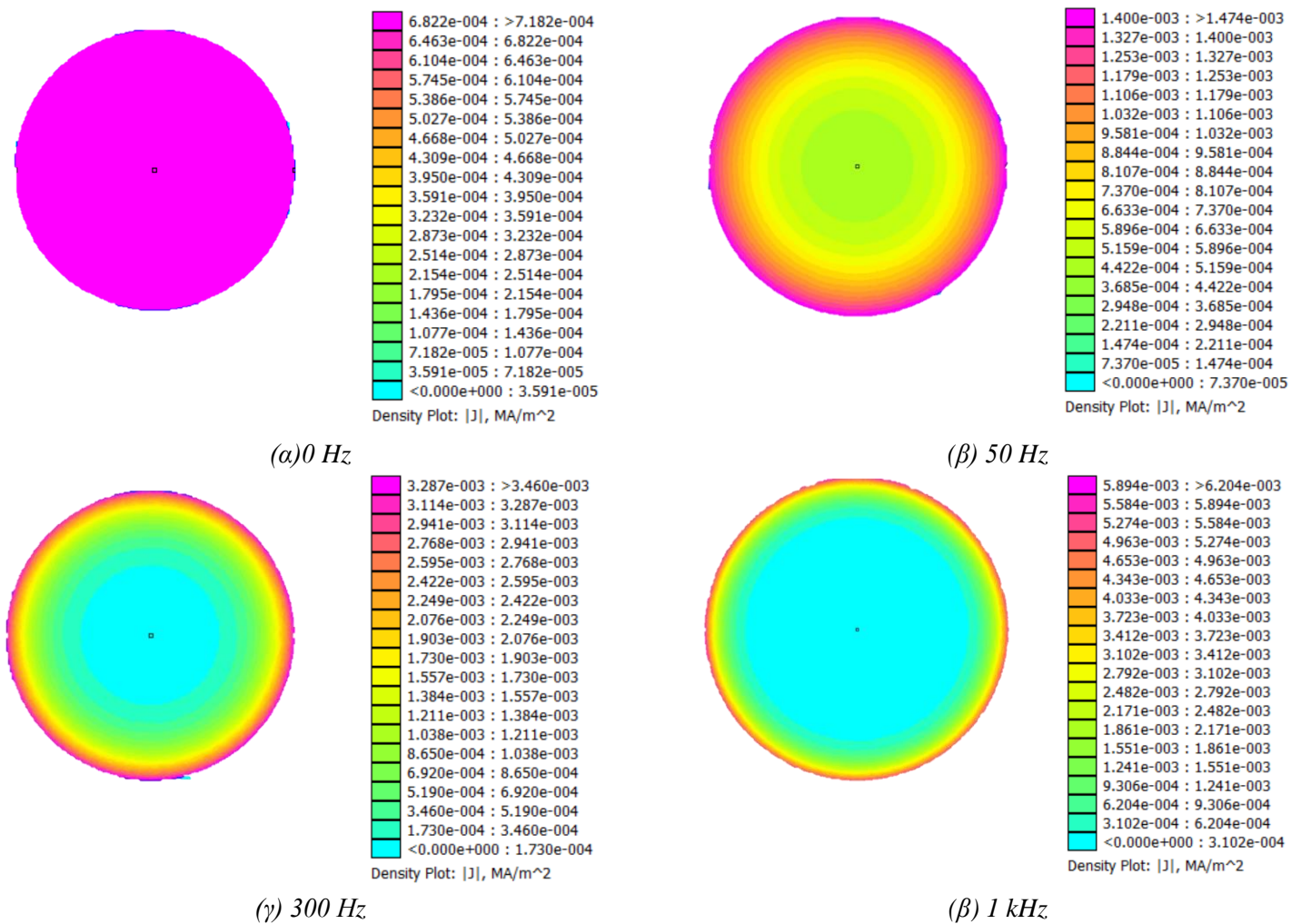


Εικόνα 11. Διαγράμματα κατανομής της πυκνότητας ρεύματος στον αγωγό για συχνότητες 0Hz, 50 Hz, 300 Hz και 1 kHz.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά από την *Εικόνα 6*, παρατηρούμε ότι συμπίπτουν πλήρως σχηματικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαφορά στις τιμές του post-processing με της *Εικόνας 6* έχει να κάνει με το γεγονός ότι το λογισμικό FEMM βγάζει τα αποτελέσματα με την peak τιμή, ενώ με τις αναλυτικές εξισώσεις υπολογίζουμε τις rms τιμές.

$$J_{total,analytical} = \frac{J_{total,numeric}}{\sqrt{2}}$$

Επιπλέον, για να κατανοηθεί καλύτερα το διάγραμμα στην Εικόνα 6, αναπαρίσταται η κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος στον αγωγό.

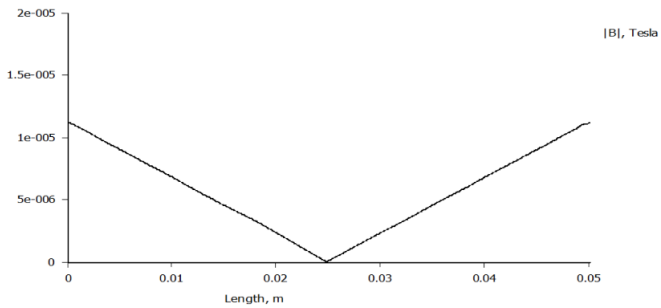


Εικόνα 12. Διαγράμματα αναπαράστασης της κατανομής της πυκνότητας ρεύματος στον αγωγό για 0 Hz, 50 Hz, 300 Hz και 1 kHz.

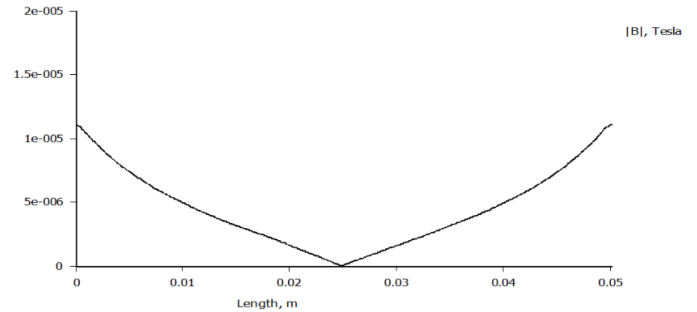
Παρατηρείται ότι με την αύξηση της συχνότητας η ενεργός επιφάνεια (effective cross-sectional area) μειώνεται σημαντικά από την επίδραση του επιδερμικού φαινομένου. Σε συχνότητα 1kHz το ρεύμα κατανέμεται σχεδόν εξολοκλήρου στην επιφάνεια του αγωγού.

3.3.2 Μαγνητικό πεδίο

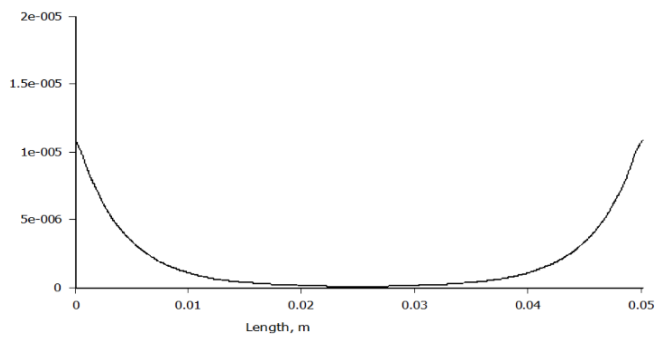
Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής μέσα στον αγωγό.



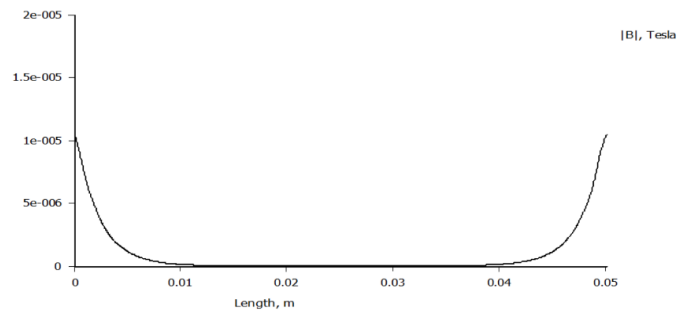
(α) 0 Hz



(β) 50 Hz



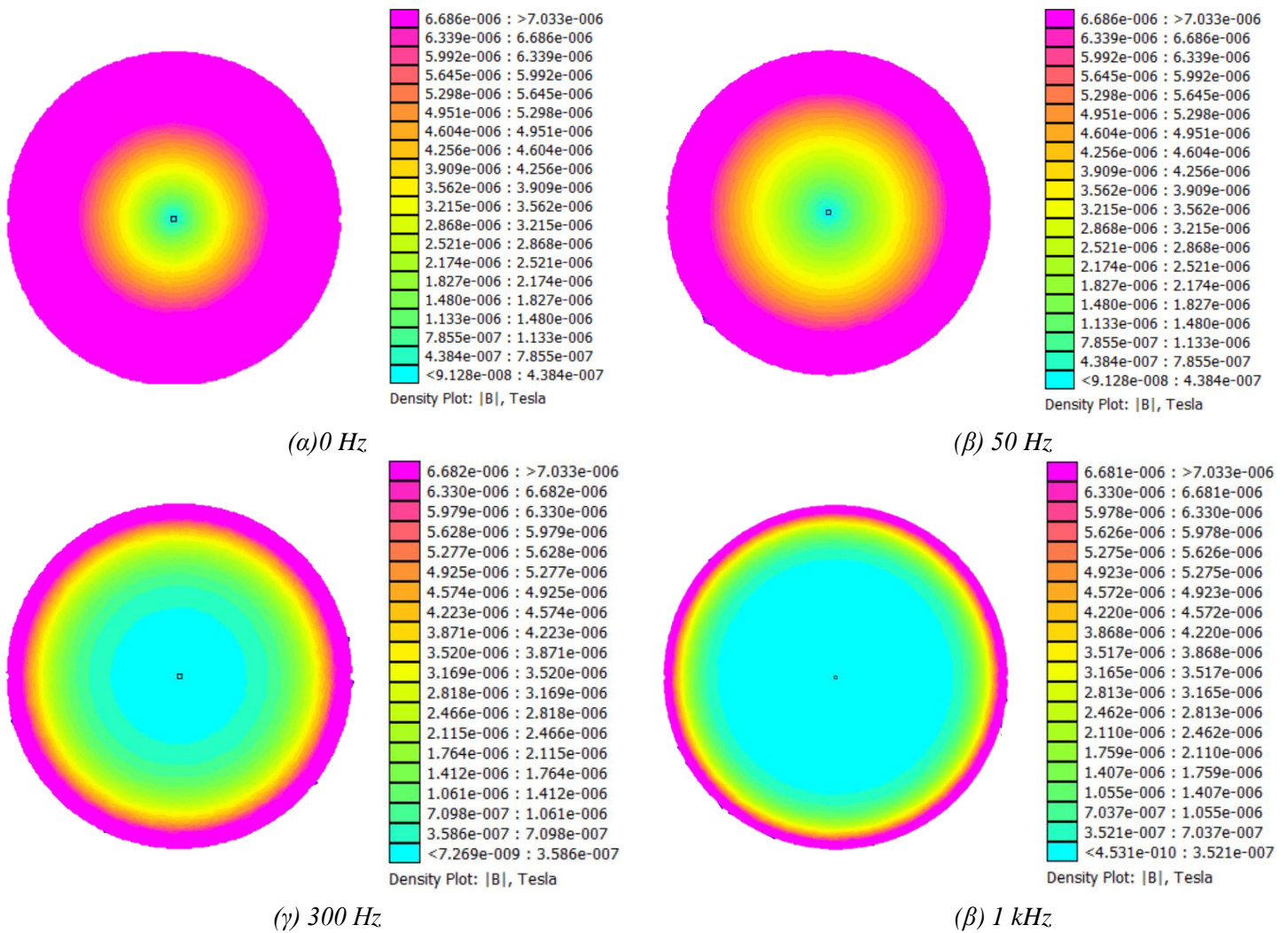
(γ) 300 Hz



(δ) 1 kHz

Εικόνα 13. Διαγράμματα του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής $|B|$ μέσα στον αγωγό.

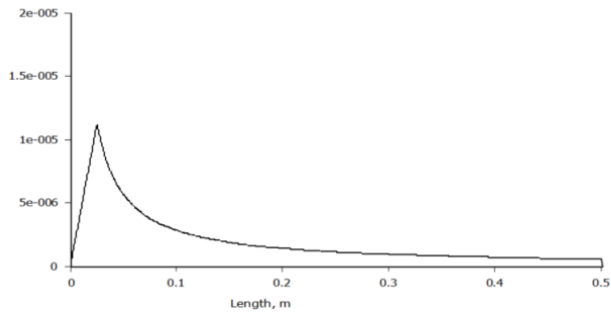
Στη συνέχεια απεικονίζεται η αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου στη διατομή του αγωγού αγωγού.



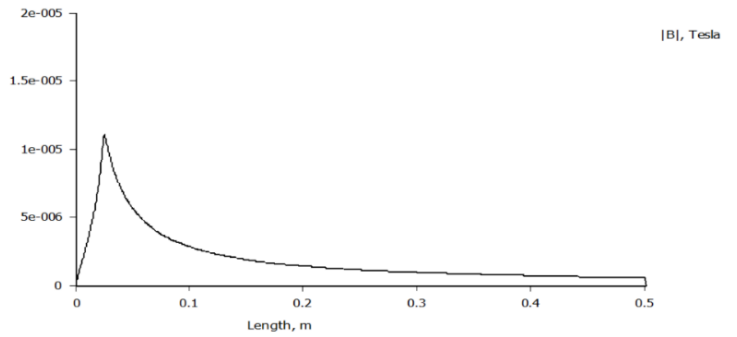
Εικόνα 14. Αναπαράσταση της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής μέσα στον αγωγό.

Το πεδίο συμπεριφέρεται όπως αποδείχθηκε και στην αναλυτική λύση της Εικόνας 7.

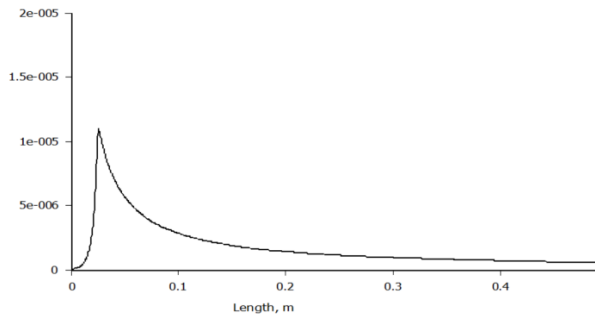
Σημασία έχει και η συμπεριφορά του πεδίου εκτός του αγωγού. Γι' αυτό παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν την σταδιακή εξασθένιση του πεδίου όσο απομακρυνόμαστε από τον αγωγό.



