



**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

“ΕΠΙΔΡΑΣΗ Η/Μ ΠΕΔΙΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ”



Επιβλέπων καθηγητής: Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος

Σπουδαστής: Βαρουξής Δημήτριος

Α.Μ.: 29940

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

Copyright © Α. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

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 Α. Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου, και ιδιαίτερα τον κύριο Ψωμόπουλο για τις χρήσιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του, την οικογένειά μου που τόσα χρόνια με στήριξε ανιδιοτελώς, και τους συμφοιτητές μου Πολίτη Μελέτιο και Αυγούλη Γεώργιο για τη σημαντική τους βοήθεια σε δύσκολες στιγμές καθώς και για τη βιβλιογραφία που μου παρείχαν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	i
Περιεχόμενα	iii
Λίστα σχημάτων	iv
Λίστα πινάκων	v
Summary	vvi
Πρόλογος	7
1 ^ο Κεφάλαιο “Γενικά περί Η/Μ πεδίων και κυμάτων”	9
1.1 Ηλεκτρομαγνητισμός.....	9
1.1.1 Χαρακτηριστικά Η/Μ κυμάτων	9
1.1.2 Διάδοση Η/Μ κυμάτων.	12
1.1.2.1 Ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα, απώλειες ακτινοβολίας.....	13
1.1.3 Εξισώσεις Maxwell, Ampere, Faraday, Biot-Savart για τον ηλεκτρομαγνητισμό..	14
1.1.3.1 Αυτεπαγωγή-Νόμος Faraday.....	14
1.1.3.2 Νόμος Biot-Savart.....	15
1.1.3.3 Νόμος Ampere.....	16
1.1.3.4 Εξισώσεις του Maxwell.....	17
2 ο Κεφάλαιο “Περί εναλλασσομένου ρεύματος”	19
2.1 Ιδιότητες Ε.Ρ	19
2.1.1 Αρμονικές	20
2.1.1.1 Επιδράσεις αρμονικών στα συστήματα μεταφοράς	21
2.1.1.2 Μη γραμμικά φορτία.....	23
2.2 Αντιμετώπιση και αξιολόγηση αρμονικών.....	24
2.2.1 Μείωση αρμονικών ρευμάτων μη γραμμικών φορτίων.....	24
2.3 Απώλειες σε αγωγούς λόγω αρμονικών	26
2.3.1 Συντονισμός.....	27
2.3.1.1 Μηχανική καταπόνηση λόγω συντονισμού.	28
3 ο Κεφάλαιο “Αγωγοί”	31
3.1 Αγωγοί	31
3.1.1 Χαρακτηριστικά αγωγών, χημικές ιδιότητες, υπόβαθρο.....	31
3.1.2 Χαλκός	34
3.1.3 Αλουμίνιο.....	35
3.1.4 Χάλυβας.....	35
3.2 Οι κυριότεροι τύποι γραμμών μεταφοράς.....	35
3.2.1 ACSR.	35
3.2.2 AAC	36
3.2.3 AAAC.....	37
3.3 Διαφορές μεταξύ των αγωγών	37
3.4 Γραμμές μεταφοράς.....	39
3.4.1 Εναέρια γραμμές μεταφοράς	39
3.4.2 Μαγνητικά πεδία γύρω από αγωγούς-αντιμετάθεση φάσεων	43
3.4.3 Υπόγειες γραμμές μεταφοράς	49
3.4.4 Συμπακτωμένοι αγωγοί.....	52
3.4.5 Ηλεκτρικά πεδία γύρω από αγωγούς. Στατικά πεδία, νόμος Coulomb.....	54

3.4.5.1 Προσδιορισμός ηλεκτρικού πεδίου γύρω από συμπαγή κυλινδρικό αγωγό.....	55
3.4.5.2 Προσδιορισμός ηλεκτρικού πεδίου σε σύστημα Μ κυλινδρικών αγωγών.....	57
4 ο Κεφάλαιο “Φαινόμενα που επιδρούν στους αγωγούς”.....	59
4.1 Επιδερμικό φαινόμενο (skin effect).....	59
4.1.1 Το επιδερμικό φαινόμενο σε αγωγούς.....	59
4.2 Μαγνητική πίεση	63
4.3 Επαγωγικές αντιδράσεις σε γραμμές μεταφοράς	64
4.3.1 Αυτεπαγωγή γραμμής μεταφοράς.....	64
4.3.1.1 Υπολογισμός αυτεπαγωγής συμπαγούς κυλινδρικού αγωγού	65
4.3.1.2 Εσωτερική, εξωτερική, και συνολική αυτεπαγωγή αγωγού σε μονοφασικό κύκλωμα δύο αγωγών με ομόρροπο ρεύμα	68
4.3.1.3 Αυτεπαγωγή λειτουργίας τριφασικής γραμμής απλού κυκλώματος με έναν αγωγό και με δέσμη αγωγών ανά φάση	68
4.4 Απώλειες Corona-ηλεκτροστατικό πεδίο.....	69
4.4.1.Υπολογισμός μέγιστης έντασης ηλ.πεδίου στους αγωγούς	69
4.4.1.1 Πεδίο σε αγωγό τριφασικής γραμμής με έναν αγωγό ανά φάση	69
4.4.1.2 Πεδίο τριφασικής γραμμής με δέσμες n αγωγών ανά φάση	70
4.5 Διείσδυση Η/Μ πεδίων και κυμάτων στην ύλη.....	71
4.5.1 Κεραυνοπληξία σε γραμμή μεταφοράς.....	75
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	76

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Τρόπος διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού κύματος	9
Σχήμα 1.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	10
Σχήμα 1.3 Εφαρμογές μικροκυματικού φάσματος Η/Μ ακτινοβολίας	11
Σχήμα 2.1 Κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος	19
Σχήμα 2.2 Παράδειγμα παραμόρφωσης ημιτονοειδούς τάσης λόγω ύπαρξης αρμονικών 3 ^{ης} και 5 ^{ης} σειράς	20
Σχήμα 2.3 Φόρτιση ουδέτερου σε 3Φ σύστημα με κοινό ουδέτερο και 3 πανομοιότυπα φορτία συνδεδεμένα.....	2Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 2.4 Απεικόνιση αρμονικών σε σχέση με τη θεμελιώδη συχνότητα	22
Σχήμα 2.5 Μονογραμμική απεικόνιση που δείχνει την αντίσταση του κυκλώματος παροχής ενός μη γραμμικού φορτίου για μια αρμονική σειράς h	23
Σχήμα 2.6 Προτεινόμενη διασύνδεση φορτίων για αποφυγή αρμονικών.....	24
Σχήμα 2.7 Τοποθέτηση μη γραμμικών φορτίων πλησίον της παροχής προς εξάλειψη αρμονικών.....	25
Σχήμα 2.8 Υπόδειγμα ομαδοποίησης μη γραμμικών φορτίων προς εξάλειψη αρμονικών	25
Σχήμα 2.9 Γράφημα εξάρτησης ρεύματος και απωλειών από τον παράγοντα THD.....	27
Σχήμα 2.10 RLC κύκλωμα προσέγγισης συντονισμού.....	27
Σχήμα 2.11 Διάγραμμα συστήματος με πυκνωτές διόρθωσης συντελεστού ισχύος.....	29
Σχήμα 2.12 Ισοδύναμο κύκλωμα σχήματος 2.11.....	29
Σχήμα 3.1 Αγωγός στερεής μόνωσης πολυαιθυλενίου	32
Σχήμα 3.2 Αγωγός με μόνωση ελαίου	33
Σχήμα 3.3 Δομή του αγωγού ACSR	35
Σχήμα 3.4 Τύποι ACSR αγωγών	36
Σχήμα 3.5 Πολύκλωνοι αγωγοί εναερίων γραμμών μεταφοράς.....	37
Σχήμα 3.6 Αγωγοί ACSR, ACAR.....	38
Σχήμα 3.7 Πίνακας ειδικής αγωγιμότητας διαφόρων στοιχείων	38
Σχήμα 3.8 Προσεγγιστική απεικόνιση παραμέτρων γραμμής μεταφοράς	39
Σχήμα 3.9 Ισοδύναμο κύκλωμα εναέριων γραμμών μεταφοράς <80km.....	39
Σχήμα 3.10 Ισοδύναμο κύκλωμα εναέριων γραμμών μεταφοράς μέσου μήκους (80-240km)	40
Σχήμα 3.11 Κύκλωμα απλής γραμμής με σταθερές L, R.....	40
Σχήμα 3.12 Κύκλωμα απλής γραμμής με την επιστροφή της γης θεωρούμενη ως 0.....	41
Σχήμα 3.13 Τριφασική γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με γείωση	42
Σχήμα 3.14 Ισοδύναμη απεικόνιση 3Φ συστήματος διπλής γραμμής	42
Σχήμα 3.15 Πρόσοψη γραμμής 2πλού κυκλώματος 380kV υπό πλήρες φορτίο	43
Σχήμα 3.16 Αντιμετάθεση αγωγών γραμμής μεταφοράς για μεγάλες αποστάσεις.....	44
Σχήμα 3.17 Αντιμετάθεση φάσεων σε πυλώνα μεταφοράς 2πλής γραμμής.....	44
Σχήμα 3.18 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου (kV/m) για αντιμετάθεση αγωγών σε κύκλωμα 500kV	46
Σχήμα 3.19 Κατανομή μαγνητικού πεδίου (μT) για αντιμετάθεση σε κύκλωμα 500kV ..	46

Σχήμα 3.20 Απεικόνιση διακύμανσης μαγνητικού πεδίου πλησίον γραμμής 220kV (24h)	47
Σχήμα 3.21 Τυπικές τιμές μαγνητικών πεδίων σε εναέριες γραμμές για διάφορες τάσεις	47
Σχήμα 3.22 Κατανομή μαγνητικού πεδίου με αντιμετάθεση και χωρίς αντιμετάθεση...	48
Σχήμα 3.23 Μαγνητικό πεδίο για ισορροπημένη και μη ισορροπημένη κατανομή φάσεων	48
Σχήμα 3.24 Συγκριτικά κόστη συνεχούς φόρτισης εναέριων και υπόγειων γραμμών μεταφοράς ανά χλμ. όδευσης	49
Σχήμα 3.25 Παράδειγμα τοποθέτησης αγωγών υπόγειας γραμμής	50
Σχήμα 3.26 Μαγνητικό πεδίο υπόγειας γραμμής μεταφοράς 132kV	50
Σχήμα 3.27 Μαγνητικό πεδίο υπόγειας γραμμής μεταφοράς 400kV	51
Σχήμα 3.28 Σύγκριση μαγνητικού πεδίου υπόγειας και εναέριας γραμμής μεταφοράς, για τάση 132 kV	51
Σχήμα 3.29 Διπλό κύκλωμα εν συγκρίσει με μονό, με αντιμετάθεση αγωγών και χωρίς	52
Σχήμα 3.30 Απεικόνιση της εφαρμογής του νόμου των αντιστρόφων τετραγώνων για το ηλεκτρικό πεδίο	54
Σχήμα 3.31 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m) πλησίον γρ. μεταφοράς 380kV	55
Σχήμα 3.32 Ηλεκτρικό πεδίο γύρω από συμπαγώ κυλινδρικό αγωγό	56
Σχήμα 3.33 Διάταξη m κυλινδρικών αγωγών	57
Σχήμα 4.1 Επιδερμικό φαινόμενο για κυλινδρικό αγωγό διατομής 2mm και για συχνότητες από 20 – 80kHz	62
Σχήμα 4.2 Επιδερμικό βάθος συναρτήσει της συχνότητας για διάφορα υλικά	63
Σχήμα 4.3 Τομή τμήματος κυλινδρικού αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα I	65

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Τυποποιημένες σταθερές γραμμών για αγωγούς πολυαιθυλένιου	34
Πίνακας 3.2 Τυποποιημένες σταθερές για αγωγούς ελαίου	34
Πίνακας 3.3 Γραμμές μεταφοράς διασυνδεδεμένου δικτύου σε χλμ. όδευσης	39
Πίνακας 3.4 Τύποι αντιμετάθεσης γραμμών μεταφοράς για μεγάλες αποστάσεις	44
Πίνακας 3.5 Θερμοκρασιακή σύγκριση στην κλίμακα °C του αλουμινίου συγκριτικά με αγωγούς από κράμα αλουμινίου - ζirkονίου	53
Πίνακας 3.4 Τύποι αντιμετάθεσης γραμμών μεταφοράς για μεγάλες αποστάσεις	44

SUMMARY

Electromagnetic fields and waves exist everywhere in nature in various forms. The planet produces its own electromagnetic field, depending on its diameter, circumference and its speed of rotation. Electromagnetic radiation of various characteristics exists within the limits of the atmosphere, created by cosmic radiation, the sun, and radioactive materials. Within the ionosphere, the usage of many forms of electromagnetic energy is high, from satellite transmissions and communications, to wi-fi signal and radio waves.

In a sense, one could say that the greater spectrum of today's technological progress is based upon the usage of the properties of electromagnetism. The transmission of electrical energy throughout the world, includes the study of both electric and magnetic fields, conductance effects, proximity and skin effect, and Corona discharges. The following paper will study these effects on transmission lines.

When an electromagnetic wave travels through a solid medium, its wavelength is slightly reduced. Also, an electromagnetic wave penetrates through a medium with almost no losses, when its wavelength is smaller than the length of the molecular structure of the medium. Conclusively, the smaller the wavelength, the higher the penetration. The electromagnetic spectrum of which man is familiar with, lies between 500kHz (AM radio signal) and wavelength from 100-600m, up to 300GHz and wavelength 1mm, used in telemetry and communications. Electromagnetic waves are produced and interfere in transmission and distribution lines, as an outcome of Faraday's, Ampere's and Maxwell's laws. In this paper an approach is made to understand how these fields are produced and affect the conductors and matter in general.

Keywords: Magnetic pressure, skin effect, proximity effect, harmonics, electromagnetic laws, transmission line inductance, Magnetic fields around conductors

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ηλεκτρομαγνητικά πεδία υπάρχουν παντού στη φύση και σε πολλές μορφές. Ο πλανήτης παράγει το δικό του Η/Μ πεδίο, που εξαρτάται από την διάμετρο, την περίμετρο, και την ταχύτητα περιστροφής του. Η/Μ ακτινοβολία πολλών και διαφόρων μηκών κύματος συναντάται εντός του γήινου μαγνητικού πεδίου από κοσμική και ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και εντός των ορίων της ιονόσφαιρας από ανθρώπινη χρήση (τεχνολογία Wi-Fi, κινητά τηλέφωνα, ραδιομεταδόσεις, τηλεπικοινωνίες κτλ.). Υπό μία έννοια δηλαδή, θα μπορούσε κάποιος να πει πως, το μεγαλύτερο φάσμα της σημερινής τεχνολογικής προόδου, εμπεριέχει τη χρησιμότητα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, η λειτουργία αυτή της φύσης περικλείεται στις περισσότερες δραστηριότητες του σύγχρονου ανθρώπου και του πολιτισμού που παράγει. Παρατηρώντας φαινόμενα που αφορούν στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, μπορούμε να πούμε πως υπάρχει ένα πολύ ευρύ φάσμα γνώσεων γύρω από αυτά.

Όταν ένα Η/Μ κύμα ταξιδεύει σε ένα μέσο που εμπεριέχει στερεά ύλη, το μήκος κύματός του μειώνεται ελαφρά. Επίσης, ένα Η/Μ κύμα διεισδύει ή διαπερνά ένα υλικό μέσο χωρίς σχεδόν καθόλου απώλειες, όταν το μήκος κύματός του είναι ίσο ή μικρότερο από το μήκος της μοριακής δομής του πλέγματος του υλικού αυτού μέσου. Συμπερασματικά, όσο μικρότερο το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη η διεισδυτικότητα.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του οποίου μέρη ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται και χρησιμοποιεί, κυμαίνεται από τιμές των 500kHz (AM radio signal) και μήκος κύματος 100-600m, μέχρι 300GHz και μήκος κύματος 1mm, σε εφαρμογές τηλεμετρίας και τηλεπ/νιών. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται και επιδρούν στους αγωγούς μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, σαν απόρροια των νόμων των Faraday, Ampere και Maxwell. Στην παρούσα πτυχιακή γίνεται μία προσέγγιση στο πώς τα πεδία παράγονται και επιδρούν στους αγωγούς και κατ'επέκταση στην ύλη.

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εμπεριέχει μελέτη των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, φαινομένων χωρητικότητας και αυτεπαγωγής που επιδρούν στους αγωγούς, έτσι ώστε να επιτευχθεί με λιγότερες απώλειες. Απώλειες λόγω επιδερμικού φαινομένου, φαινομένου γειννίασης και αλληλεπαγωγής των αγωγών που μεταφέρουν ρεύμα ή των εκκενώσεων Corona. Στις επιρροές αυτών θα εντυφλήσουμε παρακάτω.

Λέξεις κλειδιά: Επίδραση Η/Μ πεδίων σε γραμμές μεταφοράς, ηλεκτρικά πεδία γύρω από γραμμές μεταφοράς, μαγνητικά πεδία γύρω από γραμμές μεταφοράς, μαγνητική πίεση, επιδερμικό φαινόμενο, αρμονικές, Νόμοι ηλεκτρομαγνητισμού, φαινόμενο Corona, αυτεπαγωγή γραμμής μεταφοράς

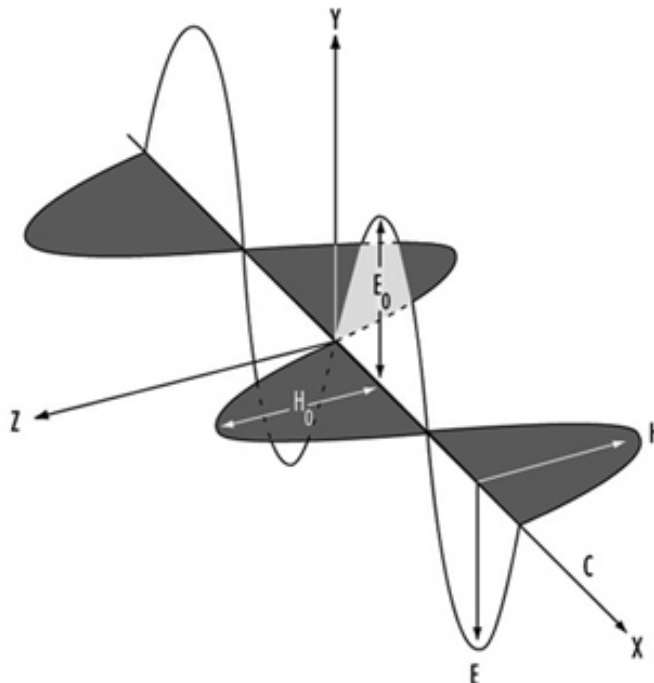
1^ο Κεφάλαιο

“Γενικά περί Η/Μ πεδίων και κυμάτων”

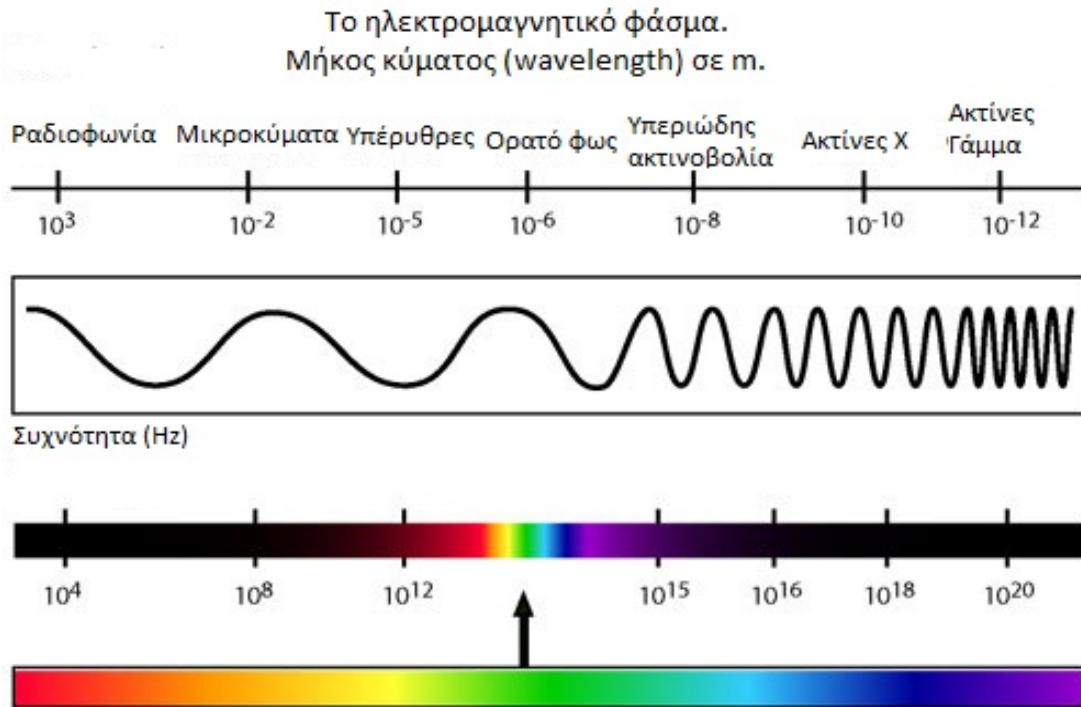
1.1 Ηλεκτρομαγνητισμός

1.1.1.Χαρακτηριστικά Η/Μ κυμάτων

Σύμφωνα με τον Maxwell, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δημιουργείται από παλλόμενο ηλεκτρικό φορτίο αλλά και γενικότερα απο κάθε φορτίο με επιτάχυνση. Ένα Η/Μ κύμα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό (E_0) και ένα μαγνητικό (H_0) πεδίο που βρίσκονται σε φάση μεταξύ τους και στο κενό ταξιδεύουν με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός. Οποιαδήποτε Η/Μ ακτινοβολία, αποτελείται απο δύο πεδία ενέργειας, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό, τα οποία ταξιδεύουν στον χώρο και στον χρόνο ακολουθώντας τον νόμο του ημιτόνου, και έχοντας κάθετη μεταξύ τους κλίση διεύθυνσης και ίδια κατεύθυνση. Η συχνότητα με την οποία πάλλεται το Η/Μ κύμα στον χώρο, είναι ίδια με την συχνότητα του παλλόμενου ηλεκτρικού φορτίου που το δημιούργησε. Για τιμές συχνότητας κάτω των 300MHz, τα δύο πεδία μπορούν να αναλυθούν χωριστά. Τα σωματίδια που μεταφέρουν την Η/Μ ακτινοβολία ονομάζονται κβάντα, από τον Γερμανό φυσικό Max Planck. Εξετάζοντας τον ηλεκτρομαγνητισμό από τη σκοπιά της υλικής δομής, αναφερόμαστε σε Η/Μ πεδία. Εξετάζοντας τον τρόπο διάδοσης, αναφερόμαστε σε Η/Μ κύμα, και αντίστοιχα από τη σκοπιά της ενέργειας αναφερόμαστε σε Η/Μ ακτινοβολία. Ανάλογα με τη συχνότητα της Η/Μ ακτινοβολίας, αυτή χωρίζεται σε μικροκύματα, ραδιοκύματα, υπέρυθρη και υπεριώδη ακτινοβολία, ορατό φως, ακτίνες X και ακτινοβολία Γάμμα.



Σχήμα 1.1. Τρόπος διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

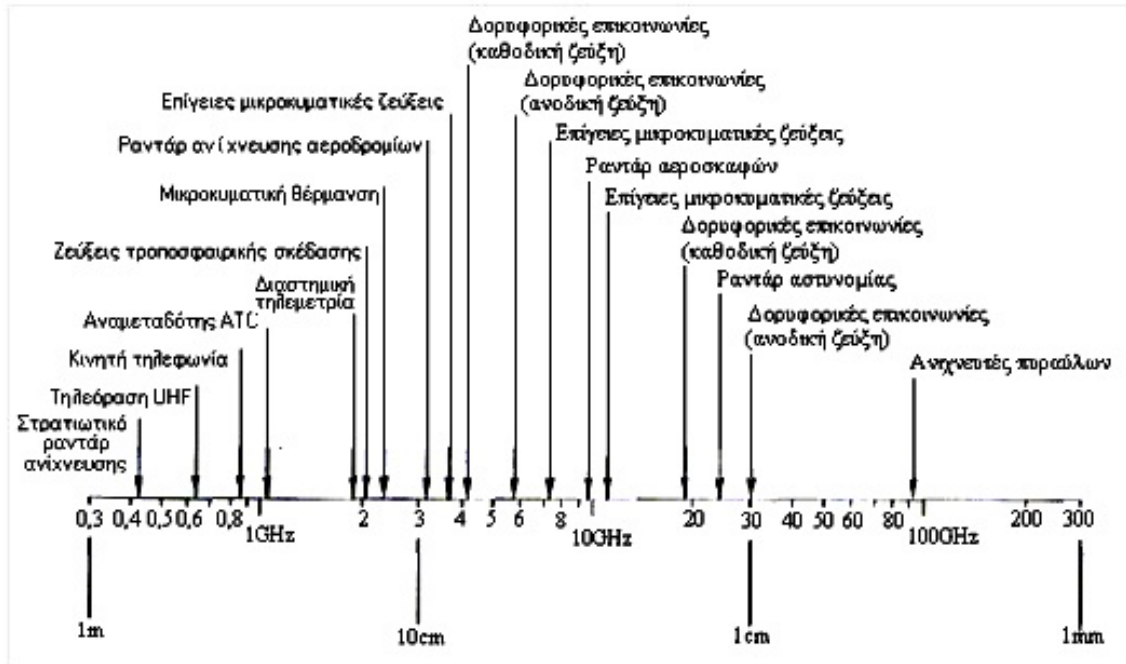


Σχήμα 1.2. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε δύο περιοχές: Την ιονίζουσα και τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία.

Υψηλόσυχη (ή ιονίζουσα) ακτινοβολία έχουμε σε συχνότητες $> 300\text{MHz}$. Η ιονίζουσα ακτινοβολία μεταφέρει υψηλή ενέργεια, έχει υψηλότερη συχνότητα και μικρότερο μήκος κύματος. Υπάρχει ισχυρή σύνδεση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου (μετρώντας το ένα γνωρίζουμε την τιμή του άλλου.) Συμπεριλαμβάνει τις ακτίνες X, Γάμμα (ραδιενέργεια), τις υπεριώδεις ηλιακές ακτίνες, και την κοσμική ακτινοβολία. Αυτή η ακτινοβολία είναι κατά κανόνα επικίνδυνη για τον άνθρωπο, αφού μπορεί να προκαλέσει ιονισμό (διάσπαση των δεσμών του DNA των κυττάρων του ανθρώπου.) Πηγές ιονίζουσας ακτινοβολίας είναι: το ραδιενεργό αέριο ραδόνιο, το υπέδαφος εξαιτίας των ραδιενεργών του συστατικών, οθόνες καθοδικού σωλήνα, μηχανήματα εκπομπής ακτίνων X όπως ιατρικά μηχανήματα ή μηχανήματα σάρωσης αποσκευών, πυρηνικοί αντιδραστήρες, φωσφορίζοντα ρολόγια, τυχόν ραδιενεργά οικοδομικά υλικά όπως σπλισμός σκυροδέματος, τσιμέντο, γρανίτης, παρκέ.

Χαμηλόσυχη (μη ιονίζουσα) ακτινοβολία έχουμε σε συχνότητες $< 300\text{MHz}$. Η μη ιονίζουσα ακτινοβολία μεταφέρει σχετικά μικρή ενέργεια, έχει μικρότερη συχνότητα και μεγαλύτερο μήκος κύματος. Η ενέργεια που μεταφέρει δεν είναι ικανή να προκαλέσει ιονισμό, δηλαδή να διασπάσει χημικούς δεσμούς στα μόρια των κυττάρων. Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ραδιοτηλεοπτικούς πομπούς, κεραιές κινητής τηλεφωνίας, ραντάρ, ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο δεν είναι συνδεδεμένα ισχυρά, και πρέπει να μετρηθούν και τα δύο. Η χαμηλόσυχη (μη ιονίζουσα) ακτινοβολία συναντάται σε οποιονδήποτε αγωγό βρίσκεται υπό τάση (ηλεκτρικά πεδία), και οποιονδήποτε αγωγό διαρρέεται από ρεύμα (ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία). Πηγές χαμηλόσυχης μη ιονίζουσας ακτινοβολίας είναι: Όλες οι ηλεκτρικές συσκευές, οι αγωγοί μεταφοράς ρεύματος, οι Μ/Σ της Δ.Ε.Η., οι υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης, οι Μ/Σ συσκευών, οι ηλεκτρικοί πίνακες, λάμπες οικονομίας, ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.



Σχήμα 1.3. Εφαρμογές μικροκυματικού φάσματος Η/Μ ακτινοβολίας από 300Hz έως 300GHz

Τα Η/Μ κύματα μπορούν γενικά να περιγραφούν απο τρεις φυσικές ιδιότητες.

Αυτές είναι :

- Η συχνότητα f
- Το μήκος κύματος λ
- Η ενέργεια φωτονίου (ή κβάντα) E (η ενέργεια που μεταφέρει το κύμα)

Για οποιοδήποτε είδος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις εισηγμένες από τον Max Planck:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.2) \quad (\text{σχέση του Planck για ένα φωτόνιο})$$

Όπου:

$c = 299.792.458 \text{ m/sec}$,η ταχύτητα του φωτός στο κενό

$h = 4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$ η σταθερά του Planck

λ : το μήκος κύματος

f : η συχνότητα

E : η ενέργεια ανά φωτόνιο

Το μήκος κύματος συχνά αναφέρεται και σε Angstrom (\AA) : $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

Σε εφαρμογές όπου η συχνότητα εκφράζεται με radians (γωνιακή συχνότητα ω) αντί για κύκλους ανά δευτερόλεπτο, είναι χρήσιμο να ενσωματώσουμε τον παράγοντα 2π στη σταθερά του Planck. Η σταθερά που προκύπτει ονομάζεται μειωμένη σταθερά του Planck, και είναι ίση με $h/2\pi$. Συμβολίζεται με \hbar . Η ενέργεια ενός φωτονίου με γωνιακή συχνότητα ω , όπου $\omega = 2\pi f$, δίνεται από τη σχέση:

$$E = \hbar \cdot \omega \quad (1.3)$$

1.1.2. Διάδοση Η/Μ κυμάτων

Ας υποθέσουμε ότι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα σε ένα μέσο μπορεί να «παγώσει» σε κάποια χρονική στιγμή και το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο μπορούν να «μετρηθούν». Αυτό είναι ένα φανταστικό πείραμα που δεν μπορεί να εκτελεστεί στην πραγματικότητα. Αποδεικνύεται ότι οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου (E) και του μαγνητικού πεδίου (H) ενός κύματος δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Ο λόγος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου H είναι γνωστός ως η χαρακτηριστική αντίσταση (ή αντίσταση κύματος), Z_0 του μέσου:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.4)$$

Για τον ελεύθερο χώρο έχουμε: $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377 \Omega$

Το μέγεθος E , τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, εκφράζεται σε Volt/m. Το μέγεθος H , η ένταση του μαγνητικού πεδίου, εκφράζεται αντίστοιχα σε A/m. Εύκολα διαπιστώνουμε ότι το μέγεθος E/H εκφράζεται σε Ω και δηλώνει την ισοδύναμη αντίσταση του κενού. Όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούσει σε κάποιο άτομο, τα δύο συνδυαζόμενα πεδία μπορούν να προσφέρουν μεταφερόμενη ενέργεια σε ένα ηλεκτρόνιο των στοιβάδων του ατόμου, με αποτέλεσμα να το εξαναγκάσουν να μεταπηδήσει σε ανώτερη ενεργειακή στάθμη. Αν η διάδοση δε γίνεται στο κενό, αλλά σε άλλο μέσο, για παράδειγμα, σε υγρό, σε γυαλί ή σε καλώδιο, η ταχύτητα είναι διαφορετική και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1.5)$$

Όπου ϵ η διηλεκτρική σταθερά του υλικού, c_m η ταχύτητα στο μέσο διάδοσης, c η ταχύτητα του φωτός. Η ταχύτητα ενός Η/Μ κύματος ισούται με :

$$v = f \cdot \lambda \quad (1.6)$$

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που ταξιδεύει στο κενό στον άξονα x , περιγράφεται από την εξίσωση

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ταξιδεύουν κάθετα στη διεύθυνση μετάδοσης x .

