



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΦΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΚΟΥΓΚΟΥΓΙΑΝΝΗ ΑΓΓΕΛΟΥ

Επιβλέποντες: Δάτσιος Ζαχαρίας
Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό
Μπουχουράς Άγγελος
Επίκουρος Καθηγητής

ΚΟΖΑΝΗ/ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING

PARAMETRIC STUDY ON LIGHTNING OVERVOLTAGES AND CRITICAL LIGHTNING CURRENTS CAUSING INSULATION FLASHOVER IN OVERHEAD TRANSMISSION LINES WITH VERTICAL PHASE CONFIGURATION

THESIS

GKOUGKOUGIANNIS AGGELOS

SUPERVISORS: Datsios Zacharias
Adjunct Lecturer

Bouhouras Aggelos
Assistant Professor

KOZANI/FEBRUARY/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “Παραμετρική διερεύνηση κεραυνικών υπερτάσεων και κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κατακόρυφης διάταξης φάσεων” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του έκτακτου εκπαιδευτικού προσωπικού του Τμήματος κ. Ζαχαρία Δάτσιου αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. 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 μόνο.

Copyright (C) Άγγελος Γκουγκουγιάννης, Ζαχαρίας Δάτσιος, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Άγγελος Γκουγκουγιάννης

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

Τα κεραυνικά πλήγματα αποτελούν μία από τις βασικότερες αιτίες σφαλμάτων στις Γραμμές Μεταφοράς (ΓΜ) ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση κεραυνικών υπερτάσεων και των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης μέσω του λογισμικού ATP-EMTP και της MATLAB σε τυπικές ΓΜ διπλού κυκλώματος κατακόρυφης διάταξης φάσεων. Τα επίπεδα τάσης των ΓΜ που μελετώνται είναι 66 kV, 150 kV, 400 kV και 765 kV. Γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των κεραυνικών πληγμάτων που μπορεί να δεχθεί ο αγωγός φάσης και ο αγωγός προστασίας ή ο πυλώνας. Η διερεύνηση αφορά τα πρώτα κεραυνικά πλήγματα αρνητικής πολικότητας λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή διάφορων παραμέτρων επίδρασης εντός του εύρους που εμφανίζεται στην πραγματικότητα, προκειμένου να εξαχθούν όσο το δυνατόν πιο ασφαλή συμπεράσματα για τις υπερτάσεις που καταπονούν τον εξοπλισμό και για τα κρίσιμα ρεύματα που μπορούν να προκαλέσουν διάσπαση στην μόνωση της ΓΜ. Οι παράμετροι των ΓΜ που εξετάζονται είναι η αντίσταση γείωσης πυλώνων, το ύψος πυλώνων, το μήκος της μόνωσης και η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης τη στιγμή του κεραυνικού πλήγματος. Οι παράμετροι που σχετίζονται με τα κεραυνικά πλήγματα είναι η απόσταση του σημείου πλήγματος από τον πυλώνα και τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος. Οι επιδράσεις των παραπάνω παραγόντων ποσοτικοποιούνται για τις συγκεκριμένες ΓΜ και εξάγονται γενικά ποιοτικά συμπεράσματα.

Λέξεις Κλειδιά

Ανάστροφη Διάσπαση
Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Κεραυνικά Πλήγματα
Κεραυνικές Υπερτάσεις
Κρίσιμα Κεραυνικά Ρεύματα
Σφάλμα θωράκισης

Abstract

Lightning strikes are one of the most common causes of faults of Overhead Transmission Lines (OTLs). The goal of this thesis is the evaluation of lightning overvoltages and critical lightning flashover currents for typical double-circuit OTLs with vertical phase configuration using the ATP-EMTP software and MATLAB. The voltage levels studied are 66 kV, 150 kV, 400 kV and 765 kV. Lightning strikes to the phase conductors and shield wires or towers are investigated. The research concentrates on first return strokes of negative downward lightning flashes considering the variation of several parameters. These vary in their ranges observed in real cases to obtain general conclusions on the lightning overvoltages and critical lightning flashover currents of OTLs. The parameters of the OTLs under study are the tower ground resistance, the tower height, the length of the insulators, and the AC voltage at the instant of lightning strike. The parameters related to the lightning strike are the distance of the strike location from the tower and the characteristics of the lightning current waveform. The effects of these parameters are quantified for the investigated OTLs and qualitative conclusions are obtained.