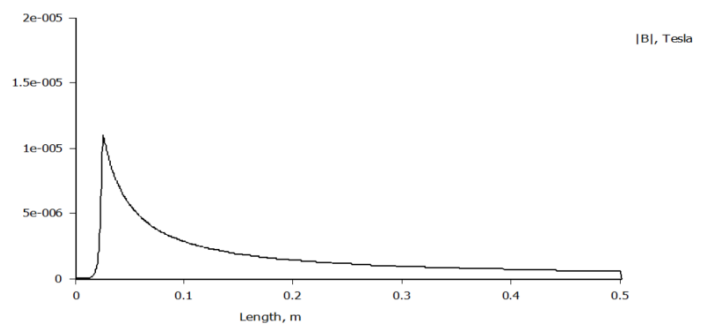
(α) 0 Hz



(β) 50 Hz



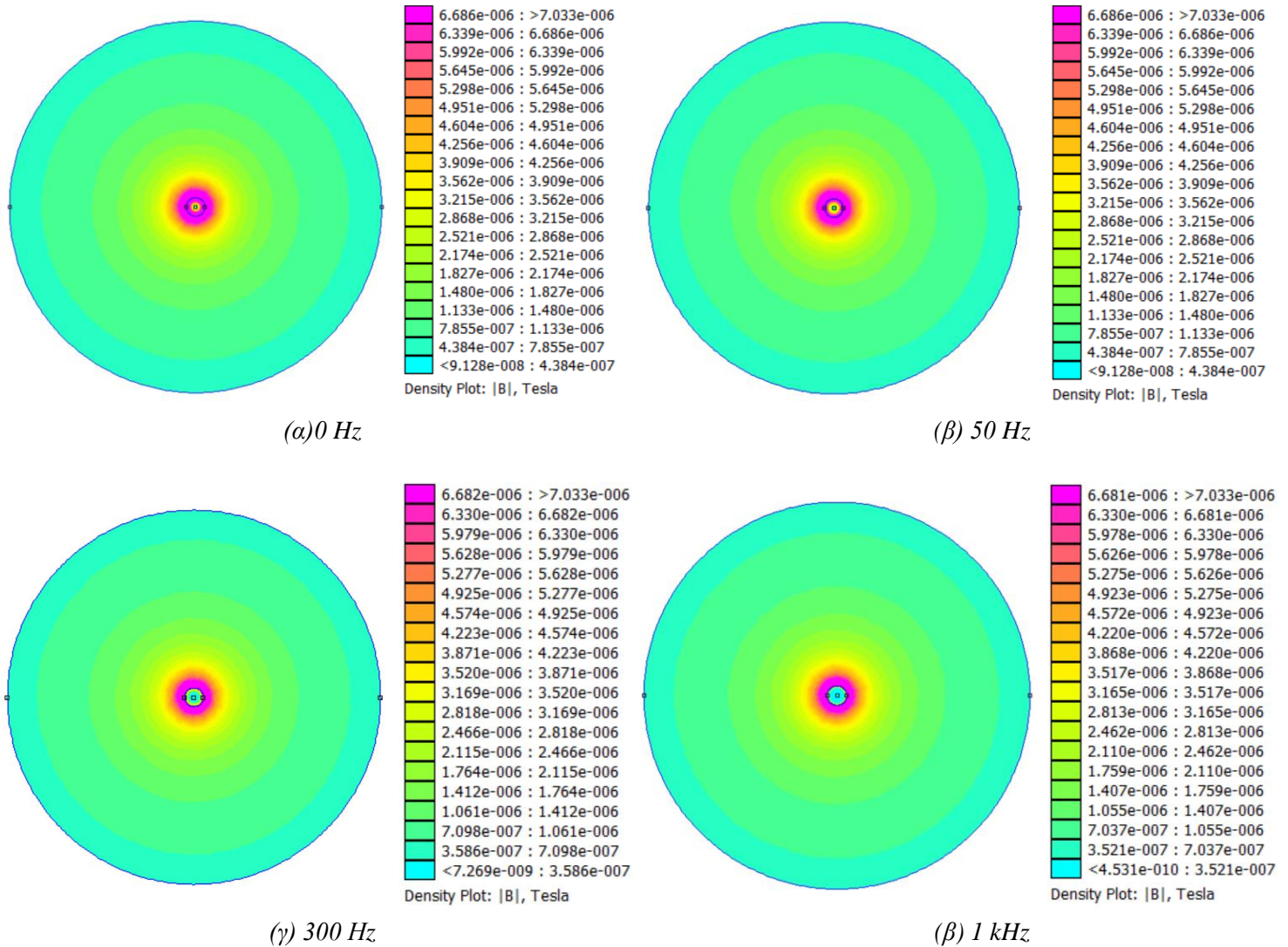
(γ) 300 Hz



(δ) 1 kHz

Εικόνα 15. Διαγράμματα κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής εκτός του αγωγού.

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται η αναπαράσταση της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής εκτός του αγωγού.



Εικόνα 16. Εικονική αναπαράσταση της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής εκτός του αγωγού.

Παρατηρούμε ότι μετά τα 0.025m, που είναι το πεδίο μέσα στον αγωγό, το πεδίο εξασθενεί με τον ίδιο ρυθμό. Αυτό εξηγείται εύκολα με τον νόμο του Ampere

$$\oint B \, dl = \mu_0 \cdot I_c \Rightarrow B \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot I \Rightarrow$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r}, r > r_c$$

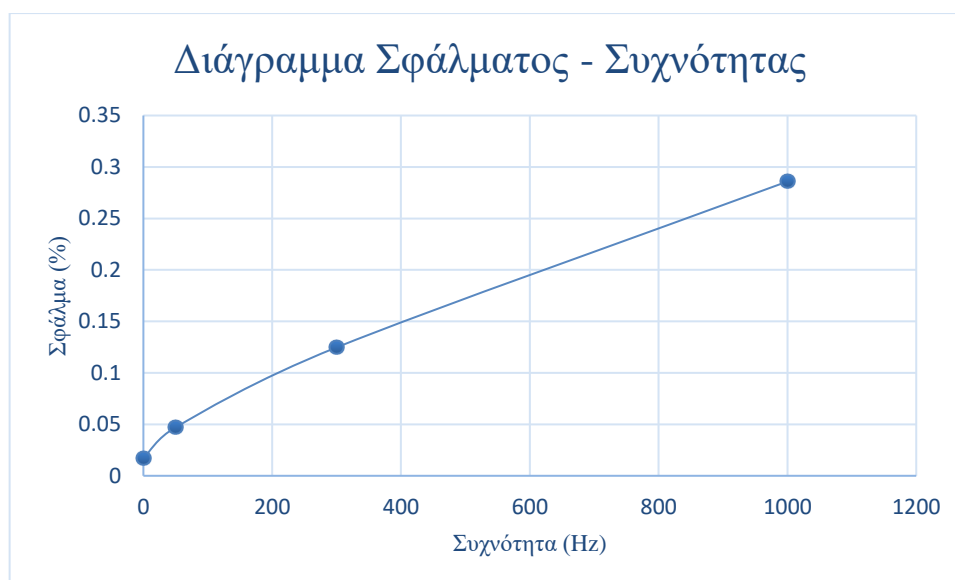
Έτσι, το πεδίο εκτός αγωγού θα συμπεριφέρεται ίδια ανεξαρτήτως συχνότητας.

3.3.3 Απώλειες Joule

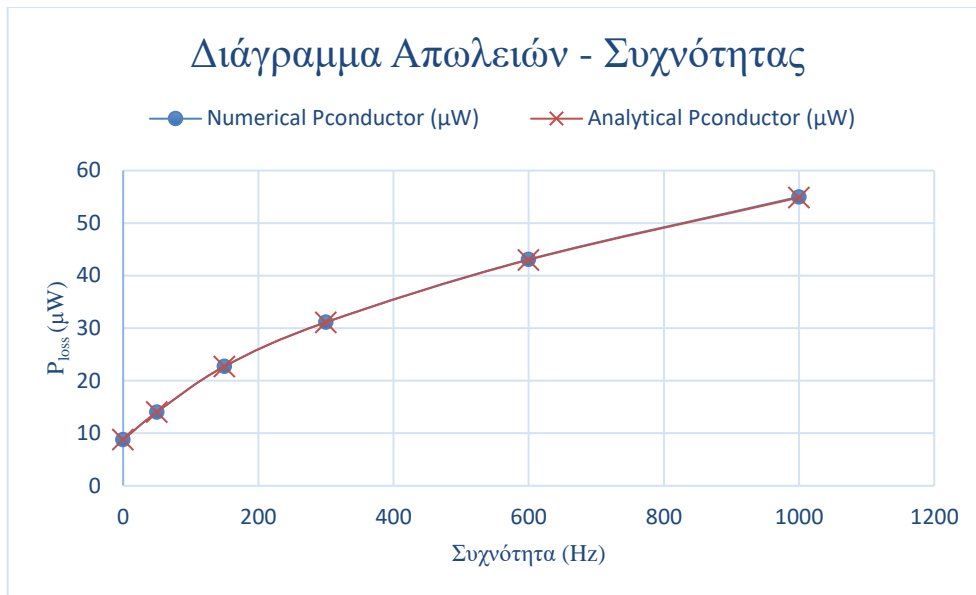
Παρακάτω παρατήθενται οι απώλειες Joule που υπολογίστηκαν μέσω της αριθμητικής λύσης και το υπολογιστικό σφάλμα που υπάρχει μεταξύ της αναλυτικής και αριθμητικής λύσης.

Frequency (Hz)	Analytical $P_{\text{conductor}} (\mu\text{W})$	Numerical $P_{\text{conductor}} (\mu\text{W})$	Σφάλμα(%)
0	8.781	8.7805	0.005694112
50	14.025	14.0184	0.047058824
300	31.106	31.1448	0.124734778
1000	54.851	55.0079	0.286047656

Πίνακας 2. Απώλειες Joule με αναλυτική και αριθμητική λύση.



Εικόνα 17. Διάγραμμα σφάλματος αναλυτικής και αριθμητικής λύσης με την συχνότητα.

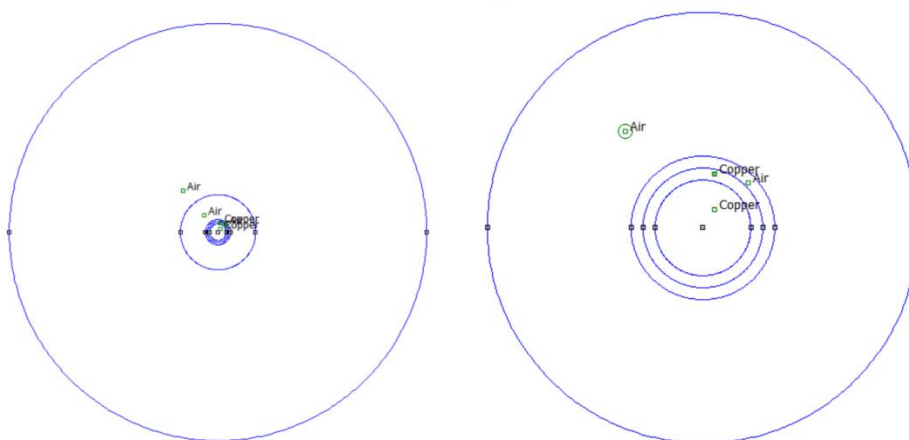


Εικόνα 18. Σύγκριση απωλειών αναλυτικής και αριθμητικής λύσης.

Παρατηρούμε ότι το σφάλμα για κάθε συχνότητα είναι μικρότερο του 1% και συγκεκριμένα στα 50 Hzeίναι μικρότερη του 0.1% που καθιστά την αριθμητική λύση αποδεκτή. Όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο αυξάνεται το σφάλμα, καθώς για τα διδιάστατα προβλήματα η χρήση του τριγωνικού τμήματος για την υλοποίηση του πλέγματος είναι ιδανική για χαμηλές συχνότητες. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την αριθμητική μέθοδο βασίζονται σε πολυώνυμα χαμηλού βαθμού, που σημαίνει ότι σε υψηλές συχνότητες μπορεί να παρουσιαστούν ταλαντώσεις, τις οποίες το πολυώνυμο δεν μπορεί να αποτυπώσει.

3.4 Μελέτη διαφορετικού πλέγματος

Γίνεται διερεύνηση ενός διαφορετικού πλέγματος επιλέγοντας την παρακάτω γεωμετρία.



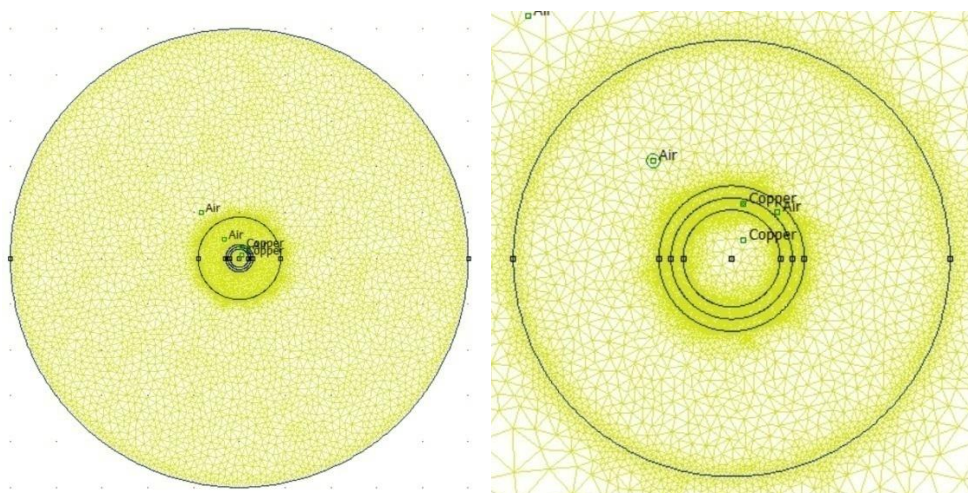
(α) Ολική γεωμετρία

(β) Λεπτομέρεια γεωμετρίας (zoomed-in)

Εικόνα 19. Αναπαράσταση της γεωμετρίας του κυλινδρικού αγωγού.

Η συγκεκριμένη γεωμετρία-διαχωρισμός επιλέγεται για να μπορεί να προσαρμοστεί η πυκνότητα του πλέγματος κοντά στην ακτίνα του κυλινδρικού αγωγού για να επιτευχθεί - θεωρητικά - καλύτερη ακρίβεια στο post-processing. Ειδικότερα, στην περίπτωση μας έχει επιλεγεί ένα πλέγμα, όπως της απλής γεωμετρίας, κοντά στο κέντρο του αγωγού, ένα πυκνό κοντά στην επιφάνειά του και τέλος, ένα πλέγμα που σταδιακά αραιώνει εκτός του αγωγού.

Στη συνέχεια απεικονίζεται το νέο πλέγμα που δημιουργήθηκε.



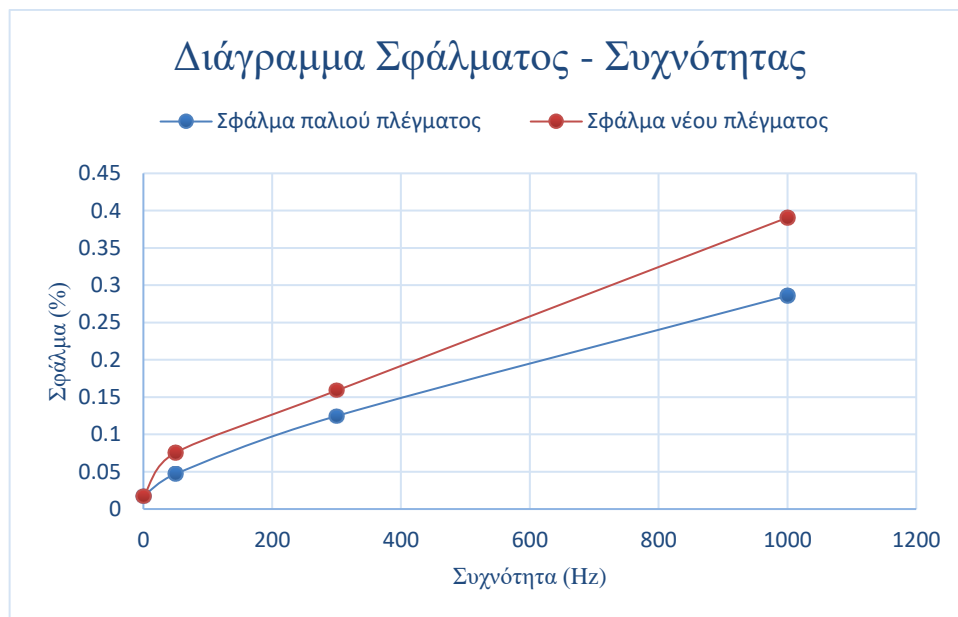
(α) Ολική γεωμετρία

(β) Λεπτεμέρεια γεωμετρίας (zoomed-in)

Εικόνα 20. Αναπαράσταση του συνολικού πλέγματος 13603 κόμβων.