Για το ηλεκτρικό πεδίο ενός επίπεδου Η/Μ κύματος ισχύει :

$$E = E_m \sin(kx - \omega t) \quad (1.8)$$

Για το μαγνητικό πεδίο ενός επίπεδου Η/Μ κύματος ισχύει :

$$B = B_m \sin(kx - \omega t) \quad (1.9)$$

Η ενέργεια που μεταφέρει ένα Η/Μ κύμα ισούται με :

$$S = \frac{1}{c\mu_0} \cdot \frac{E^2}{2} \quad (1.10)$$

Όπου $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού

Όταν δημιουργείται ένα φορτίο, το ηλεκτρικό πεδίο αρχίζει να διαδίδεται προς τα έξω με πεπερασμένη ταχύτητα που είναι η ταχύτητα του φωτός. Στο κενό ή τον αέρα, η ταχύτητα του φωτός είναι $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Σε ένα μέσο, η ταχύτητα του φωτός αλλάζει κατά μία ποσότητα και γενικά δηλώνεται ως v . Αν το υλικό έχει ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα ϵ και μ αντίστοιχα, η ταχύτητα v δίνεται ως εξής:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.11)$$

Στο κενό, η ταχύτητα του φωτός είναι:

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (1.12)$$

1.1.2.1. Ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα, απώλειες ακτινοβολίας

Η ικανότητα παραγωγής ενός ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου μέσα σε ένα ορισμένο μέσο, εξαρτάται από τις διηλεκτρικές ή μαγνητικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες δίνονται από την ηλεκτρική διαπερατότητα ϵ , που περιγράφει πόσο εύκολα το υλικό μπορεί να πολωθεί, δηλαδή πόσο εύκολα τα φορτία εντός του υλικού μπορούν να μετατοπιστούν όταν εφαρμόζεται μία τάση (ή ηλεκτρικό πεδίο).

Στο κενό ή στον αέρα, η τιμή της ηλεκτρικής διαπερατότητας είναι $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$. Οι διαπερατότητες όλων των άλλων υλικών συνήθως εκφράζονται ως ένα γινόμενο του ϵ_0 και ενός αριθμητικού παράγοντα που είναι γνωστός ως η διηλεκτρική σταθερά ϵ_r ($\epsilon_r = 1$ για το κενό). Επομένως η διηλεκτρική σταθερά ενός συγκεκριμένου υλικού είναι $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$.

Κατά τον ίδιο τρόπο, οι μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού περιγράφονται από την μαγνητική διαπερατότητα μ . Για το κενό ή τον αέρα έχουμε $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. Οι μαγνητικές διαπερατότητες των άλλων υλικών δίνονται ως $\mu = \mu_r \mu_0$ όπου το μ_r είναι ένας καθαρός αριθμός γνωστός ως σχετική μαγνητική διαπερατότητα ($\mu_r = 1$ για το κενό).

Στην ηλεκτρονική χαμηλών συχνοτήτων, τα ηλεκτρικά σήματα ταξιδεύουν από το ένα στοιχείο στο άλλο μέσω συνδετικών καλωδίων. Η απώλεια ισχύος στα καλώδια είναι συνήθως ωμική. Καθώς η συχνότητα αυξάνει, οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας και οι διηλεκτρικές απώλειες γίνονται σημαντικές.

Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι ενέργεια που ακτινοβολείται ως αποτέλεσμα του ότι ένα καλώδιο λειτουργεί όπως μία κεραία. Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας σχετίζονται με τη συχνότητα και την ισχύ των σημάτων που μεταφέρονται στα καλώδια. Στις διηλεκτρικές απώλειες, τα επαγόμενα επιφανειακά φορτία στο διηλεκτρικό που οφείλονται στη μεταβολή της τάσεως μεταξύ π.χ. του κεντρικού αγωγού και του εξωτερικού αγωγού ενός ομοαξονικού καλωδίου, καταναλώνουν ενέργεια. Οι διηλεκτρικές απώλειες σχετίζονται με τη διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού, την τάση μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού αγωγού και τη συχνότητα του σήματος. Οι διηλεκτρικές απώλειες σε ομοαξονικά καλώδια γίνονται σημαντικές για συχνότητες άνω των 10 GHz .

1.1.3. Εξισώσεις Maxwell, Ampere, Faraday, Biot-Savart για τον ηλεκτρομαγνητισμό

1.1.3.1. Αυτεπαγωγή – νόμος Faraday

Γνωρίζουμε πως η ροή ρεύματος σε οποιονδήποτε αγωγό δημιουργεί γύρω από τον αγωγό ένα μαγνητικό πεδίο. Συμπερασματικά, οποιοσδήποτε αγωγός σε ένα κύκλωμα συμπεριφέρεται σαν πηνίο. Αυτό το πόρισμα προκύπτει από τον νόμο του Faraday, ο οποίος αναφέρεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής σε ένα πηνίο. Σαν αυτεπαγωγή ορίζουμε την συμπεριφορά ενός πηνίου όταν το ρεύμα που το διαπερνά αυξομειώνεται. Συμπερασματικά από τον νόμο του Faraday, η αυτεπαγωγή μπορεί να προσδιοριστεί ως το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται, ώστε να εξουδετερώσει οποιαδήποτε αλλαγή στην τιμή του ρεύματος που διαπερνά το πηνίο. Δηλαδή, η επαγόμενη τάση σε ένα κλειστό κύκλωμα, είναι ίση με τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής. Ο νόμος της επαγωγής, αναφέρεται στη μαγνητική ροή Φ_B διά μέσω μιας υποθετικής κινούμενης επιφάνειας Σ η οποία καταλήγει σε ένα πηνίο. Η μαγνητική ροή προκύπτει σε μορφή ολοκληρώματος της μαγνητικής επαγωγής στην επιφάνεια αυτή (επιφανειακή).

$$\Phi_B = \iint_{\Sigma(t)} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{A} \quad (1.13)$$

Όπου \mathbf{B} το μαγνητικό πεδίο, $d\mathbf{A}$ ένα στοιχείο της κινούμενης περιοχής $\Sigma(t)$, και $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ το γινόμενο του απειροστικού λογισμού της ποσότητας της μαγνητικής ροής. Οι αγωγοί που μεταφέρουν ρεύμα, δέχονται επιδράσεις από εξωτερικούς παράγοντες, αλλά και από την ίδια την αυτεπαγωγή που προκαλείται στο εσωτερικό τους σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό. Ο νόμος του Faraday μας δείχνει πώς μπορεί να αναπτυχθεί μια διαφορά δυναμικού από μία μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, και έχει αντίκτυπο και στους αγωγούς.

Αυτό πρακτικά σημαίνει πως δημιουργούνται φαινόμενα στο εσωτερικό τους, τα οποία επηρεάζουν την λειτουργία τους και κατ' επέκταση το κόστος και την ευκολία μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Το αντίρροπο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται σε έναν αγωγό, με την τροποποίηση του Maxwell, δίνεται από τη σχέση :

$$E = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1.14)$$

Όπου E είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη και Φ_B η μαγνητική ροή σε Weber.

$$1 \text{ Tesla} = 1 \text{ Weber/m}^2$$

Η μεταβολή της μαγνητικής ροής με το χρόνο προκαλείται με τρεις τρόπους:

1. Με τη χρήση σταθερού βρόχου σε ένα μεταβαλλόμενο στο χρόνο μαγνητικό πεδίο.
2. Με τη χρήση ενός εμβαδού που μεταβάλλεται με το χρόνο μέσα σε ένα στατικό μαγνητικό πεδίο.
3. Με τη χρήση ενός εμβαδού που μεταβάλλεται με το χρόνο μέσα σε ένα μεταβαλλόμενο στο χρόνο μαγνητικό πεδίο.

1.1.3.2. Νόμος Biot-Savart

Ο νόμος αυτός, συσχετίζει τα μαγνητικά πεδία με τα ρεύματα που τα δημιουργούν. Η εύρεση του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από κάποια κατανομή πυκνότητας ρεύματος, είναι ένα διανυσματικό μέγεθος.

Το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σε ένα σημειακό ρεύμα, δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I d\vec{L} \times \vec{r}}{4\pi r^2} \quad (1.15)$$

Όπου: $d\vec{L}$ μήκος του αγωγού που μεταφέρει το ρεύμα I ,
 \vec{r} διανυσματική μονάδα που δείχνει την κατεύθυνση μέχρι το σημείο επιρροής του πεδίου.

Η γενική έκφραση του νόμου των Biot – Savart για το μαγνητικό πεδίο:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (1.16)$$

Όπου $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

1.1.3.3. Νόμος Ampere

Ο νόμος του Ampere συσχετίζει τα μαγνητικά πεδία με τα ηλεκτρικά ρεύματα που τα δημιουργούν, με την προϋπόθεση πως δεν υπάρχει χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Ο νόμος είναι σωστός μόνο για περιπτώσεις στατικής κατάστασης. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις ο νόμος χρησιμοποιείται με την προσθήκη του ρεύματος μετατόπισης του Maxwell.

Το μαγνητικό πεδίο ενός ίσιου αγωγού απείρου μήκους, μπορεί να υπολογιστεί με τον νόμο του Ampere.

$$\nabla \cdot H = J + \left(\varepsilon \cdot \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (1.17)$$

Ο παράγοντας $\frac{d\theta}{dt}$ ονομάζεται ρεύμα μετατόπισης και είναι η προσθήκη του Maxwell στον παραπάνω νόμο. Αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως J_D .

Το νόημα του ρεύματος μετατόπισης, είναι ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, παράγει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο με τη σειρά του προκαλεί ροή ηλεκτρονίων.

Σε περίπτωση στατικού ηλεκτρικού πεδίου, το γραμμικό ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου γύρω από έναν βρόγχο είναι ανάλογο του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον βρόχο.

$$\nabla \cdot B = J \frac{4\pi k}{c^2} + \frac{\partial E}{\partial t} \cdot \frac{1}{c^2} \quad (1.18)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (1.19)$$

$$k = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \quad (1.20)$$

Τα στατικά ηλεκτρικά πεδία, δεν παράγουν μαγνητικό πεδίο. Ωστόσο, όταν το στατικό φορτίο αποφορτιστεί σε έναν σπινθήρα, το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον σπινθήρα μπορεί να είναι μεγάλης έντασης. Σύμφωνα με το νόμο του Coulomb, το μέγεθος της ηλεκτροστατικής δύναμης αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο σημειακών φορτίων είναι ανάλογο με το γινόμενο των τιμών των δύο σημειακών φορτίων, και αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ τους. Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί, πως στα δυναμικά Η/Μ πεδία, οι τιμές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα, λειτουργούν σαν τιμές χρονικά μεταβαλλόμενες. Η μελέτη των επιπτώσεων στους αγωγούς μεταφοράς ρεύματος, πραγματοποιείται με την παραπάνω παραδοχή, αφού ένας αγωγός πάντα λειτουργεί υπό χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία ανεξάρτητα από τη συχνότητα.

1.1.3.4. Εξισώσεις του Maxwell

Τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων βασίζονται στις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες συσχετίζουν την πυκνότητα ηλεκτρικής ροής \mathbf{D} , την πυκνότητα μαγνητικής ροής \mathbf{B} , την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} και την ένταση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} με την πυκνότητα της εντάσεως του ρεύματος \mathbf{J} και την πυκνότητα φορτίου ρ :

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.21)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.22)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.23)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.24)$$

Όπου :

E η ηλεκτρική πεδιακή ένταση

H η μαγνητική πεδιακή ένταση

μ η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου

ε η διηλεκτρική σταθερά του μέσου

σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου

Η πρώτη εξίσωση του Maxwell μας λέει ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο έχει σαν αποτέλεσμα ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και είναι γνωστή ως νόμος του Faraday. Η δεύτερη εξίσωση δηλώνει ότι ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο έχει σαν αποτέλεσμα ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Η τρίτη εξίσωση δηλώνει ότι η μορφή, η ένταση και η διεύθυνση του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου καθορίζονται από τη γεωμετρική κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων που παράγουν το πεδίο. Τέλος, η τέταρτη εξίσωση μας λέει ότι το μαγνητικό πεδίο ακολουθεί έναν κλειστό βρόχο.

Για τη μελέτη των μεγεθών του πεδίου στον ατμοσφαιρικό αέρα που περιβάλλει τις γραμμές μεταφοράς, ισχύει για τις σταθερές :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Προκύπτει πως για την συχνότητα των 50Hz στην οποία λειτουργούν οι γραμμές μεταφοράς, δεν υπάρχει ζεύξη μεταξύ των δύο πεδιακών εντάσεων, οπότε πρακτικά δεν υπάρχει Η/Μ πεδίο, αλλά δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους πεδία, το ηλεκτρικό, που εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής, και το μαγνητικό, που εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ του αέρα είναι πρακτικά μηδενική οπότε και μηδενίζεται ο αντίστοιχος όρος στη 2^η εξίσωση του Maxwell. Οι εξισώσεις παίρνουν τη μορφή:

$$\nabla \times E \cong 0 \quad (1.25)$$

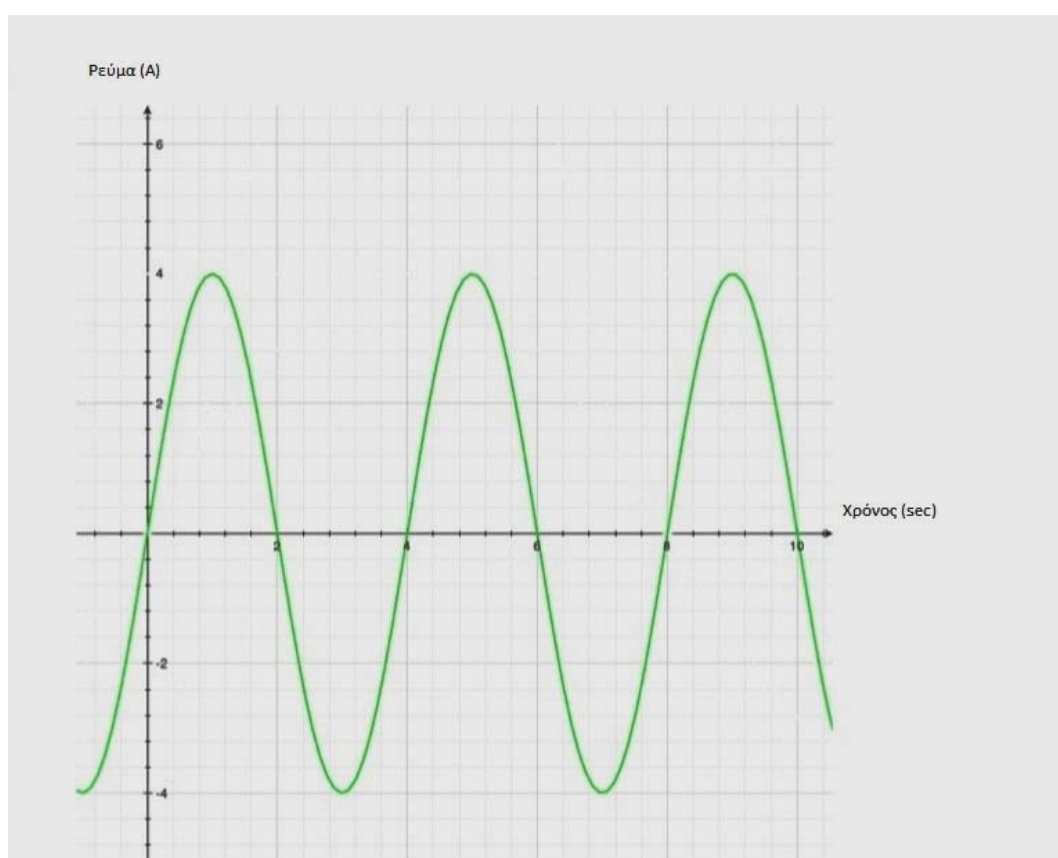
$$\nabla \times H \cong 0 \quad (1.26)$$

2^ο Κεφάλαιο

“Περί εναλλασσομένου ρεύματος”

2.1. Οι ιδιότητες του Ε.Ρ.

Το εναλλασσόμενο ρεύμα (σε συντομία Α.Σ.) ανακαλύφθηκε από τον Nikola Tesla περί τα τέλη του περασμένου αιώνα. Αναφερόμενοι στο Ε.Ρ. θα πρέπει να το προσδιορίσουμε με όρους συχνότητας και έντασης. Η έντασή του έχει άμεση σχέση με την ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας. Εξίσου σωστό είναι να χρησιμοποιηθεί και ο όρος πυκνότητα ρεύματος J.



Σχήμα 2.1. Κυματομορφή εναλλασσομένου ρεύματος

Κατά την ανάλυση των συστημάτων μεταφοράς, μπορούμε να θεωρήσουμε δύο ξεχωριστά πεδία, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Το εναλλασσόμενο ρεύμα όπως φαίνεται και στο σχήμα, εναλλάσσεται σε πολικότητα με την πάροδο του χρόνου και η καθιερωμένη συχνότητα λειτουργίας των συστημάτων είναι στην Ευρώπη και στις ανατολικές χώρες τα 50Hz, ενώ στην Αμερική είναι τα 60Hz. Για τις συχνότητες αυτές οι μεταβολές της ηλεκτρικής και της μαγνητικής πεδιακής έντασης με τον χρόνο μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές, αφού αποκτούν εξαιρετικά χαμηλές τιμές. Κατά την παραγωγή του εναλλασσομένου ρεύματος, η τάση που παράγεται από τα σταθερά πηνία από την κίνηση του περιστρεφόμενου

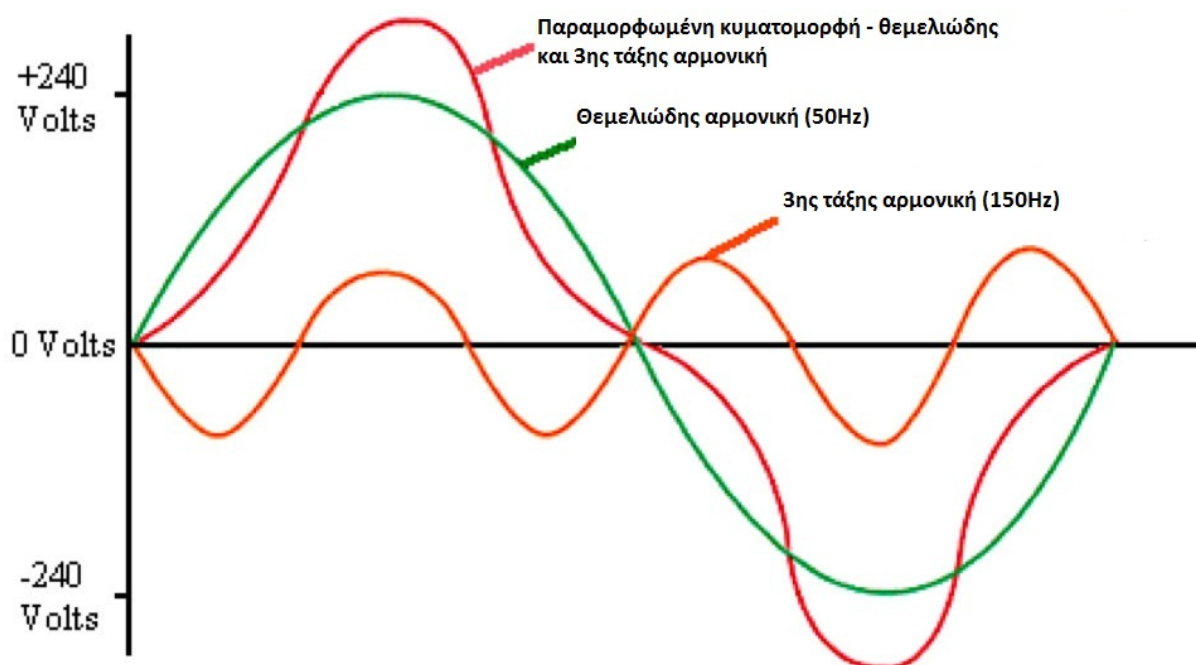
μαγνήτη, είναι ανάλογη του ρυθμού με τον οποίο η μαγνητική ροή αλλάζει κάθετα στα πηνία (νόμος επαγωγής του Faraday). Αυτή η αναλογία είναι μεγαλύτερη όταν οι μαγνητικοί πόλοι είναι πιο κοντά στα πηνία, και ελαχιστοποιείται όταν οι μαγνητικοί πόλοι είναι πιο μακριά. Μαθηματικά, η αναλογία της μεταβολής της μαγνητικής ροής εξαιτίας ενός περιστρεφόμενου μαγνήτη, ακολουθεί τον νόμο του ημιτόνου. Έτσι, και η τάση που παράγεται από τα πηνία ακολουθεί την ίδια λειτουργία.

2.1.1. Αρμονικές.

Τα προηγούμενα χρόνια, τα περισσότερα φορτία ήταν γραμμικά (επαγωγικοί κινητήρες, λαμπτήρες πυρακτώσεως, αντιστάσεις θέρμανσης). Σήμερα όμως χρησιμοποιούνται φορτία μη γραμμικά, τα οποία όταν συνδέονται με μια πηγή τάσης ημιτονοειδούς μορφής, άγουν ρεύματα μη ημιτονοειδούς μορφής. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μόλυνση του δικτύου με αρμονικές, και ειδικότερα με συνιστώσες του ρεύματος σε συχνότητες πολλαπλάσιες των 50Hz (3^{ης}, 5^{ης}, 7^{ης} τάξης αρμονικές), οι οποίες διαρρέουν τα καλώδια τροφοδοσίας των δικτύων και επηρεάζουν ολόκληρη την εγκατάσταση.

Οι εναλλαγές της τάσης και του φορτίου προκαλούν αλλαγή στη συχνότητα του ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί μια σύνθετη κυματομορφή, και όχι την επιθυμητή ημιτονοειδή.

Η σύνθετη κυματομορφή που προκύπτει μπορεί να περιγραφεί προσδιορίζοντας τις επιμέρους κυματομορφές χωριστά και να αναλυθεί χρησιμοποιώντας σειρές Fourier. Οι παράγοντες κάθε κυματομορφής μπορούν να προσδιοριστούν με όρους DC ρεύματος, και η συχνότητα με τιμές από 0 έως άπειρο.

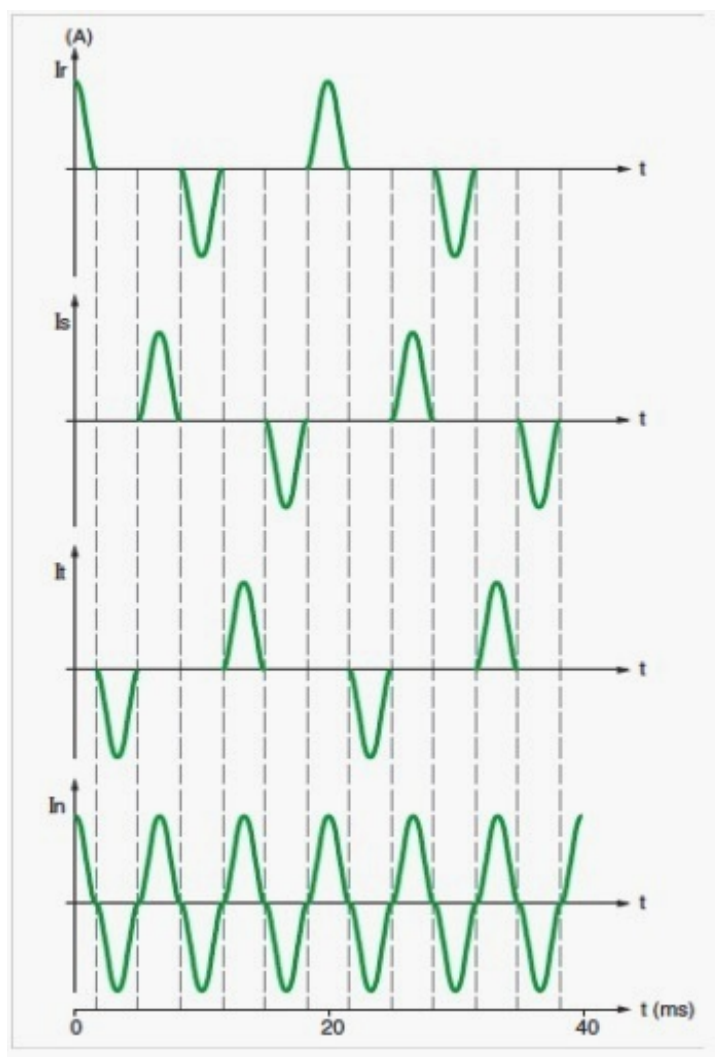


Σχήμα 2.2. Παράδειγμα παραμόρφωσης ημιτονοειδούς τάσης λόγω ύπαρξης αρμονικών 3ης και 5ης τάξης.

2.1.1.1. Επιδράσεις αρμονικών στα συστήματα μεταφοράς.

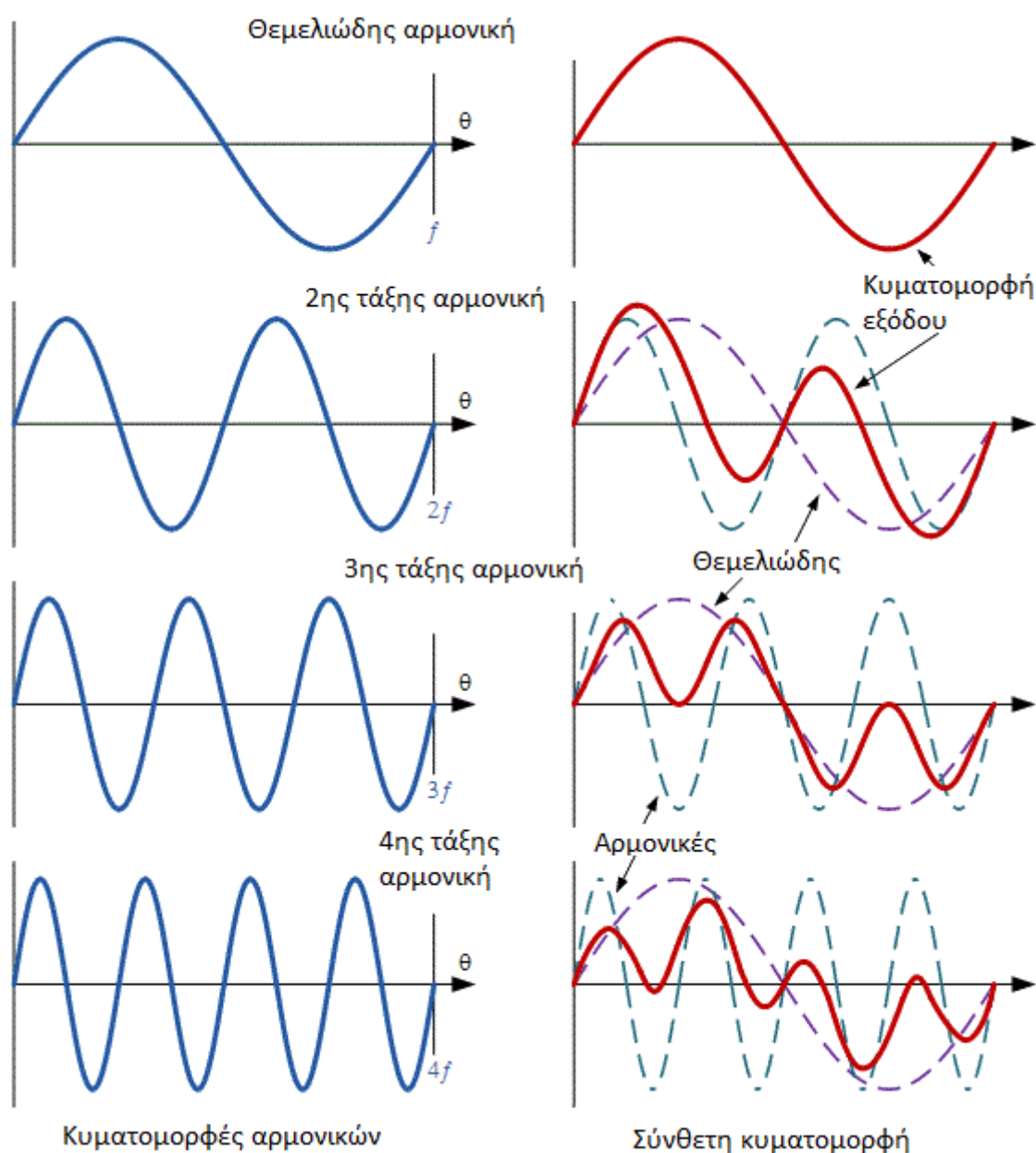
Οι βασικότερες επιδράσεις των αρμονικών είναι οι ακόλουθες:

1. Αυξάνουν την RMS τιμή της θεμελιώδους συχνότητας. Το επιπλέον αυτό ρεύμα προσ αυξάνει τις απώλειες του συστήματος στους Μ/Σ, τους αγωγούς και στους πυκνωτές αντιστάθμισης κατά μήκος της γραμμής. Μία τυπική εκτίμηση των επιπλέον απωλειών χωρίς να υπολογίσουμε τις απώλειες λόγω επιδερμικού φαινομένου, είναι της τάξης του 3%.
2. Αυξάνουν τις θερμικές απώλειες. Μ/Σ, διακόπτες, πυκνωτές και αγωγοί πρέπει να είναι σχεδιασμένοι ώστε να αντέχουν τα ρεύματα υψηλότερων συχνοτήτων. Εάν αυτό δε συμβεί, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα πρόκλησης ακόμα και πυρκαγιάς λόγω υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας.
3. Υπερφόρτωση των ουδετέρων αγωγών καθώς το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων που τον διαρρέουν δεν είναι πλέον ίσο με 0.



Σχήμα 2.3. Φόρτιση ουδετέρου σε 3φασικό σύστημα με κοινό ουδέτερο και 3 πανομοιότυπα φορτία συνδεδεμένα.

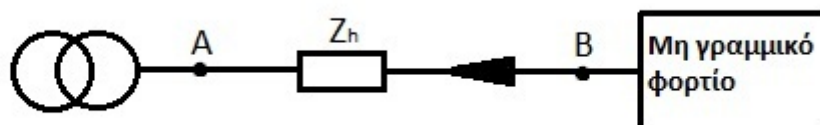
4. Παραμόρφωση της προσφερόμενης τάσης που μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα σε ευαίσθητα φορτία όπως ηλεκτρονικές συσκευές.
5. Μείωση του $\cos\phi$, αυξημένες απώλειες στους αγωγούς λόγω άεργης ισχύος.
6. Παρεμβολές σε κυκλώματα ελέγχου και τηλεπ/νίων. Οι αρμονικές μεγάλης συχνότητας δημιουργούν προβλήματα Η/Μ παρεμβολών στη λειτουργία συστημάτων ελέγχου (PLC) και σε δίκτυα τηλεπ/νίων. Σύμφωνα με την οδηγία 120 της ΔΕΗ η ανοχή στην παραμόρφωση της τάσης μπορεί να είναι από 0,5%-6%.