Keywords

Backflashover
Critical Lightning Flashover Currents
Lightning
Lightning Overvoltages
Overhead Transmission Lines
Shielding Failure

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Ζαχαρία Δάτσιο για την ανάληψη της διπλωματικής εργασίας αυτής και τη βοήθεια που μου παρείχε στην εκπόνηση της. Μέσω της άρτιας συνεργασία μας και της συνεχής καθοδήγησης, με βοήθησε στην εμβάθυνση στην κεραυνική συμπεριφορά εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και στο ευρύτερο αντικείμενο των Υψηλών Τάσεων, καθώς και των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν (ATP-EMTP, MATLAB), ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω επιτυχώς την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που μου στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια ως αρωγοί τόσο οικονομικά όσο και ψυχολογικά και τους φίλους μου που στήριζαν διαρκώς την προσπάθεια αυτή.

ΚΟΖΑΝΗ/ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
Abstract.....	8
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος Σχημάτων	13
Κατάλογος Εικόνων	19
Πρόλογος.....	21
Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή	23
1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	23
1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	23
Κεφάλαιο 2 Συμπεριφορά ΓΜ σε Κεραυνικά Πλήγματα.....	25
2.1 Διαχωρισμός Κεραυνικών Πληγμάτων.....	25
2.1.1 Πλήγμα Κεραυνού σε Αγωγό Φάσης.....	25
2.1.2 Πλήγμα Κεραυνού στον Αγωγό Προστασίας.....	26
Κεφάλαιο 3: Παράγοντες που επηρεάζουν τις Κεραυνικές Υπερτάσεις και τα Κρίσιμα Ρεύματα	
Περιπτώσεις για Διερεύνηση.....	29
3.1 Πλήγμα στον Πυλώνα ή σε Αγωγό Προστασίας.....	29
3.2 Πλήγμα σε Αγωγό Φάσης.....	29
3.3 ΓΜ προς Διερεύνηση	30
3.4 Παράμετροι προς Διερεύνηση των Επιλεγμένων ΓΜ.....	35
Κεφάλαιο 4: Μοντέλα Προσομοίωσης ΓΜ Ηλεκτρικής Ενέργειας	43
4.1 Μοντέλα Προσομοίωσης στο λογισμικό ATP-EMTP	43
4.2 Κώδικας Προσομοίωσης στο MATLAB	45
4.2.1 Υπολογισμός Κρίσιμων Κεραυνικών Ρευμάτων με την βοήθεια του Κώδικα	45
4.2.2 Υπολογισμός Υπερτάσεων που Καταπονούν τους Μονωτήρες με την Βοήθεια του Κώδικα	48