Frequency (Hz)	Newmesh $P_{\text{conductor}}$ (μW)	Old mesh $P_{\text{conductor}}$ (μW)	Σφάλμα Νέου πλέγματος – αναλυτικής λύσης (%)
0	8.78052	8.78052	0.016968455
50	14.0144	14.0184	0.075579323
300	31.1553	31.1448	0.158811805
1000	55.0654	55.0079	0.390694791

Πίνακας 3. Απώλειες Joule με αναλυτική και αριθμητική λύση



Εικόνα 21. Σύγκριση σφάλματος μεταξύ των 2 πλεγμάτων.

Και τα δύο πλέγματα είναι κατάλληλα για την μελέτη μας, αφού το σφάλμα στις χαμηλές συχνότητες είναι κάτω από 0.1%. Ωστόσο, παρατηρούμε καλύτερη ακρίβεια με την γεωμετρία του απλού πλέγματος, παρά τους αισθητά λιγότερους κόμβους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι απώλειες Joule έχουν να κάνουν με το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης που παρουσιάζει ο αγωγός.

Πιο συγκεκριμένα, αυξάνοντας του κόμβους του πλέγματος εκτός του αγωγού στο νέο πλέγμα, ουσιαστικά βελτιώνουμε ακρίβεια στον υπολογισμό της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου και της αέργου ισχύος και δεν επηρεάζουμε τόσο την ακρίβεια υπολογισμού των απωλειών Joule.

4. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ 33kV, 540A (CIGRE, CASE STUDY 4[1])

4.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή θα γίνει σύγκριση της ακρίβειας στον υπολογισμό των απωλειών του μοντέλου που αναπτύχθηκε, με τις αναλυτικές μεθόδους που καλύπτονται στο τεχνικό εγχειρίδιο της Cigre [1]

4.2 Φαινόμενο γειτνίασης (proximity effect)

Προτού, συνεχιστεί η μελέτη θα γίνει μια επιφανειακή επεξήγηση του φαινομένου γειτνίασης που θα παρατηρηθεί παρακάτω. Το φαινόμενο γειτνίασης είναι μια μη-ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος στον αγωγό με χρονομεταβλητό ρεύμα, που προκαλείται από το χρονομεταβλητό ρεύμα σε έναν κοντινό αγωγό. Σε αυτήν την περίπτωση, το επαγόμενο ρεύμα παράγεται από το χρονομεταβλητό μαγνητικό πεδίο του γειτονικού αγωγού.[16] Η βασική αιτία του φαινομένου γειτνίασης είναι παρόμοια με του skin effect, επειδή και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν δινορεύματα που προκαλούνται στο σώμα του αγωγού που μεταφέρει το ρεύμα. Αυτά τα ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες ισχύος στον αγωγό και είναι ισοδύναμα με την αύξηση της αντίστασης (και, ως εκ τούτου, η AC αντίσταση είναι μεγαλύτερη από τη DC αντίσταση). Ωστόσο, στην περίπτωση του φαινομένου γειτνίασης, τα δινορεύματα προκαλούνται επειδή το μαγνητικό πεδίο από τον κοντινό αγωγό διεισδύει στο σώμα του αγωγού κατακόρυφα προς τον άξονα του αγωγού. Αυτό προκαλεί δινορεύματα που αναιρούνται κοντά επίπεδο συμμετρίας, αλλά στις επιφάνειες ρέουν στον ίδιο άξονα με το κύριο ρεύμα, αλλά με αντίθετες κατευθύνσεις στις δύο άκρες του αγωγού.

Στην άκρη όπου η κατεύθυνση των δινορευμάτων είναι η ίδια με το κύριο ρεύμα, αυτά προστίθενται, προκαλώντας αυξημένη τοπική πυκνότητα ρεύματος. Στην άλλη άκρη, η κατεύθυνση των δινορευμάτων είναι αντίθετη με το κύριο ρεύμα, οπότε αφαιρούνται, προκαλώντας χαμηλότερη τοπική πυκνότητα ρεύματος.

Η τοπική απώλεια ισχύος είναι ανάλογη του τετραγωνικού της πυκνότητας ρεύματος, επομένως η υψηλότερη τοπική πυκνότητα ρεύματος προκαλεί αναλογικά υψηλότερες απώλειες, παρόλο που το καθαρό ρεύμα μέσα από τον αγωγό παραμένει το ίδιο.[17]

4.3 Διαδικασία μοντελοποίησης

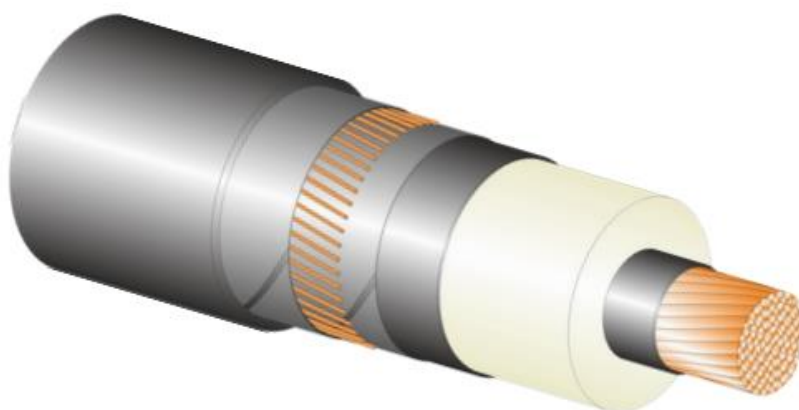
Συνοπτικά, η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι οι εξής:

- Εύρεση των απωλειών μέσω των αναλυτικών λύσεων μέσω του εγχειριδίου σε σχέση με την θερμοκρασία λειτουργίας.

- Μοντελοποίηση της μίας φάσης για να συγκριθεί η αναλυτική λύση με την αριθμητική χωρίς να ληφθεί υπ' όψη το φαινόμενο γειτνίασης.
- Μοντελοποίηση και την τριών φάσεων για να συνοπολογιστεί και το φαινόμενο γειτνίασης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο διαχειριστής του δικτύου ενδιαφέρεται για της απώλειες του καλωδίου όταν αυτό είναι στις μέγιστες συνθήκες φόρτισης. Η επιτρεπτή θερμοκρασία κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι συνήθως στους 90°C. Γι' αυτό το συγκεκριμένο case study 4 της Cigre γίνεται για θερμοκρασία 90 °C. Ωστόσο, στην παρακάτω μελέτη όπως αναφέρθηκε παραπάνω θα γίνει για ένα εύρος θερμοκρασιών για να μελετηθεί και το σφάλμα σε άλλες θερμοκρασίες. Επιπροσθέτως, η μελέτη αυτή θα συνοπολογίσει το φαινόμενο γειτνίασης που μελετάται στο εγχειρίδιο παρόλο που δεν είναι μέρος της αναλυτικής έρευνας που έγιναν στα προηγούμενα κεφάλαια και θα πραγματοποιηθεί μία επιφανειακή ανάλυση για λόγους πληρότητας του casestudy.

Το καλώδιο με το οποίο θα συγκρίνουμε τους υπολογισμούς του μοντέλου μας είναι το Casestudy 4. Είναι ένα υπόγειο καλώδιο 33kV και έχει τα παρακάτω στοιχεία:

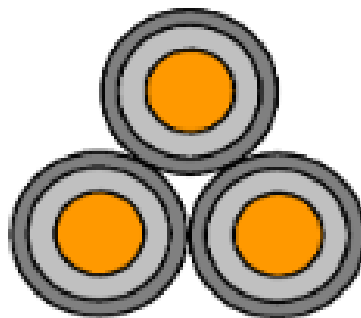


Εικόνα 22. Σχεδιασμός καλωδίου ισχύος Case study 4

Παράμετρος	Τιμές
Ακτίνααγωγού r_c (mm)	9.2
Ακτίνακαλωδίου r (mm)	22.0
Αντιστάση αγωγού @20°C $R_0(\Omega/m)$	0.0754×10^{-3}
f (Hz)	50
I_{rms} (A)	537.4631099368
Skin effect factor k_s	1
Proximity effect factor k_p	1
Συντελεστής θερμοκρασίας α στους 20 °C ανά Kelvin	3.93×10^{-3}

Πίνακας 4. Παράμετροι αγωγού.

Οι τρεις φάσεις διαταχθηκαν σε μορφή τριφυλίου (trefoil) και απεικονίζονται παρακάτω:



Εικόνα 23. Διάταξη τριφυλίου (trefoil) για της τρεις φάσεις

4.4 Υπολογισμός απωλειών με βάση το τεχνικό εγχειρίδιο της Cigre.

Η κατασκευή ενός αγωγού επηρεάζει σημαντικά την AC αντίστασή του. Αυτή η αντίσταση περιλαμβάνει τη DC αντίσταση στην θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς και την επίδραση της αυτεπαγωγής ενός αγωγού και, ειδικότερα, τη σχετική αντίδραση

της κάθεκλώνου μέσα στον αγωγό (επιδερμικό φαινόμενο - skin effect), και την αμοιβαία αλληλεπαγωγή μεταξύ των γειτονικών φάσεων του καλωδίου (φαινόμενο γειτνίασης - proximity effect). Και τα δύο αυτά φαινόμενα επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται το AC ρεύμα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν απώλειες ενέργειας στον αγωγό. Ουπολογισμός των συγκεκριμένων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των νημάτων εντός ενός αγωγού είναι εξαιρετικά πολύπλοκος και απαιτεί γνώση της κατασκευής του αγωγού, πληροφορίες που συνήθως δεν είναι διαθέσιμες.

Γι' αυτό τον λόγο, στον υπολογισμό της αντίστασης του αγωγού, το εγχειρίδιο χρησιμοποιεί δύο συντελεστές (y_s , y_p) που σχετίζονται με τον τρόπο κατασκευής του αγωγού και συνυπολογίζουν το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο γειτνίασης.

Αρχικά, χρειάζεται να υπολογιστεί η DC αντίσταση R' στην θερμοκρασία λειτουργίας μέσω της εξίσωσης

$$R' = R_o [1 + a_{20}(\theta - 20)] \quad (\Omega/m) \quad (5.1)$$

Επιλέχθηκε εύρος από τους 20 °C μέχρι τους 90°C με βήμα 10.

Θερμοκρασία (°C)	R' (Ω/m)
20	7.54 x 10 ⁻⁵
30	7.84 x 10 ⁻⁵
40	8.13 x 10 ⁻⁵
50	8.43 x 10 ⁻⁵
60	8.73 x 10 ⁻⁵
70	9.02 x 10 ⁻⁵
80	9.32 x 10 ⁻⁵
90	9.61 x 10 ⁻⁵

Πίνακας 5. Αντίσταση R' για το επιλεγμένο εύρος θερμοκρασιών.

Έπειτα, υπολογίζονται οι συντελεστές επιδερμικού φαινομένου y_s και φαινομένου γειτνίασης y_p και η AC αντίσταση R για κάθε θερμοκρασία μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s \quad (5.2)$$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (5.3)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p \quad (5.4)$$

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \quad (5.5)$$

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (5.6)$$

Θερμοκρασία (°C)	y_s	y_p	R (Ω/m)
20	1.43×10^{-2}	1.05×10^{-2}	7.72713×10^{-5}
30	1.33×10^{-2}	9.78×10^{-3}	8.01681×10^{-5}
40	1.23×10^{-2}	9.12×10^{-3}	8.30693×10^{-5}
50	1.15×10^{-2}	8.52×10^{-3}	8.59745×10^{-5}
60	1.07×10^{-2}	7.98×10^{-3}	8.88833×10^{-5}
70	1.00×10^{-2}	7.48×10^{-3}	9.17955×10^{-5}
80	9.40×10^{-3}	7.03×10^{-3}	9.47107×10^{-5}
90	8.84×10^{-3}	6.62×10^{-3}	9.76287×10^{-5}

Πίνακας 6. Skin effect factor y_s , proximity effect factor y_p και AC αντίστασης

R σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Τέλος, ο υπολογισμός των απωλειών γίνεται από την εξίσωση (2.1) $P = R \cdot I^2$ που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.

Θερμοκρασία (°C)	Ploss total (Watt)
20	22.32109825
30	23.1578706
40	23.99594759
50	24.83516815
60	25.67543763
70	26.51666631
80	27.35875483
90	28.20160819

Πίνακας 7. Απώλειες πραγματικής ισχύος για το επιλεγμένο εύρος θερμοκρασιών.

4.5 Μοντελοποίηση της μίας φάσης.

Για την μοντελοποίηση της μίας φάσης αρκεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία στο κεφάλαιο 3. Να σημειωθεί ότι στην μελέτη αυτή η μέθοδος επιλογής του J_{source} παραμένει ίδια, απλώς το ρεύμα που επιδιώκουμε να έχουμε είναι αυτό στον πίνακα 4.

Για λόγους ευκολίας δεν θα θεωρηθεί ο αγωγός τύπου πολύκλωνου αλλά ως ένας εννιαίος συμπαγής κυλινδρικός αγωγός. Όπως έχει αναφερθεί στην βιβλιογραφία [15] η διαφορά είναι ελάχιστη στην DC αντίσταση μεταξύ των 2 περιπτώσεων. Στο τεχνικό εγχειρίδιο αναφέρεται ότι η σχέση:

$$R_{DC} = \frac{\rho_{strand} \cdot F_{lay\ length}}{A_{strand}} (\Omega/m) \quad (5.7)$$

όπου ρ_{strand} είναι η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία και A_{strand} το εμβαδο τ. Ο συντελεστής $F_{lay\ length}$ ορίζεται από τη σχέση:

$$F_{lay\ length} = \sqrt{1 + \frac{\pi \cdot Lay_diameter}{Length_of_lay}} \quad (5.8)$$

όπου Length_of_lay είναι το μήκος που χρειάζεται για να ολοκληρώσει μια πλήρη ελικοειδή περιστροφή ένας κλώνος και Lay_diameter είναι 1.29 φορές η διάμετρος του αγωγού.[1]

Όμως, εξαιτίας της παραδοχής που έγινε, το μήκος του αγωγού L υπολογίζεται από τη σχέση:

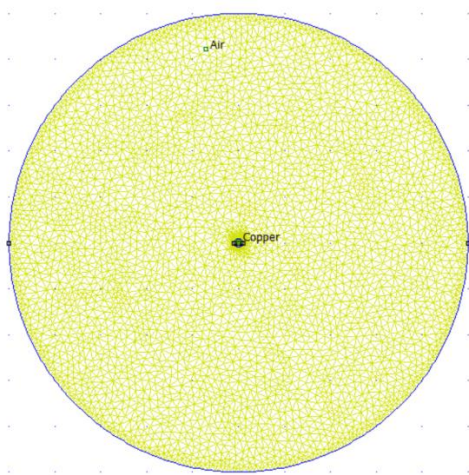
$$L = \sigma A R_o \quad (5.9)$$

όπου σ είναι η αγωγιμότητα του χαλκού στους 20°C , A το εμβαδόν του αγωγού και R_o η DC αντίσταση στους 20°C .