Σχήμα 2.4. Απεικόνιση αρμονικών σε σχέση με την θεμελιώδη συχνότητα. Αριστερά παρουσιάζονται οι αρμονικές ανεξάρτητες, ενώ δεξιά σε σύγκριση με τη θεμελιώδη. Απεικόνιση τεσσάρων πρώτων αρμονικών.

2.1.1.2. Μη γραμμικά φορτία.

Τα μη γραμμικά φορτία προκαλούν ρεύματα αρμονικών που διοχετεύονται στο δίκτυο διανομής και μεταφοράς. Αρμονικές τάσεις προκαλούνται από τη ροή αρμονικών ρευμάτων διαμέσω των αντιστάσεων των κυκλωμάτων παροχής.



Σχήμα 2.5. Μονογραμμική απεικόνιση που δείχνει την αντίσταση του κυκλώματος παροχής ενός μη γραμμικού φορτίου για μια αρμονική σειράς h .

Η αντίσταση ενός αγωγού αυξάνει ως συνάρτηση της συχνότητας του ρεύματος που ρέει μέσω του αγωγού. Επομένως, για κάθε αρμονική υπάρχει μια αντίσταση Z_h στο κύκλωμα παροχής. Όταν το αρμονικό ρεύμα ρέει μέσω της αντίστασης, δημιουργεί μια τάση η οποία ισούται με:

$$V_h = I_h \cdot Z_h \quad (2.1)$$

Επομένως το ρεύμα στο σημείο B παραμορφώνεται, και οι συσκευές από το σημείο αυτό και μετά λαμβάνουν παραμορφωμένη τάση. Για ένα δεδομένο αρμονικό ρεύμα η παραμόρφωση είναι ανάλογη της αντίστασης στο δίκτυο διανομής.

Τα μη γραμμικά φορτία μπορεί να θεωρηθεί πως επανεισάγουν τα αρμονικά ρεύματα αντίρροπα στο δίκτυο διανομής, προς την πηγή.

Παραδείγματα μη γραμμικών φορτίων που προκαλούν αρμονικές :

1. Ηλεκτρονικά ισχύος
2. Μετασχηματιστές ανόρθωσης
3. UPS
4. Ασύγχρονες μηχανές DC.
5. Συσκευές παραγωγής ηλεκτρικών τόξων (υψικάμινοι τήξης μετάλλων, οξυγονοκολλήσεις)
6. Εξοπλισμός κτιριακών εγκαταστάσεων όπως φωτοτυπικά μηχανήματα, μηχανές φαξ, ηλεκτρονικοί υπολογιστές.
7. Οικιακός εξοπλισμός όπως φούρνοι μικροκυμάτων, λαμπτήρες φθορισμού.

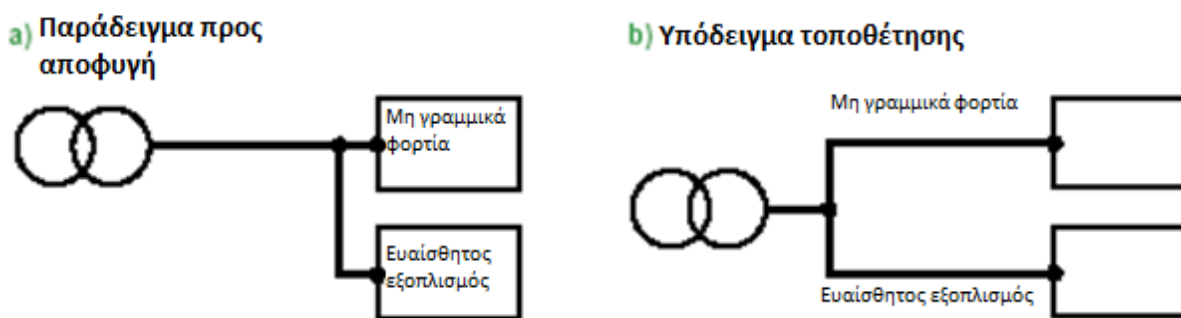
2.2. Αντιμετώπιση και αξιολόγηση αρμονικών

2.2.1. Μείωση αρμονικών ρευμάτων των μη γραμμικών φορτίων

Η αυξανόμενη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος τα τελευταία χρόνια έχει αυξήσει επίσης την παρουσία αρμονικών στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικού ρεύματος. Αναδύθηκε η ανάγκη εξάλειψής τους, λόγω του ότι μπορούν να προκληθούν σοβαρές ζημιές εξίσου στον βιομηχανικό όσο και τον οικιακό εξοπλισμό. Αξίζει να αναφερθεί πως οι διηλεκτρικές απώλειες λόγω αρμονικών, μπορεί να είναι καταστρεπτικές για μία υπόγεια γραμμή μεταφοράς, και πως ο σύγχρονος βιομηχανικός και οικιακός εξοπλισμός είναι πολύ πιο ευαίσθητοι σε αρμονικές.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να αντιμετωπιστεί σε μία εγκατάσταση η παρουσία αρμονικών.

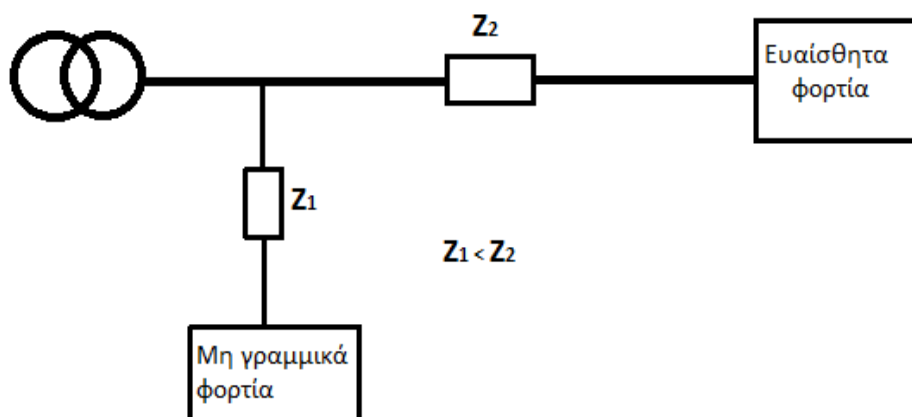
1. Τα αρμονικά ρεύματα κάποιων μετατροπέων μπορούν να ελαχιστοποιηθούν τοποθετώντας ένα επαγωγικό κύκλωμα εξομάλυνσης μεταξύ της εισόδου και του σημείου σύνδεσής τους. Η αυτεπαγωγή δημιουργεί μία αντίρροπη τάση, όταν αρμονικό το ρεύμα την διαρρέει.
2. Ελαχιστοποίηση της αρμονικής αντίστασης της πηγής, συνδέοντας τον εξοπλισμό που προκαλεί το πρόβλημα απευθείας σε έναν Μ/Σ μεγάλης ισχύος. Σημαντική σημείωση είναι το ότι, είναι προτιμητέο στην πηγή να συνδεθούν πολλά καλώδια μικρής διατομής, παρά ένα μεγαλύτερης. Εάν οι αγωγοί αυτοί είναι σε αρκετά μακρινή απόσταση, η φαινόμενη αντίσταση της πηγής διαιρείται με τον αριθμό των συνδεδεμένων αγωγών.
3. Τοποθέτηση των μη γραμμικών φορτίων πλησίον της παροχής.



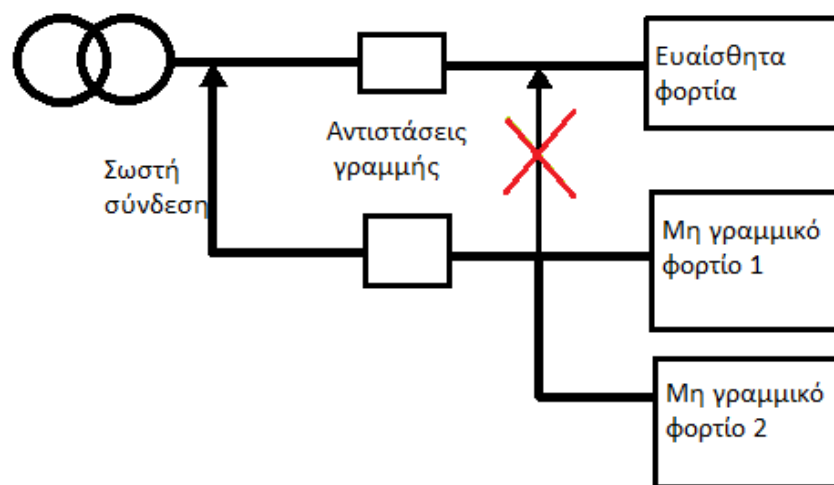
Σχήμα 2.6. Προτεινόμενη διασύνδεση φορτίων για αποφυγή αρμονικών

4. Τοποθέτηση ενεργού φίλτρου εν παραλλήλω με το μη γραμμικό φορτίο. Τα ενεργά φίλτρα αναλύουν τις αρμονικές που απορροφώνται από το φορτίο, και μετά επανεισάγουν το κατάλληλο αρμονικό ρεύμα στο φορτίο με την κατάλληλη φάση με αποτέλεσμα τα αρμονικά ρεύματα να εξουδετερώνονται.

5. Δομή της εγκατάστασης: Τα ευαίσθητα φορτία δεν πρέπει να είναι συνδεδεμένα εν παραλλήλω με μη γραμμικά φορτία. Μη γραμμικά φορτία μεγάλης ισχύος είναι προτιμητέο να συνδέονται απευθείας σε ξεχωριστό Μ/Σ.



Σχήμα 2.7. Τοποθέτηση μη γραμμικών φορτίων πλησίον της παροχής προς εξάλειψη αρμονικών



Σχήμα 2.8. Υπόδειγμα ομαδοποίησης μη γραμμικών φορτίων προς εξάλειψη αρμονικών

Ο φωτισμός εκτιμάται στο 55% της συνολικής κατανάλωσης ρεύματος παγκοσμίως. Ένα ποσοστό της τάξης του 80% ελέγχεται από τροφοδοτικά SMPS (Switched Mode Power Supply), όπως μετατροπείς DC/DC και DC/AC. Αυτό πρακτικά σημαίνει, πως η μισή ποσότητα ρεύματος που διακινείται παγκοσμίως μπορεί να περιέχει αρμονικές, επηρεάζοντας τον εξοπλισμό.

2.2. Απώλειες σε αγωγούς λόγω αρμονικών

Η ισχύς που παρέχεται σε ένα φορτίο είναι συνάρτηση της θεμελιώδους αρμονικής I_1 του ρεύματος. Όταν το ρεύμα περιέχει αρμονικές, η RMS τιμή του ρεύματος είναι μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη I_1 . Αυτό υποδηλώνει την ύπαρξη ρευμάτων τα οποία ανεβάζουν τις απώλειες Joule στον αγωγό.

Η συνολική παραμόρφωση THD (Total Harmonic Distortion), δίνεται από τον τύπο :

$$\text{THD} = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (2.2)$$

Η παραμόρφωση του ρεύματος ορίζεται από τη σχέση :

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

Όπου I_h είναι η RMS τιμή της αρμονικής ρεύματος τάξης h , ενώ I_1 η RMS τιμή του ρεύματος της θεμελιώδους αρμονικής.

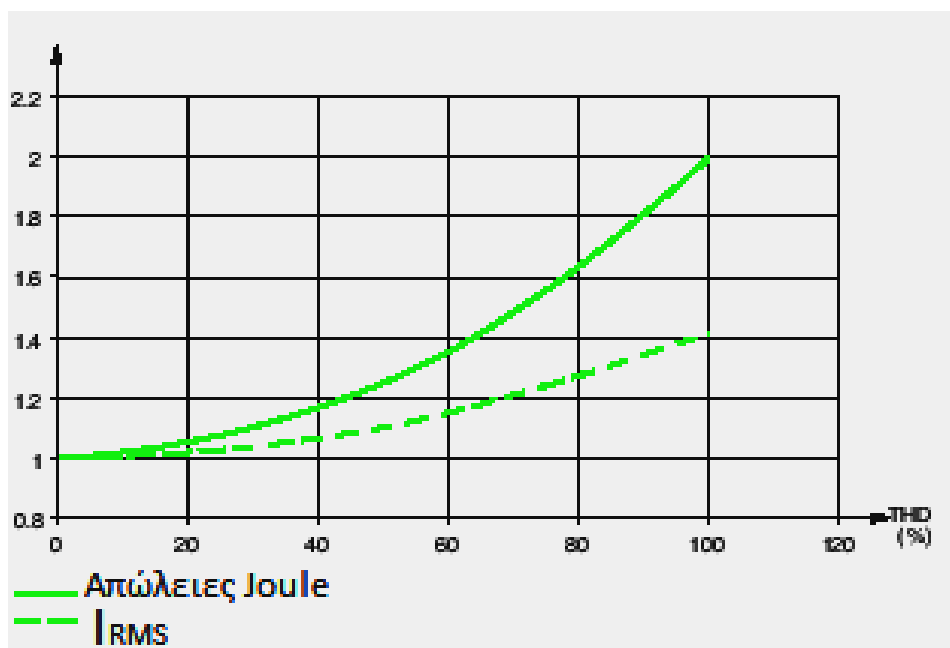
Το I_{RMS} θα ισούται με :

$$I_{RMS} = I_1 \cdot \sqrt{1 + \text{THD}^2} \quad (2.4)$$

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο IEEE-519 (Institute of Electrical Electronics Engineers), η ανεκτή παραμόρφωση (THD) λόγω αρμονικών, σε μέρη με ευαίσθητο εξοπλισμό όπως νοσοκομεία ή αεροδρόμια ανέρχεται στο 3%, ενώ σε εγκαταστάσεις όπως σχολεία και κτίρια ανέρχεται στο 5%. Όσο μεγαλύτερος ο καταναλωτής, τόσο μικρότερη είναι η ανοχή στον παράγοντα THD. Αυτό συμβαίνει επειδή, όπως ειπώθηκε προηγουμένως, οι αρμονικές επανεισέρχονται στο δίκτυο διανομής και μεταφοράς, άρα καταναλωτές μεγάλης ισχύος θα επιβαρύνουν περισσότερο το δίκτυο. Για την οριοθέτηση της ανοχής αυτής, χρησιμοποιείται η αναλογία SCR (Short Circuit Ratio).

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει σε συνάρτηση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης :

1. Την αύξηση της ενεργού τιμής του ρεύματος
2. Την αύξηση των απωλειών Joule.



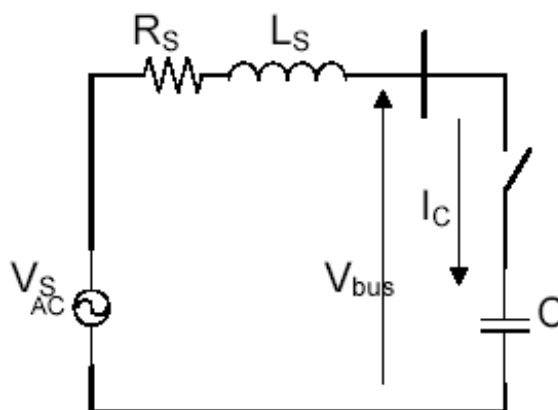
Σχήμα 2.9. Εξάρτηση ρεύματος και θερμικών απωλειών από τον παράγοντα THD

2.2.1. Συντονισμός

Η ταυτόχρονη χρήση επαγωγικών και χωρητικών συσκευών σε δίκτυα διανομής έχει σαν αποτέλεσμα παράλληλο ή εν σειρά συντονισμό που εκδηλώνεται με τιμές πολύ υψηλής ή πολύ χαμηλής αντίστασης αντίστοιχα. Οι διαφορετικές τιμές αντίστασης τροποποιούν το ρεύμα και την τάση στα δίκτυα διανομής. Ο εν σειρά συντονισμός προκαλεί αύξηση της τάσης, ενώ ο παράλληλος συντονισμός προκαλεί αύξηση των ρευμάτων που κυκλοφορούν στο σύστημα.

Ο συντονισμός σε ένα σύστημα λαμβάνει χώρα όταν η επαγωγική και η χωρητική αντίδραση του συστήματος γίνονται ίσες. Η προέλευση του συντονισμού είναι από τις -μεγάλων ή μικρών τιμών- αντιστάσεις στον ζυγό μεταφοράς.

Γενικότερα για ένα δίκτυο της μορφής :



Σχήμα 2.10. RLC κύκλωμα προσέγγισης συντονισμού

Συντονισμό έχουμε στη συχνότητα:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.5)$$

Όπου :

L η αυτεπαγωγή του συστήματος

C η χωρητικότητα των πυκνωτών αντιστάθμισης

Η τάξη της αρμονικής συντονισμού είναι :

$$h_r = \frac{\omega_r}{\omega_0} \quad (2.6)$$

Όπου:

ω_0 η γωνιακή ταχύτητα στη θεμελιώδη συχνότητα

ω_r η γωνιακή ταχύτητα στη συχνότητα συντονισμού

2.2.1.1. Μηχανική καταπόνηση λόγω συντονισμού

Κατά την κατάσταση συντονισμού υπό την επίδραση κάποιων σειρών αρμονικών, στο κύκλωμα επιδρούν μεταβατικά φαινόμενα όπως υπερτάσεις, παρεμβολές σε συστήματα τηλεπικοινωνιών, λανθασμένη λειτουργία ρελέ προστασίας και ασφαλειοδιακοπών. Μπορεί να προκληθεί πρόωρη γήρανση των πυκνωτών αντιστάθμισης, σφάλματα στις σύγχρονες μηχανές και κινητήρες, καθώς επίσης και αδυναμία ορθής λειτουργίας των Μ/Σ ή εκτεταμένες απώλειες στην έξοδό τους.

Το φαινόμενο πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την εγκατάσταση πυκνωτών για διόρθωση του συντελεστή ισχύος σε μία εγκατάσταση, ή όταν προστίθενται επαγωγικά στοιχεία όπως μηχανές ή Μ/Σ σε σύστημα που υπάρχουν ήδη εγκατεστημένοι πυκνωτές.

Σαν συνέπεια της ύπαρξης της ιδιοσυχνότητας κάθε υλικού σώματος, της ίδιας συχνότητας με την οποία δονείται, ένα ηλεκτρικό κύκλωμα βρίσκεται μονίμως υπό την επίδραση και της ιδιοσυχνότητάς του, αλλά και της συχνότητας δόνησης που προκαλεί η ροή ρεύματος.

Στο σημείο που η συχνότητα συντονισμού ενός κυκλώματος πλησιάζει την τιμή της ιδιοσυχνότητας της δόνησης του ίδιου του συστήματος, προκαλείται μηχανική καταπόνηση των επιμέρους εξαρτημάτων που διαρρέονται από τα αρμονικά ρεύματα. Είναι προφανές δηλαδή πως οι αγωγοί και τα φορτία δέχονται μηχανική καταπόνηση και κατά τον συντονισμό αυτό αλλά και με την απλή ύπαρξη αρμονικών.

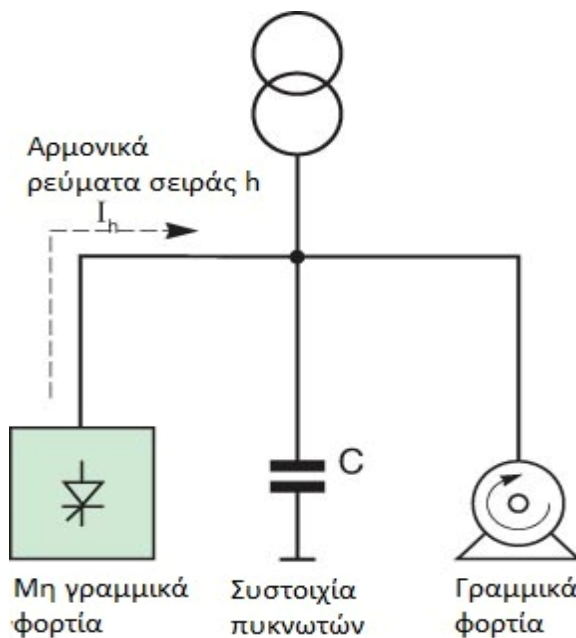
Μπορούμε να υπολογίσουμε τη σειρά της αρμονικής που μπορεί να προκαλέσει συντονισμό σε ένα σύστημα με την παρακάτω σχέση:

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_{CAP}}} \quad (2.10)$$

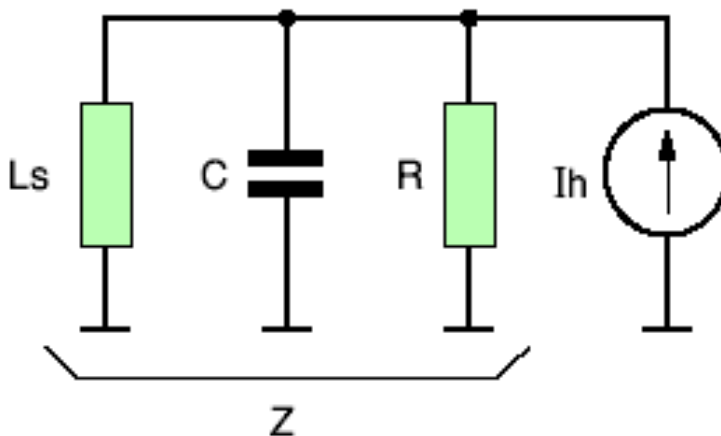
Όπου:

MVA_{sc} η ισχύς της πηγής

Και $MVAR_{CAP}$ η φαινομένη ισχύς που απορροφούν οι πυκνωτές



Σχήμα 2.8. Διάγραμμα συστήματος με πυκνωτές διόρθωσης συντελεστού ισχύος



Σχήμα 2.9. Ισοδύναμο κύκλωμα σχήματος 2.8

Η αντίσταση Z θα ισούται με:

$$Z = \frac{j \cdot L_s \cdot \omega}{1 - L_s \cdot C \omega^2} \quad (2.7)$$

Αγνοώντας το R και όπου:

L_s η αυτεπαγωγή της παροχής

C η χωρητικότητα των πυκνωτών διόρθωσης συντελεστού ισχύος

3^ο Κεφάλαιο

“Αγωγοί”

3.1. ΑΓΩΓΟΙ

3.1.1 – Χαρακτηριστικά αγωγών, χημικές ιδιότητες, υπόβαθρο.

Ο ηλεκτρισμός προκύπτει σε ατομικό επίπεδο από ηλεκτρόνια που ταξιδεύουν μεταξύ ατόμων σε ένα υλικό ή μία ουσία. Τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια ποικίλλουν μεταξύ των ουσιών, προκαλώντας διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες στο καθένα απο αυτά.

Τα υλικά ή τα κράματα υλικών που συγκεντρώνουν άτομα με ελεύθερα ηλεκτρόνια και μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια ονομάζονται αγωγοί, ενώ τα υλικά που διακόπτουν τη ροή ηλεκτρισμού μονωτές. Κατά την επεξεργασία των υλικών κάθε αγωγού, δημιουργούνται παραλλάξεις στην εσωτερική τους κρυσταλλική δομή.

Διαφορετικοί τύποι αγωγών χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, και ποικίλλουν στις ιδιότητές τους ανάλογα με τον τύπο κυκλώματος και την τάση που εξυπηρετούν. Στην πολύχρονη διάρκεια της αλματώδους εξέλιξης της μεταφοράς του ρεύματος, δοκιμάστηκαν αρκετά υλικά. Το αλουμίνιο (Al), ο χαλκός (Cu) και ο χάλυβας (St) είναι τα συνηθέστερα κράματα που πλέον χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ρεύματος.

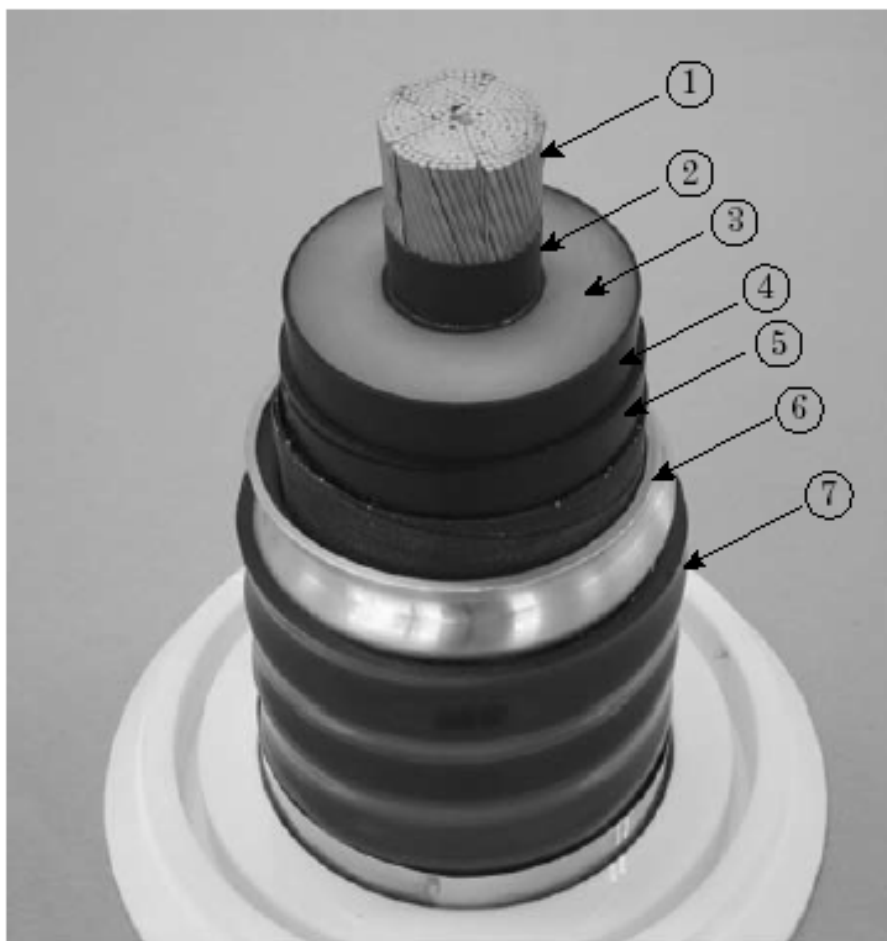
Οι αγωγοί για τάσεις από 30kV και πάνω, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους ανάλογα με τη διαφορά των μονωτικών υλικών, και αποκαλούνται εν συντομογραφία CV (Cross-linked polyethylene insulated with Vinyl sheathed cable) αγωγοί με μόνωση πολυαιθυλενίου, και OF (Oil Field), αγωγοί με μόνωση ελαίου.

Οι αγωγοί CV χρησιμοποιούν το στέρεο οργανικό στοιχείο δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE) το οποίο παρουσιάζει εξαιρετικές ιδιότητες ηλεκτρικής μόνωσης, θερμοκρασιακής αντοχής, μηχανικής αντοχής και εξαιρετικής ελαστικότητας. Οι OF χρησιμοποιούν σαν κύρια μόνωση χαρτί εμποτισμένο με ειδικό έλαιο. Στα παρακάτω σχήματα (3.1, 3.2) φαίνονται οι τυπικές δομές των δύο τύπων αγωγών.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται τομή ενός αγωγού μόνωσης πολυαιθυλενίου, αποτελούμενου από το κυρίως μέρος του αγωγού, το φύλλο εξομάλυνσης, μόνωση πολυαιθυλενίου καθώς και φύλλο μόνωσης που εγχύεται ταυτόχρονα, μαλακή επίστρωση ημιαγώγιμης ταινίας, μεταλλικό πλέγμα καθώς και εξωτερική επένδυση.

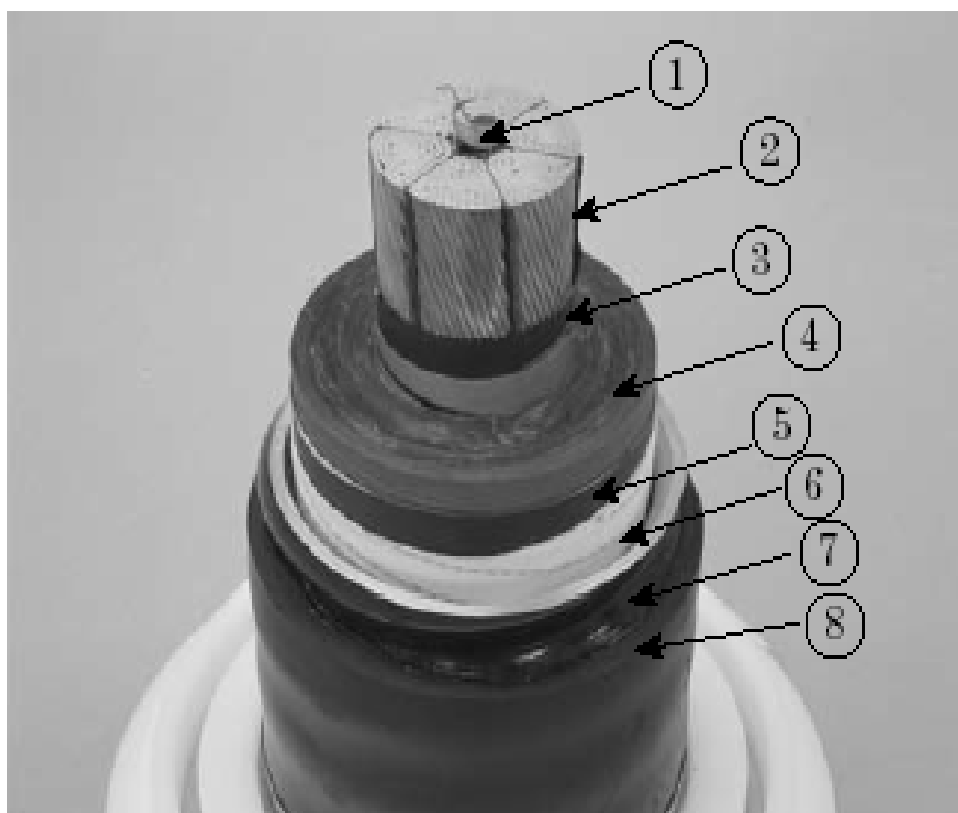
Στο σχήμα 3.2 αντίστοιχα παρουσιάζεται τομή ενός αγωγού μόνωσης ελαίου, αποτελούμενου από την αγώγιμη οδό του ελαίου, το κυρίως μέρος του αγωγού, το φύλλο εξομάλυνσης, το μονωτικό χαρτί εμποτισμένο σε έλαιο, το μεταλλικό πλέγμα του αγωγού, την ταινία περίπλεξης, το μεταλλικό περίβλημα καθώς και την εξωτερική επένδυση του αγωγού.

Οι πίνακες 3.1 και 3.2 αντίστοιχα, δείχνουν τυποποιημένες σταθερές αγωγών μόνωσης πολυαιθυλενίου και ελαίου αντίστοιχα. Παρουσιάζονται χαρακτηριστικές ωμικές αντιστάσεις, αυτεπαγωγές και χωρητικότητες λειτουργίας, καθώς και η σύνθετη αντίσταση ανά χιλιόμετρο όδευσης.