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Συζήτηση.....	51
5.1 Πλήγμα στον Πυλώνα ή σε Αγωγό Προστασίας.....	51
5.1.1 Υπερτάσεις από το ATP-EMTP με όλες τις Παραμέτρους Επίδρασης και όλες τις ΓΜ σε Σταθερό Κεραυνικό Ρεύμα.....	51
5.1.2 Γραφήματα Υπέρτασης συναρτήσει του Ρεύματος για την ΓΜ των 150kV για κάθε Παράμετρος επίδρασης.....	61
5.1.3 Κρίσιμο Κεραυνικό Ρεύμα που Προκαλεί Διάσπαση της Μόνωσης Εναέριων ΓΜ λόγω Ανάστροφης Διάσπασης.....	65
5.1.3.1 Κυματομορφές Υπερτάσεων Κρίσιμης Ανάστροφης Διάσπασης.....	65
5.1.3.2 Μεταβολή Κρίσιμου Ρεύματος συναρτήσει της Γωνίας Φάσης της Εναλλασσόμενης Τάσης.....	67
5.1.4 Ραβδογράμματα Κρίσιμων Ρευμάτων.....	72
5.2 Πλήγμα σε Αγωγό Φάσης.....	77
5.2.1 Υπερτάσεις από το ATP-EMTP με όλες τις Παραμέτρους Επίδρασης και όλες τις ΓΜ σε Σταθερό Κεραυνικό Ρεύμα.....	77
5.2.2 Γραφήματα Υπέρτασης συναρτήσει του Ρεύματος για τη ΓΜ των 150kV για κάθε Παράμετρο Επίδρασης.....	85
5.2.3 Κρίσιμο Κεραυνικό Ρεύμα που προκαλεί Διάσπαση της Μόνωσης Εναέριων ΓΜ λόγω Ανάστροφης Διάσπασης.....	89
5.2.3.1 Κυματομορφές Υπερτάσεων Κρίσιμης Ανάστροφης Διάσπασης.....	89
5.2.4 Ραβδογράμματα Κρίσιμων Ρευμάτων.....	91
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	97
Βιβλιογραφία.....	99

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Πλήγμα κεραυνού στον επάνω αγωγό φάσης, δημιουργία οδοντών κυμάτων στον αγωγό φάσης που επλήγη και επαγόμενα κύματα στους υπόλοιπους αγωγούς.....	26
Σχήμα 2.2: Πλήγμα κεραυνού στον αγωγό προστασίας, οδεύοντα κύματα κατά μήκος του αγωγού προστασίας (μέσω των πυλώνων οδεύουν προς της γη), επαγόμενα κύματα στους υπόλοιπους αγωγούς.....	27
Σχήμα 3.1: Σχέδιο ΓΜ 66 kV με έναν αγωγό προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα.....	31
Σχήμα 3.2: Σχέδιο ΓΜ 150 kV με έναν αγωγό προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα.....	32
Σχήμα 3.3: Σχέδιο ΓΜ 400 kV με δύο αγωγούς προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα.....	33
Σχήμα 3.4: Σχέδιο ΓΜ 765 kV με δύο αγωγούς προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα.....	34
Σχήμα 4.2.1: Διάγραμμα ροής εκτίμησης κρίσιμου κεραυνικού ρεύματος με μεταβλητή φάση αναφοράς, μεταβλητό κεραυνικό ρεύμα.....	47
Σχήμα 4.2.2.1: Διάγραμμα ροής για αλγόριθμο εξαγωγής αποτελεσμάτων μέσω πίνακα μεγίστων και ελαχίστων τιμών (καταγραφή μέγιστων/ελάχιστων τιμών υπερτάσεων).....	48
Σχήμα 4.2.2.2: Πίνακας αποτελεσμάτων υπερτάσεων (AA, AB, AC) των μονωτήρων των τριών φάσεων σε ΓΜ 765 kV με αντίσταση γείωσης 200 Ω, με αρχικό ρεύμα 10 kA και βήμα προσομοίωσης 10 kA. Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα.....	49
Σχήμα 5.1.1.1: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 66 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης των πυλώνων της γραμμής.....	52
Σχήμα 5.1.1.2: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 150 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης των πυλώνων της γραμμής.....	52
Σχήμα 5.1.1.3: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 400 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης των πυλώνων της γραμμής.....	53
Σχήμα 5.1.1.4: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 765 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης των πυλώνων της γραμμής.....	53
Σχήμα 5.1.1.5: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 66 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.....	54
Σχήμα 5.1.1.6: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 150 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.....	55
Σχήμα 5.1.1.7: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 400 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.....	55
Σχήμα 5.1.1.8: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 765 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.....	56
Σχήμα 5.1.1.9: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 66 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος της απόστασης μεταξύ δύο πυλώνων.....	57