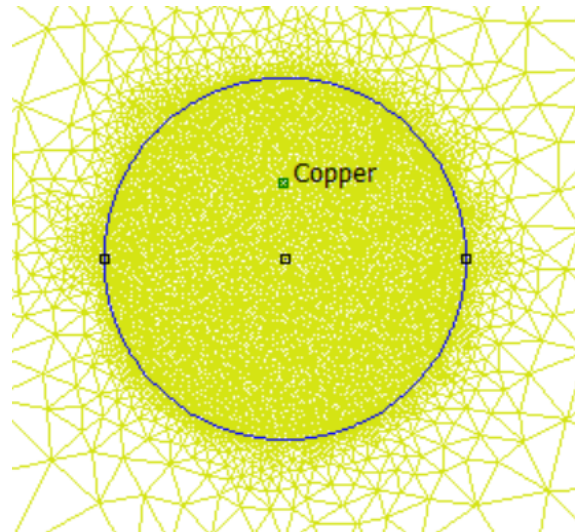
Για να γίνει μελέτη και στις υπόλοιπες θερμοκρασίες χρειάζεται η DC αντίσταση R' . Μέσω αυτής, μπορεί να βρεθεί η αγωγιμότητα σ που απαιτεί το λογισμικό για να χαρακτηριστεί ένα υλικό για τις άλλες θερμοκρασίες της μελέτης. Αρκεί να εφαρμοστεί ο τύπος (5.9) λυμένος ως προς σ

$$\sigma = \frac{L}{A \cdot R'}$$

Παρακάτω παρουσιάζονται το επιλεγμένο πλέγμα και η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος στον αγωγό.

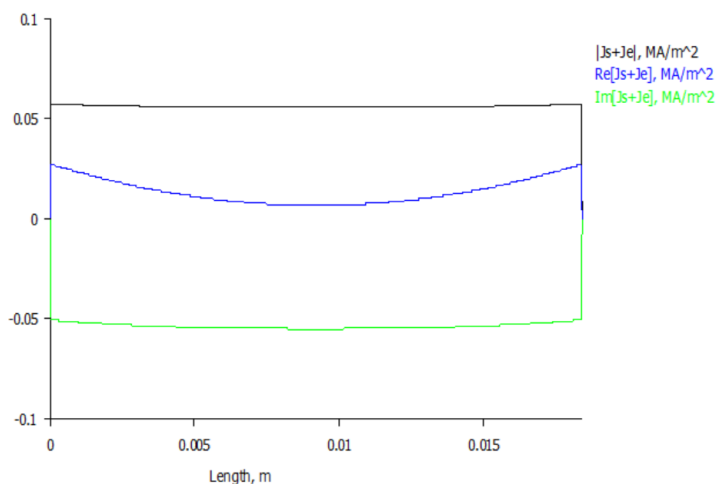
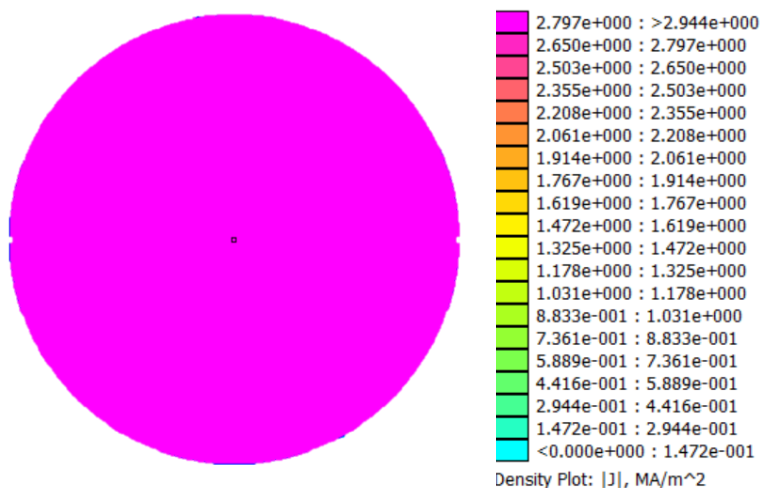


(α) Ολική γεωμετρία



(β) Λεπτομέρεια γεωμετρίας (zoomed-in)

Εικόνα 24. Αναπαράσταση πλέγματος 12783 κόμβων.



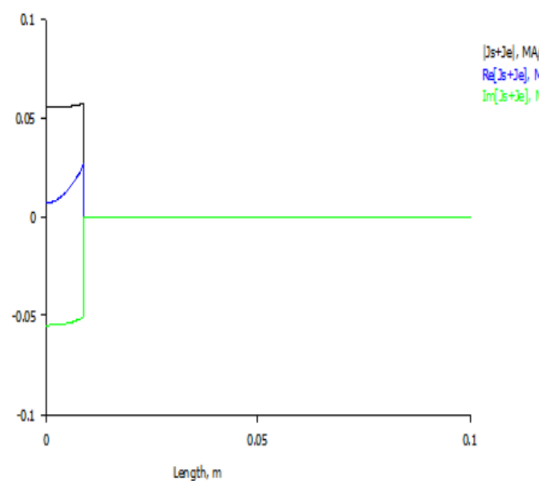
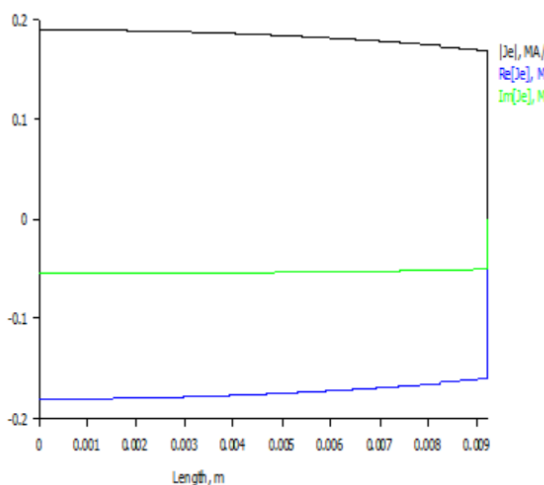
(α) Εικονική αναπαράσταση της κατανομής της πυκνότητας ρεύματος μέσα στον αγωγό στους 90 °C

(β) Διαγράμματα κατανομής της πυκνότητας ρεύματος στον αγωγό στους 90 °C

Εικόνα 25. Αναπαράσταση της κατανομής της πυκνότητας του ρεύματος μέσα στον αγωγό στα 50Hz.

Παρατηρούμε ότι η κατανομή του ρεύματος είναι αισθητά ομαλότερη σε σχέση με τον αγωγό που μελετήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Αυτό είναι κάτι που ήταν αναμενόμενο, καθώς το επιδερμικό φαινόμενο συνδέεται άμεσα με την ακτίνα του αγωγού, όσο μικρότερη η ακτίνα, τόσο λιγότερο έντονο είναι το επιδερμικό φαινόμενο, όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες.

Για να φανεί καλύτερα η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου στην κατανομή του ρεύματος, παρατίθενται τα παρακάτω διαγράμματα.

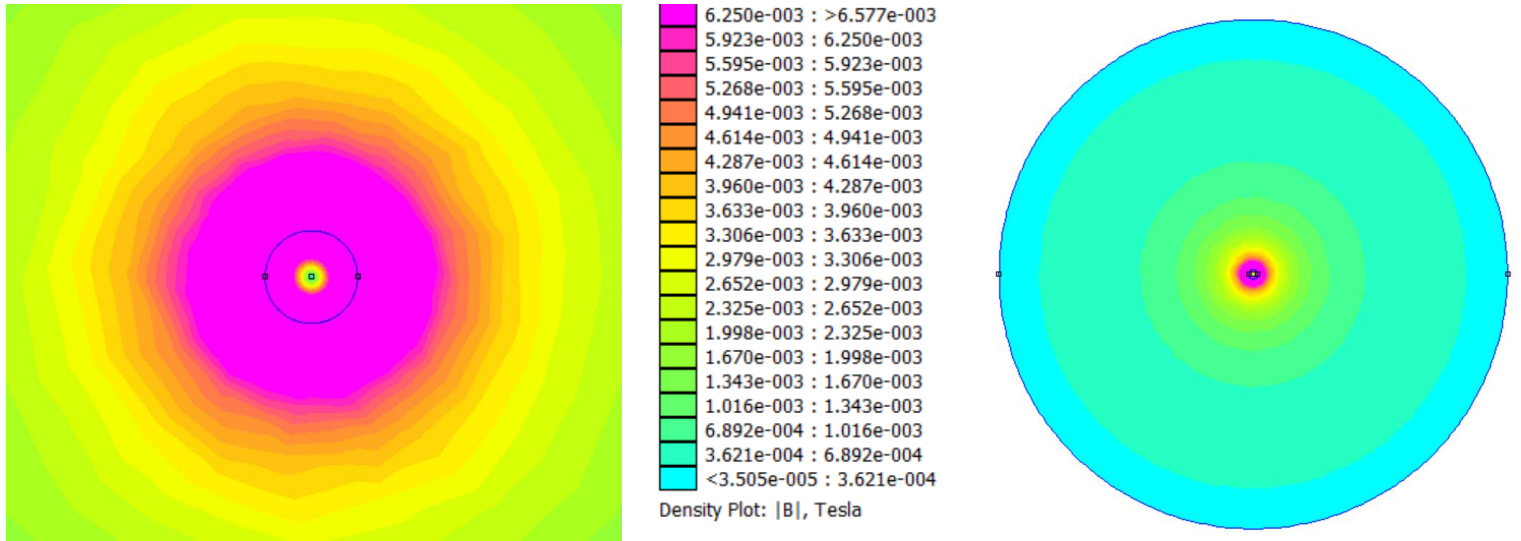


(α) Διαγράμματα της κατανομής της πυκνότητας δινορεύματος μέσα στον αγωγό στους 90°C

(β) Διαγράμματα κατανομής της πυκνότητας ρεύματος στον αγωγό στους 90°C

Εικόνα 26. Διαγράμματα κατανομής ρεύματος.

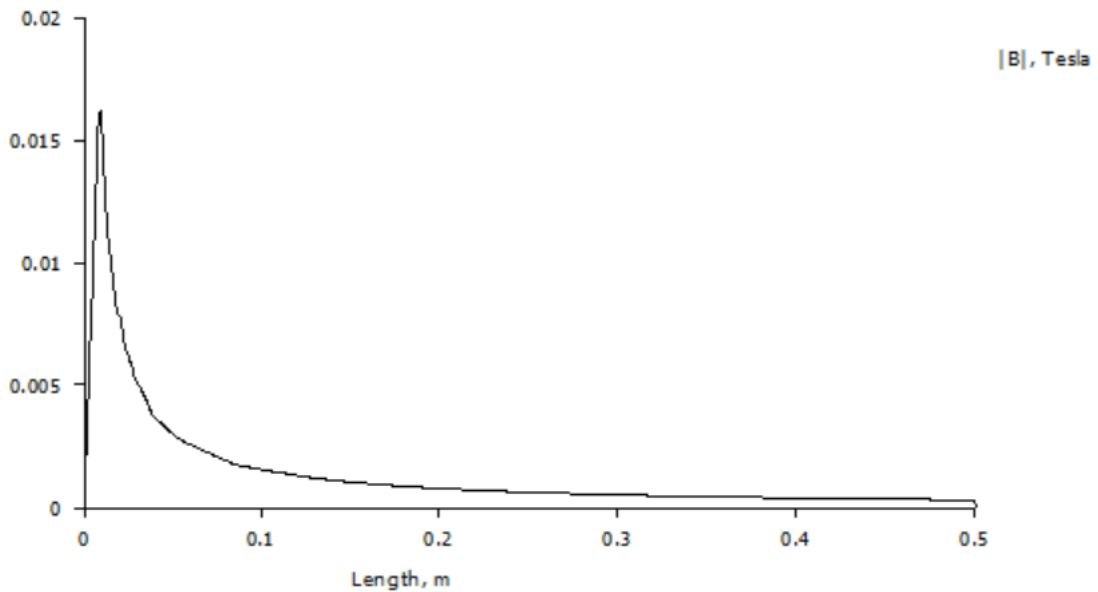
Παρατηρούμε τα ρινορεύματα έχουν μέτρο $0.2\text{MA}/\text{m}^2$ επομένως μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι υπάρχει το επιδερμικό φαινόμενο.



(α) Εικονική αναπαράσταση της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής μέσα στον αγωγό στους 90°C

(β) Διαγράμματα κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής εκτός του αγωγού στους 90°C

Εικόνα 27. Αναπαράσταση της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής



Εικόνα 28. Διάγραμμα κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής από το κέντρο του αγωγού μέχρι το όριο του αέρα στους 90°C

Παρατηρούμε ότι η κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής είναι όμοια με αυτή που βρέθηκε στο κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, μέσα στον αγωγό παρατηρούμε ομοιότητες συγκρίνοντάς την με την προηγούμενη κατανομή. Σε σχέση με τα προηγούμενα βλέπουμε μία μικρή διαφορά που οφείλεται στο γεγονός ότι το επιδερμικό φαινόμενο είναι μειωμένο στην περίπτωση του case study, καθώς η ακτίνα του αγωγού είναι μικρότερη από αυτή του αγωγού του κεφαλαίου 3.

Για να γίνει σωστότερη σύγκριση της αναλυτικής λύσης με την αριθμητική, θα μηδενιστεί ο συντελεστής φαινομένου γεινίασης γ_p , καθώς δεν υπάρχουν γειτονικές φάσεις.

Έτσι, η εξίσωση (5.6) θα γίνει

$$R = R' \cdot (1 + \gamma_s)$$

Οι τιμές των αντιστάσεων που θα χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν οι απώλειες παρατίθενται παρακάτω.

Θερμοκρασία (°C)	R without skin effect	R with skin effect
20	7.54×10^{-5}	7.65×10^{-5}
30	7.84×10^{-5}	7.94×10^{-5}
40	8.13×10^{-5}	8.23×10^{-5}
50	8.43×10^{-5}	8.53×10^{-5}
60	8.73×10^{-5}	8.82×10^{-5}
70	9.02×10^{-5}	9.11×10^{-5}
80	9.32×10^{-5}	9.41×10^{-5}
90	9.61×10^{-5}	9.6992×10^{-5}

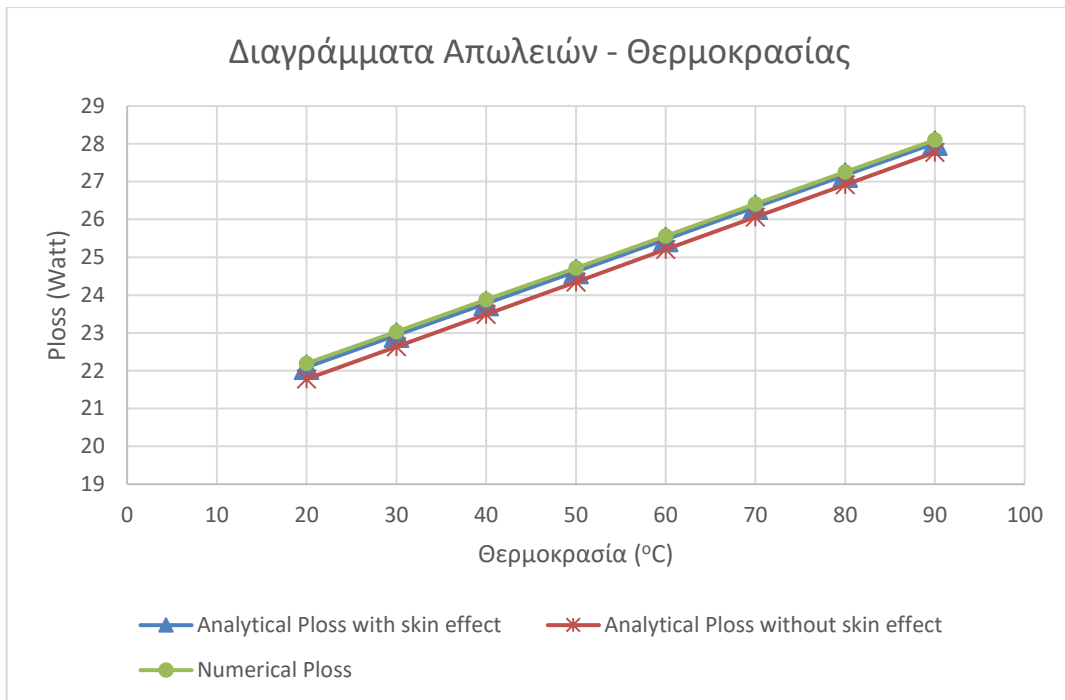
Πίνακας 8. Η τιμή της αντίστασης σε σχέση με την θερμοκρασία όταν λαμβάνεται υπόψη ή μη το επιδερμικό φαινόμενο με βάση τους τύπους της Cigre.