Σχήμα 3.1. Αγωγός στερεής μόνωσης πολυαιθυλενίου

1. Αγωγός: Αποτελείται από συνεστραμμένα συμπιεσμένα συρματίδια χαλκού ή αλουμινίου. Αγωγός Miliken ή συμπαγής διαβαθμισμένος αγωγός χρησιμοποιείται για να ελαττώσει το επιδερμικό φαινόμενο και φαινόμενα γειτνίασης.
2. Φύλλο αγωγού: Εξομαλύνει φαινόμενα ηλεκτροστατικής πίεσης και τα πεδία μεταξύ του αγωγού και της μόνωσης.
3. Εγκάρσια μόνωση πολυαιθυλενίου : Το XLPE είναι το υλικό μόνωσης του τύπου αυτού αγωγών, η οποία είναι πολυμερείς ενώσεις εξαιρετικής μονωτικής ικανότητας.
4. Φύλλο μόνωσης: Εγχύεται ταυτόχρονα με τα 2 προηγούμενα μέρη του αγωγού, έτσι ώστε να αποφεύγονται μηχανικές πιέσεις σε τυχόν κενά μεταξύ των υλικών.
5. Μαλακή επίστρωση ημιαγώγιμης ταινίας: Για αγωγούς με μεταλλικό φύλλο, η επίστρωση αυτή απορροφά διογκώσεις λόγω θερμότητας.
6. Μεταλλικό πλέγμα: Χρησιμοποιείται για να ελέγξει το ηλεκτρικό πεδίο εντός του αγωγού.
7. Εξωτερική επένδυση: Προστατεύει τον αγωγό από μηχανικές βλάβες και οξειδώσεις. Χρησιμοποιείται PVC ή PE λόγω καλής συμπεριφοράς του σε αποφλοιώση, καιρικές συνθήκες και χημικές επιδράσεις.



Σχήμα 3.2. Αγωγός με μόνωση ελαίου

1. Αγωγήμη οδός λαδιού: Το μονωτικό έλαιο γεμίζει τον αγωγό λαδιού κατά μήκος της γραμμής. Η πίεση του λαδιού παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από τη διαστολή ή τη συστολή του μονωτικού ελαίου που προκαλείται από τη θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.
2. Αγωγός: Συνεστραμμένα και συμπιεσμένα συρματίδια αλουμινίου ή χαλκού.
3. Φύλλο αγωγού: Εξομαλύνει φαινόμενα ηλεκτροστατικής πίεσης και λειαίνει τα πεδία στα κενά μεταξύ του αγωγού και της μόνωσης.
4. Χαρτί εμποτισμένο σε μονωτικό έλαιο: Η μόνωση των αγωγών OF πραγματοποιείται με συνδυασμό χαρτιού και ελαίου. Αρκετές στρώσεις χαρτιού τυλίγονται γύρω από τον αγωγό, και στεγνώνονται για να αφαιρεθεί η υγρασία.
5. Μεταλλικό πλέγμα: Μη μαγνητική μεταλλική ταινία ή επιμεταλλωμένο χαρτί που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρική μόνωση.
6. Ταινία περίπλεξης: Προστατεύει το πλέγμα από εξωτερική ζημιά κατά την κατασκευή και μονώνει το ρεύμα στα όρια του πλέγματος.
7. Μεταλλικό περίβλημα: Αλουμίνιο σε κυματοειδή σχηματισμό που διατηρεί την πίεση του λαδιού, προστατεύει από εξωτερική ζημιά και δρα ως αγωγός επιστροφής σε τυχόν σφάλμα της γείωσης.
8. Εξωτερική επένδυση: Προστατεύει τον αγωγό από μηχανική καταπόνηση και παράγοντες οξείδωσης. Χρησιμοποιείται PVC ή PE λόγω καλής συμπεριφοράς του σε αποφλοίωση, καιρικές συνθήκες και χημικές επιδράσεις.

Τάση γραμμής (kV)	Διατομή αγωγού (mm ²)	Διάμετρος καλωδίου (mm)	Ωμική αντίσταση (Ω/km)	Αυτεπαγωγή λειτουργίας (mH/km)	Χωρητικότητα λειτουργίας (μF/km)	Σύνθετη αντίσταση (Ω/km)
500	2.500	61.2	0.00746	0.383	0.25	0.112
	2.000	53.8	0.00933	0.400	0.23	0.116
275	2.500	61.2	0.00746	0.381	0.28	0.108
	2.000	53.8	0.00933	0.392	0.25	0.112
	1.200	41.7	0.01560	0.422	0.21	0.122
154	2.000	53.8	0.00933	0.352	0.26	0.103
	1.200	41.7	0.01560	0.382	0.22	0.112
	800	34.0	0.02310	0.404	0.19	0.119
66	2.000	53.8	0.00933	0.302	0.53	0.086
	1.200	41.7	0.0156	0.324	0.43	0.092
	800	34.0	0.0231	0.340	0.37	0.097

Πίνακας 3.1. Τυποποιημένες σταθερές γραμμών για καλώδια πολυαιθυλενίου

Τάση γραμμής (kV)	Διατομή αγωγού (mm ²)	Διάμετρος καλωδίου (mm)	Ωμική αντίσταση (Ω/km)	Αυτεπαγωγή λειτουργίας (mH/km)	Χωρητικότητα λειτουργίας (μF/km)	Σύνθετη αντίσταση (Ω/km)
500	2.500	68.0	0.00732	0.305	0.37	0.101
	2.000	59.1	0.00915	0.388	0.27	0.113
275	2.000	57.5	0.00915	0.363	0.41	0.098
	1.200	45.7	0.00151	0.389	0.34	0.105
154	2.000	57.5	0.00915	0.333	0.57	0.09
	1.200	45.7	0.01510	0.367	0.45	0.095
	800	40.6	0.02260	0.361	0.44	0.097
66	2.000	57.0	0.00910	0.312	0.96	0.082
	1.200	45.2	0.01510	0.331	0.80	0.086
	800	39.6	0.02230	0.334	0.79	0.087

Πίνακας 3.2. Τυποποιημένες σταθερές για καλώδια λαδιού

3.1.2 – Χαλκός (Cu)

Ο χαλκός υπάρχει σε αφθονία στη φύση, παρουσιάζει τις καλύτερες ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες, και όταν είναι σκληρής ολκήσεως, παρουσιάζει μεγάλη μηχανική αντοχή. Είναι το επικρατέστερο υλικό που χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους αγωγών χαμηλής τάσης.

Όσον αφορά τις γραμμές μεταφοράς, λόγω των απαιτήσεων στη σχέση βάρους/όγκου και λόγω του μεγάλου κόστους, ο χαλκός έχει παραμεριστεί. Η διαδικασία κατασκευής ενός αγωγού από χαλκό, περιλαμβάνει την θέρμανσή του και στη συνέχεια την επιμήκυνσή του στην κατάλληλη διατομή. Η εφέλκυσή του εν ψυχρώ, μειώνει την αγωγιμότητά του αλλά αυξάνει τη μηχανική του αντοχή.

3.1.3 – Αλουμίνιο (Al)

Το αλουμίνιο έχει μεγαλύτερη θερμική διαστολή, οξειδώνεται ευκολότερα, έχει το 65% της αγωγιμότητας του χαλκού, και μικρότερη μηχανική αντοχή. Ωστόσο, είναι ελαφρύτερο και έχει την μισή αντίσταση από αυτή του χαλκού. Οι περιπτώσεις που αντενδείκνυται το αλουμίνιο είναι κοντά στη θάλασσα, όπου και η διάβρωση λόγω των αλάτων το οξειδώνει. Οι δύο τύποι αλουμινίου που χρησιμοποιούνται είναι τα θερμικά επεξεργασμένα κράματα και η καθαρή του μορφή.

3.1.4 – Χάλυβας (St)

Ο χάλυβας είναι κατά πολύ λιγότερο αποτελεσματικός από τον χαλκό και οξειδώνεται εύκολα. Για τον λόγο αυτό οι αγωγοί από χάλυβα χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια μόνοι τους και συνήθως γαλβανίζονται. Η χρήση του χάλυβα συνιστάται κυρίως στη μηχανική υποστήριξη γραμμών.

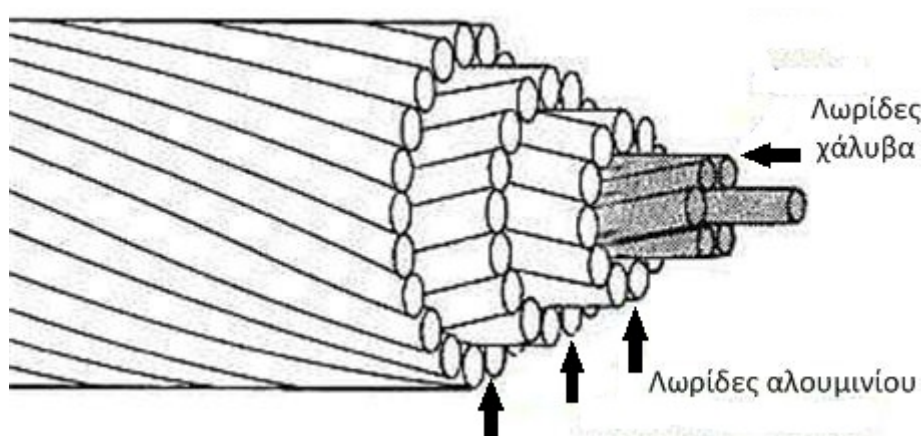
Οι αγωγοί με βάση τον χάλυβα έχουν 3-5 φορές μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα μεταφοράς όπου χρειάζονται λιγότερα στηρίγματα.

3.2. Οι κυριότεροι τύποι αγωγών εναέριας μεταφοράς.

3.2.1. Αγωγοί ACSR. Αλουμίνιο ενισχυμένο με χάλυβα (Steel Reinforced Aluminum)

Αυτοί οι αγωγοί χρησιμοποιούνται κυρίως στην μέση υψηλή και υπερυψηλή τάση. Οι γραμμές αυτές μεταφοράς, έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή, και πολύ υψηλή χωρητικότητα και αγωγιμότητα. Οι γραμμές ACSR έχουν μια κεντρική λωρίδα αγωγού από χάλυβα που υποστηρίζει το βάρος της γραμμής, ενώ το περιπλεγμένο αλουμίνιο χρησιμεύει για την αγωγιμότητά του.

Οι αγωγοί αυτοί είναι διαθέσιμοι σε μια μεγάλη γκάμα περιεκτικότητας σε χάλυβα. Αυτή κυμαίνεται από 7% κατά βάρος για 36/1 διατομή έως 40% για 30/7. Σήμερα, οι πιο συνηθισμένοι διαχωρισμοί στις διατομές Al/St, είναι 18/1, 45/7, 72/7, 84/19 (δείχνει αντίστοιχα τον αριθμό λωρίδων αλουμινίου χάλυβα, ώστε 18/1 αντιστοιχεί σε 18 λωρίδες αλουμινίου και μία λωρίδα χάλυβα) με περιεκτικότητα χάλυβα από 11% - 18% της πυκνότητας του αγωγού.



Σχήμα 3.3. Δομή αγωγού ACSR. Τα εξωτερικά στρώματα είναι συνεστραμμένα κατά αντίθετες φορές, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω μαγνητικών πεδίων.

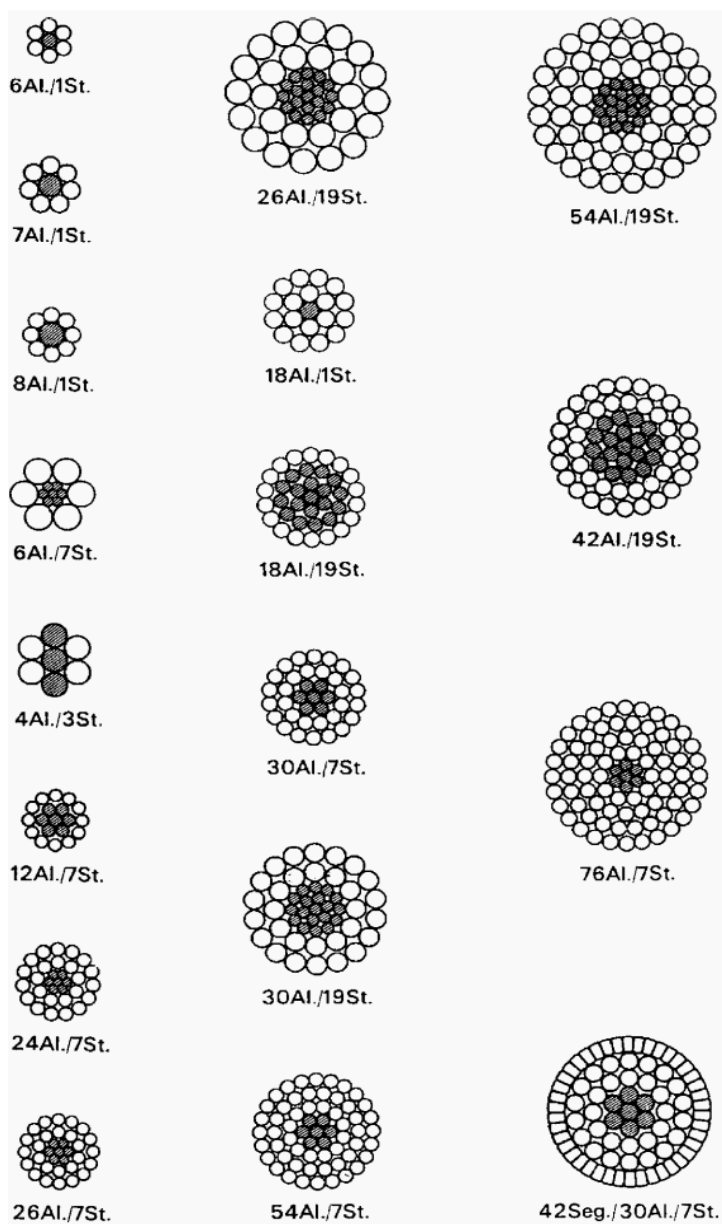
Η έκφραση για τον αριθμό των κλώνων N είναι:

$$N = 3n(n + 1) + 1 \quad (3.1)$$

Όπου n ο αριθμός των στρώσεων

3.2.2 . Αγωγοί AAC. Αγωγοί από αλουμίνιο (All Aluminum Conductor)

Σύμφωνα με το IACS (International Annealed Copper Standard), η αγωγιμότητα του συνηθέστερου κράματος αλουμινίου, 1350, είναι 61,2 %. Λόγω χαμηλής αναλογίας αντοχής/βάρους, αυτός ο τύπος αγωγού έχει περιορισμένη χρήση σε γραμμές μεταφοράς αλλά έχει μεγάλο συντελεστή αντίστασης στη διάβρωση. Ωστόσο, χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου το δίκτυο μεταφοράς έχει μικρό μήκος και απαιτείται υψηλή αγωγιμότητα.

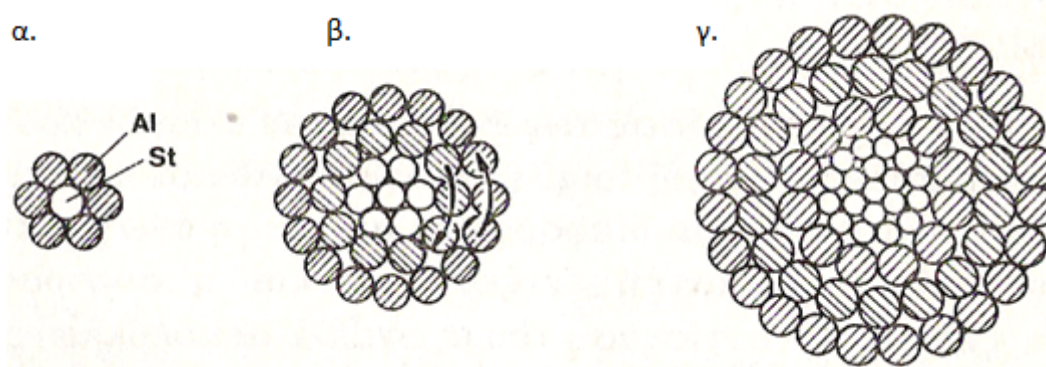


Σχήμα 3.4. Τύποι ACSR αγωγών. Πάντα η διατομή του κεντρικού κορμού του αγωγού είναι λίγο μικρότερη των περιφερειακών συνεστραμμένων

3.2.3. Αγωγοί AAAC. Κράμα αλουμινίου (All Aluminum Alloy Conductor)

Οι αγωγοί AAAC είναι εξ'ολοκλήρου φτιαγμένοι από κράμα αλουμινίου-πυριτίου-μαγνησίου. Σε σύγκριση με τους αγωγούς ACSR, είναι ελαφρύτεροι, με συγκρινόμενη μηχανική αντοχή και ικανότητα μεταφοράς ρεύματος, χαμηλότερες απώλειες και μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιούνται πολύ σε εναέριες γραμμές μεταφοράς/διανομής που απαιτείται πολύ καλή μηχανική αντοχή του αγωγού.

Στο σχήμα 3.5 φαίνεται η τομή ACSR αγωγών με ενίσχυση χάλυβα και αποτελούμενοι από ηλεκτροτεχνικό αλουμίνιο, ή ηλεκτροτεχνικό χαλκό σαν υλικό που μεταφέρει την τάση, και με τον χάλυβα να χρησιμοποιείται για μηχανική ενίσχυση του αγωγού.



Σχήμα 3.5. Πολύκλωνοι αγωγοί εναερίων γραμμών μεταφοράς: α) Αγωγός από ηλεκτροτεχνικό αλουμίνιο E-Al, ή από ηλεκτροτεχνικό χαλκό E-Cu, β, γ) ACSR- Αγωγοί με ενίσχυση χάλυβα

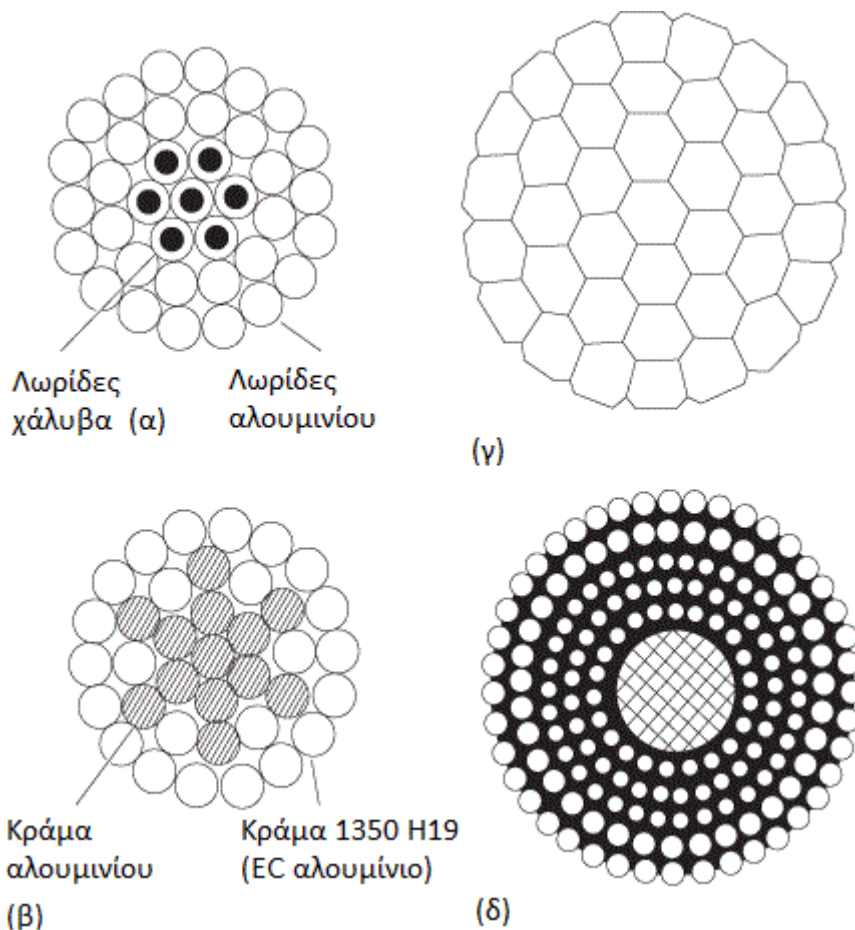
3.3. Διαφορές μεταξύ των αγωγών

Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των παραπάνω τύπων αγωγών, είναι τα υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένοι. Οι AAC είναι φτιαγμένοι από ηλεκτρολυτικά επεξεργασμένο αλουμίνιο με 99,7% καθαρότητα, οι AAAC από κράματα αλουμινίου, ενώ οι ACSR από αλουμίνιο ενισχυμένο με χάλυβα.

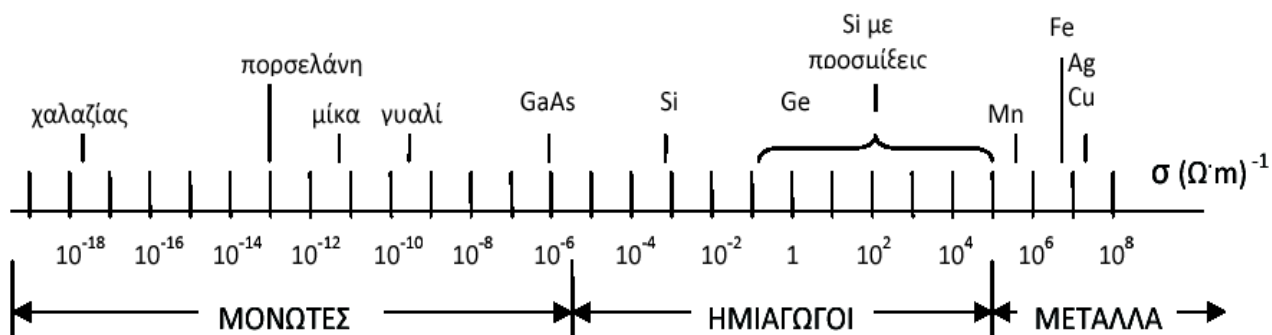
Ο δεύτερος παράγοντας είναι η αντίστασή τους στη διάβρωση, πράγμα που σχετίζεται άμεσα με τη διάρκεια ζωής του αγωγού.

Οι ACSR έχουν μικρότερη αντίσταση στη διάβρωση, αφού περιέχουν χάλυβα που είναι επιρρεπής στην οξείδωση (σκουριά). Οι AAC και οι AAAC έχουν μεγαλύτερη, αφού αποτελούνται κυρίως από αλουμίνιο. Σε έναν ACSR αγωγό ο χάλυβας καλύπτει τη μηχανική υποστήριξη, ενώ το υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο μεταφέρει το ρεύμα. Αυτό συνεπάγεται χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής του χάλυβα συγκριτικά με το αλουμίνιο, κάτι που οι άλλοι 2 τύποι αγωγών δεν έχουν. Για τους παραπάνω λόγους, σε εναέριες γραμμές μεταφοράς, ο κυριότερος τύπος αγωγού που χρησιμοποιείται είναι ο ACSR.

Άλλοι τύποι αγωγών είναι οι: ACAR (Aluminum Conductor Alloy Reinforced), ACSS (Aluminum Conductor Steel Supported), GTZACSR (Gap Type Z Aluminum Conductor), όπου Z είναι το υλικό Ζιρκόνιο (Zr), ACCR (Aluminum Conductor Carbon Reinforced).



Σχήμα 3.6. (α) ACSR (β) ACAR (γ) Συμπακτωμένος ομόκεντρος αγωγός (δ) Ομόκεντρος αγωγός επεκτεταμένου πυρήνα



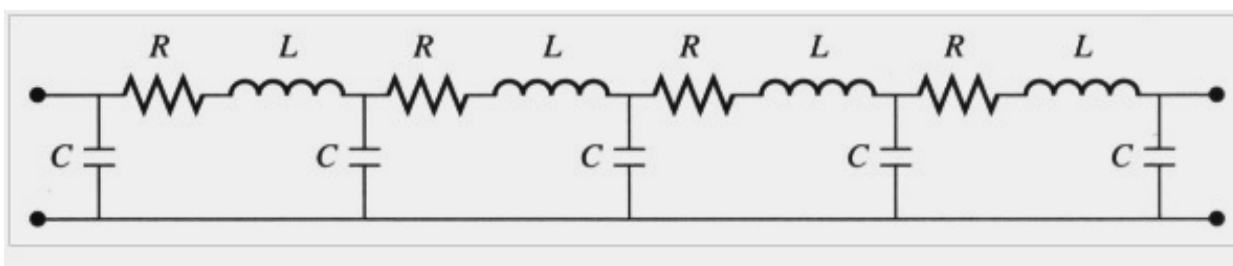
Σχήμα 3.7. Πίνακας Ειδικής αγωγιμότητας διαφόρων στοιχείων, πηγή : ikaros.teipir.gr

3.4 Γραμμές μεταφοράς

Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται με τρεις τρόπους. Με εναέριες, με υπόγειες, και με υποβρύχιες γραμμές μεταφοράς.

	400kV	400kV DC	150kV	66kV	ΣΥΝΟΛΟ
Εναέριες	2.628	107	8.127	39	10.901
Υποβρύχιες		160	140	15	315
Υπόγειες	4		82	1	87
ΣΥΝΟΛΟ	2.632	267	8.349	55	11.303

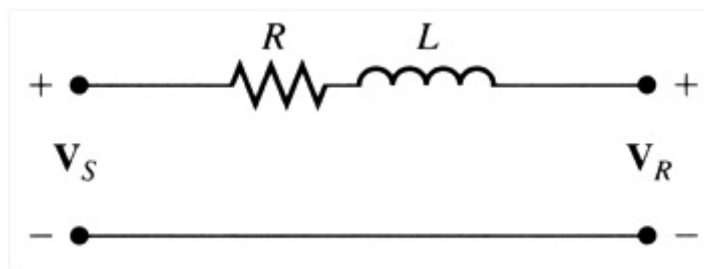
Πίνακας 3.3. Γραμμές μεταφοράς διασυνδεδεμένου δικτύου σε χλμ. Όδευσης. πηγή : dei.gr



Σχήμα 3.8 – Προσεγγιστική απεικόνιση μιας γραμμής μεταφοράς με τις παραμέτρους της

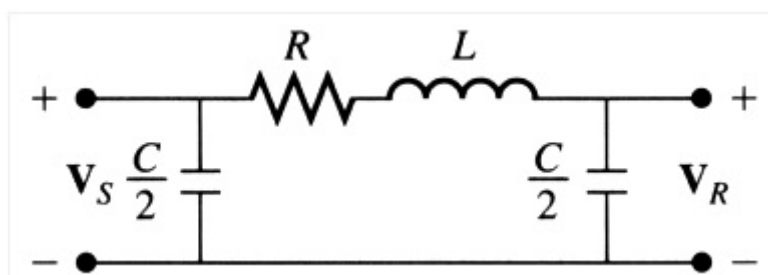
3.4.1 –Εναέριες γραμμές μεταφοράς

Η εναέρια μεταφορά ενέργειας είναι η πιο συμφέρουσα και η πλέον επικρατέστερη από άποψη κόστους και επισκευής. Τα βασικότερα κριτήρια για τον σχεδιασμό της εναέριας γραμμής είναι η επιλογή του τύπου και του μεγέθους του αγωγού, τα οποία πρέπει να ισορροπούν την ανάγκη για ελαχιστοποίηση της αντίστασης της γραμμής, χαμηλό κόστος και μικρό βάρος. Εναέριες γραμμές μικρότερες από 80km μπορούν να απεικονισθούν όπως παρακάτω, θεωρώντας εν σειρά την ωμική και επαγωγική αντίδραση.



Σχήμα 3.9. Ισοδύναμο κύκλωμα εναέριας γραμμής μεταφοράς < 80km.

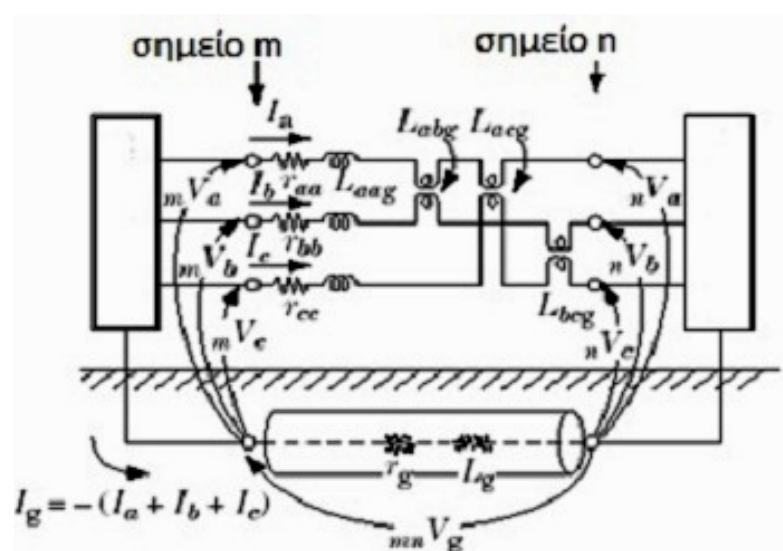
Για μέσου μήκους γραμμές (80-240km.), η χωρητικότητα της γραμμής πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Ωστόσο, μπορεί να μοντελοποιηθεί με δύο πυκνωτές, που ο καθένας έχει μισή τιμή από αυτήν της χωρητικότητας της γραμμής.



Σχήμα 3.10. Ισοδύναμο κύκλωμα εναέριας γραμμής μεταφοράς μέσου μήκους 80-240km

Επίσης λαμβάνονται υπόψιν τα κατασκευαστικά στοιχεία, όπως οι πύργοι στήριξης και οι μονωτήρες, καθώς και ο τρόπος τοποθέτησης των αγωγών στις μονάδες στήριξης, που επηρεάζει την αντίσταση των αγωγών και την ένταση των Η/Μ πεδίων που αναπτύσσονται γύρω τους.

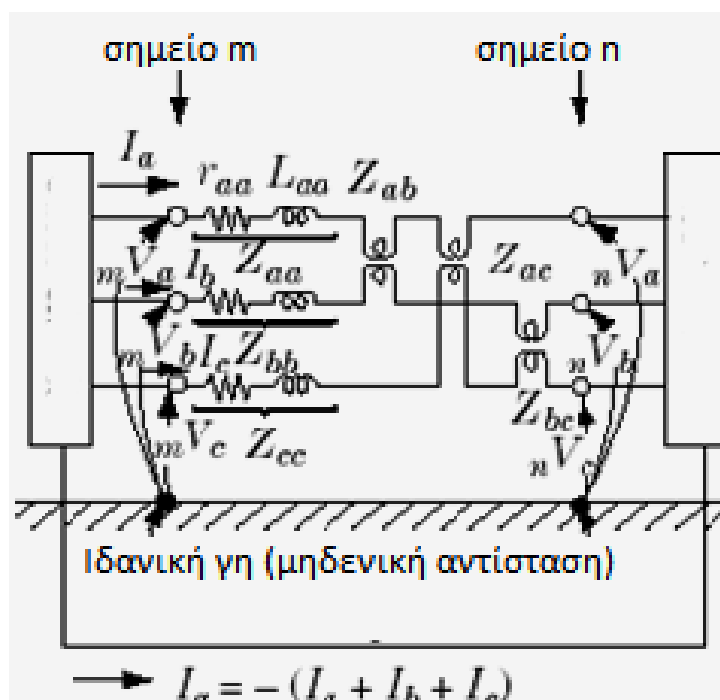
Μία απλή τριφασική γραμμή μεταφοράς, μεταξύ ενός σημείου m και ενός n με μόνο αυτεπαγωγή και αντίσταση, και χωρίς καλώδιο γείωσης, μπορεί να περιγραφεί όπως παρακάτω.



Σχήμα 3.11. Κύκλωμα απλής γραμμής με σταθερές L , R .

Στο σχήμα 3.11, τα r_g , L_g είναι αντίστοιχα η ισοδύναμη αντίσταση και αυτεπαγωγή της γης. Τα κυκλώματα I και II, συνδεδεμένα στα σημεία m και n, μπορούν θεωρητικά να είναι τριφασικά κυκλώματα οποιουδήποτε είδους. Όλες οι τάσεις και τα ρεύματα είναι διανυσματικά μεγέθη, και τα συμβολικά βέλη δείχνουν τις κατευθύνσεις μέτρησης των τριφασικών ρευμάτων και τάσεων που πρέπει να είναι γραμμένα κατά τον ίδιο τρόπο, έτσι ώστε να περιγραφούν οι ηλεκτρικές ιδιότητες του τριφασικού κυκλώματος.