Σχήμα 5.1.1.10: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 150 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος της απόστασης μεταξύ δύο πυλώνων.....	57
Σχήμα 5.1.1.11: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 400 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος της απόστασης μεταξύ δύο πυλώνων.....	58
Σχήμα 5.1.1.12: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 765 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος της απόστασης μεταξύ δύο πυλώνων.....	58
Σχήμα 5.1.1.13: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 66 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.....	59
Σχήμα 5.1.1.14: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 150 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.....	59
Σχήμα 5.1.1.15: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 400 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.....	60
Σχήμα 5.1.1.16: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων ΓΜ 765 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.....	60
Σχήμα 5.1.2.1: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: η αντίσταση γείωσης.....	62
Σχήμα 5.1.2.2: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος επίδρασης: το ύψος του πυλώνα.....	62
Σχήμα 5.1.2.3: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος: το σημείο πλήγματος.....	63
Σχήμα 5.1.2.4: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος επίδρασης: διάρκεια μετώπου του κεραυνικού ρεύματος.....	63
Σχήμα 5.1.2.5: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος επίδρασης: η μέγιστη κλίση (S_m) του κεραυνικού ρεύματος.....	64
Σχήμα 5.1.2.6: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος επίδρασης: η διάρκεια ημίσεος εύρους (t_h) κεραυνικού πλήγματος.....	64
Σχήμα 5.1.3.1.1: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 66 kV (επάνω φάσης Α για τις γωνία φάσης 0°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -25,4 kA.....	65
Σχήμα 5.1.3.1.2: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 150 kV (επάνω φάσης Α για τις γωνία φάσης 0°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -71,1 kA.....	66
Σχήμα 5.1.3.1.3: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 400 kV (επάνω φάσης Α για τις γωνία φάσης 0°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -173 kA.....	66
Σχήμα 5.1.3.1.4: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 765 kV (επάνω φάσης Α για τις γωνία φάσης 0°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -161,2 kA.....	67

Σχήμα 5.1.3.2.1: Αναπαράσταση της μεταβολής της AC τάσης των τριών φάσεων της γραμμής μεταφοράς συναρτήσει της φάσης της τάσης.....	68
Σχήμα 5.1.3.2.2: Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης για την αντίσταση γείωσης στη ΓΜ 150 kV. Στην καμπύλη των 10 Ω απεικονίζονται και οι τρεις Φάσεις [A (upper), B (Middle), C (Lower)] στις οποίες συμβαίνει διάσπαση στη κάθε περίπτωση, ανάλογα ισχύουν και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.....	69
Σχήμα 5.1.3.2.3: Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης για το ύψος του πυλώνα της ΓΜ 150 kV σε σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω.....	69
Σχήμα 5.1.3.2.4: Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης για την απόσταση του σημείου πλήγματος της ΓΜ 150 kV για σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης στα 25 Ω.....	70
Σχήμα 5.1.3.2.5: Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης της ΓΜ 150 kV για τη διάρκεια μετώπου (t_f) που χαρακτηρίζει το κεραυνικό πλήγμα για σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω.....	70
Σχήμα 5.1.3.2.6: Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης της ΓΜ 150 kV για τη μέγιστη κλίση (S_m) που χαρακτηρίζει το κεραυνικό πλήγμα για σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω.....	71
Σχήμα 5.1.3.2.7: Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης της ΓΜ 150 kV για τη διάρκειας ημίσεος εύρους (t_h) που χαρακτηρίζει το κεραυνικό πλήγμα για σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω.....	71
Σχήμα 5.1.4.1: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής τις αντιστάσεις γείωσης.....	72
Σχήμα 5.1.4.2: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το ύψος του πυλώνα στις ΓΜ 66 kV και 150 kV.....	73
Σχήμα 5.1.4.3: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το ύψος του πυλώνα στις ΓΜ 400 kV και 765 kV.....	73
Σχήμα 5.1.4.4: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής την απόσταση του σημείου πλήγματος από τον πυλώνα.....	74
Σχήμα 5.1.4.5: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στη ΓΜ 66 kV για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.....	74
Σχήμα 5.1.4.6: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στη ΓΜ 150 kV για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.....	75
Σχήμα 5.1.4.7: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στη ΓΜ 400 kV για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.....	75
Σχήμα 5.1.4.8: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στη ΓΜ 765 kV για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.....	76
Σχήμα 5.1.4.9: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση στις 240° με παράγοντα επιρροής τις παραμέτρους του κεραυνού (διάρκεια μετώπου (t_f), μέγιστη κλίση (S_m), διάρκεια ημίσεος εύρους (t_h)).....	76