Τα αποτελέσματα για τις τιμές των απωλειών φαίνονται παρακάτω, όπου για τον υπολογισμό των συνολικών απωλειών χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της αντίστασης που συνυπολογίζει το επιδερμικό φαινόμενο, ενώ για τις απώλειες χωρίς το επιδερμικό φαινόμενο χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που δεν το λαμβαναν υπόψη.

Single phase (no proximity)	Analytical		Numerical
Θερμοκρασία (°C)	Ploss total (Watt)	Ploss without skin effect (Watt)	Ploss (Watt)
20	22.09202733	21.78053532	22.1959
30	22.93635926	22.6363929	23.0366
40	23.78174431	23.49248666	23.8788
50	24.62773221	24.34845354	24.7214
60	25.47440928	25.20444964	25.5651
70	26.32168833	26.06045085	26.4094
80	27.16945519	26.91639863	27.2548
90	28.01771116	27.77234237	28.1004

Πίνακας 9. Οι απώλειες ισχύος στον αγωγό του καλωδίου σε σχέση με την θερμοκρασία.

Στην συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα των απωλειών. Η αυξητική τάση που φαίνεται στα διαγράμματα είναι η αναμενόμενη, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και η αντίσταση και κατά συνέπεια και οι απώλειες. Οι απώλειες όταν έχει ληφθεί υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο είναι μεγαλύτερες, επειδή όπως έχει προαναφερθεί στο επιδερμικό φαινόμενο μειώνεται η αποτελεσματική επιφάνεια του αγωγού έχοντας ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση.

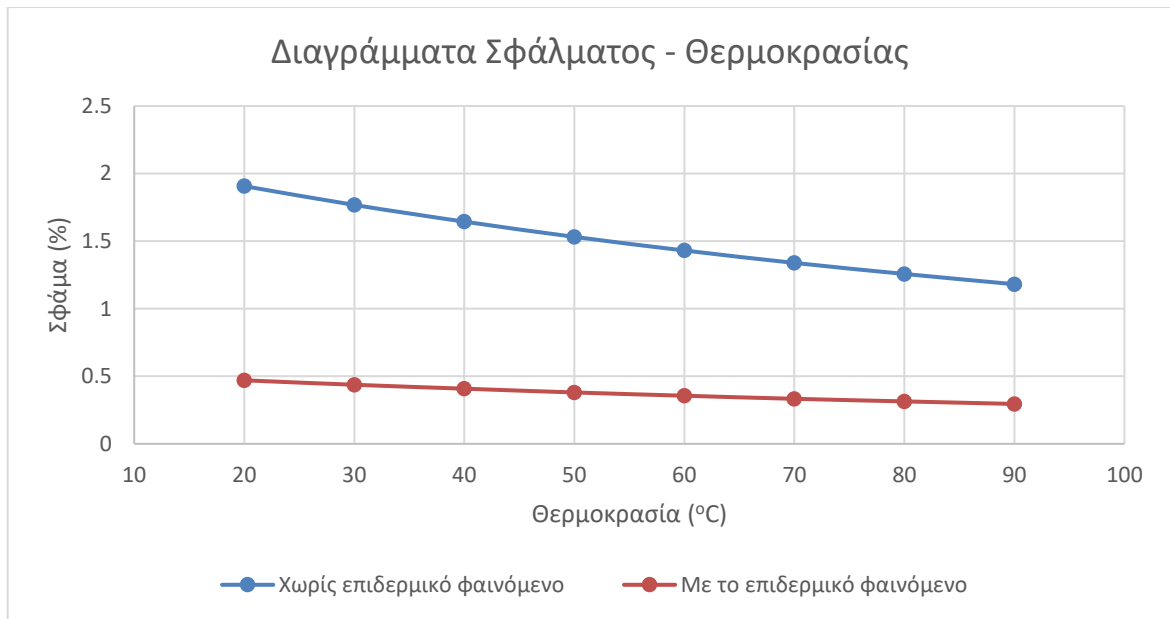


Εικόνα 29. Διαγράμματα Απωλειών – Θερμοκρασίας αναλυτικών και αριθμητικής λύσης.

Τέλος, υπολογίζεται το σφάλμα στο αποτέλεσμα μεταξύ της αναλυτικής και αριθμητική λύσης και οι τιμές παρατίθενται παρακάτω.

	Με το επιδερμικό φαινόμενο	Χωρίς επιδερμικό φαινόμενο
Θερμοκρασία (°C)	Σφάλμα(%)	Σφάλμα(%)
20	0.470181719	1.907045307
30	0.437038598	1.767980899
40	0.408110036	1.644412299
50	0.380334623	1.531704929
60	0.35600716	1.430899544
70	0.33322964	1.338998903
80	0.314120436	1.257231213
90	0.295130595	1.18123862

Πίνακας 10. Σφάλμα αναλυτικής με αριθμητικής λύσης με και χωρίς επιδερμικό φαινόμενο.



Εικόνα 30. Διαγράμματα Σφάλματος – Θερμοκρασίας για περίπτωση με και χωρίς επιδερμικό φαινόμενο.

Παρατηρούμε την αισθητή διαφορά – πάνω από 1% – στο ποσοστιαίο σφάλμα όταν δεν έχει συνυπολογιστεί το επιδερμικό φαινόμενο. Από την άλλη, τα επίπεδα του ποσοστιαίου σφάλματος όταν έχει συνυπολογιστεί το φαινόμενο είναι εξαιρετικά μικρότερο. Ωστόσο, βλέπουμε ότι σε σχέση με το σφάλμα της σύγκρισης μεταξύ αναλυτικών λύσεων στο κεφάλαιο 2 και του μοντέλου στα 50 Hz, οι λύσεις του κεφαλαίου 2 είναι πιο κοντά. Σε κάθε περίπτωση, το σφάλμα είναι κάτω από 0.5% πράγμα που καθιστά αμελητέα την διαφορά.

4.6 Μοντελοποίηση τριφασικού καλωδίου

Για την μοντελοποίηση του τριφασικού καλωδίου διάταξης τριφυλίου που μελετάται στο εγχειρίδιο πρέπει να διαταχθούν κατάλληλα οι φάσεις.

Ουσιαστικά θα εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι τα κέντρα των αγωγών σχηματίζουν ένα ισόπλευρο τρίγωνο και το κέντρο βάρους των ισοπλεύρων τριγώνων ισαπέχουν από τις κορυφές του. Θα θεωρηθεί ως κέντρο της διάταξης το σημείο (0,0). Η απόσταση μίας κορυφής από το κέντρο βάρους είναι $\frac{2}{3}$ · μήκος πλευράς. Στην περίπτωση μας, με τη διάταξη τριφυλίου, εξορισμού τα καλώδια έχουν επαφή μεταξύ τους όπως φαίνεται και στην Εικόνα 22. Άρα, η απόσταση μεταξύ των 2 κορυφών – δηλαδή η πλευρά του τριγώνου – θα έχει μήκος 2 φορές την ακτίνα του καλωδίου $2 \cdot r_{cable} = 44mm$.

Έτσι,

- Για την Α φάση το καλώδιο θα τοποθετηθεί στο σημείο $\left(\frac{4}{3} \cdot r_{cable}, 0\right) \Rightarrow (0.0293, 0)$.
- Για την Β φάση το καλώδιο θα τοποθετηθεί στο σημείο $\left(\frac{4}{3} \cdot r_{cable} \cdot \cos(120), \frac{4}{3} \cdot r_{cable} \cdot \sin(120)\right) \Rightarrow \left(-\frac{11}{750}, 0.0253\right)$, καθώς έχει την ίδια απόσταση από το $(0,0)$ αλλά αποκλίνει για 120° από την φάση Α.
- Για την Γ φάση, ομοίως το καλώδιο θα τοποθετηθεί στην ίδια απόσταση που τοποθετήθηκαν και οι υπόλοιπες, αλλά θα αποκλίνει 240° . Έτσι, με απλή τριγωνομετρία το κέντρο του καλωδίου είναι στο σημείο $\left(-\frac{11}{750}, -0.0253\right)$.

Αφού τοποθετηθούν τα κέντρα, η υπόλοιπη διαδικασία για την διαμόρφωση της επιθυμητής διάταξης παραμένει ίδια με αυτή του κεφαλαίου 3. Επιπροσθέτως, από την στιγμή που γίνεται μελέτη σε τριφασικό ρεύμα πλέον, πρέπει να συμπεριλάβουμε στα ρεύματα την διαφορά φάσης που υπάρχει μεταξύ των καλωδίων.

Σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα, τα ρεύματα έχουν ίδιο μέτρο και διαφορά φάσης 120° . Έτσι,

- Η φάση Α για την χρονική στιγμή $t = 0$ θα είναι

$$\hat{I}_A = I_{max} e^{j\omega t} = I_{max} = \sqrt{2} I_{rms}$$

- Η φάση Β

$$\hat{I}_B = I_{max} e^{j(\omega t - 120)} = I_{max} \{\cos(-120) + j\sin(-120)\} = I_{max} \left(-\frac{1}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2}\right)$$

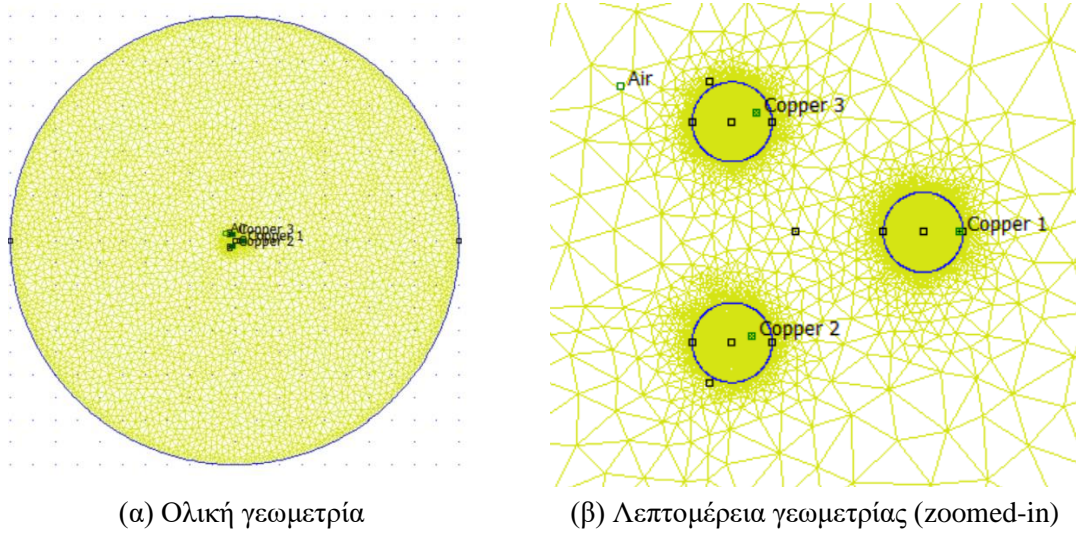
- Η φάση Γ

$$\hat{I}_C = I_{max} e^{j(\omega t - 240)} = I_{max} \{\cos(-240) + j\sin(-240)\} = I_{max} \left(-\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2}\right)$$

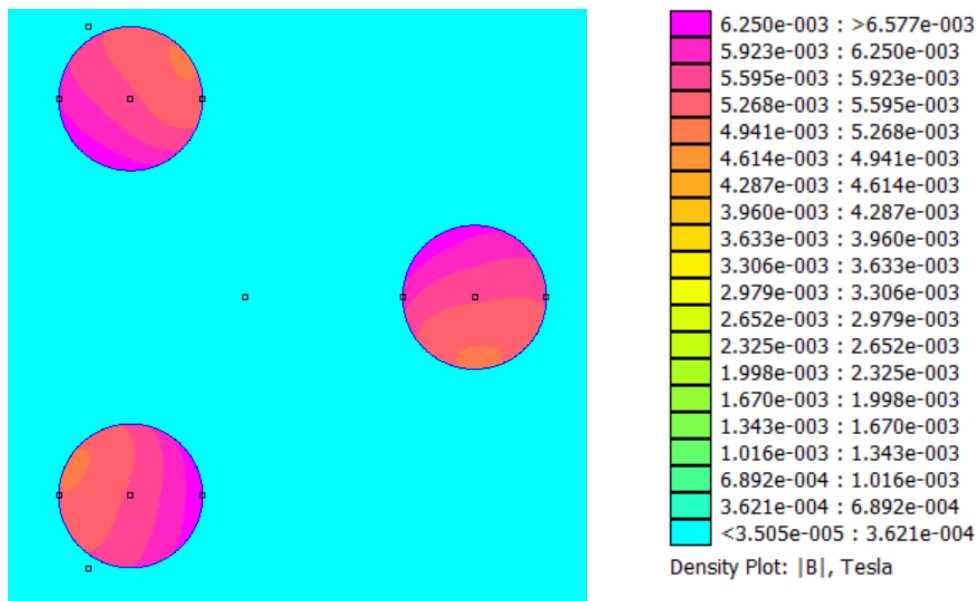
Επομένως, σε κάθε έναν αγωγό Copper 1, 2, 3 επιβάλλουμε μία πυκνότητα ρεύματος J ,

$$J \cdot \left(-\frac{1}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2}\right) \text{ και } J \cdot \left(-\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2}\right) \text{ αντίστοιχα.}$$

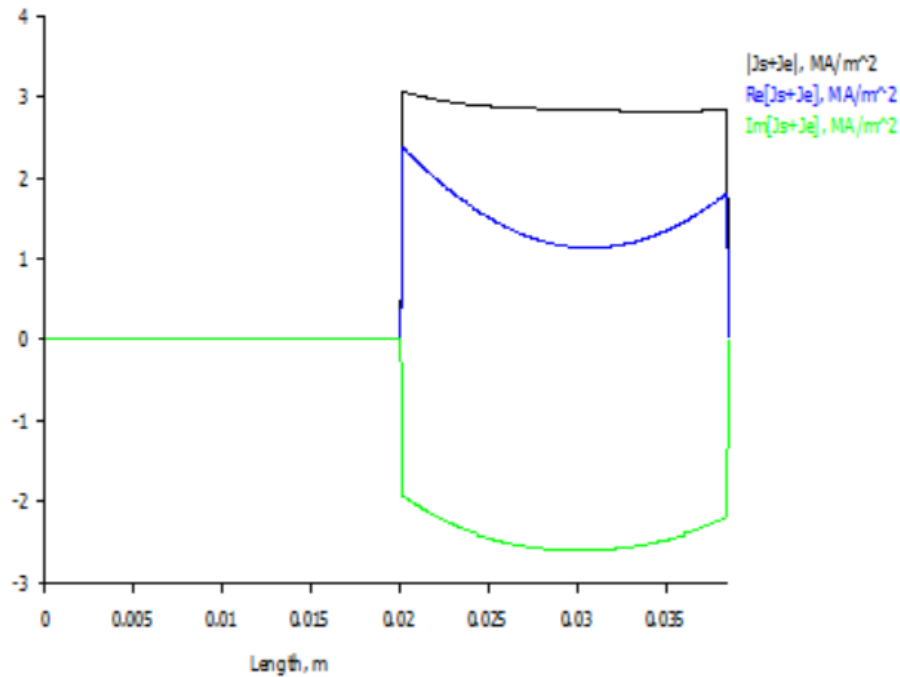
Παρακάτω παρουσιάζονται το επιλεγμένο πλέγμα και η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος στον αγωγό.



Εικόνα 31. Αναπαράσταση πλέγματος 30945 κόμβων.