Στο σχήμα, τα ρεύματα ρέουν από αριστερά προς δεξιά. Αντίστοιχα, το αντίρροπο ρεύμα I_g πρέπει να ρέει μέσω της γης. Στα περισσότερα εγχειρίδια, γίνεται συμψηφισμός των τιμών ρεύματος που επιστρέφουν δια μέσω της γης, και απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:



Σχήμα 3.12. Κύκλωμα απλής γραμμής, με την επιστροφή της γης να θεωρείται μηδέν, συνυπολογιζόμενη όμως στις τιμές Z_{aa} , Z_{bb} , Z_{cc} .

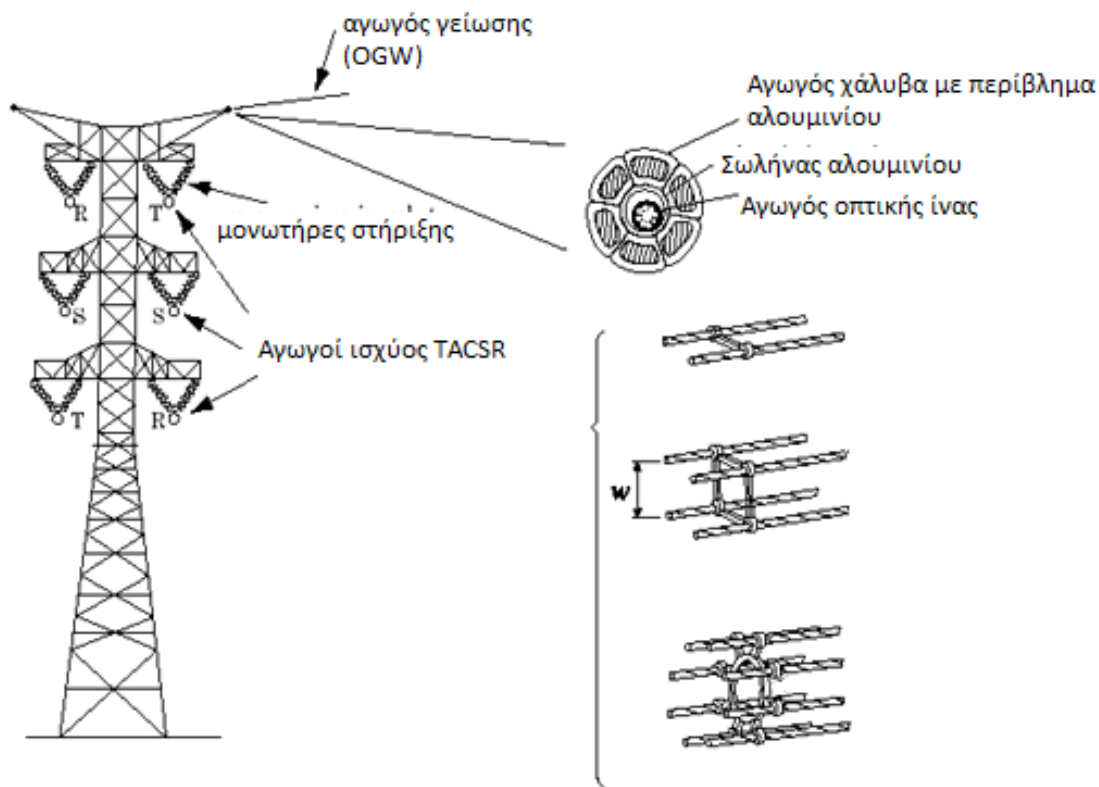
Η εξίσωση μεταφοράς της γραμμής είναι:

$$mV_{abc} - nV_{abc} = Z_{abc} \cdot I_{abc} \quad (3.2)$$

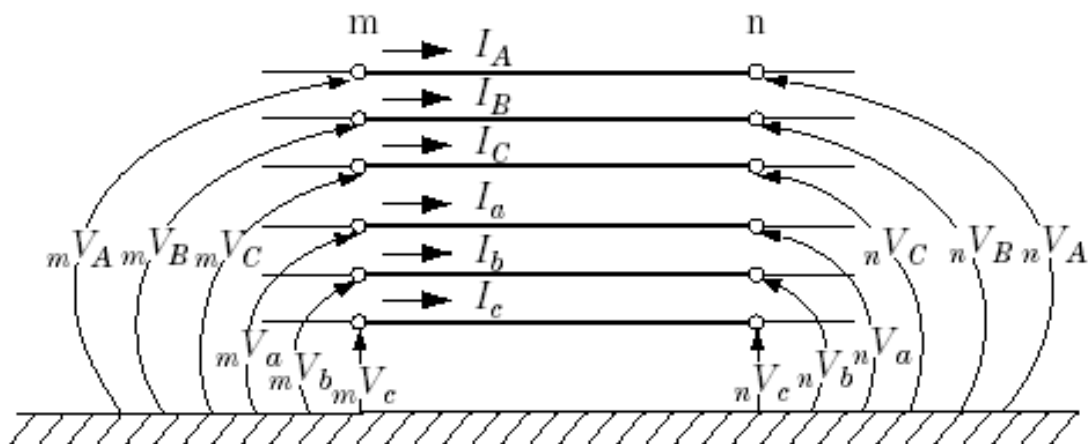
Μια τυπική γραμμή μεταφοράς αποτελείται από 2 κυκλώματα, ένα σε κάθε μεριά του πυλώνα. Το κάθε κύκλωμα αποτελείται από 3 σειρές φάσεων. Το μαγνητικό πεδίο δεν εξαρτάται απλώς από την ένταση του ρεύματος, αλλά και από τον τρόπο που ισορροπώνται τα ρεύματα που ρέουν στα κυκλώματα. Στις γραμμές μεταφοράς, η σύνθετη αντίσταση X_L είναι συνήθως κατά πολύ μεγαλύτερη από την ωμική αντίσταση R .

Η επιλογή του τύπου των αγωγών συμπεριλαμβάνει αρκετές παραμέτρους, όπως η ημερήσια μηχανική καταπόνηση, οι συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, μέγιστη ταχύτητα ανέμων), το μήκος της γραμμής, η καμπυλότητα μεταξύ των πυλώνων, καθώς και υπολογισμούς υπό ακραία καιρικά φαινόμενα (χιόνι, παγετός, βροχοπτώσεις). Χαρακτηριστικά των αγωγών όπως η αναλογία αντοχής/βάρους, η μέγιστη μηχανική αντοχή, ο θερμικός συντελεστής διαστολής και η AC αντίσταση καθορίζουν το ποιός τύπος αγωγού θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση.

Χαρακτηριστικό υπόδειγμα πυλώνα μεταφοράς φαίνεται στο σχήμα 3.13, με αγωγούς τύπου TACSR (Thermal resistant Aluminum Conductor Steel Reinforced) και διπλό αγωγό γείωσης για προστασία από κεραυνοπληξία.



Σχήμα 3.13. Τριφασική γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με γείωση.

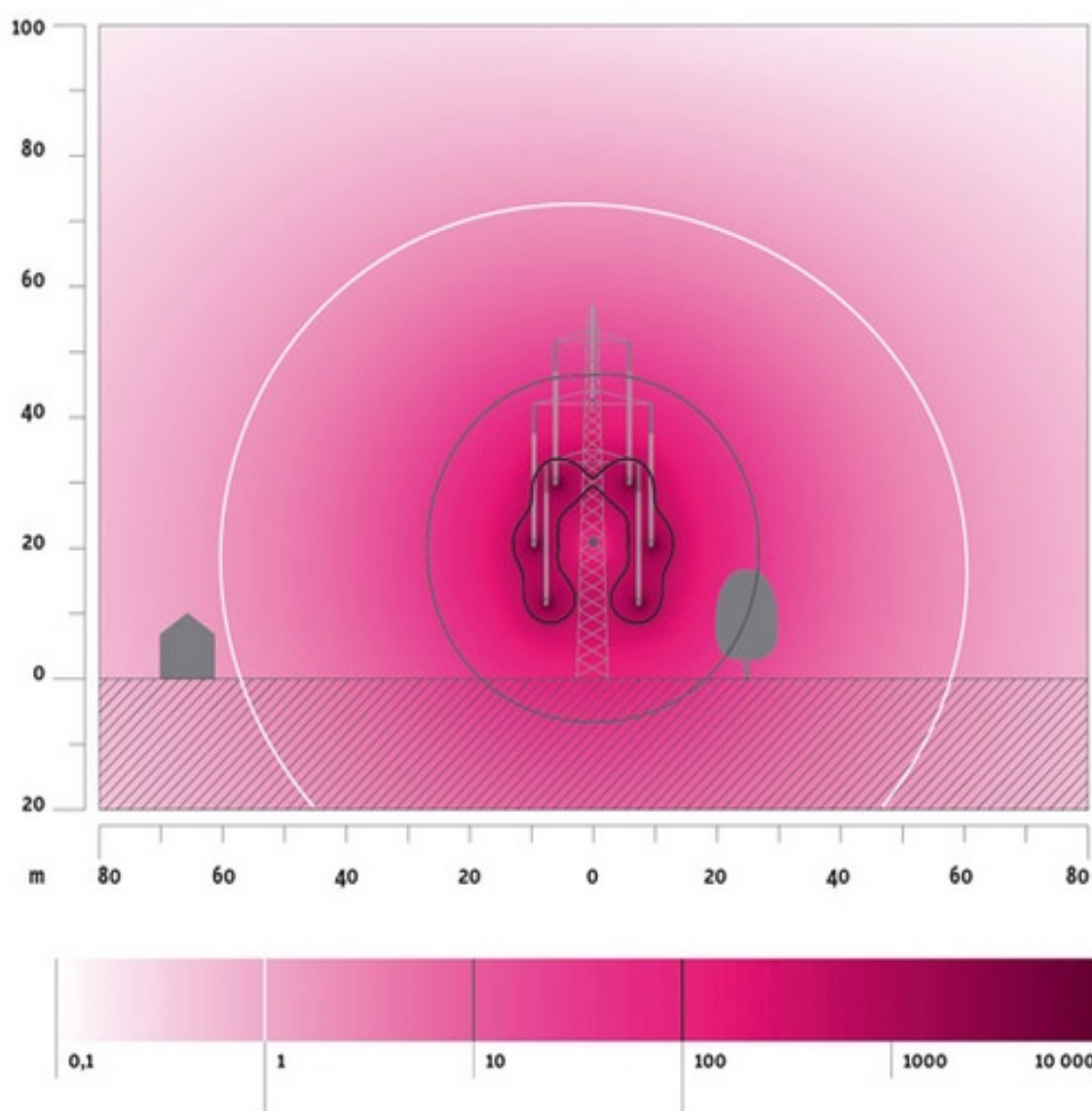


Σχήμα 3.14. Ισοδύναμη απεικόνιση τριφασικού συστήματος διπλής γραμμής

3.4.2 – Μαγνητικά πεδία γύρω από αγωγούς, αντιμετάθεση φάσεων.

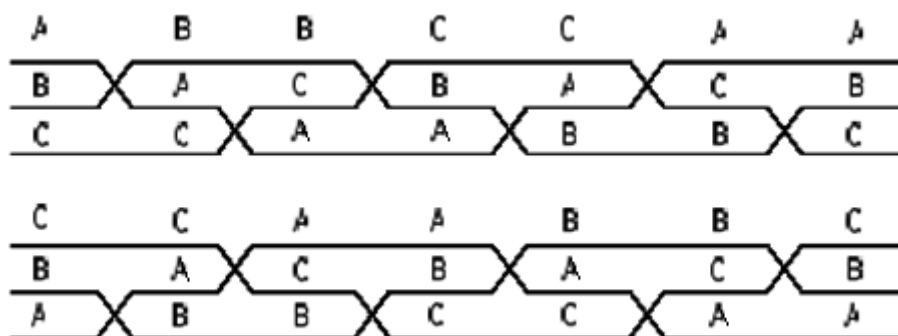
Τα εναλλασσόμενα ρεύματα σε κάθε αγωγό αλλάζουν στον χρόνο το ένα σε σχέση με το άλλο. Οι φασικές τους γωνίες είναι διαφορετικές. Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο οι τρεις φάσεις θα συνδεθούν στους αγωγούς, η χωρική επέκταση του μαγνητικού πεδίου θα μειωθεί ή θα αυξηθεί.

Η βελτιστοποίηση του συστήματος συνίσταται από ειδικά προγράμματα προσομοίωσης τα οποία απεικονίζουν την έκταση του μαγνητικού πεδίου, υπολογισμένη για διαφορετικές διατομές αγωγών και τοποθέτησή τους.



Σχήμα 3.15. Πρόσοψη γραμμής διπλού κυκλώματος 380kV με 2 κυκλώματα σε λειτουργία υπό πλήρες φορτίο (1.920 Ampere)
πηγή: FOEN (Federal Office for the Environment).
Πυκνότητα μαγνητικής ροής σε μT (microTesla.)

Η μέθοδος της αντιμετάθεσης των αγωγών, χρησιμοποιείται κυρίως για μεγάλες αποστάσεις γραμμών μεταφοράς.

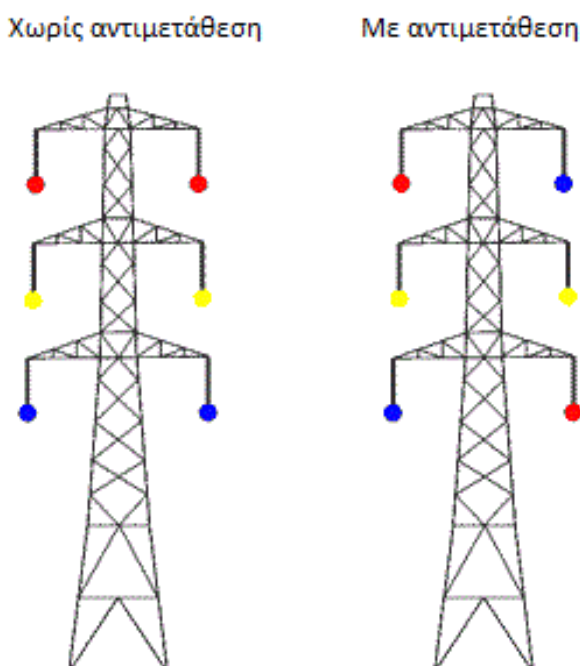


Σχήμα 3.16. – Αντιμετάθεση αγωγών γραμμής μεταφοράς, σε περίπτωση διανομής σε μεγάλες αποστάσεις.

Υπάρχουν 6 τύποι αντιμετάθεσης, οι οποίοι δείχνονται παρακάτω.

Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4	Τύπος 5	Τύπος 6
$A C'$	$B C'$	$B A'$	$C A'$	$C B'$	$A B'$
$B B'$	$A A'$	$C C'$	$B B'$	$A A'$	$C C'$
$C A'$	$C B'$	$A B'$	$A C'$	$B C'$	$B A'$

Πίνακας 3.4. – Τύποι αντιμετάθεσης γραμμών μεταφοράς για μεγάλες αποστάσεις.



Σχήμα 3.17. Αντιμετάθεση φάσεων σε πυλώνα μεταφοράς διπλής γραμμής.

Το μαθηματικό μοντέλο του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται γύρω από μια γραμμή μεταφοράς εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση που προκύπτει από τον νόμο του Faraday :

$$\nabla^2 \times E - \sigma \cdot \mu \frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon \cdot \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (3.3)$$

Όπου : ε η διηλεκτρική σταθερά του μέσου, μ και σ η μαγνητική διαπερατότητα και αγωγιμότητα του μέσου αντίστοιχα.

Αντίστοιχα η μαθηματική έκφραση του μαγνητικού πεδίου είναι η παρακάτω :

$$\nabla^2 \times H - \sigma \cdot \mu \frac{\partial H}{\partial t} - \varepsilon \cdot \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (3.4)$$

Εφόσον όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα μεγέθη στις γραμμές μεταφοράς είναι χρονικά μεταβαλλόμενα, η έκφραση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να γραφτεί στη σύνθετη μορφή της.

$$E = E \cdot e^{j\omega t} \quad (3.5)$$

Συνεπώς,

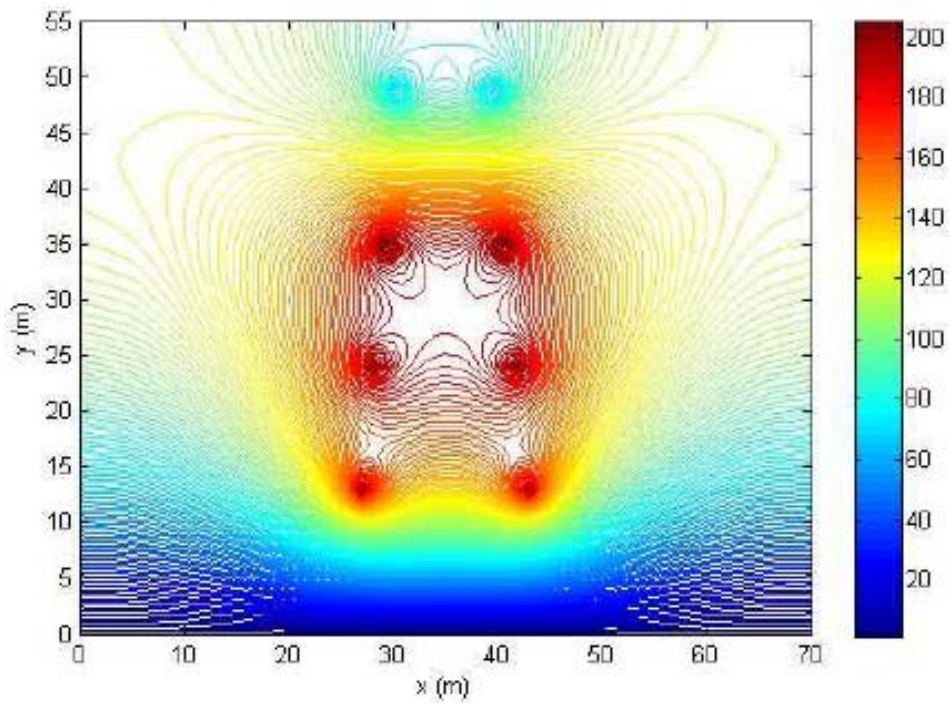
$$\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E \quad (3.6)$$

και

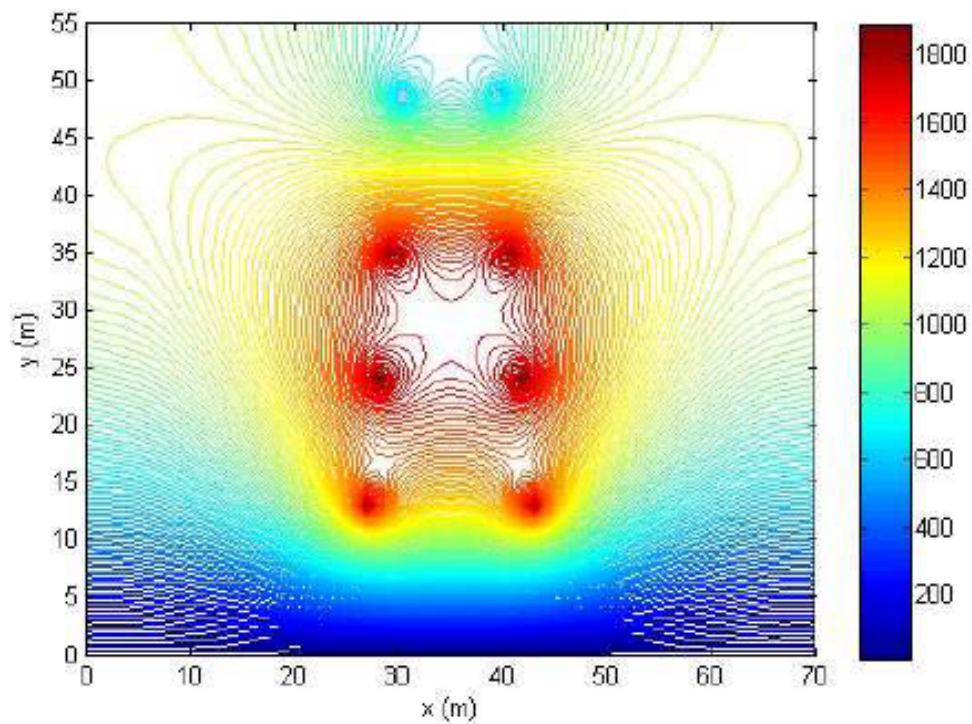
$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\omega^2 E \quad (3.7)$$

Όπου ω η γωνιακή συχνότητα.

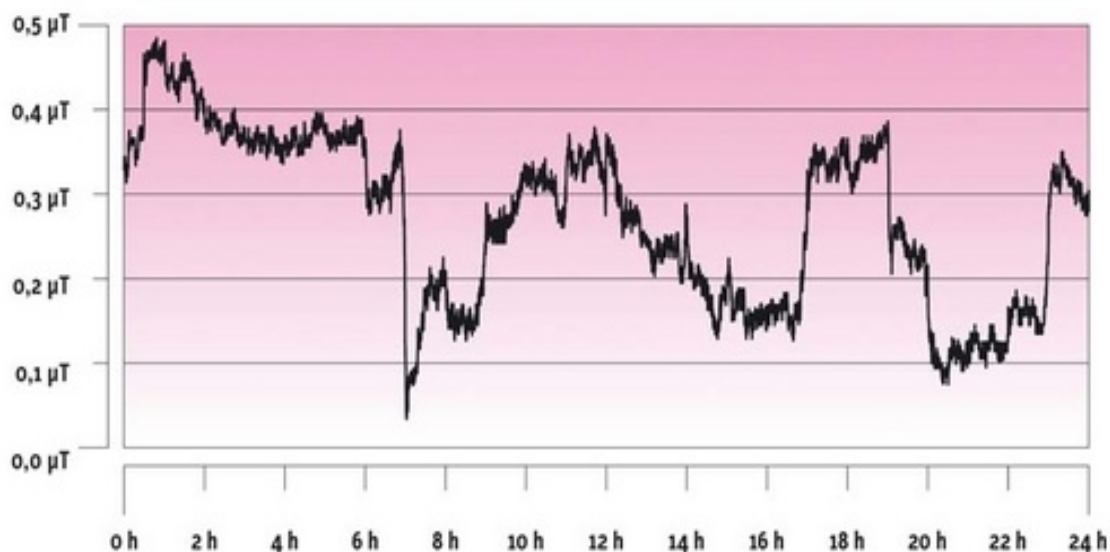
Στα σχήματα 3.18 και 3.19, παρουσιάζονται μετρήσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου σε γραμμή υπερηψηλής τάσης 500kV. Ο άξονας χ (m) δείχνει την απόσταση σε μήκος και ο άξονας ψ την απόσταση σε ύψος. Με τη χρωματισμένη διαβάθμιση δείχνεται η κατανομή του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα.



Σχήμα 3.18. Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου [kV/m] για αντιμετάθεση αγωγών σε διπλό κύκλωμα υπερυψηλής τάσης $500kV$.

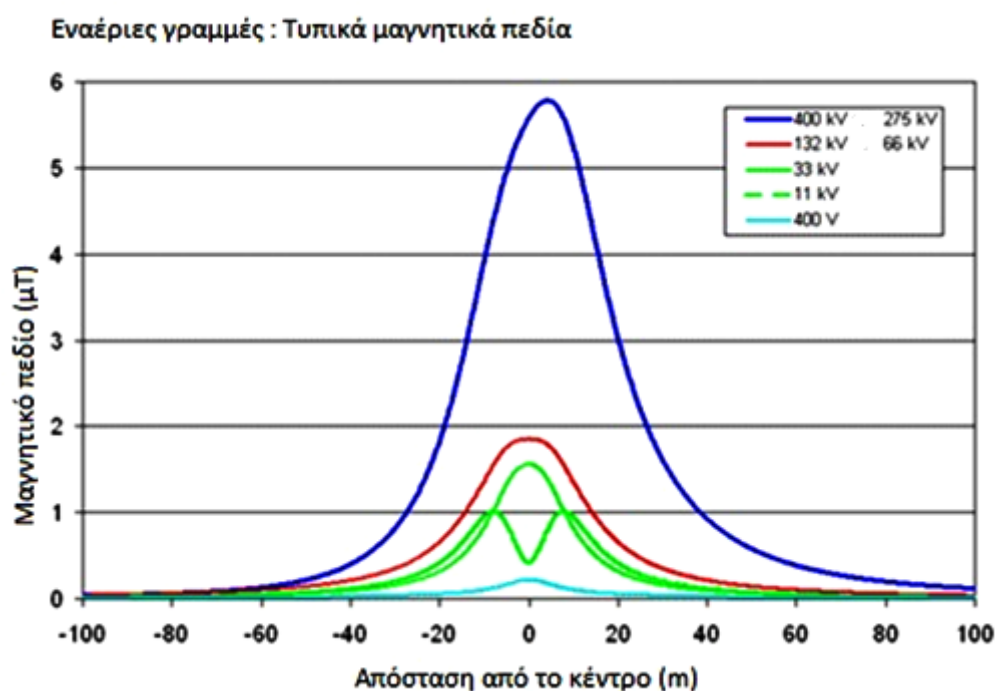


Σχήμα 3.19. Κατανομή μαγνητικού πεδίου [μT] για αντιμετάθεση αγωγών σε διπλό κύκλωμα υπερυψηλής τάσης $500kV$.



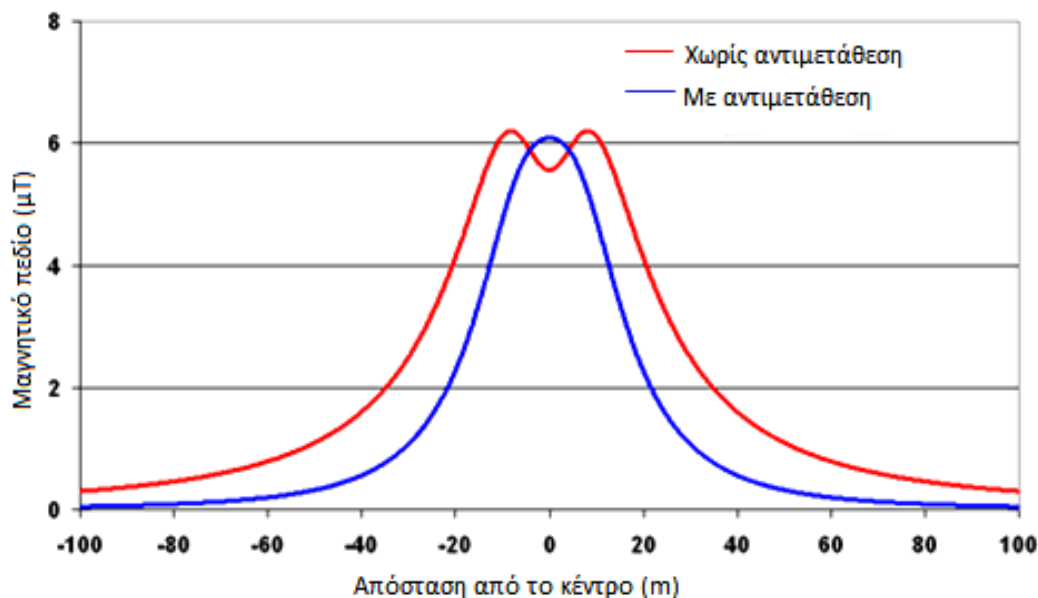
Σχήμα 3.20 – Απεικόνιση μαγνητικού πεδίου κοντά σε μία γραμμή 220kV σε 24ωρη βάση. Το μαγνητικό πεδίο διακυμαίνεται ανάλογα με την ποσότητα του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς. [Δείγμα: Ιανουάριος 2012]
πηγή: FOEN (Federal Office for the Environment)

Τα μαγνητικά πεδία, σε μακροσκοπική κλίμακα σχετίζονται με τα ηλεκτρικά ρεύματα. Αυτή η σχέση συγκεκριμενοποιείται με τον νόμο των Biot-Savart και υπολογίζεται με τον νόμο του Ampere. Τα μαγνητικά πεδία είναι άμεσα σχετιζόμενα με το ρεύμα. Οι μεγαλύτερες γραμμές μεταφοράς, έχουν μια μέση τιμή 700A.

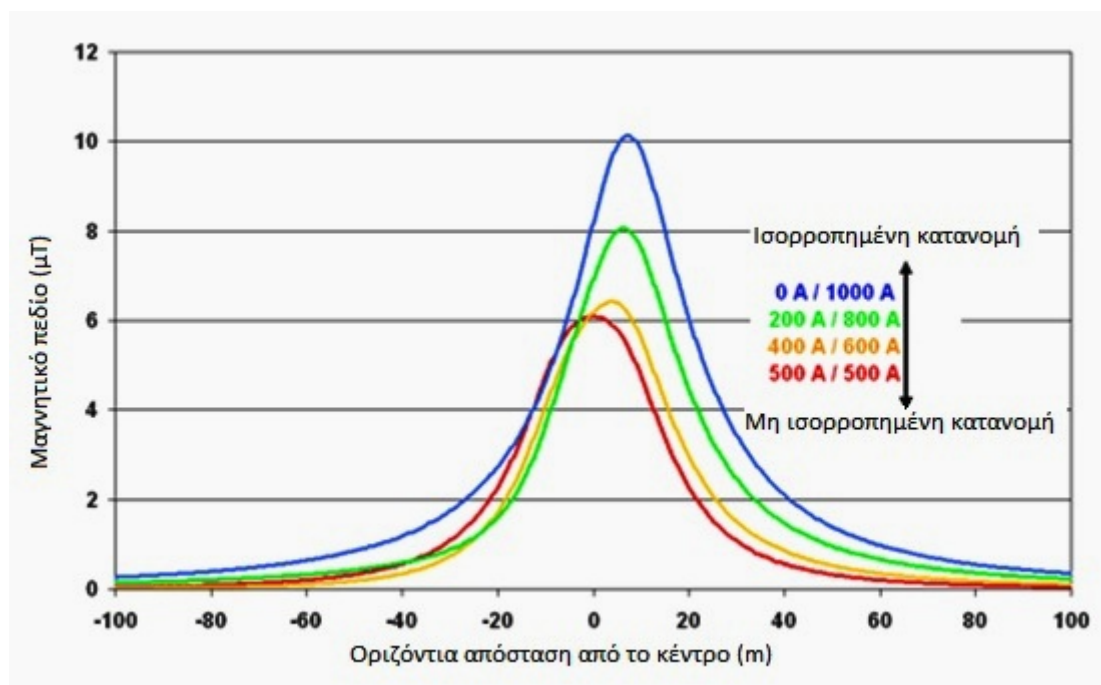


Σχήμα 3.21. Τοπικές τιμές μαγνητικών πεδίων σε εναέρια κυκλώματα για διάφορες τιμές τάσεων.

Όπως το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται άμεσα από το συνολικό ρεύμα στο κύκλωμα, έτσι εξαρτάται και από την ισορροπία του ρεύματος μεταξύ των 2 κυκλωμάτων όταν πρόκειται για κύκλωμα διπλής γραμμής. Για ένα ισορροπημένο σύστημα μεταφοράς, τα μαγνητικά πεδία αλληλοεξουδετερώνονται, ενώ για ένα μη ισορροπημένο σύστημα ενισχύονται.



Σχήμα 3.22. Κατανομή μαγνητικού πεδίου σε γραμμή με αντιμετάθεση και χωρίς αντιμετάθεση.