Σχήμα 5.2.1.1: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση) με παράμετρο την ειδική αντίσταση του εδάφους.....	78
Σχήμα 5.2.1.2: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 150 kV (επάνω φάση) με παράμετρο την ειδική αντίσταση του εδάφους.....	78
Σχήμα 5.2.1.3: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 765 kV (επάνω φάση) με παράμετρο την ειδική αντίσταση του εδάφους.....	79
Σχήμα 5.2.1.4: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.....	80
Σχήμα 5.2.1.5: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 150 kV (επάνω φάση) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.....	80
Σχήμα 5.2.1.6: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 400 kV (επάνω φάση) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.....	81
Σχήμα 5.2.1.7: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.....	82
Σχήμα 5.2.1.8: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων ΓΜ 150 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.....	82
Σχήμα 5.2.1.9: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων ΓΜ 400 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.....	83
Σχήμα 5.2.1.10: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.....	84
Σχήμα 5.2.1.11: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 150 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.....	84
Σχήμα 5.2.1.12: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 400 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.....	85
Σχήμα 5.2.2.1: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: ειδική αντίσταση εδάφους.....	86
Σχήμα 5.2.2.2: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: ύψος πυλώνα.....	86
Σχήμα 5.2.2.3: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: απόσταση πλήγματος.....	87
Σχήμα 5.2.2.4: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: διάρκεια μετώπου (t_f).....	87
Σχήμα 5.2.2.5: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: μέγιστη κλίση (S_m).....	88
Σχήμα 5.2.2.6: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: διάρκεια ημίσειος εύρους (t_h).....	88

Σχήμα 5.2.3.1: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση Α για γωνία φάσης 90°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -3,8 kA.....	89
Σχήμα 5.2.3.2: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 150 kV (επάνω φάση Α για γωνία φάσης 90°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -6,1 kA.....	90
Σχήμα 5.2.3.3: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 400 kV (επάνω φάση Α για γωνία φάσης 90°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -14,5 kA.....	90
Σχήμα 5.2.3.4: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 765 kV (επάνω φάση Α για γωνία φάσης 90°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -24,1 kA.....	91
Σχήμα 5.2.4.1: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής την ειδική αντίσταση του εδάφους.....	92
Σχήμα 5.2.4.2: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ των 66 kV και των 150 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το ύψος πυλώνα.....	92
Σχήμα 5.2.4.3: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ των 400 kV και των 765 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το ύψος πυλώνα.....	93
Σχήμα 5.2.4.4: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής την απόσταση πλήγματος.....	93
Σχήμα 5.2.4.5: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.....	94
Σχήμα 5.2.4.6: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στην ΓΜ 150 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.....	94
Σχήμα 5.2.4.7: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στην ΓΜ 400 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.....	95
Σχήμα 5.2.4.8: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στην ΓΜ 765 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.....	95
Σχήμα 5.2.4.9: Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την πάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής τις παραμέτρους του κεραυνού (διάρκεια μετώπου (t_f), μέγιστη κλίση (S_m), διάρκεια ημίσεος εύρους (t_h)).....	96