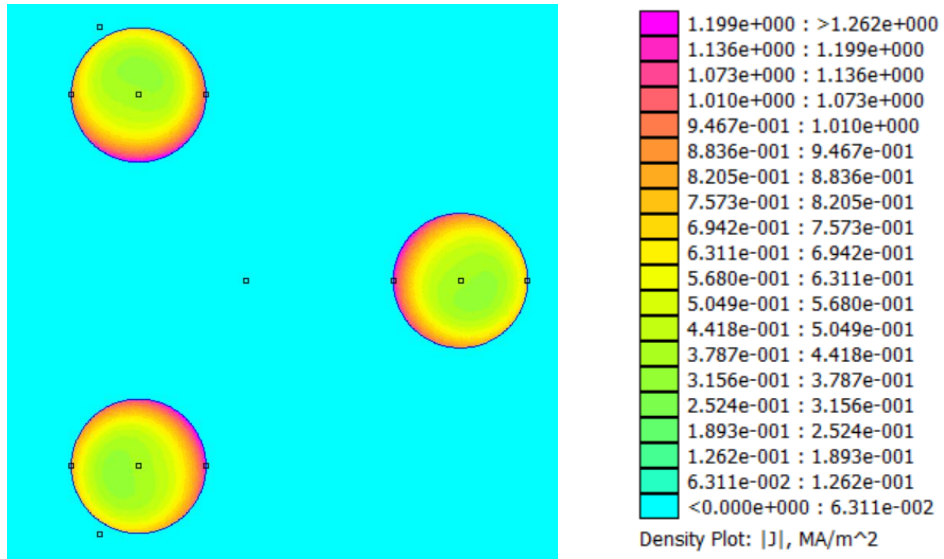
Εικόνα 32. Εικονική αναπαράσταση της κατανομής της πυκνότητας του ρεύματος μέσα στον αγωγό στους 90°C στα 50Hz .



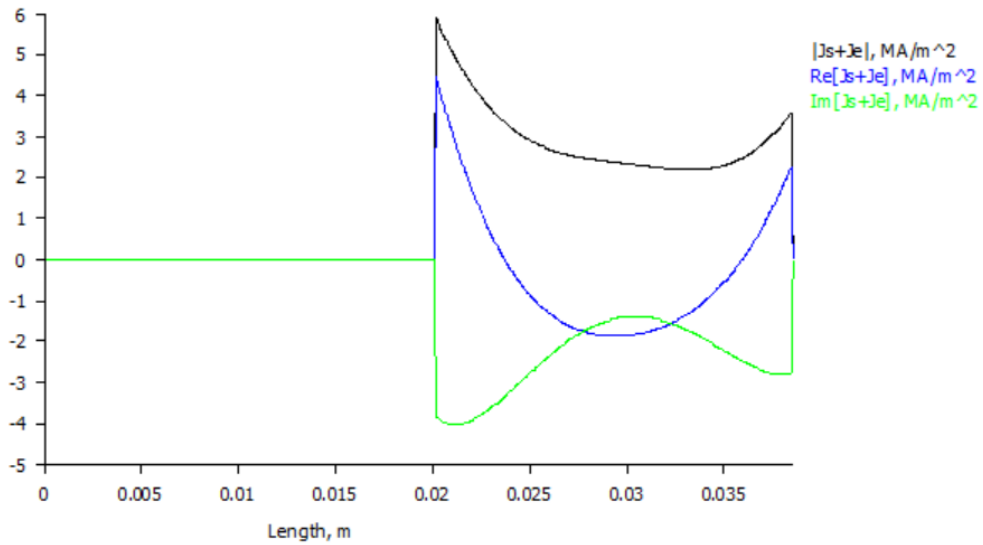
Εικόνα 33. Γραφική αναπαράσταση της κατανομής του της πυκνότητας ρεύματος μέσα στην μία φάση του αγωγού στους 90°C

Παρατηρείται ότι η πυκνότητα ρεύματος έχει κατανεμηθεί όμοια και συμμετρικά ως προς το σύνολο του τραπεζοειδούς καλωδίου. Ως προς το επίπεδο των φάσεων, παρατηρείται ασυμμετρία στην κατανομή της πυκνότητας ρεύματος πράγμα που υποδεικνύει την επίδραση του φαινομένου γεινιάσης. Κοντά στο κέντρο του τριφυλίου η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη ενώ κοντά στην περιφέρεια ξανακάνει ένα μικρότερο overshoot. Στο κέντρο είναι ισχυρότερο το φαινόμενο γεινιάσης και γι' αυτό παρατηρείται και πιο έντονη κατανομή, σε αντίθεση με τα σημεία που είναι αντιδιαμετρικά από την περιοχή που είναι έντονη και φαίνεται το μικρό overshoot λόγω επιδερμικού φαινομένου. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ρεύματα έχουν διαφορά φάσης 120° και επομένως το ρεύμα θα κατανεμηθεί στο σημείο που βρίσκονται κοντινότερα οι αγωγοί ενώ στην “μακρυνή” περιοχή που γίνεται αλληλεξουδετέρωση των μαγνητικών πεδίων, επηρεάζει μόνο το επιδερμικό φαινόμενο.

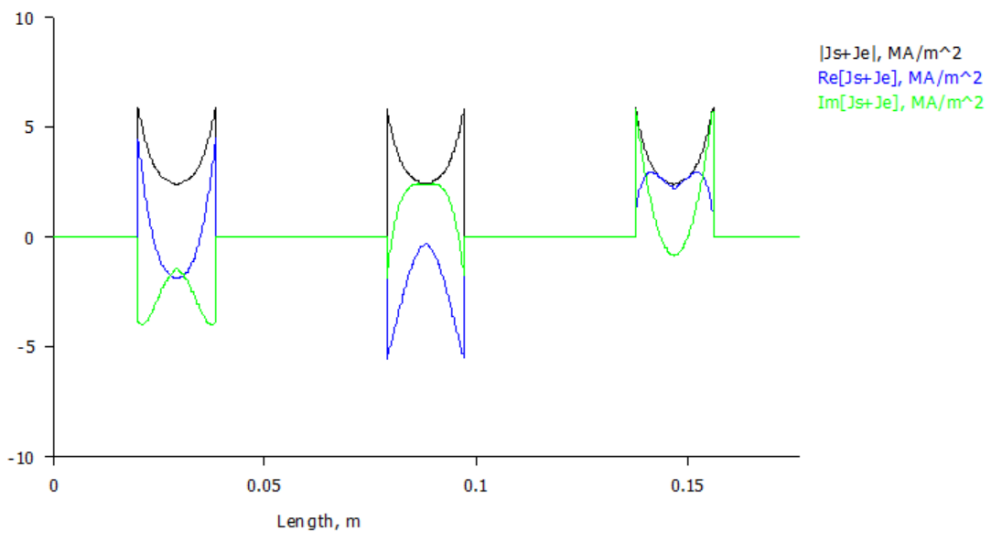
Επειδή το επιδερμικό φαινόμενο όπως είδαμε και στο μονοφασικό καλώδιο είναι λιγότερο εμφανές στην περιπτώσή μας, παρατίθεται ξανά η πυκνότητα ρεύματος αλλά σε μία υψηλότερη συχνότητα τα 300 Hz, όπου το φαινόμενο είναι πολύ πιο ισχυρό και μπορεί να γίνει καλύτερη αναπαράσταση των προαναφερθέντων.



Εικόνα 34. Εικονική αναπαράσταση της κατανομής της πυκνότητας ρεύματος μέσα στον αγωγό στους 90°C, στα 300Hz.



(α) Διάγραμμα της κατανομής της πυκνότητας ρεύματος μέσα στην μία φάση του αγωγού.

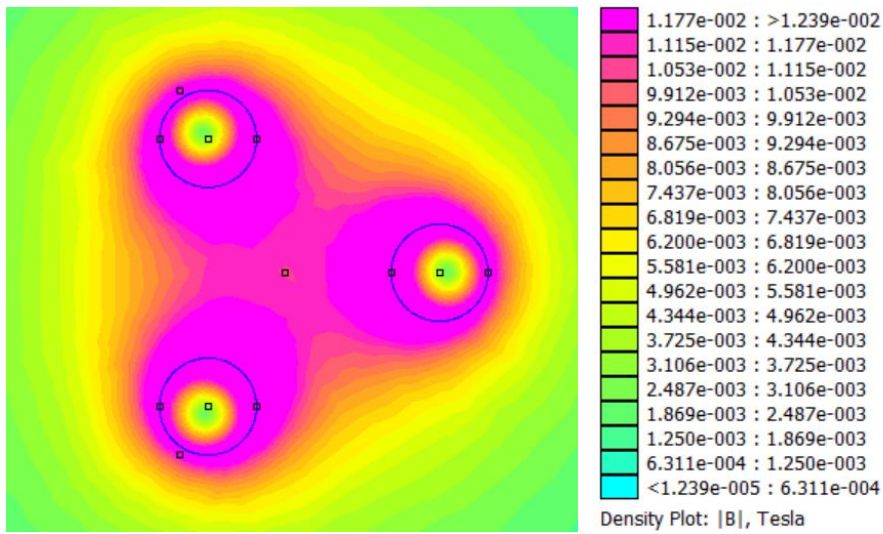


(β) Διάγραμμα της κατανομής της πυκνότητας ρεύματος μέσα στο καλώδιο. (από το κέντρο του καλωδίου-κέντρο του αγωγού)

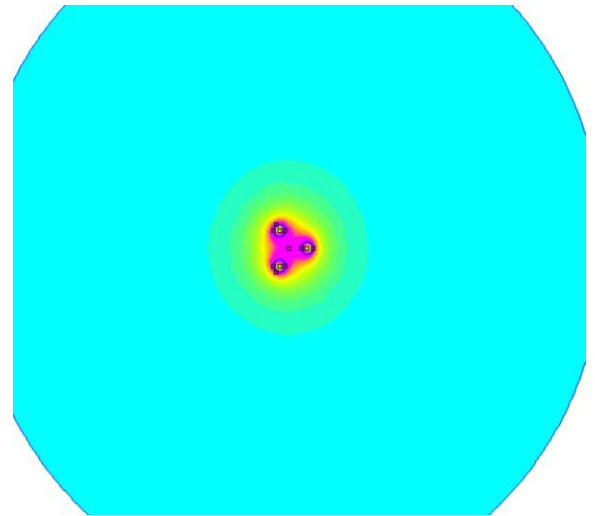
Εικόνα 35. Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της πυκνότητας ρεύματος μέσα στην μία φάση του αγωγού στους 90 °C, στα 300Hz.

Πλέον, από την Εικόνα 33 φαίνεται ξεκάθαρα η συμμετρία (Εικόνα 34β) στην κατανομή του ρεύματος ως προς το συνολικό καλώδιο. Η επίδραση του επιδερμικού και φαινομένου γειτνίασης στους αγωγούς είναι επίσης εμφανέστερες και παρατηρείται ασυμμετρία στην κατανομή (Εικόνα 34α).

Παρακάτω παρατίθεται το μέτρο της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής.

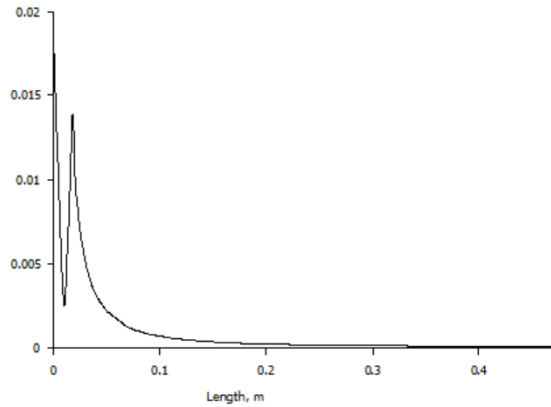


(α) Εικονική αναπαράσταση της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής μέσα στον αγωγό στους 90 °C

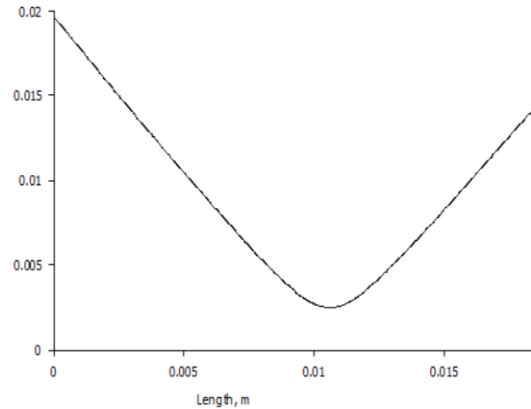


(β) Διαγράμματα κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής εκτός του αγωγού στους 90 °C

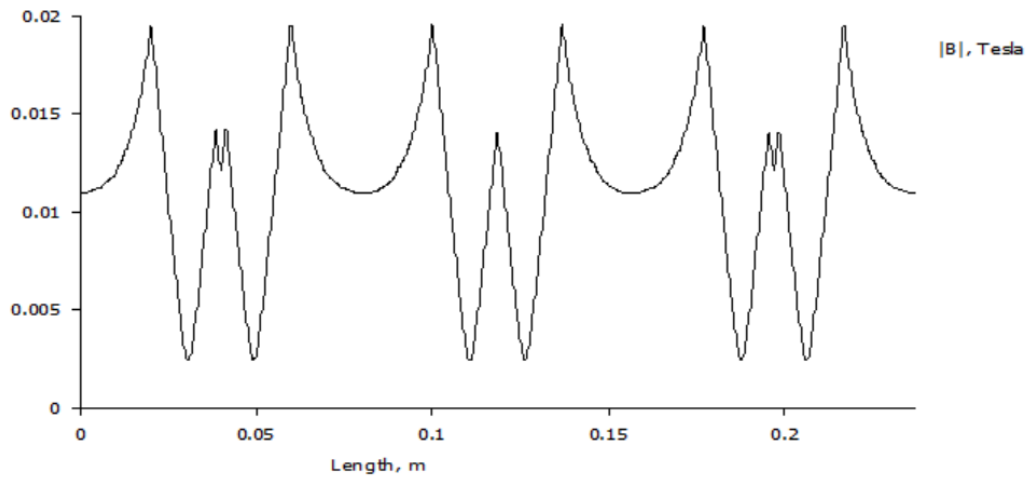
Εικόνα 36. Αναπαράσταση της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής στα 50Hz.



(α) Διάγραμμα της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής στην περιοχή στους 90 °C



(β) Διάγραμματα της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής εντός της Α φάσης του αγωγού στους 90 °C



(γ) Διάγραμμα της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής σε όλες τις φάσεις (κέντρο καλωδίου – πιο μακρινό σημείο του αγωγού από το κεντρό)

Εικόνα 37. Διαγράμματα της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής.

Παρατηρείται όπως ήταν αναμενόμενο το μαγνητικό πεδίο να ακολουθεί στην συμμετρία και ασυμμετρία αντίστοιχα, που εμφάνισε και η κατανομή πυκνότητας ρεύματος. Πάλι, από την Εικόνα 37γ μπορεί κανείς να συμπεράνει την συμμετρία στην κατανομή του πεδίου στο κέντρο του καλωδίου ενώ από την Εικόνα 37β είναι ξεκάθαρη και η ασυμμετρία που προκαλεί το φαινόμενο γειτνίασης στην κάθε φάση. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι στα 50Hz μορφή της κατανομής του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής μέσα στον αγωγό (Εικόνα 37β) ακολουθεί το σχήμα “ V ” που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 για συχνότητα μηδενική (με μία αναμενόμενη ασυμμετρία που προκλήθηκε από το φαινόμενο γειτνίασης) και όχι αυτή των 50Hz. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η ακτίνα κατά μέτρο είναι πιο κοντά στο βάθος διείσδυσης δ στο casestudy απ’ ότι στο κεφάλαιο 3 και επομένως

παρουσιάζεται λιγότερη παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου από την ασθενότερη παρουσία του επιδερμικού φαινομένου.