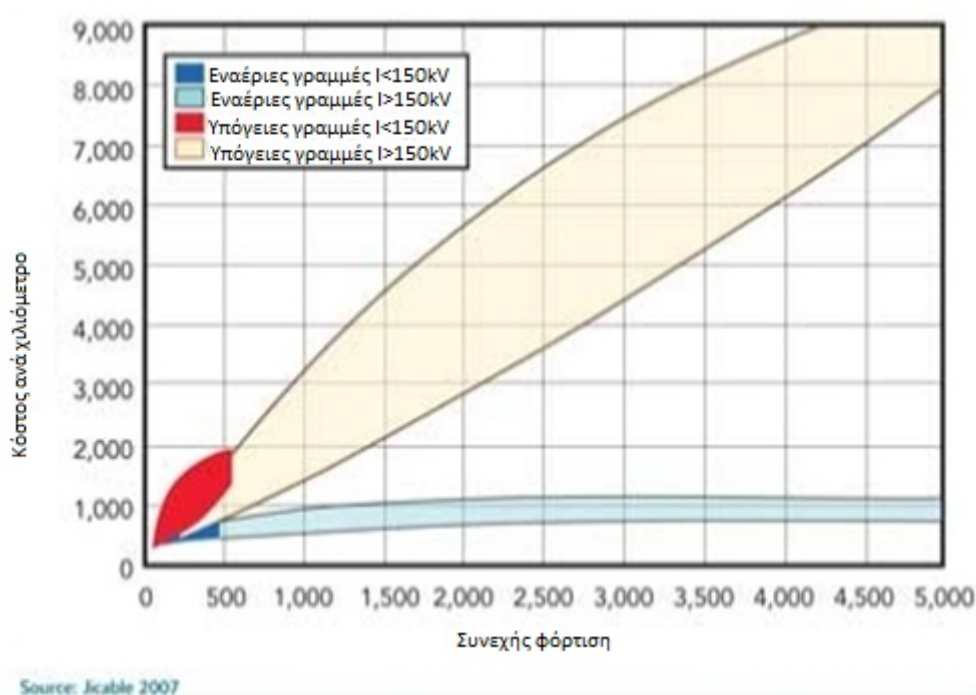


Σχήμα 3.23. Το συνολικό ρεύμα της γραμμής είναι 1.000A. Στο γράφημα δεικνύεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου για ισορροπημένη και μη ισορροπημένη κατανομή.

3.4.3. Υπόγειες γραμμές μεταφοράς

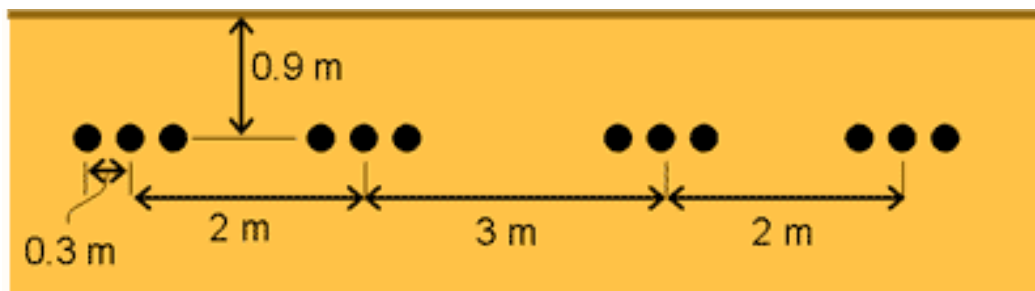
Οι υπόγειες γραμμές χρησιμοποιούνται ή αντικαθιστούν τις εναέριες, σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, σε περιοχές οικολογικά ευαίσθητες, και στην τροφοδότηση νησιών. Τα καλώδια είναι μονωμένα και δρομολογούνται μέσα από υπόγειους αγωγούς.

Κοστίζουν πολύ περισσότερο στην κατασκευή και στη συντήρησή τους, και σε σχέση με τις εναέριες επιδρούν σε μεγαλύτερη έκταση στο περιβάλλον. Οι περιορισμοί στην κατασκευή τους είναι αρκετοί, αφού πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν θέματα όπως διασταύρωση με άλλα δίκτυα, βάθος διεύθυνσης των ριζών των δέντρων όταν περνάνε μέσα από δάση, υγρασία εδάφους, υπόγεια ύδατα κτλ. Το κόστος συντήρησης και εγκατάστασής τους πολλές φορές υπερβαίνει και το 3πλάσιο μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς.

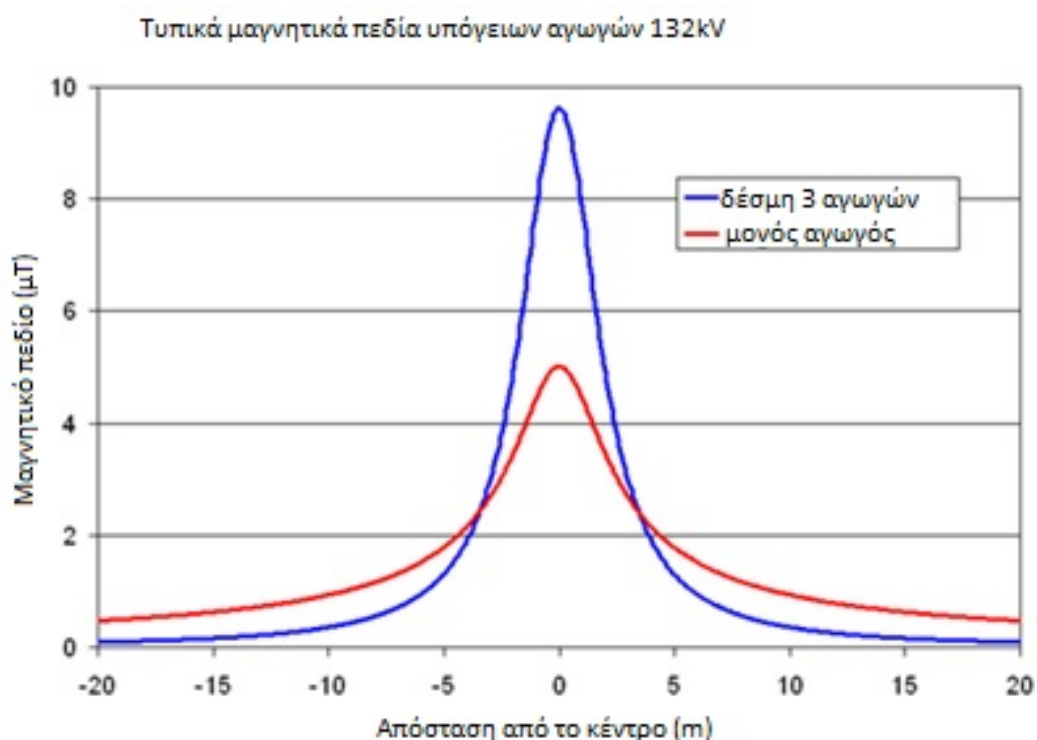


Σχήμα 3.24. Συγκριτικά κόστη συνεχούς φόρτισης ανά χιλιόμετρο. Το κόστος αυξάνεται δραματικά για τις υπόγειες γραμμές, λόγω των δομικών έργων που χρειάζονται για την εγκατάστασή τους.

Τα τελευταία χρόνια, χώρες όπως η Γερμανία ή η Ολλανδία, εγκαθιστούν πηγές ανανεώσιμης ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Η σύνδεσή τους με το δίκτυο μεταφοράς, πολλές φορές απαιτεί τη χρησιμοποίηση υπόγειων και υποθαλάσσιων γραμμών, λόγω της τοποθεσίας των ανεμογεννητριών οι οποίες είναι σε παραθαλάσσιες περιοχές. Μία συμφέρουσα λύση όσον αφορά τη μερική χρήση υπόγειων καλωδίων κατά μήκος του δικτύου σε συνδυασμό με εναέρια μέσα, προτάθηκε από κάποιες ευρωπαϊκές εταιρίες ηλεκτρισμού. Σε περιοχές όπου υπάρχει κίνδυνος άμεσης καταπόνησης ή διάβρωσης των εναέριων μέσων, η χρησιμότητα του συνδυασμού στον τρόπο μεταφοράς είναι μεγάλη. Παρακάτω παρουσιάζονται γραφήματα του μαγνητικού πεδίου υπόγειων γραμμών για διάφορες τιμές τάσης σύμφωνα με την παρακάτω τοποθέτηση, καθώς και η σύγκρισή τους με εναέριες γραμμές μεταφοράς.

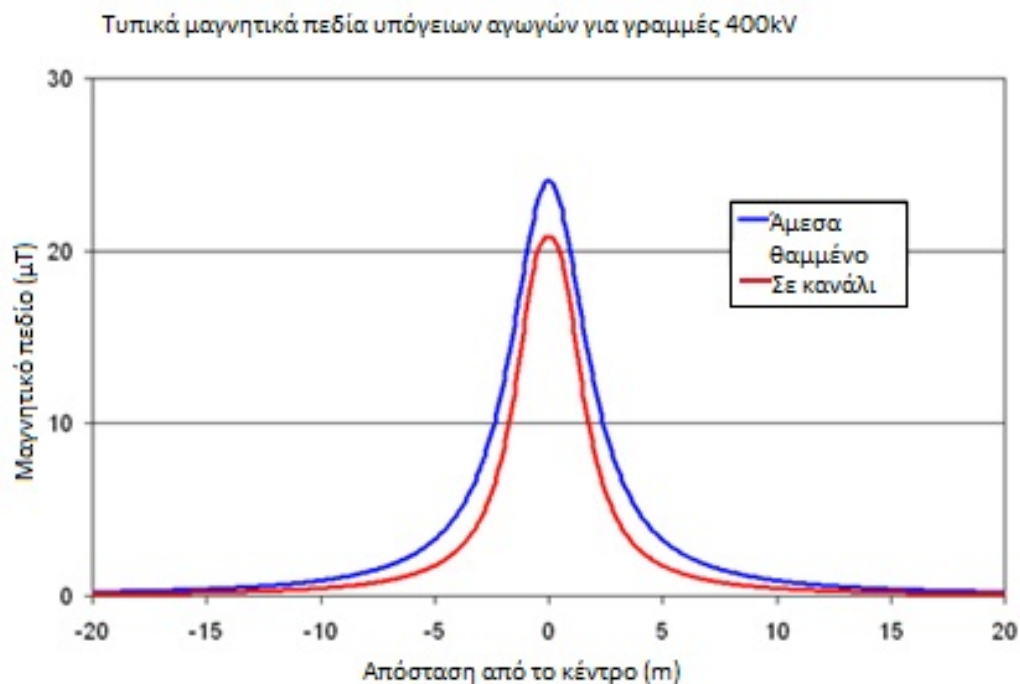


Σχήμα 3.25. Παράδειγμα τοποθέτησης αγωγών υπόγειας γραμμής.

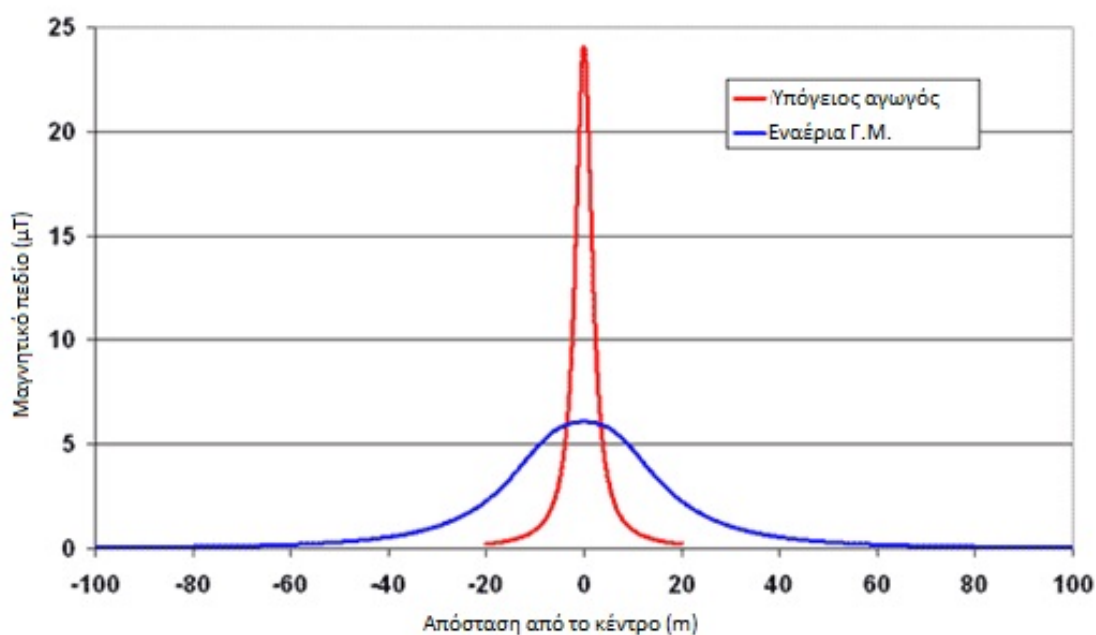


Σχήμα 3.26. Μαγνητικό πεδίο υπόγειας γραμμής μεταφοράς 132kV, για έναν και τρεις αγωγούς αντίστοιχα

Σε αρκετές περιπτώσεις, αντί να θαφτούν άμεσα στο έδαφος, οι υπόγειοι αγωγοί οδεύουν μέσα σε κανάλι, το οποίο μπορεί να βρίσκεται σε βάθος έως και 10 μέτρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια του εδάφους μειώνεται δραματικά, ακόμη χαμηλότερα από το αντίστοιχο πεδίο μιας εναέριας γραμμής. Επίσης, πολλές φορές οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς έχουν 2 δέσμες αγωγών, σε αντιστοιχία με τις εναέριες, και κάθε δέσμη μπορεί να περιλαμβάνει 2 ομάδες αγωγών.

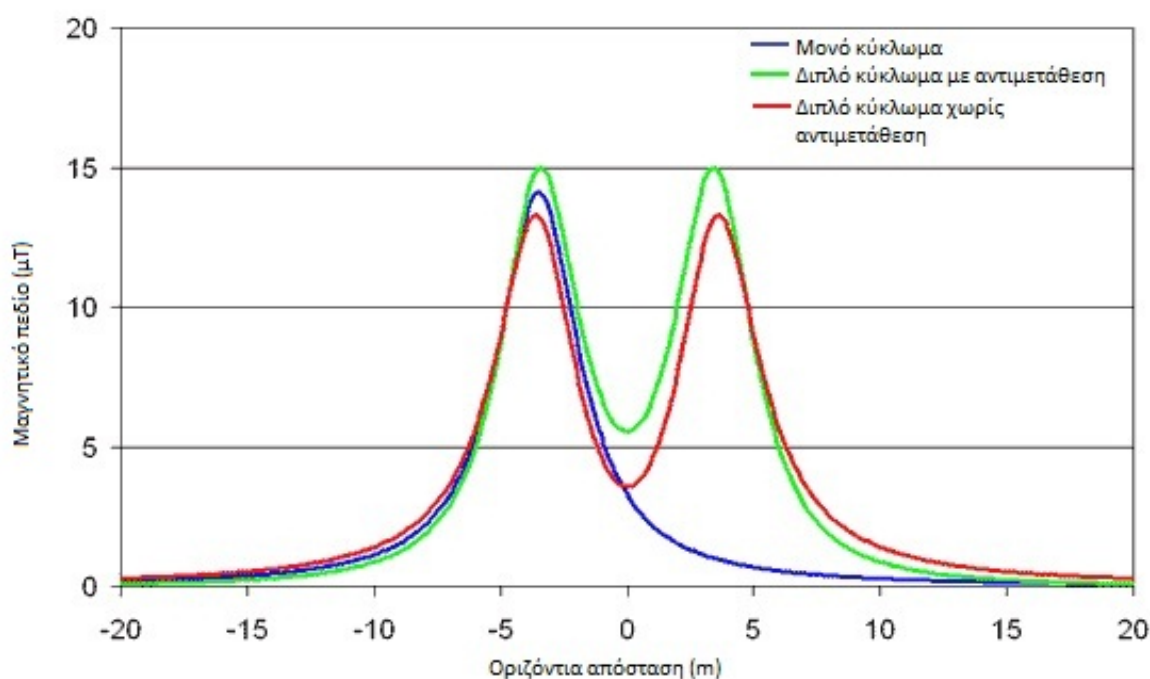


Σχήμα 3.27. Μαγνητικό πεδίο υπόγειας γραμμής γραμμής μεταφοράς 400kV, θαμμένη άμεσα και μέσα σε κανάλι μεταφοράς.



Σχήμα 3.28. Σύγκριση μαγνητικού πεδίου υπόγειας και εναέριας γραμμής μεταφοράς για τάση 132kV.

Όσο αυξάνεται η ζήτηση στην ενέργεια, η τοποθέτηση αγωγών μεγαλύτερης διατομής γίνεται απαιτητικότερη. Στο σημείο αυτό μπορούν να τοποθετηθούν παραπάνω κυκλώματα, αντί να αυξάνεται η διατομή των αγωγών. Το πώς επηρεάζει αυτό το μαγνητικό πεδίο, φαίνεται στο παρακάτω γράφημα για αντιμετάθεση και χωρίς αντιμετάθεση αγωγών.



Σχήμα 3.29. – Διπλό κύκλωμα με αντιμετάθεση αγωγών και χωρίς, σε σύγκριση με μονό κύκλωμα.

3.4.4. Συμπακτωμένοι αγωγοί

Οι συμπακτωμένοι αγωγοί, χαρακτηρίζονται από παντελή έλλειψη διακένου στο εσωτερικό τους, με τέτοιο τρόπο ώστε η συνολική τους διάμετρος –ανταποκρινόμενη στην εξωτερική διάμετρο του αγωγού- σχηματίζεται από ένα αγωγίμο υλικό. Αυτή η λύση επιτρέπει την μείωση της ωμικής αντίστασης σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος με την ίδια πάντα εξωτερική διάμετρο, και έτσι συνεπάγεται έλεγχο και απαγωγή των απωλειών σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο τύπος αυτός αγωγών, χρησιμοποιεί κράματα με χαμηλό συντελεστή διαστολής α έτσι ώστε να είναι ελεγχόμενη η καμπύλη του τόξου μεταξύ των πυλώνων και οι μηχανικές ιδιότητες.

Οι αγωγοί υψηλής θερμοκρασιακής ανοχής, κατασκευάζονται με συγκεκριμένα υλικά όπως Al-Zr (TAL Thermal Resistant Aluminum Alloy), και διατηρούν τις μηχανικές τους ιδιότητες ακόμη και όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας για πολύ μεγάλες περιόδους (ξεπερνούν τα 20 χρόνια.)

Zr (ζιρκόνιο) : Δραστικό μέταλλο υψηλά ανθεκτικό στη διάβρωση από οξέα και καυστικά αλκάλια και στη θερμότητα.

Πυκνότητα : $6,52 \text{ gr/cm}^3$

Θερμοκρασία τήξης $\cong 1850^\circ\text{C}$

Πρέπει να σημειωθεί πως ακόμη και το ανοπτημένο αλουμίνιο μπορεί να φτάσει θερμοκρασίες λειτουργίας μέχρι και 180°C και να μην παρουσιάσει πρόβλημα, (ενώ το κράμα ZTAL μπορεί να φτάσει ακόμη και τους 240°C σε επείγουσες περιπτώσεις), αλλά τα μηχανικά του χαρακτηριστικά είναι κατώτερα από αυτών του κράματος Al-Zr.

Τύπος κράματος	Περιγραφή	Θερμοκρασία λειτουργίας	Θερμοκρασία επείγουσας λειτουργίας
ZTAL	Ultra Thermal resistant Aluminum Alloy	210°C	240°C
TAL	Thermal resistant Aluminum Alloy	150°C	180°C
Al	Aluminum 1350 H19	70°C	90°C
Al	Aluminum 1350-0	150°C	180°C

Πίνακας 3.5. Θερμοκρασιακή σύγκριση στην κλίμακα °C του αλουμινίου σε σχέση με τους αγωγούς από κράμα αλουμινίου – ζirkονίου.

3.4.5. Ηλεκτρικά πεδία γύρω από αγωγούς. Στατικά πεδία, νόμος του Coulomb.

Ο νόμος του Coulomb μοιάζει πολύ με τον νόμο του Νεύτωνα περί βαρύτητας, και εξετάζει την ηλεκτρική δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο σημειακών φορτίων. Η ηλεκτρική δύναμη που ασκείται σε ένα σημειακό φορτίο q_1 ως αποτέλεσμα της παρουσίας ενός σημειακού φορτίου q_2 , είναι ένα διανυσματικό μέγεθος και δίνεται από τον νόμο του Coulomb.

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ (N)} \quad (3.8)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται λόγω της παρουσίας του φορτίου q_1 μόνο, είναι ίσο με

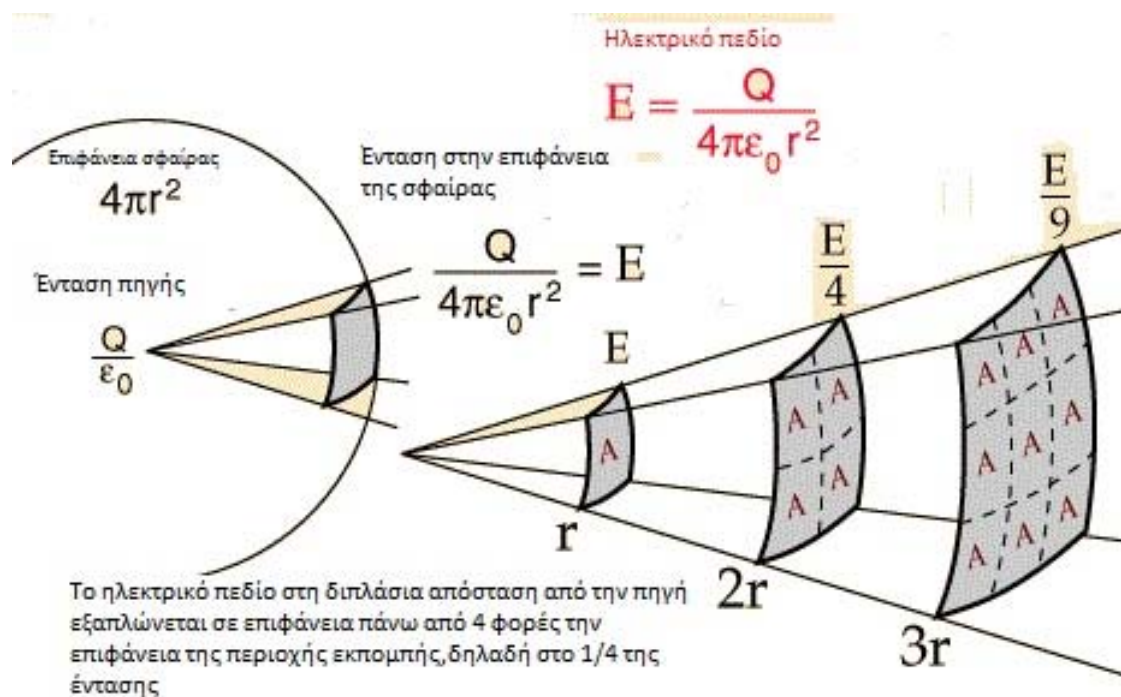
$$E = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3.9)$$

Όπου ϵ_0 η διαπερατότητα του κενού.

Παρουσία άνω του ενός φορτίου, το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο ισούται με το άθροισμα των πεδίων του κάθε ενός φορτίου ξεχωριστά, δηλαδή $E_{ολικό} = E_1 + E_2 + \dots + E_n$

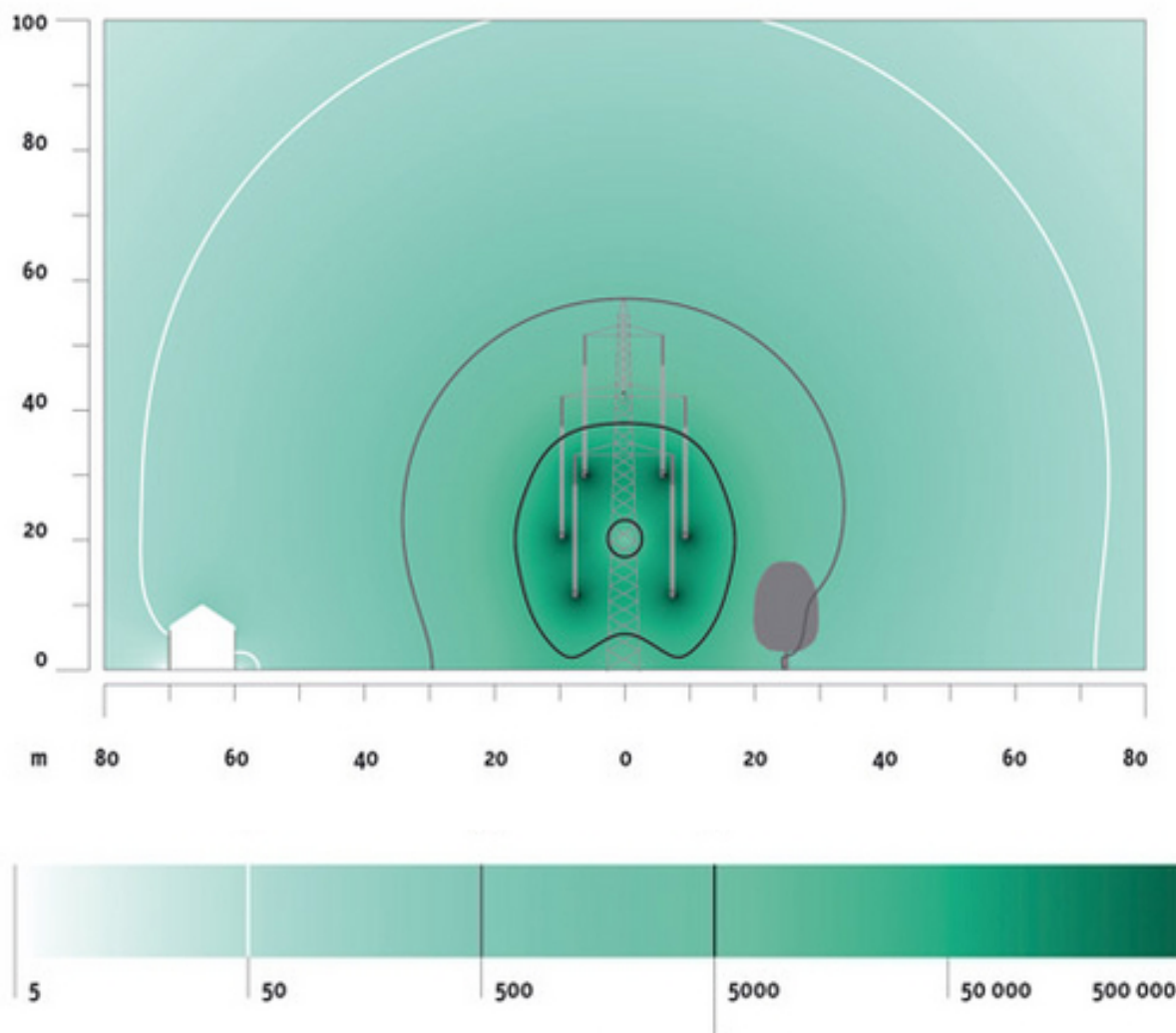
Το ηλεκτρικό πεδίο υπακούει στον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου, ο οποίος εφαρμόζεται σε όλες τις γνωστές δυνάμεις που ενεργούν στη φύση. Ο νόμος αυτός, ορίζει πως η επίδραση κάθε σημειακής πηγής που δρά ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και εκτείνεται στο άπειρο, εξασθενεί αναλογικά με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή.

Η έννοια του στατικού πεδίου, είναι το ότι τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια σε ένα υλικό βρίσκονται υπό συνθήκη ισορροπίας, δηλαδή δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου από ένα σημείο σε ένα άλλο. Υπό στατικές συνθήκες, η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου και το άθροισμα των φορτίων σε έναν αγωγό είναι 0.



Σχήμα 3.30. – Απεικόνιση της εφαρμογής του νόμου των αντιστρόφων τετραγώνων για το ηλεκτρικό πεδίο

Σαν άμεση συνέπεια των παραπάνω, τα ηλεκτρικά πεδία γύρω από γραμμές μεταφοράς εξαρτώνται άμεσα από την τάση μεταφοράς και από την απόσταση από τον αγωγό. Ακριβώς κάτω από μία γραμμή υψηλής τάσης των 380kV, η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να φτάσει τα 5.000V/m. Όσο χαμηλότερη η τάση, τόσο μικρότερο το πεδίο και όσο αυξάνει η απόσταση από τον αγωγό, μειώνεται και η επίδραση του πεδίου. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα από μετρήσεις πλησίον γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης 380kV.



Σχήμα 3.31. Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [V/m], κοντά σε μια γραμμή μεταφοράς 380kV διπλού κυκλώματος. πηγή: FOEN (Federal Office for the Environment)

3.4.5.1. Προσδιορισμός του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από συμπαγή κυλινδρικό αγωγό.

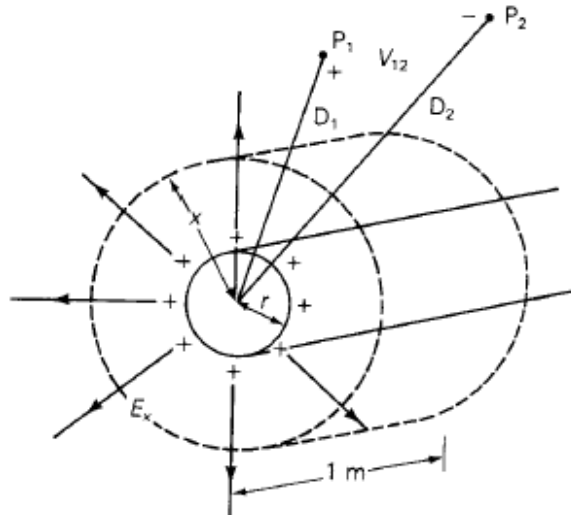
Ο νόμος του Gauss δηλώνει πως η συνολική ροή του ηλεκτρικού πεδίου που εξέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια, ισούται με το συνολικό φορτίο εντός του όγκου που περιβάλλεται από την επιφάνεια. Η συνιστώσα, δηλαδή της πυκνότητας του ρεύματος σε μια κλειστή επιφάνεια ισούται με το φορτίο που περικλείεται στην επιφάνεια. Ένα σημειακό ηλεκτρικό φορτίο έχει διανυσματικές ιδιότητες, και δημιουργεί γύρω του ένα πεδίο. Το άθροισμα των σημειακών αυτών φορτίων έχει επίσης διανυσματικό χαρακτήρα, δηλαδή εξέρχεται ή εισέρχεται στο πεδίο.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει έναν κυλινδρικό αγωγό ακτίνας r και με φορτίο q Coulomb ανά μέτρο που διανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του αγωγού.

Για τους υπολογισμούς θεωρείται τέλειος αγωγός ($\rho = 0$).

Εντός του αγωγού, για το ηλεκτρικό πεδίο ισχύει:

$$E_{int} = \rho \cdot J = 0 \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.32. Ηλεκτρικό πεδίο γύρω από συμπαγή κυλινδρικό αγωγό

Λόγω της ομοιόμορφης κατανομής του ρεύματος, η ένταση της πυκνότητας του ηλεκτρικού πεδίου είναι σταθερή. Από τον νόμο του Gauss:

$$\iint D|ds = \iint \varepsilon \cdot E|ds = Q_{enclosed} \quad (3.11)$$

Από τον νόμο του Gauss, τα ηλεκτρικά φορτία είναι πηγή ηλεκτρικών πεδίων. Οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου προέρχονται από τα θετικά φορτία και τερματίζουν στα αρνητικά. Το παραπάνω σχήμα δείχνει έναν κυλινδρικό αγωγό με ακτίνα r και με φορτίο q Coulomb ανά μέτρο, που κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του αγωγού.