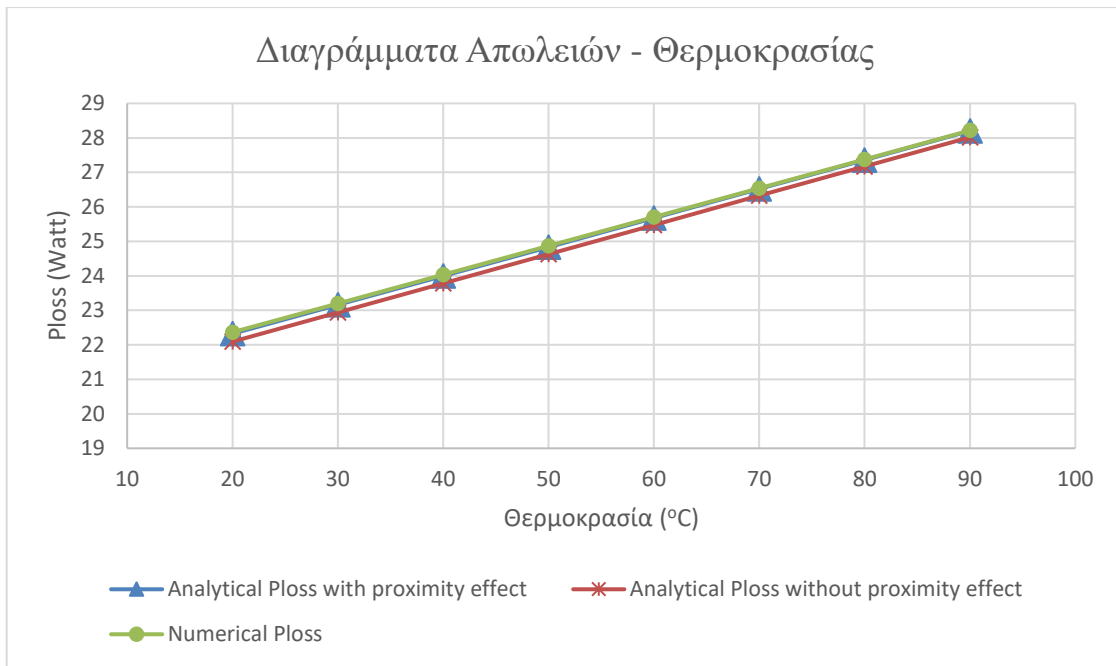
Τα αποτελέσματα για τις τιμές των απωλειών φαίνονται παρακάτω, όπου για τον υπολογισμό του Ploss total χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της αντίστασης που συνυπολογίζει το φαινόμενο γειννίασης, ενώ για το Ploss without proximity effect χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που δεν το λαμβάναν υπόψη.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα απωλειών ισχύος και σφάλματος για την φάση A.

Three phase	Analytical		Numerical
Θερμοκρασία (°C)	Ploss total (Watt)	Ploss without proximity effect (Watt)	Ploss (Watt)
20	22.32109825	22.09202733	22.3667
30	23.1578706	22.93635926	23.1982
40	23.99594759	23.78174431	24.0316
50	24.83516815	24.62773221	24.8659
60	25.67543763	25.47440928	25.7016
70	26.51666631	26.32168833	26.5382
80	27.35875483	27.16945519	27.3762
90	28.20160819	28.01771116	28.2145

Πίνακας 11. Απώλειες σε σχέση με την θερμοκρασία και την επίδραση του φαινομένου γειννίασης.

Στην συνέχεια, παρατίθενται τα διάγραμμα των απωλειών. Όμοια με προηγουμένως, η αυξητική τάση που βλέπουμε στα διαγράμματα είναι η αναμενόμενη, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και η αντίσταση και κατά συνέπεια και οι απώλειες. Οι απώλειες όταν έχει ληφθεί υπόψη το φαινόμενο γειννίασης είναι μεγαλύτερες, επειδή το φαινόμενο γειννίασης όπως και επιδερμικό φαινόμενο επηρεάζει την αποτελεσματική επιφάνεια του αγωγού αυξάνοντας έχει την αντίσταση.

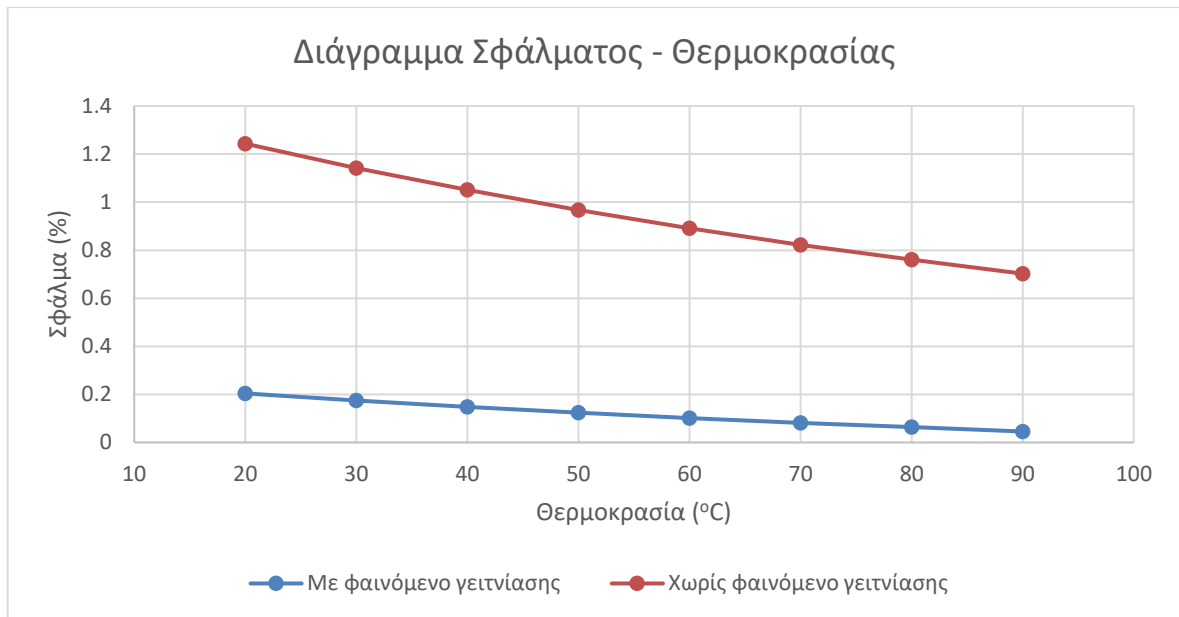


Εικόνα 38. Διαγράμματα Απωλειών - Θερμοκρασίας

Τέλος, υπολογίζεται το σφάλμα στο αποτέλεσμα μεταξύ της αναλυτικής και αριθμητικής λύσης και οι τιμές παρατίθενται παρακάτω.

Θερμοκρασία (°C)	Με φαινόμενο γειτνίασης	Χωρίς φαινόμενο γειτνίασης
	Σφάλμα(%)	Σφάλμα(%)
20	0.20429888	1.243311307
30	0.174149844	1.141596798
40	0.148576808	1.050619677
50	0.123743274	0.967071554
60	0.101896485	0.891839015
70	0.081208133	0.822559954
80	0.063764496	0.760945737
90	0.045713026	0.702372997

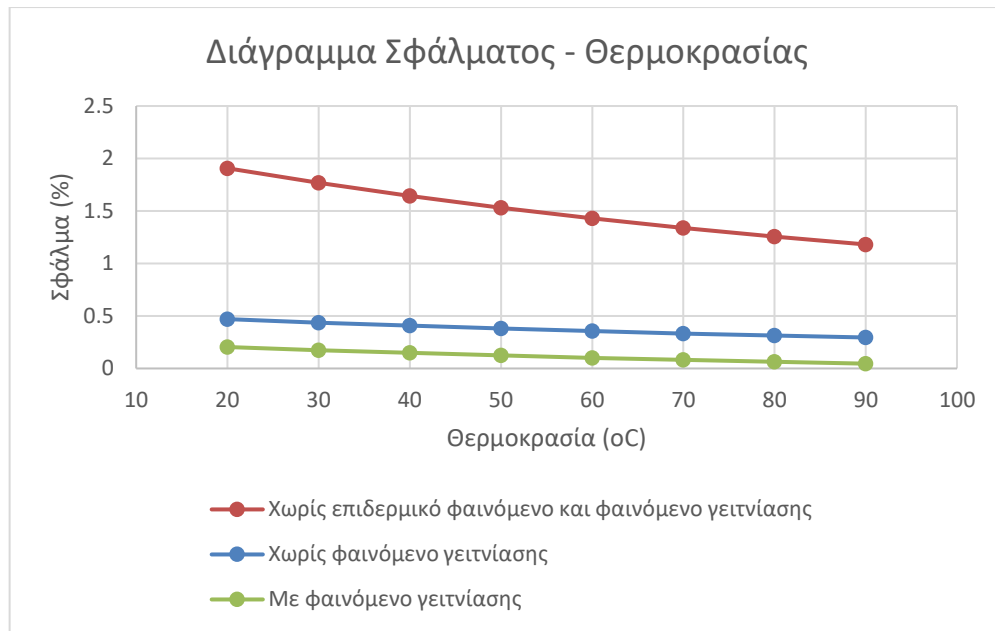
Πίνακας 12. Σφάλμα αναλυτικής με αριθμητικής λύσης με και χωρίς φαινόμενο γειτνίασης.



Εικόνα 39. Διαγράμματα Σφαλμάτων – Θερμοκρασίας για περίπτωση με και χωρίς φαινόμενο γειτνίασης.

Παρατηρούμε την αισθητή διαφορά στο ποσοστιαίο σφάλμα όταν δεν έχει συνυπολογιστεί το φαινόμενο γειτνίασης. Από την άλλη, τα επίπεδα του ποσοστιαίου σφάλματος όταν έχει συνυπολογιστεί το φαινόμενο είναι εξαιρετικά μικρότερο. Βλέπουμε ότι σε σχέση με το σφάλμα της σύγκρισης μεταξύ αναλυτικών λύσεων στο κεφάλαιο 2 και του μοντέλου στα 50 Hz, οι λύσεις του κεφαλαίου 2 είναι πιο κοντά. Στην περίπτωση του τριφασικού έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην διαφορά και η πιθανή απόκλιση που υπάρχει στην διάταξη που υλοποιήσαμε. Μερικές συντεταγμένες ήταν δεκαδικά με πολλά ψηφία τα οποία αγνοήθηκαν για λόγους ευκολίας. Σε κάθε περίπτωση, το σφάλμα είναι κάτω από 0.2% πράγμα που καθιστά αμελητέα την διαφορά.

Συμπερασματικά, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που δείχνει την διαφορά στο σφάλμα αν έχουμε ή όχι υπολογίσει τα 2 φαινόμενα.



Εικόνα 40. Διαγράμματα Σφαλμάτων – Θερμοκρασίας για την περίπτωση : (α) Να μην συνυπολογιστεί κανένα από τα 2 φαινόμενα, (β) να συνυπολογιστεί το επιδερμικό φαινόμενο και (γ) να συνυπολογιστούν και τα 2.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, η εργασία αυτή πραγματεύεται τη διαδικασία μοντελοποίησης ενός κυλινδρικού χάλκινου αγωγού, των εμπλεκόμενων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και τη μελέτη των απωλειών του στα πλαίσια ανάπτυξης κατάλληλων αριθμητικών μοντέλων για τη μελέτη των καλωδίων ισχύος.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- Για τη μελέτη των απωλειών Joule σε ένα χάλκινο κυλινδρικό αγωγό, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να προσεγγίσει πολύ ικανοποιητικά την αναλυτική λύση αλλά και μία υποδειγματική περίπτωση ανάλυσης καλωδίου ισχύος της Cigre, χρησιμοποιώντας διακριτότητες που περιλαμβάνουν τουλάχιστον 6400 και 12700 κόμβους πλέγματος, αντίστοιχα.
- Η επιλογή πλέγματος είναι σοβαρής σημασίας για την ακρίβεια των υπολογισμών και ιδιαίτερα για τις απώλειες που μελετώνται στην συγκεκριμένη εργασία, τον κύριο ρόλο διαδραματίζει το πλέγμα που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση του αγωγού.
- Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε λιγότερο απαιτητικά μοντέλα στις περιοχές χαμηλών συχνοτήτων, καθώς όπως παρατηρήσαμε το σφάλμα αυξάνεται σημαντικά σε υψηλότερες συχνότητες για το ίδιο πλέγμα.
- Η απόσταση για τα όρια της εξωτερικής οριακής συνθήκης του περιβάλλοντος χώρου δεν επηρεάζει σημαντικά τις απώλειες Joule στον αγωγό. Αντιθέτως έχει σημαντική επίδραση στον υπολογισμό της αυτεπαγωγής των αγωγών όταν δεν υπάρχουν εξωτερικά πλέγματα θωράκισης στα καλώδια.
- Η ακτίνα των αγωγών και η αποστάσεις μεταξύ των αγωγών τριφασικών καλωδίων παίζει σημαντικό ρόλο στην αναπαράσταση του επιδερμικού και του φαινομένου γειννίασης.
- Στις υψηλότερες συχνότητες η χρησιμοποιούμενη διατομή αγωγού ανάπτυξης του ρεύματος μειώνεται σημαντικά, αυξάνοντας τις αντίστοιχες απώλειες ισχύος.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει τις απώλειες ισχύος του αγωγού καθώς η ειδική αντίσταση του αγωγού αυξάνεται πρακτικά γραμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας.

- Το φαινόμενο γειννίαςης προκαλεί σημαντική ασυμμετρία στην κατανομή του ρεύματος μέσα στους αγωγούς και αυξάνει τις προκύπτουσες απώλειες.

6. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, αναπτύχθηκαν ορισμένα σημεία συνεισφοράς στην επιστήμη, όπως

- Ανάλυση της βέλτιστης διακριτότητας που είναι κατάλληλη για να μελετηθούν οι απώλειες Joule στους χάλκινους κυλινδρικούς αγωγούς των καλωδίων ισχύος.
- Ανάδειξη μέσω οπτικοποίησης της επίδρασης του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου γειννίαςης στην κατανομή του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου.

7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Με την ολοκλήρωση της τρέχουσας εργασίας προτείνονται τα ακόλουθα θέματα για περαιτέρω ανάπτυξη και διερεύνηση:

- Επέκταση της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε μέσω σε αγωγούς καλωδίων τύπου Milliken.
- Πειραματική επιβεβαίωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων σε κατασκευασμένα καλώδια.

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

8.1 Επιδερμικό φαινόμενο (Skin effect)

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί το εικονικά το βάθος διείσδυσης δ σε σχέση με την ακτίνα του αγωγού. Όπως αναφέρθηκε, όταν η ακτίνα του αγωγού r_c είναι πολύ μεγαλύτερη από το δ τότε το φαινόμενο τείνει να γίνει επιφανειακό.

Επομένως, το δ ορίζεται ως

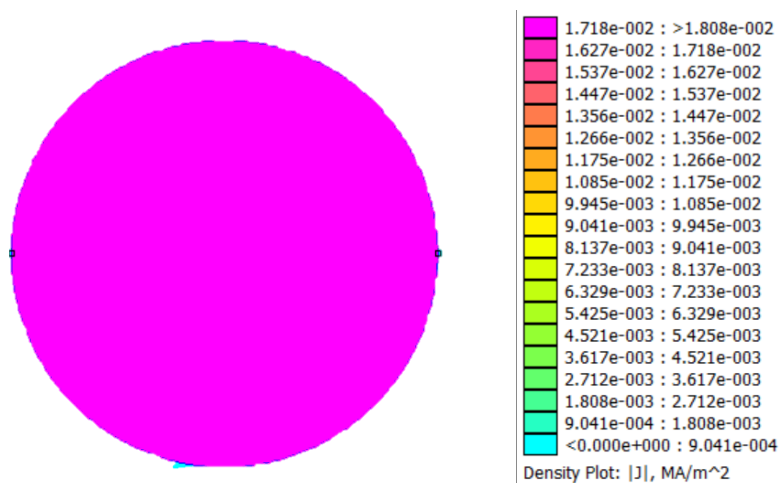
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}}$$

όπου f είναι η συχνότητα, μ η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα και σ η ειδική αγωγιμότητα του χαλκού.