Το E_{int} (το πεδίο μέσα στον αγωγό) είναι σταθερό και ίσο με το μηδέν.

Για να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο εκτός του αγωγού, επιλέγουμε έναν κύλινδρο με ακτίνα $x > r$ και μήκος ένα μέτρο.

Λόγω της ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου, η E_x είναι σταθερή στον κυλινδρικό αγωγό. Επίσης, δεν υφίσταται επαπτομενική παράμετρος του E_x , οπότε το ηλεκτρικό πεδίο είναι ακτινωτό. Ολοκληρώνοντας την (3.11):

$$\varepsilon E_x (2\pi x)(l) = q(l) \quad (3.12)$$

$$E_x = \frac{q}{2\pi \varepsilon x} \quad (V/m) \quad (3.13)$$

Όπου $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

Στο σχήμα (3.32) φαίνεται η διαβάθμιση των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου, η κατεύθυνση των οποίων όπως δεικνύεται και από τα βέλη, είναι από τα θετικά φορτία από όπου προέρχεται το πεδίο, προς τα αρνητικά φορτία, που στην περίπτωση αυτή είναι το άπειρο.

Η διαφοροποίηση μεταξύ δύο ομόκεντρων κύλινδρων σε αποστάσεις D_1 , D_2 από το κέντρο του αγωγού είναι:

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E_x dx \quad (3.14)$$

Αντικαθιστώντας την (3.13) στην (3.11):

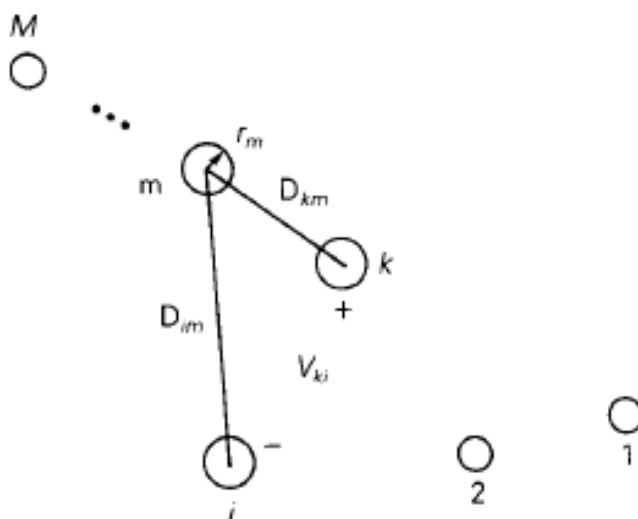
$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi\epsilon x} dx = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (\text{Volt}) \quad (3.15)$$

Η (3.15) μας δίνει την τάση V_{12} μεταξύ δύο σημείων P_1, P_2 σε αποστάσεις D_1, D_2 από το κέντρο του αγωγού, όπως δείχνεται στο σχήμα. Επίσης, σύμφωνα με τον συμβολισμό του σχήματος η V_{12} είναι η τάση στο σημείο P_1 , συγκριτικά με το P_2 .

Αν το q είναι θετικό και $D_2 > D_1$, τότε η V_{12} είναι θετική. Η παραπάνω σχέση ισχύει τόσο για AC όσο και για DC. Για AC η V_{12} είναι τάση που προσδιορίζει τον δείκτη της φάσης, και το q είναι φασική αναπαράσταση ενός ημιτονοειδούς φορτίου.

3.4.5.2. Προσδιορισμός του ηλεκτρικού πεδίου σε σύστημα M κυλινδρικών αγωγών.

Υποθέτοντας πως ο κάθε αγωγός m του παρακάτω σχήματος έχει ένα φορτίο q_m (C/m) που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 3.33 διάταξη m κυλινδρικών αγωγών

Εφαρμόζουμε την (3.13) για M κυλινδρικούς αγωγούς.

Η τάση V_{kim} μεταξύ των αγωγών k, i λόγω του φορτίου q_m θα είναι:

$$V_{kim} = \frac{qm}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{im}}{D_{km}} \text{ (Volt) } (3.16)$$

Για δέσμες αγωγών με N_b αγωγούς ανά δέσμη και φορτίο q (C/m), το ηλεκτρικό φορτίο ανά αγωγό είναι q/N_b , και η μέση τιμή του ηλεκτρικού πεδίου για μεμονωμένο αγωγό σε μια δέσμη αγωγών είναι:

$$E_{ave} = \frac{q/N_b}{2\pi\epsilon r} (3.17)$$

4^ο Κεφάλαιο

“Φαινόμενα που επιδρούν στους αγωγούς”

4.1. Επιδερμικό φαινόμενο (skin effect)

Γνωρίζουμε πως ένα χρονικά αμετάβλητο ρεύμα σε έναν ομογενή κυλινδρικό αγωγό, κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την διατομή του αγωγού. Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα όμως, έχει την τάση να συγκεντρώνεται κοντά στην επιφάνεια των αγωγών. Αν η συχνότητα είναι πολύ ψηλή, το ρεύμα περιορίζεται σε ένα πολύ λεπτό στρώμα πολύ κοντά στην επιφάνεια του αγωγού, πρακτικά στην ίδια την επιφάνεια. Το φαινόμενο της μη ομοιογενούς κατανομής της πυκνότητας του ρεύματος σε αγωγούς ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο.

Η αιτία δημιουργίας του επιδερμικού φαινομένου είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, συνοδεύεται πάντα από ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί δευτερεύοντα επαγόμενα (χρονικά μεταβαλλόμενα) ρεύματα, και ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο. Γνωρίζουμε από τον νόμο του Lenz πως τα επαγόμενα ρεύματα δημιουργούν τη μαγνητική ροή, η οποία είναι αντίθετη στην εξωτερική μαγνητική ροή, με τέτοιο τρόπο που η συνολική ροή μειώνεται.

Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα, τόσο μεγαλύτερη τιμή θα έχουν τα επαγόμενα ρεύματα, ενώ όσο μεγαλύτερη η διαπερατότητα, τόσο προάγεται η μείωση της μαγνητικής ροής. Συνεπώς, τόσο το συνολικό χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο όσο και τα επαγόμενα ρεύματα μέσα στους αγωγούς, μειώνονται όταν συγκρίνονται με την περίπτωση συνεχούς ρεύματος.

Το επιδερμικό φαινόμενο είναι πρακτικής σημασίας για τη μεταφορά του ρεύματος. Για παράδειγμα, σε υψηλές συχνότητες, ένα πολύ μικρό στρώμα του αγωγού μεταφέρει το περισσότερο ρεύμα, οπότε μπορούμε να επιστρώσουμε οποιονδήποτε αγωγό με ασήμι και να μεταφέρουμε πρακτικά όλο το ρεύμα μέσα από την ασημένια επίστρωση.

Δυστυχώς το ασήμι οξειδώνεται εύκολα, οπότε συχνά χρησιμοποιείται χρυσός ο οποίος είναι αδρανές υλικό. Ακόμα και για χαμηλές συχνότητες, (50Hz και 60Hz αντίστοιχα για Ευρώπη και Αμερική και Καναδά), στην περίπτωση υψηλών ρευμάτων η χρήση συμπαγών παχέων αγωγών δεν είναι αποδοτική. Αντί αυτών χρησιμοποιείται δέσμη κυκλωμάτων, συνήθως συνεστραμμένων αγωγών. Στον σχεδιασμό γραμμών μεταφοράς μικρών αποστάσεων, το επιδερμικό φαινόμενο δεν έχει σημαντικό ρόλο στις απώλειες, όσο αυξάνεται όμως η απόσταση της γραμμής από την πηγή τόσο οι υπολογισμοί πρέπει να συμπεριλάβουν τον ρόλο που έχει το φαινόμενο αφού αυξάνει την ενεργή αντίσταση των αγωγών.

4.1.1. Το επιδερμικό φαινόμενο σε αγωγούς

Η συγκεντρωμένη πυκνότητα του ρεύματος που μεταφέρει ένας αγωγός, είναι το μέγεθος που προκαλεί τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς. Από τη διαφορική μορφή των εξισώσεων του Maxwell, και αγνοώντας την πυκνότητα του ρεύματος μετατόπισης, προκύπτει :

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (4.1)$$

$$\nabla \times H = J \quad (4.2)$$

Γνωρίζουμε πως :

$$E = \frac{J}{\sigma} \quad \text{και} \quad H = \frac{B}{\mu}$$

Οπότε η σχέση 4.1 θα γίνει :

$$\nabla \times J = -j\omega\sigma B \quad (4.3)$$

$$\nabla \times B = \mu J \quad (4.4)$$

Το βάθος στο οποίο συγκεντρώνεται η πυκνότητα του ρεύματος, ονομάζεται επιδερμικό βάθος. Το επιδερμικό βάθος είναι η ουσιαστικά η ενεργός απόσταση διείσδυσης ενός Η/Μ κύματος σε ένα μέταλλο. Αυτό ορίζεται από τον εξής τύπο:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} \quad (m) \quad (4.5)$$

Στην απόσταση αυτή, το εύρος του διανύσματος της πυκνότητας J μειώνεται στο $\frac{1}{e}$ της τιμής του. Είναι προφανές από την παραπάνω σχέση, πως το επιδερμικό φαινόμενο εξαρτάται από τρεις παράγοντες, την συχνότητα f , την ειδική αντίσταση ρ και την διαπερατότητα μ του μέσου. Η μη ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος, αυξάνει την ισοδύναμη αντίσταση του αγωγού, άρα και τις απώλειες Joule στην επιφάνεια ανά μονάδα μήκους.

Η πυκνότητα του ρεύματος J μειώνεται εκθετικά από την τιμή J_s της επιφάνειας ακολούθως :

$$J = J_s e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (4.6)$$

Για να προσδιοριστεί η επίδραση του φαινομένου, ορίζεται μία αναλογία S η οποία είναι ίση με :

$$S = \frac{R_f}{R_0} \quad (4.7)$$

Όπου R_f η AC αντίσταση και R_0 η ισοδύναμη DC αντίσταση.

Σε μικρές συχνότητες, το πεδίο διεισδύει σε όλη την έκταση του αγωγού για να μεταφέρει το ρεύμα. Ως αποτέλεσμα, η αντίσταση του αγωγού είναι μικρή, και για θερμοκρασία T υπολογίζεται από τη σχέση :

$$R_{DC} = \frac{\rho_T \cdot l}{A} \quad (\Omega) \quad (4.8)$$

Όπου A η διατομή του αγωγού, l το μήκος του αγωγού.

Η αντίσταση R_s στην επιφάνεια του αγωγού δίνεται από τη σχέση :

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu}{2 \cdot \sigma}} \quad (\Omega) \quad (4.9)$$

Η εκτίμηση των απωλειών Joule και της αντίστασης σε έναν αγωγό σε υψηλές συχνότητες :

$$P_j = \int_S R_s |H_0|^2 dS \quad (W) \quad (4.10)$$

Όπου H_0 η σύνθετη rms τιμή της εφαπτομένης συνιστώσας του διανύσματος H στην επιφάνεια του αγωγού.

Θεωρούμε έναν κυλινδρικό αγωγό ακτίνας a , αγωγιμότητας σ και διαπερατότητας μ , που μεταφέρει ημιτονοειδές ρεύμα γωνιακής συχνότητας ω και με μια τιμή rms I . Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του αγωγού είναι :

$$H(0) = \frac{I}{2\pi a} \quad (4.11)$$

Οπότε σύμφωνα με την (4.10) οι απώλειες Joule ανά μονάδα μήκους τους αγωγού θα είναι :

$$P' = R_s \cdot \frac{I^2}{2\pi a} \quad (W/m) \quad (4.12)$$

Επειδή η αντίσταση ανά μονάδα μήκους είναι $[P' = R' \cdot I^2]$, η αντίσταση ανά μονάδα μήκους για κυλινδρικό αγωγό σε υψηλές συχνότητες θα είναι :

$$R' = \frac{R_s}{2\pi a} \quad (\Omega/m) \quad (4.13)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (4.10) ,η ισχύς που αναπτύσσεται λόγω αντίστασης σε υψηλές συχνότητες μέσα στον αγωγό, είναι περίπου η ίδια με την τιμή των απωλειών Joule.

Γνωρίζουμε πως η εσωτερική ισχύς λόγω αντίστασης ανα μονάδα μήκους του αγωγού μπορεί να εκφραστεί ως $X'_{int} \cdot I^2$. Η σχέση (4.10) ωστόσο, αναφέρεται στο πεδίο εντός του αγωγού μόνο. Αφού είναι θετική, η εσωτερική αντίσταση είναι επαγωγική :

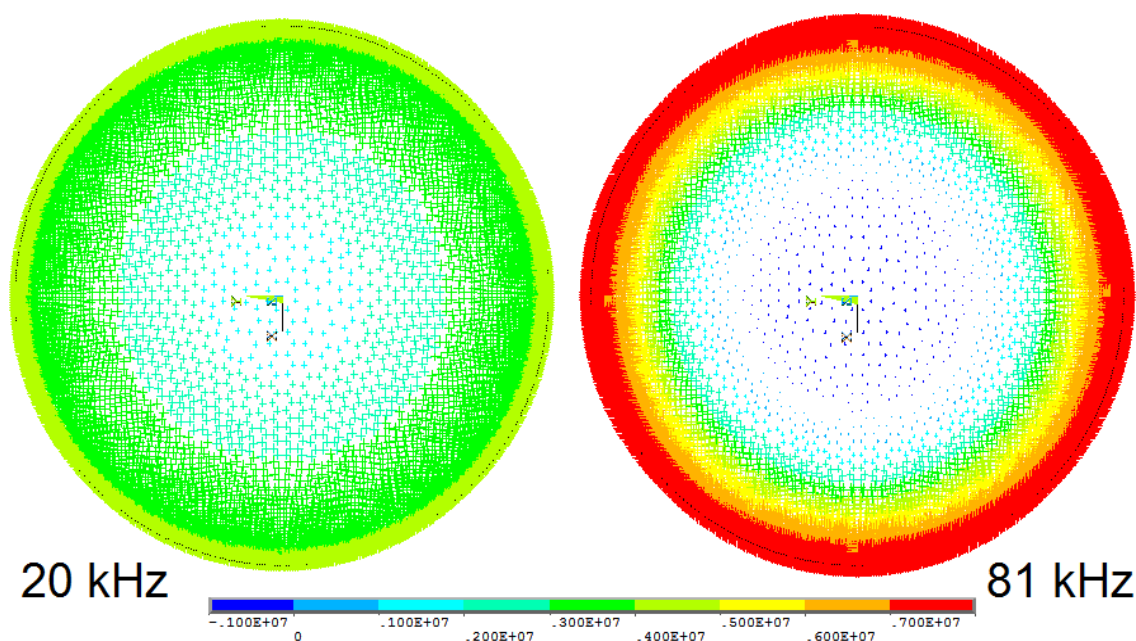
$$X'_{int} = \omega L'_{int} \quad (4.14)$$

Μια αρχική εκτίμηση της σχέσης δείχνει πως η αυτεπαγωγή της γραμμής είναι εξίσου ίσως και πιο σημαντική όσον αφορά τις επιδράσεις στον αγωγό.

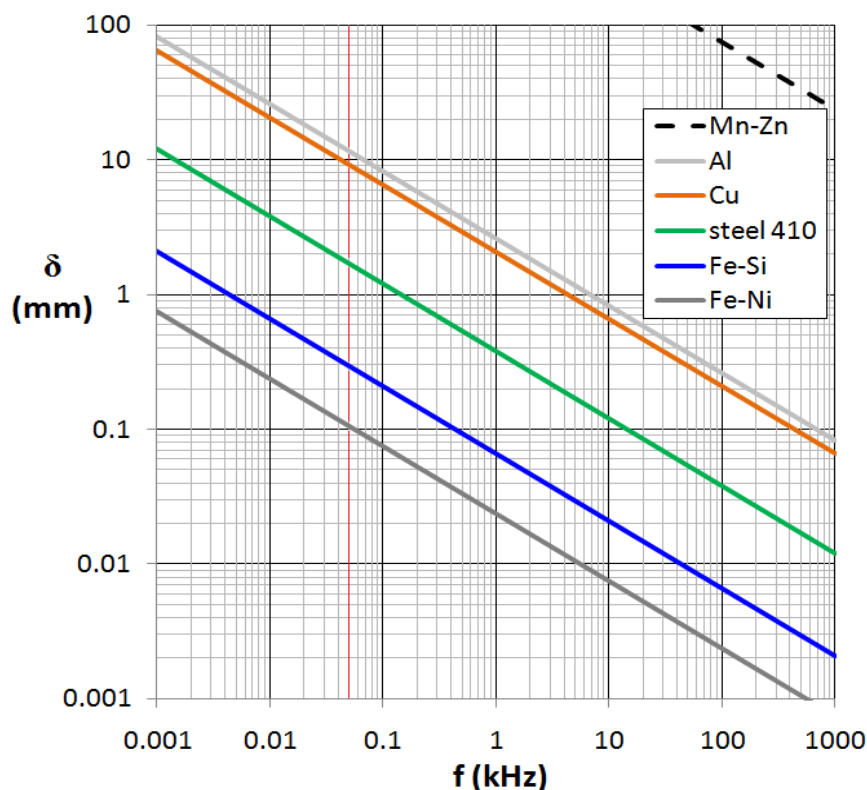
Συνεπώς από την (4.14) η εσωτερική αντίσταση του αγωγού σε υψηλές συχνότητες ανα μονάδα μήκους δίνεται από τη σχέση :

$$L'_{int} = \frac{R'}{\omega} = \frac{R_s}{2\pi\alpha\omega} \text{ (H/m)} \quad (4.15)$$

Σε έναν καλό αγωγό, το επιδερμικό βάθος είναι μειωμένο. Η συνολική αντίσταση παραμένει χαμηλότερη ακόμα και με το ελαττωμένο επιδερμικό βάθος. Ωστόσο, ο καλός αγωγός παρουσιάζει ψηλότερη αναλογία μεταξύ AC και DC αντίστασης συγκρινόμενος με έναν αγωγό μεγαλύτερης αντίστασης. Για παράδειγμα, στα 50Hz, ένας αγωγός χαλκού έχει κατά προσέγγιση 23% μεγαλύτερη αντίσταση από ότι στο συνεχές ρεύμα. Ιδίου διαμετρήματος αγωγός αλουμινίου στην ίδια συχνότητα έχει μόνο 10% μεγαλύτερη τιμή αντίστασης.



Σχήμα 4.1. Επιδερμικό φαινόμενο για κυλινδρικό αγωγό διατομής 2mm και για συχνότητες 20-80kHz.



Σχήμα 4.2. Επιδερμικό βάθος συναρτήσει της συχνότητας για διάφορα υλικά

4.2. Μαγνητική πίεση

Η μαγνητική πίεση είναι η μηχανική ενέργεια που ασκείται επάνω σε ένα αγωγικό σώμα, όταν αυτό βρίσκεται εντός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Είναι πανομοιότυπη με οποιαδήποτε φυσική μηχανική πίεση, με τη μόνη διαφορά ότι κυφορείται και προκύπτει από το ίδιο το πεδίο. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως σε μαγνητικά πεδία όπου η ένταση H του μαγνητικού πεδίου είναι μεγάλη, υπάρχει επίδραση στην μοριακή δομή του εκάστοτε αγωγού. Εάν ένα ηλεκτρικό ρεύμα διαρεύσει μέσα από ένα βρόγχο, το καλώδιο λειτουργεί ως ηλεκτρομαγνήτης, έτσι η ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσα στον αγωγό είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν στα εξωτερικά στρώματα γύρω από τον αγωγό. Αυτή η απόκλιση στην ένταση του πεδίου προκαλεί μια αύξηση στην μαγνητική πίεση που τείνει να διογκώσει το καλώδιο ομοιόμορφα προς τα έξω.

Σε ακόμη μεγαλύτερα ρεύματα, η μαγνητική πίεση μπορεί να προκαλέσει μηχανική πίεση που υπερβαίνει την μηχανική αντοχή του καλωδίου, προκαλώντας τη διάσπασή του ή ακόμα και την εκτίναξη κομματιών του. Αν υπάρχουν ρεύματα παράλληλα σε ένα μαγνητικό πεδίο, οι πεδιακές γραμμές ακολουθούν σχήματα στα οποία το διάνυσμα της μαγνητικής έντασης ισορροπείται από τον μαγνητικό τανυστή δύναμης.

Το διανυσματικό αυτό μέγεθος δρά για να αποκαταστήσει παραμορφωμένες μαγνητικές γραμμές. Παρόλο που αναφέρεται ως δύναμη, είναι ουσιαστικά βαθμός πίεσης ($Pa \cdot m^{-1}$) που είναι επίσης πυκνότητα δύναμης ($N \cdot m^{-3}$) και ισούται με :

$$\frac{(B \cdot \nabla) \cdot B}{\mu_0} \quad (4.16)$$

Η μαγνητική πίεση στο διεθνές σύστημα μονάδων S.I. (P σε Pa, B σε T, μ_0 σε H/m), δίνεται από τη σχέση:

$$P_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4.17)$$

Η μαγνητική πίεση εξαρτάται από την πυκνότητα της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου και αυξάνει όσο οι μαγνητικές γραμμές συγκλίνουν η μία με την άλλη. Ο μαγνητικός ταυνοστής δύναμης, ωστόσο, εξαρτάται από το πόσο η μαγνητική πίεση διαφοροποιείται με την απόσταση, και από την πυκνότητα ρεύματος J και την αλληλεπίδρασή της με το μαγνητικό πεδίο B .

Σε κατάσταση ομαλής λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς, η πίεση που ασκείται στους αγωγούς είναι περιορισμένη. Σε περίπτωση όμως σφάλματος (βραχυκύκλωμα ή πτώση κεραυνού) σε οποιοδήποτε σημείο μιας γραμμής, η τιμή του ρεύματος μπορεί να φτάσει μέσα σε msec ακόμη και τιμές 30 φορές πάνω από το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα. Τη στιγμή του σφάλματος, η ένταση του μαγνητικού πεδίου και η πυκνότητα του ρεύματος αυξάνονται δραματικά. Η μηχανική επίδραση του φαινομένου μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα όχι μόνο στους αγωγούς, αλλά και στην ίδια τη μηχανική υποστήριξη της γραμμής και στους μονωτήρες (υπερπήδηση, ηλεκτροχημική καταπόνηση).

4.3. Επαγωγικές αντιδράσεις σε γραμμές μεταφοράς.

4.3.1. Αυτεπαγωγή γραμμής μεταφοράς

Αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές χρησιμοποιούνται στη θεωρία των γραμμών για να προσδιοριστούν οι ροές και οι εντάσεις του μαγνητικού πεδίου, καθώς και οι επαγωγικές πτώσεις τάσης κατά μήκος των γραμμών. Το φαινόμενο της αυτεπαγωγής συνεπάγεται απώλειες ισχύος μεταξύ των γραμμών και μεταξύ των γραμμών και της γης και οφείλεται στην διαρροή μεταξύ των μονωτήρων και τις απώλειες Corona. Μπορούμε να θεωρήσουμε δύο περιπτώσεις μελέτης των αυτεπαγωγών μιας γραμμής μεταφοράς.

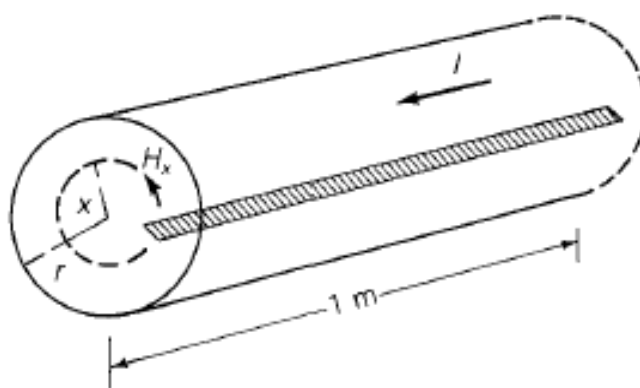
Στην 1η περίπτωση το άθροισμα των ρευμάτων των φάσεων είναι μηδέν, και η γη θεωρείται σαν μη υπάρχουσα. Στη 2η περίπτωση συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση της γης. Θεωρούμε, ως απλουστευμένη περίπτωση, μια εναέρια μονοφασική γραμμή που αποτελείται από 2 μονόκλωνους αγωγούς ίδιας διατομής. Η ένταση που διαρρέει κάθε αγωγό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο με δυναμικές γραμμές ομόκεντρους προς τον αγωγό κύκλους σε επίπεδα κάθετα προς την πορεία της γραμμής. Εάν ορίσουμε ως D την απόσταση των 2 αγωγών και d τη διάμετρό τους, στην παραπάνω γραμμή και σε απόσταση μεγαλύτερη από $D+d/2$ οι πεδιακές γραμμές που δημιουργούνται από το ρεύμα που διαρρέει τον ένα αγωγό, δεν εμπλέκονται με το κύκλωμα και συνεπώς δε συμμετέχουν στη διαδικασία της επαγωγής.

4.3.1.1. Υπολογισμός αυτεπαγωγής συμπαγούς κυλινδρικού αγωγού.

Η αυτεπαγωγή ενός μαγνητικού κυκλώματος που διατηρεί σταθερό μ , μπορεί να καθοριστεί υπολογίζοντας τα ακόλουθα:

1. Την ένταση του μαγνητικού πεδίου H από τον νόμο του Ampere.
2. Την πυκνότητα μαγνητικής ροής B ($B = \mu H$)
3. Διαρροές (λ) από την υπάρχουσα μαγνητική ροή
4. Επαγωγή από τις διαρροές ανά Ampere ($L = \lambda/I$)

Το σχήμα 4.3 δείχνει τμήμα ενός μέτρου ενός συμπαγούς κυλινδρικού αγωγού με ακτίνα r , που διαρρέεται από ρεύμα I . Υποθέτουμε πως δεν υπάρχουν πτώσεις τάσης, ότι ο αγωγός είναι μη-μαγνητικός ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$) και ότι έχει ομοιογενώς κατανεμημένη πυκνότητα (αγνόηση του επιδερμικού φαινομένου).



Σχήμα 4.3. Τομή τμήματος κυλινδρικού αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα I .

Για να προσδιορίσουμε το μαγνητικό πεδίο εντός του αγωγού, επιλέγουμε τον διαγραμμισμένο κύκλο με $x < r$ ως την κλειστή επιφάνεια στην οποία θα εφαρμόσουμε τον νόμο του Ampere:

$$\oint H_{tan} dl = I_{enclosed} \quad (4.18)$$

Λόγω της συμμετρίας το H_x είναι σταθερό κατά μήκος του τμήματος. Επίσης, δεν υπάρχει ακτινική συνιστώσα του H_x , άρα αυτό είναι εφαπτόμενο στο τμήμα του αγωγού. Αυτό σημαίνει πως ο αγωγός έχει ένα ομόκεντρο μαγνητικό πεδίο. Από την (4.18) προκύπτει το ολοκλήρωμα της περιοχής του τμήματος:

$$H_x(2\pi x) = I_x, \text{ για } x < r \quad (4.19)$$

Όπου I_x είναι κομμάτι του συνολικού ρεύματος που διαρρέει το τμήμα. Λύνοντας την (4.19) προκύπτει η σχέση:

$$H_x = \frac{I_x}{2\pi x} \quad (\text{A/m}) \quad (4.20)$$

Υποθέτοντας πως η κατανομή του ρεύματος εσωτερικά του αγωγού είναι ομοιόμορφη, για

$x < r$ ισχύει:

$$I_x = \left(\frac{x}{r}\right)^2 \cdot I \quad (4.21)$$

Από την (4.21) και την (4.20) προκύπτει η ένταση του μαγνητικού πεδίου:

$$H_x = \frac{x \cdot I}{2\pi r^2} \quad (A/m) \quad (4.22)$$

Η πυκνότητα ροής του μαγνητικού πεδίου B_x για μη μαγνητικό αγωγό είναι:

$$B_x = H_x \cdot \mu_0 = \frac{\mu_0 \cdot x \cdot I}{2\pi r^2} \quad (Wb/m^2) \quad (4.23)$$

Υπολογίζουμε την διαφορική ροή $d\Phi$ ανά μονάδα μήκους του αγωγού στο εσωτερικό κυλινδρικό σχήμα εντός του αγωγού, με γνώμονα το ότι μόνο το εμβαδό $\left(\frac{x}{r}\right)^2$ του συνολικού ρεύματος σχετίζεται με τη ροή.

$$d\lambda = \left(\frac{x}{r}\right)^2 d\Phi = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r^4} x^3 dx \quad (Wb/m) \quad (4.24)$$

Ολοκληρώνοντας από $x=0$ έως $x=r$ καθορίζουμε τις συνολικές διαρροές λ_{int} εντός του αγωγού.

$$\lambda_{int} = \int_0^r d\lambda = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 \cdot I}{8\pi} \quad (Wb/m) \quad (4.25)$$

Η εσωτερική επαγωγή L_{int} ανά μονάδα μήκους λόγω των διαρροών αυτών θα είναι:

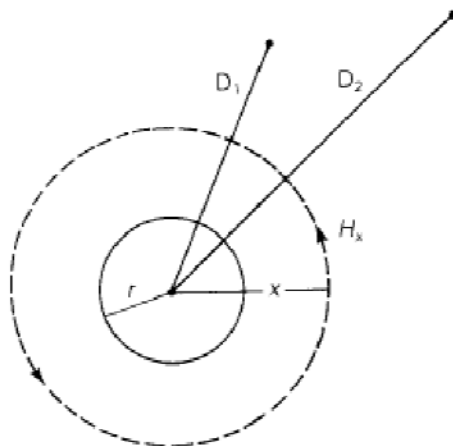
$$L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (H/m) \quad (4.26)$$

Εν συνεχεία, για να υπολογίσουμε το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό, επιλέγουμε ακτίνα $x > r$ ως την κλειστή επιφάνεια που εμπεριέχει όλο το ρεύμα I .

$$H_x(2\pi x) = I, \text{ για } x > r \quad (4.27)$$

Το οποίο μας δίνει:

$$H_x = \frac{I}{2\pi x} \quad (A/m) \quad (4.28)$$



Σχήμα 4.4. – Προσδιορισμός μαγνητικού πεδίου γύρω από έναν αγωγό μέσω ορισμού δύο σημείων D_1, D_2

Εκτός του αγωγού, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ και :

$$B_x = H_x \cdot \mu_0 = (4\pi \cdot 10^{-7}) \frac{I}{2\pi x} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{x} \text{ (Wb/m}^2\text{)} \quad (4.29)$$

$$d\Phi = B_x dx = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{x} dx \text{ (Wb/m)} \quad (4.30)$$

Αφού όλο το ρεύμα I περικλείεται από την εξωτερική ροή, ισχύει:

$$d\Phi = d\lambda = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{x} dx \text{ (Wb/m)} \quad (4.31)$$

Ολοκληρώνοντας μεταξύ δύο εξωτερικών σημείων σε αποστάσεις D_1, D_2 από το κέντρο του αγωγού, προσδιορίζουμε την εξωτερική διαρροή λ_{12} μεταξύ των δύο σημείων:

$$\lambda_{12} = \int_{D_1}^{D_2} d\lambda = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I \int_{D_1}^{D_2} \frac{dx}{x} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} \text{ (Wb/m)} \quad (4.32)$$

Η εξωτερική επαγωγή L_{12} λόγω των διαρροών ανάμεσα στα σημεία D_1, D_2 ανά μονάδα μήκους είναι:

$$L_{12} = \frac{\lambda_{12}}{I} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} \text{ (H/m)} \quad (4.33)$$

Η συνολική επαγωγή L_p που οφείλεται τόσο στη ροή εντός, όσο και εκτός του αγωγού, θα ισούται με:

$$L_p = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{D}{r} \right) \text{ (H/m)} \quad (4.34)$$

4.3.1.2. *Εσωτερική, εξωτερική, και συνολική αυτεπαγωγή αγωγού σε μονοφασικό κύκλωμα δύο αγωγών με ομόρροπο ρεύμα.*

Θεωρώντας ένα σημείο Σ μέσα στον έναν αγωγό εκ των δύο που το απαρτίζουν, που απέχει απόσταση r από το κέντρο του και με $r \leq d/2$, η ένταση του πεδίου που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει το αντίστοιχο τμήμα της διατομής του συγκεκριμένου αγωγού, σύμφωνα με την πεδιακή θεωρία θα είναι:

$$H_r = \frac{r \cdot I}{2\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (4.35)$$

Και η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην ίδια θέση:

$$B_r = \mu \cdot H_r = \frac{\mu \cdot r \cdot I}{2\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (4.36)$$

Άρα, η στοιχειώδης μαγνητική ροή Φ (Weber) μέσα από κυλινδρική επιφάνεια ακτίνας r και πάχους dr , ανά μονάδα μήκους, είναι:

$$d\Phi_r = B_r \cdot dr = \frac{\mu \cdot r \cdot I}{2\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \cdot dr \quad (4.37)$$

Για τη συνολική διατομή του αγωγού η πεπλεγμένη μαγνητική ροή L θα είναι:

$$L = \frac{\mu \cdot I}{8\pi} \quad (4.38)$$

Στην περίπτωση που, όπως συμβαίνει στην πράξη, είναι $D \gg d/2$, η σχέση που δίνει τη συνολική ροή στο σύστημα 2 αγωγών για ομόρροπες μαγνητικές ροές και για $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ είναι:

$$L = 1 + 4 \ln \frac{D}{\left(\frac{D}{2}\right)^2} \cdot 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (4.39)$$

4.3.1.3. *Αυτεπαγωγή λειτουργίας τριφασικής γραμμής απλού κυκλώματος με έναν αγωγό και με δέσμη αγωγών ανά φάση.*

Θεωρούμε τμήμα γραμμής R,S,T μήκους l , επίπεδης ή τριγωνικής διάταξης. Ακολούθως, γίνονται οι αντιμεταθέσεις RST – TRS – STR, που πάλι ισχύουν για ένα μήκος l . Η αυτεπαγωγή λειτουργίας της τριφασικής γραμμής θα ισούται με:

$$L'_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \ln \frac{D_m}{r} + \frac{\mu_r}{4} \right\} \text{ (H/m)} \quad (4.40)$$

Όπου $D_m = \sqrt[3]{D_{RS} D_{ST} D_{TR}}$ (μέση γεωμετρική απόσταση)

Η αυτεπαγωγή τριφασικής γραμμής απλού κυκλώματος για δέσμη n αγωγών ανά φάση είναι πρακτικά η ίδια με παραπάνω, θεωρώντας ίδιες αποστάσεις μεταξύ των αγωγών.

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \ln \frac{D_m}{r_b} + \frac{\mu_r}{4n} \right\} \quad (H/m) \quad (4.19)$$

4.4. Απώλειες Corona, ηλεκτροστατικό πεδίο

Οι απώλειες Corona εμφανίζονται στην επιφάνεια των αγωγών εναερίων γραμμών. Συνίσταται από μερικές ηλεκτρικές εκκενώσεις στον αέρα, και εμφανίζεται όταν το ηλεκτρικό πεδίο E ξεπεράσει μια ωρισμένη κρίσιμη τιμή. Μεταξύ άλλων, αυτή εξαρτάται και από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, το κρίσιμο πεδίο όμως εξαρτάται από τη διάμετρο και το είδος της επιφάνειας του αγωγού. Οι εκκενώσεις Corona έχουν κρουστική μορφή, και έτσι προκαλούνται υψίσυχα Η/Μ κύματα που παρενοχλούν τις ραδιοεπικοινωνίες. Τυπικές συχνότητες πολύκλωνων αγωγών είναι 0,1 – 5 MHz.

4.4.1. Υπολογισμός μέγιστης έντασης ηλ.πεδίου στους αγωγούς.

4.4.1.1. Πεδίο στον αγωγό τριφασικής γραμμής με έναν αγωγό ανά φάση.

Για έναν μεμονωμένο αγωγό, που φέρει φορτίο q ανά μονάδα μήκους, η πεδιακή ένταση έχει μέγιστο στην επιφάνεια του αγωγού. Με την παραδοχή ότι δεν υφίστανται φαινόμενα γειτνίασης, δηλαδή ότι το φορτίο q είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στην περιφέρεια, τότε προκύπτει η πεδιακή ένταση από την διηλεκτρική μετατόπιση ως εξής:

$$E_{max} = \frac{D}{\epsilon_0} = \frac{q/2\pi r}{\epsilon_0} \quad (4.20)$$

Όπου: D η διηλεκτρική μετατόπιση ($C.m^{-2}$)

R η ακτίνα

q το φορτίο ανά μονάδα μήκους ($C.m^{-1}$)

Για μια συμμετριοποιημένη τριφασική γραμμή ισχύει η παρακάτω εξίσωση μεταξύ φορτίου q , της τάσης U και της χωρητικότητας λειτουργίας C'

$$q = C' \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (4.21)$$

Από την 4.20 προκύπτει με αντικατάσταση του q :

$$E_{max} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot C' \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (4.22)$$

Ένα απλό κύκλωμα έχει χωρητικότητα λειτουργίας:

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{D_m}{r}} \quad (4.23)$$

$$\text{Όπου } D_m = \sqrt[3]{D_{RS}D_{ST}D_{TR}}$$

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε:

$$E_{max} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{r \cdot \ln\frac{D_m}{r}} \quad (4.24)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο μίας τριφασικής γραμμής ενός αγωγού ανά φάση.

Μία συνήθης μονάδα που χρησιμοποιείται στην Αμερική και τον Καναδά για να εκφράσει το εμβαδό ενός κύκλου είναι το cmil (circular mil), και αντιστοιχεί σε $5,067 \cdot 10^{-4} mm^2$.

Συνεπάγεται πως $1.000 \text{ cmil} = 0,5067 mm^2 = 1MCM$

Για μία γραμμή 150kV, 636MCM ($322,6 mm^2$) έχουμε $r = 12,4 mm$,

$D_m = 8,19 m$.

Για τον υπολογισμό της πεδιακής έντασης χρησιμοποιούμε την (4.24), χωρίς να ληφθεί υπόψη η ανωμαλία της επιφάνειας του αγωγού λόγω καιρικών συνθηκών και μηχανικής καταπόνησης.

Επιλύοντας, βρίσκουμε ενεργό τιμή 10,76 kV/cm για ένα χρονικό μέγιστο $\sqrt{2}$.

Το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο της γραμμής είναι $10,76 \cdot \sqrt{2} = 15,22 kV/cm$.

4.4.1.2. Πεδίο τριφασικής γραμμής με δέσμες n αγωγών ανά φάση.

Σε περιπτώσεις πολλαπλών αγωγών ανά φάση, υποθέτουμε ισοκατανομή του φορτίου q κάθε φάσης στους n επιμέρους αγωγούς. Κάθε αγωγός φέρει δηλαδή q/n φορτίο. Λόγω φαινομένων γειτνίασης των αγωγών σε αυτή την περίπτωση, η επίλυση γίνεται προσεγγιστικά βρίσκοντας το πεδίο πάνω σε έναν επιμέρους αγωγό, π.χ. τον υπ' αριθμό ,1 αθροίζοντας τα πεδία των άλλων επιμέρους αγωγών και το ίδιο το πεδίο.

Εφαρμόζουμε σε μία δέσμη $n = 4$ αγωγών ανά φάση. Η διάταξη των αγωγών είναι σε κορυφές τετραγώνου. Οι αγωγοί 2,3,4 επάγουν πεδία με ακτινικές συνιστώσες στη θέση του αγωγού 1 ως εξής:

$$E_{2r} = E_2 \cdot \sin\alpha = \frac{q}{4 \cdot 2\pi\epsilon_0 X} \cdot \sin\alpha \quad (4.25)$$

Αποδεικνύεται πως για n αγωγούς ανά φάση, ισχύει:

$$E_{2r} = E_{3r} = \dots = E_{nr} = \frac{q}{n \cdot 2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{2r_T} \quad (4.26)$$

Το συνολικό πεδίο των αγωγών 2...n, σε μια σταθερή περιοχή γύρω από τον αγωγό 1, μπορεί να θεωρηθεί ομοιογενές (σταθερό). Η τιμή του είναι:

$$E_r = \sum_{i=2}^n E_{1r} = \frac{q/n}{2\pi\epsilon_0} \cdot (n-1) \cdot \frac{1}{2r_T} \quad (4.27)$$

Όπου: r_T είναι η ακτίνα του κύκλου που εμπερικλείει τους αγωγούς και E_{1r} η ένταση του πεδίου του πρώτου αγωγού.

Αν δεν υπήρχε ο αγωγός 1, θα υφίστατο μόνο το πεδίο E_r . Η ύπαρξη του πεδίου που δημιουργείται από τον αγωγό 1 προκαλεί μια παραμόρφωση του πεδίου E_r . Το παραμορφωμένο πεδίο έχει διπλάσια ένταση ($2E_r$), απ' ό,τι το απαραμόρφωτο πεδίο. Μαζί με το πεδίο $2E_r$ αθροίζεται και το ίδιο πεδίο του E_1 .

Αθροίζοντας τα πεδία και εκφράζοντας το φορτίο q σαν συνάρτηση της χωρητικότητας C' και της πολικής τάσης U , προκύπτει για το ηλεκτρικό πεδίο:

$$E_{max} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{C'}{n2\pi\epsilon_0} \quad (4.28)$$

4.5 Διείσδυση Η/Μ πεδίων και κυμάτων στην ύλη

Τα Η/Μ κύματα, όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο κεφάλαιο, κατηγοριοποιούνται σε σχέση με την συχνότητα ή με το μήκος κύματός τους. Από μήκη κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας (400nm – 10nm) και για συχνότητες 7.5×10^{14} - 3×10^{16} Hz και μεγαλύτερες, η ακτινοβολία αρχίζει να προκαλεί ιονισμό των ατόμων ή των μορίων ενός υλικού, με αποτέλεσμα την απόσπαση ηλεκτρονίων από αυτό. Ονομάζεται ιονίζουσα ακτινοβολία, και χαρακτηρίζεται από υψηλή ενέργεια κβαντισμού η οποία κυμαίνεται από 3.1eV για την υπεριώδη μέχρι αρκετά MeV για τις ακτίνες Γάμμα.

Οι αγωγοί γίνονται φορείς του ηλεκτρισμού (έχουν ροή ηλεκτρονίων), εάν υπάρχει ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως δεν μπορεί να υπάρξει ηλεκτρικό πεδίο σε έναν αγωγό κάτω από αυστηρά στατικές συνθήκες (καμία ροή φορτίου, καμία χρονική εναλλαγή.)

Η πυκνότητα του ρεύματος J (A/m^2) είναι η μέτρηση της ροής ηλεκτρονίων ανά μονάδα επιφάνειας. Σε συνηθισμένους αγωγούς, η αγωγιμότητα μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, με εξαίρεση κάποια υλικά με βάση τον άνθρακα, στα οποία η αγωγιμότητα αυξάνεται με την ανύψωση της θερμοκρασίας.

Η τροποποίηση του νόμου του Ohm ($J=\sigma \cdot E$) ισχύει για χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία, αν αγνοηθεί η αδράνεια των ηλεκτρονίων και το ρεύμα μετατόπισης.

Η μεγάλη αγωγιμότητα των αγωγών καθιστά δύσκολη τη διείσδυση παλλόμενων Η/Μ πεδίων στα μέταλλα, επειδή τα επαγόμενα ρεύματα τείνουν να “μονώνουν” τα πεδία. Όσο μεγαλύτερη η αγωγιμότητα ενός αγωγού, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αντίσταση που θα συναντά ένα Η/Μ κύμα κατά τη διείσδυσή του σε αυτόν, επειδή τα επαγόμενα ρεύματα δημιουργούν ένα είδος «ασπίδας» γύρω από τον αγωγό.

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε έναν αγωγό δεν υπακούν στις κυματικές εξισώσεις, και σαν συνέπεια δεν διαδίδονται ελεύθερα.

Υποθέτοντας ένα επίπεδο Η/Μ κύμα στο κενό με rms πυκνότητα ισχύος 100W/m^2 που προσκρούει σε μια επίπεδη χάλκινη επιφάνεια, υπολογίζουμε την ισχύ που ανακλάται και την ισχύ που διαδίδεται ως εξής:

Η rms ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$I = Z_0 \cdot H^2 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.29)$$

$$\text{όπου } Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega$$

$H = \sqrt{\frac{I}{Z_0}} = 0,515 \text{ A/m}$, και αφού η αγωγιμότητα του χαλκού είναι μεγάλη, το μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια είναι το διπλάσιο του προσκρούοντος πεδίου λόγω προσθήκης στάσιμων κυμάτων, επειδή κάθε υλικό στη φύση διαθέτει κάποιον αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων στη δομή του, δηλαδή είναι $1,03 \text{ A/m}$.

Η πυκνότητα στο σώμα είναι:

$$\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2\sigma}} \cdot H^2 \quad (4.30)$$

Λόγω του επιδερμικού φαινομένου, όταν ένα Η/Μ κύμα προσπίπτει σε κάποιο υλικό, μειώνεται, εκτός από το ρεύμα, και το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο καθώς αυτό εισχωρεί στο υλικό σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$H = H_0 \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (4.31)$$

$$E = E_0 \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (4.32)$$

όπου d το πάχος του υλικού

Για την θωράκιση των υλικών από διαχέουσες ακτινοβολίες, χρησιμοποιείται ο παράγοντας f_s , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_0 προς το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο H_i ενός υλικού καθορισμένου πάχους, σε δεδομένη συχνότητα.

$$f_s = 20 \log \frac{H_0}{H_i} \text{ (db)} \quad (4.33)$$

Η κλίμακα decibel χρησιμοποιείται κυρίως για τη σύγκριση λόγων ισχύος ή τάσεως. Αν θεωρήσουμε μόνο ηλεκτρική ισχύ, θα έχουμε:

$$dB = 10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (4.34)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι το dB δεν είναι φυσική ποσότητα αλλά παριστάνει το λόγο δύο φυσικών ποσοτήτων και είναι ένας αδιάστατος αριθμός. Πράξεις όπως η πρόσθεση δύο τιμών dB δεν έχουν φυσική σημασία.

Όταν ένα Η/Μ κύμα προσπίπτει σε ένα μέσο, κάποια ποσότητα ανακλάται και κάποια ποσότητα απορροφάται και επαναδιαδίδεται από το μέσο αυτό. Κατά την πρόσπτωση ενός κύματος σε έναν αγωγό, αυτό μειώνεται εκθετικά όπως αναφέρθηκε πιο πάνω.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να εισαχθεί μία έννοια η οποία μας δείχνει το κατά πόσο ένα υλικό μπορεί να διαπεραστεί από μία Η/Μ ακτινοβολία. Η έννοια αυτή έχει δανειστεί από την επιστήμη της οπτικής, και είναι η αδιαφάνεια (opacity) ενός μέσου διάδοσης. Επίσης χρησιμοποιείται ο όρος ‘συντελεστής εξασθένησης’ (attenuation coefficient) ή συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient), (m^{-1} , cm^{-1}).

Με την αύξηση της έντασης ενός προσπίπτοντος κύματος ή πεδίου σε έναν αγωγό, το όριο της αδιαφάνειας του αγωγού τείνει προς μικρότερες συχνότητες. Καθώς η συχνότητα πλησιάζει το οριακό σημείο αδιαφάνειας, η κρίσιμη ένταση του πεδίου κατά την οποία συμβαίνουν μη γραμμικά φαινόμενα στον αγωγό, μειώνεται. Για εντάσεις που ξεπερνούν την κρίσιμη αυτή ένταση, το πεδίο διεισδύει στον αγωγό σε βάθος μεγαλύτερο από τα συνήθη επιδερμικά βάθη. Στην περίπτωση αυτή, το πεδίο σε αγωγούς χαμηλής εξασθένησης προκαλεί ραγδαία μη αρμονικές χωρικές ταλαντώσεις με περίοδο και ένταση που ποικίλουν ανάλογα με το επιδερμικό βάθος δ . Αυτό συνεπάγεται πως σε κάποια τμήματα του συνήθους επιδερμικού βάθους, η περίοδος και η ένταση τροποποιούνται κατά έναν μη περιοδικό τρόπο, όπου η απόσβεση του κύματος σε μεγαλύτερο βάθος μπορεί να περιγραφεί από γραμμικές εξισώσεις.

Η μετρούμενη πυκνότητα I ενός κύματος που προσπίπτει σε ένα μέσο με πάχος x σχετίζεται με την πυκνότητα του προσπίπτοντος κύματος και εξασθενεί εκθετικά από την επιφάνειά του. (Νόμος Beer – Lambert)

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (4.35)$$

Όπου το x σημειώνει την απόσταση που διανύεται.

Ο συντελεστής εξασθένησης ενός υλικού είναι ο λόγος της αναδύουσας και της προσπίπτουσας πυκνότητας της ακτινοβολίας I / I_0 . Κατ’ αυτόν τον τρόπο αποφασίζεται από τους μηχανικούς πόση προστασία χρειάζεται από διαχέουσες ακτινοβολίες.

Σαν φυσικές έννοιες, το βάθος διείσδυσης είναι η απόσταση την οποία μπορεί να διανύσει ένα κύμα μέχρι η πυκνότητά του να μειωθεί στο $1/e$ της τιμής της (≈ 0.37), ενώ το επιδερμικό βάθος είναι η απόσταση την οποία το κύμα μπορεί να διανύσει μέχρι η έντασή του να μειωθεί κατά τον ίδιο παράγοντα. Ο συντελεστής εξασθένησης σχετίζεται με το βάθος διείσδυσης και με το επιδερμικό βάθος με τον ακόλουθο τύπο:

$$\alpha_{absorption} = \frac{1}{\delta_{penetration}} = \frac{2}{\delta_{skin}} \quad (dB/m) \quad (4.36)$$

Οι μη γραμμικές ιδιότητες ενός αγωγού, εκδηλώνονται κάτω από συνθήκες στις οποίες η ενέργεια της ταλάντωσης ενός ηλεκτρονίου ευρισκόμενου σε ένα υψίσυχνο πεδίο συγκρίνεται με την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων.

Μπορούμε να εκφράσουμε τον συντελεστή εξασθένισης σε σύγκριση με τη σταθερά διάδοσης γ (propagation constant) ενός μέσου.

Για υλικά όπως ο χαλκός ή άλλα υλικά αγωγών, η σταθερά διάδοσης μπορεί να υπολογιστεί από τις σταθερές της γραμμής (εγκάρσια αγωγιμότητα και σύνθετη αντίσταση).

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad (4.37)$$

όπου: $Z = R + j\omega L$ η σύνθετη αντίσταση της γραμμής ανά μέτρο
 $Y = G + j\omega C$ η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής ανά μέτρο

Για ένα Η/Μ κύμα που μεταδίδεται σε μία γραμμή μεταφοράς, ισχύει ότι:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (4.38)$$

όπου α είναι ο συντελεστής εξασθένισης

β είναι η σταθερά της φάσης, η οποία καθορίζει την ένταση/φάση ενός ημιτονοειδούς σήματος κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = k \text{ (rad/m)} \quad (4.39)$$

Ένα σήμα που μεταδίδεται σε μία γραμμή μεταφοράς μπορεί να παραμορφωθεί ακόμα και αν οι συνθήκες της γραμμής είναι απόλυτα γραμμικές. Αυτό συμβαίνει με δύο τρόπους. Πρώτον, ο συντελεστής εξασθένισης μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τη συχνότητα, πράγμα το οποίο μπορεί να μεταβάλλει το σχήμα του μεταδιδόμενου σήματος. Δεύτερον, υπάρχει παραμόρφωση λόγω της εξάρτησης της συχνότητας από την ταχύτητα της φάσης του μεταδιδόμενου σήματος και τις μεταδιδόμενες συνιστώσες της συχνότητας. Εάν διαφορετικές συνιστώσες της συχνότητας μεταδίδονται σε διαφορετικές ταχύτητες, το σήμα αποκτά μία παραμόρφωση στον χώρο και τον χρόνο, που ονομάζεται διασπορά (dispersion). Για μια γραμμή χωρίς διασπορά, δηλαδή χωρίς παραμορφώσεις κατά τη μεταφορά ενός σήματος, ισχύει για τον συντελεστή εξασθένισης:

$$\alpha = \sqrt{RG} \quad (4.40)$$

Η συνθήκη του Heaviside για την μη παραμόρφωση ενός μεταφερόμενου σήματος, πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\frac{G}{C} = \frac{R}{L} \quad (4.41)$$

Το βάθος διείσδυσης δίνεται από τον τύπο:

$$\delta_{pen} = \frac{1}{\alpha} \quad (4.42)$$

4.5.1. Κεραυνοπληξία σε γραμμή μεταφοράς.

Ο κεραυνός μπορεί να οριστεί σαν μια υψηλής ενέργειας ηλεκτρική εκκένωση. Η πτώση κεραυνών πλησίον ή επάνω στις γραμμές μεταφοράς, είναι φαινόμενο που υφίσταται σχεδόν πάντα και έχει έντονη επίδραση στα συστήματα μεταφοράς και διανομής. Στο ανομοιογενές πεδίο που δημιουργείται από την κορυφή ενός πυλώνα μεταφοράς, η διάσπαση του ατμοσφαιρικού αέρα επιφέρει μία κρουστικής μορφής τάση η οποία διαρρέει την γραμμή και ακολουθεί τους νόμους των οδεύοντων κυμάτων, που χαρακτηρίζεται από τιμές μερικών εκατοντάδων έως και πολλών χιλιάδων Ampere. Για την προστασία των συστημάτων μεταφοράς χρησιμοποιούνται αγωγοί γείωσης κατά μήκος της γραμμής.

Πολύ συχνά, κεραυνικές εκκενώσεις προσπίπτουν στον αγωγό φάσης μιας γραμμής μεταφοράς. Σε αυτή την περίπτωση το οδεύον κύμα φτάνει μέχρι τους μονωτήρες προκαλώντας υπέρταση μεταξύ αγωγών φάσης και πυλώνων.

Εάν η υπέρταση αυτή είναι πολύ μεγάλη και ξεπεράσει την τάση ανοχής του μονωτήρα, μπορεί να προκαλέσει την υπερπήδηση του μονωτήρα και κατά συνέπεια την καταστροφή του. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι εφοδιασμένες με αγωγούς προστασίας. Ακόμα και τότε όμως σφάλματα θωράκισης μπορεί να συμβούν, δηλαδή ο κεραυνός να πλήξει απευθείας τον αγωγό φάσης.

Στην περίπτωση που ο κεραυνός πλήξει τον πυλώνα ή κάποιον αγωγό προστασίας η ανύψωση του δυναμικού κατά μήκος του πυλώνα έχει σα συνέπεια την ανύψωση του δυναμικού στους μονωτήρες. Ο μονωτήρας θα υποστεί υπερπήδηση αν η τάση αυτή ξεπεράσει την τάση ανοχής του, φαινόμενο γνωστό και ως ανάστροφη διάσπαση.

Όταν υπάρχει έμμεσο πλήγμα, όταν δηλαδή ο κεραυνός πλήξει το έδαφος ακόμα και αρκετές εκατοντάδες μέτρα μακριά από τη γραμμή μεταφοράς ή τον πυλώνα, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία της εκκένωσης μπορεί να προκαλέσουν ανύψωση του δυναμικού στη γραμμή, με αποτέλεσμα την υπερπήδηση των μονωτήρων χαμηλής τάσης.

Το ρεύμα σε έναν κεραυνό, το οποίο εμφανίζεται υπό τη μορφή μίας ή περισσότερων κρούσεων με απότομο μέτωπο, που η κάθε μία τους μετά το μέγιστο εύρος αποσβέεται με σχετικά μικρό ρυθμό. Τυπική κυματομορφή κεραυνικού ρεύματος αποτελεί αυτή με διάρκεια μετώπου της τάξης των 5μs και διάρκεια ημίσεως εύρους της τάξης των 100μs. Χαρακτηριστικά μεγέθη του κεραυνικού ρεύματος αποτελούν:

1. Το μέγιστο εύρος, το εύρος του ρεύματος του κεραυνού μπορεί να ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες έως και χιλιάδες Ampere. Το μέγιστο εύρος του ρεύματος του κεραυνού σε συνδυασμό με την αντίσταση που θα αναγκαστεί να διαρρεύσει καθορίζουν τη μέγιστη αναπτυσσόμενη εξαιτίας του τάση.
2. Η μέση κλίση (dl/dt), ο μέσος ρυθμός ανόδου του ρεύματος ο οποίος υπολογίζεται στο τμήμα του μετώπου της κυματομορφής του ρεύματος που βρίσκεται μεταξύ 30%-90% του μέγιστου εύρους

$$\frac{dl}{dt} = \left(\frac{I_{90} - I_{30}}{t_{90} - t_{30}} \right) \text{ kA}/\mu\text{sec} \quad (4.43)$$

3. Το ολικό φορτίο Q, το ολοκλήρωμα της κρουστικής συνιστώσας του ρεύματος του κεραυνού στο χρόνο.
4. Η ειδική ενέργεια (SE), η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη ροή του ρεύματος του κεραυνού σε μοναδιαία αντίσταση. Υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα του τετραγώνου ρεύματος του κεραυνού στο χρόνο καθ' όλη τη διάρκειά του. Εκφράζει την ενέργεια που συνοδεύει την ηλεκτρική εκκένωση του κεραυνού σε J/Ω.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι μελέτης της ανθρώπινης νόησης. Η χρησιμοποίησή τους προς όφελος της επιστήμης έχει επιφέρει πολλές ανακαλύψεις σε τομείς πρωτογενούς σημασίας για την ανθρωπότητα. Η μεταφορά και διανομή του ηλεκτρισμού σε απομακρυσμένες περιοχές όπου είναι αναγκαίο, φέρει μεγάλη ευθύνη προς τους κατοίκους που εξυπηρετεί. Οι συμπεριφορές της ύλης και του περιβάλλοντος, καθώς και οι επιδράσεις που έχουν τα Η/Μ πεδία πάνω στους ανθρώπους είναι τομείς στους οποίους πολλά πανεπιστήμια ανά τον κόσμο υλοποιούν την τεχνογνωσία που παρέχεται από τα εργαστήρια δοκιμών. Ο σχεδιασμός μιας γραμμής μεταφοράς, εμπεριέχει όπως είδαμε και παραπάνω πολλές παραμέτρους, και εξαρτάται πάντα από τις συνθήκες τις οποίες εξυπηρετεί. Η χιλιομετρική απόσταση, οι καιρικές συνθήκες, η ιδιοσυγκρασία του εδάφους, η ισχύς που εξυπηρετείται είναι μερικές από αυτές που πρέπει οπωσδήποτε να ληφθούν υπόψιν. Τα πρωτογενή υλικά κατασκευής των γραμμών μεταφοράς, όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός, έχουν διαφορές που καθορίζουν συνήθως τον βασικό σχεδιασμό της εκάστοτε γραμμής. Συνυπολογισμός των απωλειών λόγω επιδερμικού φαινομένου, αγωγιμότητας ως προς τη γη, αυτεπαγωγής της γραμμής, είναι απαραίτητος για τον καθορισμό των υλικών που θα αποτελούν τους αγωγούς και τους μονωτήρες στήριξης. Η μελέτη των φαινομένων που επιδρούν στις γραμμές είναι πολλές φορές προσεγγιστική, λόγω των μεταβολών και των παραμέτρων που είναι αδύνατο να συνυπολογιστούν με μεγάλο βαθμό ακρίβειας. Παρόλα αυτά, τα εργαλεία που μας δίνουν ακόμη και αυτή τη δυνατότητα είναι εξαιρετικά χρήσιμα, για τον προσδιορισμό φαινομένων που είναι αδύνατο να μελετηθούν αλλιώς. Η επίδραση των Η/Μ πεδίων στις γραμμές μεταφοράς συνίσταται σε κάθε περίπτωση, ενίοτε είναι και πολύ σημαντική. Από τις απώλειες των δινορρευμάτων στους Μ/Σ, μέχρι την πτώση κεραυνού σε μία γραμμή, τα φαινόμενα ακολουθούν τα ίδια μοτίβα και την ίδια συμπεριφορά, σύμφωνα πάντα με τους νόμους που έδωσαν οι Maxwell, Ampere, Faraday, Lenz, Biot και Savart. Η πρόκληση απωλειών λόγω των πεδίων ανεβάζει σημαντικά το κόστος μεταφοράς και κατασκευής, οπότε οι μηχανικοί ανά τον κόσμο επιδιώκουν μέγιστη λειτουργικότητα τουλάχιστον στον τομέα αυτό. Το μέλλον έπεται ενδιαφέρον με την ραγδαία πρόοδο της τεχνογνωσίας στον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού και των φαινομένων γύρω από τον ηλεκτρομαγνητισμό.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. J. Duncan Glover , Mulukutla Sarma, Thomas Overbye “Power system analysis and design fourth edition”, Chris Carson
2. Kostas Gouramanis, Charis Demoulias, Dimitris P. Lampridis, Petros Dokopoulos “Distribution of non-sinusoidal currents in parallel conductors used in three phase four wire networks”
3. Xiaopeng Cai “Electric Current Induced Stresses Around the Crack Tip in Conductors.”
4. J. R. Lucas “High Voltage Engineering”, 2001
5. Yoshihide Hase “Handbook Of Power Systems Engineering ”
6. S. Tupsie, A. Isaramongkolrak “Analysis Of Electromagnetic Field Effects using FEM for Transmission Lines Transposition ”
7. M.I.T. open courseware: “ Electromagnetic Fields and Waves In Matter “
8. Chonung Kima, Zhijian Jinc, Pingkai Jianga, Zishu Zhuc
“Investigation of dielectric behavior of thermally aged XLPE cable in the High Frequency Range” Sciencedirect.com
9. V.G. Peschansky “Kinetic Phenomena In Layered Conductors Placed in a Magnetic field”
10. Paul Lorrain, Dale R. Corson, Francois Lorrain “Electromagnetic Fields And Waves including Electric Circuits ” W.H. Freeman & Company
11. David K. Cheng “Field and Wave Electromagnetics” Adison Wesley publishing company
12. Y. Haze “Handbook Of Power Systems Engineering”
13. Bidyut K. Sen, Richard Wheeler “Skin Effects models for Transmission Line Structures using Generic SPICE circuit Simulators”
14. ABB Switchgear Manual
15. Schneider Electric Electrical Installation Guide
16. V.P. Silin , Non linear theory of penetration of a high frequency field in a conductor, P.N. Lebedev Physics Institute , Vol. 26 N.5 May, 1968
17. <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/power-quality-guide.shtml>
18. <http://www.electronics-tutorials.ws/blog/harmonics-and-harmonic-frequency.html>
19. <http://www.copperinfo.co.uk/busbars/pub22-copper-for-busbars/sec4.htm#ProximityEffect>

20. <http://www.transmission-line.net/2011/04/transmission-line-conductors-comparison.html>
21. <http://www.southwire.com/support/TransmissionConductorsReviewOfTheDesignandSelectionCriteria.htm>
22. https://giz.energypedia.info/wiki/Technical_Aspects_of_Grid_Interconnection
23. <http://www.emfs.info/Sources+of+EMFs/Overhead+power+lines/specific/>
24. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/amplaw.html#c2>
25. <http://electrical-engineering-portal.com/conductor-types-used-for-overhead-lines>
26. <http://www.bafu.admin.ch/elektrosmog/01079/01080/01081/02271/index.html?lang=en>