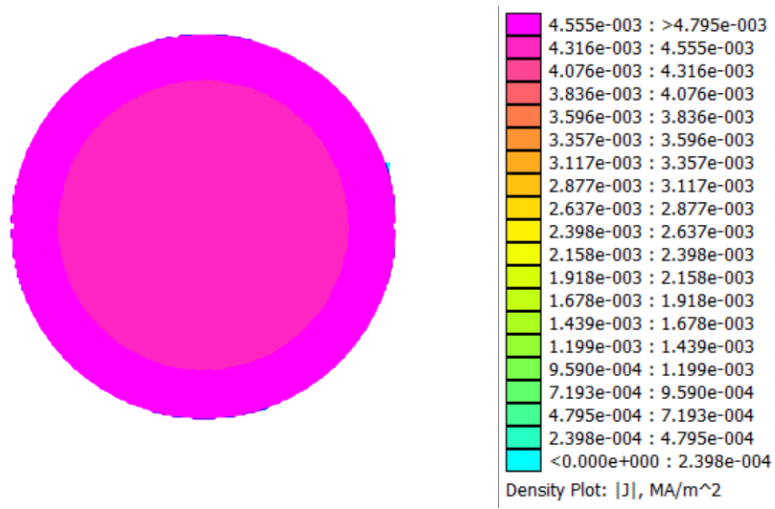
Παράμετροι	
μ	1 H/m
f	50 Hz
σ	58×10^6 S

Άρα, $\delta = 1.0476 \times 10^{-5}$.

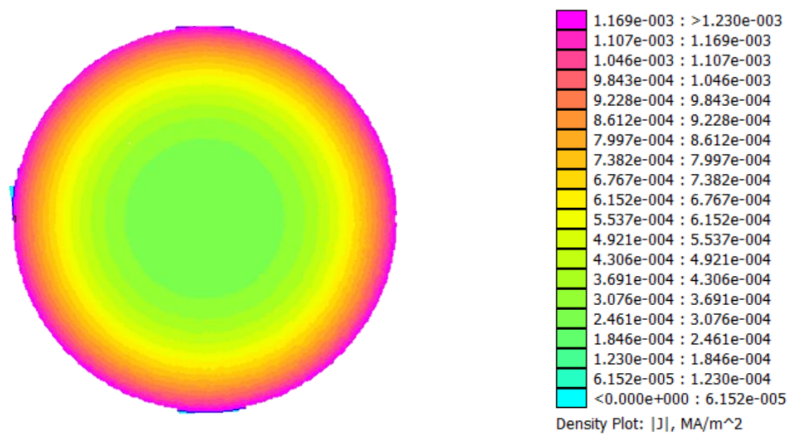
Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά παραδείγματα της επίδρασης της ακτίνας του αγωγού σε σχέση με το επιδερμικό φαινόμενο για συνολικό ρεύμα 1A.



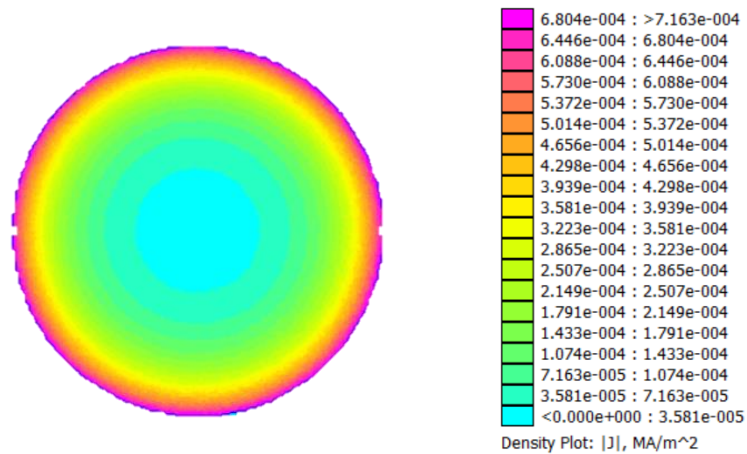
(a) $r_c = 0.005m$



(a) $r_c = 0.01m$



(a) $r_c = 0.03m$



(a) $r_c = 0.05m$

Εικόνα 41. Αναπαράσταση του επιδερμικού φαινομένου.

Επομένως, πράγματι η ακτίνα του αγωγού είναι σημαντική επίδραση στο βάθος διείσδυσης και κατεπέκταση στο επιδερμικό φαινόμενο. Όσο μικρότερη ακτίνα τόσο μεγαλύτερο το βάθος διείσδυσης. Επίσης, όταν $r_c < \frac{\delta}{1000}$ παρατηρούμε ότι το επιδερμικό φαινόμενο είναι αρκετά ασθενές.

8.2 Κώδικας MATLAB για υπολογισμό απωλειών σε χάλκινο κυλινδρικό αγωγό

Παρατίθεται ο κώδικας MATLAB για υπολογισμό απωλειών σε χάλκινο κυλινδρικό αγωγό.

```
% Script to calculate the current density of a Solid Cylindrical
Conductor

% Constants
mu_0 = 4*pi*1E-7;    % vacuum permability

% Input Parameters
f = 0:1:8000;        % frequency / Hz
sigma = 58E6;       % conductivity / S/m
r_c = 0.025;        % conductor radius / m
z_c = 1;           % conductor length / m
mu_r = 1;          % permability
I = 1;            % conductor current / A
N = 10000;

% Calculation of Variables
r = -r_c:r_c/N:r_c;    % generation of r-coordinate
omega = 2*pi.*f;      % angular frequency / Hz
R_DC = z_c/(sigma*pi*r_c^2); % DC resistance / Ohm/m
L_DC = mu_0*mu_r/(8*pi); % DC inductance / H/m

% Calculation of Function Argument m
m = sqrt(-1i*omega*mu_0*mu_r*sigma);

% Current Density at 50 Hz Normalized to the DC Current Density
% by using the Bessel Function of the First Kind
J_AC = (m(51)*I/(2*pi*r_c))*(besselj(0,m(51)*r)./...
        besselj(1,m(51)*r_c));

J_DC = I/(pi*r_c^2); % DC current density / A/m^2

%% 50Hz

J_AC_Magnitude = abs(J_AC);

delta = sqrt(2./(sigma*mu_0*mu_r*omega)); % delta-skin depth

Dr = r_c/ N;
P_copper_50 = 0;
```

```

for c = 0:1:N

    P_copper_50 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
        Dr/2)^2)) * (1/sigma) * (J_AC_Magnitude(c+1))^2 +
P_copper_50;

end

%% 0Hz
P_copper_DC = R_DC*I

%% 1Hz
J_AC_1 = (m(2)*I/(2*pi*r_c)) * (besselj(0,m(2)*r) ./ ...
    besselj(1,m(2)*r_c));

J_AC_1_Magnitude = abs(J_AC_1);

P_copper_1 = 0;

for c = 0:1:N

    P_copper_1 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
Dr/2)^2)) * (1/sigma) * J_AC_1_Magnitude(c+1)^2 + P_copper_1;

end

%% 150Hz
J_AC_150 = (m(151)*I/(2*pi*r_c)) * (besselj(0,m(151)*r) ./ ...
    besselj(1,m(151)*r_c));

J_AC_150_Magnitude = abs(J_AC_150);

P_copper_150 = 0;

for c = 0:1:N

    P_copper_150 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
Dr/2)^2)) * (1/sigma) * J_AC_150_Magnitude(c+1)^2 + P_copper_150;

end

%% 300Hz

J_AC_300 = (m(301)*I/(2*pi*r_c)) * (besselj(0,m(301)*r) ./ ...

```



```

                                besselj(1,m(301)*r_c));

J_AC_300_Magnitude = abs(J_AC_300);

P_copper_300 = 0;
for c = 0:1:N

    P_copper_300 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
Dr/2)^2)) * (1/sigma) * J_AC_300_Magnitude(c+1)^2 + P_copper_300;

end

%% 600Hz
J_AC_600 = (m(601)*I/(2*pi*r_c)) * (besselj(0,m(601)*r) ./ ...
                                besselj(1,m(601)*r_c));

J_AC_600_Magnitude = abs(J_AC_600);

P_copper_600 = 0;

for c = 0:1:N

    P_copper_600 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
Dr/2)^2)) * (1/sigma) * J_AC_600_Magnitude(c+1)^2 + P_copper_600;

end

%% 1000Hz
J_AC_1000 = (m(1001)*I/(2*pi*r_c)) * (besselj(0,m(1001)*r) ./ ...
                                besselj(1,m(1001)*r_c));

J_AC_1000_Magnitude = abs(J_AC_1000);

P_copper_1000 = 0;

for c = 0:1:N

    P_copper_1000 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
Dr/2)^2)) * (1/sigma) * J_AC_1000_Magnitude(c+1)^2 + P_copper_1000;

end

%% 3000Hz

```

```

J_AC_3000 = (m(3001)*I/(2*pi*r_c))*(besselj(0,m(3001)*r) ./ ...
            besselj(1,m(3001)*r_c));

J_AC_3000_Magnitude = abs(J_AC_3000);

Dr = r_c/ N;
P_copper_3000 = 0;

for c = 0:1:N

    P_copper_3000 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
Dr/2)^2))*(1/sigma)*J_AC_3000_Magnitude(c+1)^2 + P_copper_3000;

end

%% 5000Hz

J_AC_5000 = (m(5001)*I/(2*pi*r_c))*(besselj(0,m(5001)*r) ./ ...
            besselj(1,m(5001)*r_c));

J_AC_5000_Magnitude = abs(J_AC_5000);

P_copper_5000 = 0;

for c = 0:1:N

    P_copper_5000 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
Dr/2)^2))*(1/sigma)*J_AC_5000_Magnitude(c+1)^2 + P_copper_5000;

end

%% 8000Hz

J_AC_8000 = (m(8001)*I/(2*pi*r_c))*(besselj(0,m(8001)*r) ./ ...
            besselj(1,m(8001)*r_c));

J_AC_8000_Magnitude = abs(J_AC_8000);

P_copper_8000 = 0;

for c = 0:1:N

    P_copper_8000 = ((pi*(r(c+1) - Dr/2)^2) - (pi*(r(c+1) +
Dr/2)^2))*(1/sigma)*J_AC_8000_Magnitude(c+1)^2 + P_copper_8000;

```

```

end
%% plots

%Current density J
figure(1)

g4 = real(J_AC_1000);
h(4)=plot(r, g4, 'DisplayName', '1 kHz');
hold on

g = real(J_AC_1);
h(1)= plot(r, g, 'DisplayName', '0 Hz');
hold on

g2 = real(J_AC);
h(2)=plot(r, g2, 'DisplayName', '50 Hz');
hold on

g3 = real(J_AC_300);
h(3)=plot(r, g3, 'DisplayName', '300 Hz');
hold on

xlabel('r in meters')
ylabel('Re(J_z) in A/m^2')
legend(h)
grid on
hold off

%Magnetic flux density B
figure(2)
B_0 = (mu_0/2*pi.*r).*(J_AC_1.*(pi*(r_c^2)));
Mag_B_0 = abs(B_0);
B_norm(1) =plot(r, Mag_B_0/max(Mag_B_0), 'DisplayName', '0 Hz');
hold on

B_50 = (mu_0/2*pi.*r).*(J_AC.*(pi*(r_c^2)));
Mag_B_50 = abs(B_50);
B_norm(2) = plot(r, Mag_B_50/max(Mag_B_50), 'DisplayName', '50 Hz');
hold on

B_300 = (mu_0/2*pi.*r).*(J_AC_300.*(pi*(r_c^2)));
Mag_B_300 = abs(B_300);
B_norm(3) = plot(r, Mag_B_300/max(Mag_B_300), 'DisplayName', '300
Hz');

```

```
B_1000 = (mu_0/2*pi.*r).*(J_AC_1000.*(pi*(r_c^2)));
Mag_B_1000 = abs(B_1000);
B_norm(4) = plot(r,Mag_B_1000/max(Mag_B_1000),'DisplayName', '1
kHz');
hold on

xlabel('r in meters');
ylabel('|B| Normalized ');
legend(B_norm)
grid on
```

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. H. Neher and M. H. Mcgrath, *CIGRE: B1 Technical Brochure "Insulated Cables", Power cable rating examples for calculation tool verification, TB 880-Power 2022*. 2022. [Online]. Available: <https://pithos.okeanos.grnet.gr/public/7uIlDgbVtffAlDnjsxUKT>
- [2] Mircea. Ardelean, Philip. Minnebo, and European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport., *HVDC submarine power cables in the world : state-of-the-art knowledge*. Publications Office, 2015. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC97720>
- [3] G. Mazzanti and M. Marzinotto, *Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development*. 2013. doi: 10.1002/9781118590423.
- [4] R. Suchantke, "Alternating Current Loss Measurement of Power Cable Conductors with Large Cross Sections Using Electrical Methods," 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/327861035_Alternating_Current_Loss_Measurement_of_Power_Cable_Conductors_with_Large_Cross_Sections_Using_Electrical_Methods_PhD_Thesis
- [5] N. Mohd Zainuddin *et al.*, "Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 120053–120081, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004578.
- [6] M. Kumar, M. S. Bhaskar, S. Padmanaban, P. Siano, F. Blaabjerg, and Z. Leonowicz, "Electric field analysis of extra high voltage (EHV) underground cables using finite element method," in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977883.
- [7] Kiran Daware, "Underground Power Cables." Accessed: Sep. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.electriceasy.com/2017/03/underground-power-cables.html>
- [8] L. Carter *et al.*, "Submarine cables and the oceans: Connecting the world," *UNEP-WCMC Biodiversity Ser.*, vol. 31, Sep. 2009, [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj6uqGd456CAxUZQvEDHRAGDBUQFnoECBsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.iscpc.org%2Fdocuments%2F%3Fid%3D132&usg=AOvVaw3NvqQm1NOjM M7GYE1Pr_q3&opi=89978449
- [9] "Submarine Power Cables State-of-the-art production facility, more than 100 years of experience and reference installations around the world." [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/394154709/Submarine-Power-Cables-State-Of-The-Art-Production-Facility-More-Than-100-Years-of-Experience-and-Reference-Installations-Around-the-World>

- [10] M. Kaufman, "Burying power cables at sea could help the U.S. harness wind and wave energy," August 19, 2014. Accessed: Sep. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/140819-submarine-power-cables-offshore-wind>
- [11] V. Vahedy, "Polymer insulated high voltage cables," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 22, no. 3, pp. 13–18, 2006, doi: 10.1109/MEI.2006.1639025.
- [12] "EFFICIENT ELECTRICAL ENERGY TRANSMISSION AND DISTRIBUTION INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION." [Online]. Available: <https://shorturl.at/ryQV0>
- [13] H. A. Wheeler, "Formulas for the Skin Effect," *Proceedings of the IRE*, vol. 30, no. 9, pp. 412–424, 1942, doi: 10.1109/JRPROC.1942.232015.
- [14] "Skin effect." Accessed: Sep. 21, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect
- [15] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics manual v4.2," 2018. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiW06ah5J6CAxXuS_EDHRicAMYQFnoECBkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.femm.info%2FArchives%2Fdoc%2Fmanual42.pdf&usg=AOvVaw3kCOMBs5ltVzzfY_69tjMr&opi=89978449
- [16] M. A. Prša, K. K. Kasaš-Lažetić, and N. D. Mučalica, "Skin effect and proximity effect in a real, high voltage, double three-phase system," in *2011 IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool*, 2011, pp. 1–4. doi: 10.1109/EUROCON.2011.5929245.
- [17] Stan Zurek, "Proximity effect," *Encyclopedia Magnetica*. Accessed: Sep. 21, 2023. [Online]. Available: https://e-magnetica.pl/doku.php/proximity_effect