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1: ΓΜ 66 kV στην Κίνα με έναν αγωγό προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα.....	31
Εικόνα 3.2: ΓΜ 150 kV του ΕΣΜΗΕ με έναν αγωγό προστασίας με τη μεσαία φάση να προεξέχει έναντι των άλλων δύο. Η κάθε αλυσίδα μονωτήρων αποτελείται από 10-12 δισκοειδείς μονωτήρες.....	32
Εικόνα 3.3: ΓΜ 400 kV του ΕΣΜΗΕ με δύο αγωγούς προστασίας με τη μεσαία φάση προεξέχει έναντι των άλλων δύο. Στο κάτω μέρος των μονωτήρων υπάρχει ένας αγωγός δακτύλιος γύρω από τον τελευταίο δισκοειδή μονωτήρα (για την εξομάλυνση της κατανομής τάσης). Η κάθε αλυσίδα μονωτήρων αποτελείται από 17-19 δισκοειδείς μονωτήρες.....	33
Εικόνα 3.4: ΓΜ 765 kV με δύο αγωγούς προστασίας. Είναι αδύνατον να πληγεί κάποιος αγωγός φάσης από κεραυνό, παρά μόνο οι αγωγοί προστασίας βάσει ηλεκτρογεωμετρικών μοντέλων σύλληψης του κεραυνού καθώς η γωνία θωράκισης είναι αρνητική.....	34
Εικόνα 4.1: Περιβάλλον λογισμικού ATP-EMTP με μοντέλο προσομοίωσης ΓΜ 400 kV που πλήττεται από κεραυνό.....	43

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό να γίνει καλύτερα αντιληπτό πώς τα κεραυνικά πλήγματα επιδρούν στις Γραμμές Μεταφοράς (ΓΜ) και τις συνέπειές τους, προκειμένου να μπορέσουμε μελλοντικά να θωρακίσουμε τον εξοπλισμό μας με πιο κατάλληλο τρόπο για να προστατευθεί από μη επιθυμητά αποτελέσματα που ενδέχεται να προκληθούν (ΓΜ εκτός λειτουργίας, καταστροφή εξοπλισμού, οικονομικές κόστος των παραπάνω) από τα πλήγματα αυτά. Για την παραπάνω μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι λογισμικά:

- ATP-EMTP
- MATLAB.

Μέσω των λογισμικών αυτών και κατάλληλων μοντέλων προσομοίωσης των ΓΜ προσομοιώθηκαν κεραυνικά πλήγματα σε ΓΜ και εκτιμήθηκαν οι υπερτάσεις που προκαλούνται στον εξοπλισμό της ΓΜ. Εκτιμήθηκαν επίσης τα ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα επί του αντικείμενου που μελετάται στην διπλωματική εργασία. Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στην Κοζάνη. Το αντικείμενό της αφορά την αντικεραυνική προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και σχετίζεται άμεσα με το αντικείμενο των Υψηλών Τάσεων.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στο 1^ο Κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας θα γίνει μία σύντομη εισαγωγή σχετικά με το περιεχόμενο που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης θα γίνει αναφορά στον σκοπό της εργασίας.

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν τα κεραυνικά πλήγματα που είναι ίσως από τα κυριότερα αίτια σφαλμάτων των εναέριων Γραμμών Μεταφοράς (ΓΜ) ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα για επίπεδα τάσης λειτουργίας κάτω των 300 kV [1]. Πραγματοποιήθηκε έρευνα σχετικά με την συμπεριφορά των ΓΜ σε κεραυνικά πλήγματα τα οποία χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες:

- Πλήγμα στον πυλώνα ή σε αγωγό προστασίας
- Πλήγμα σε αγωγό φάσης.

Διερευνήθηκαν οι υπερτάσεις και τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα που προκαλούν διάσπαση στις ΓΜ, μέσω του λογισμικού προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων ATP-EMTP [2], [3]. Εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων σε ΓΜ τεσσάρων διαφορετικών επιπέδων τάσης (66 kV, 150 kV, 400 kV, 765 kV) και η συμπεριφορά αυτών για τις διάφορες παραμέτρους της κυματομορφής των πρώτων κεραυνικών πληγμάτων που μπορούν να δεχθούν.

Με την εκπόνηση λοιπόν, της εργασίας αυτής γίνεται καλύτερα κατανοητή η συμπεριφορά του Εναέριου Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας σε ένα ενδεχόμενο κεραυνικό πλήγμα, μπορεί να επιτευχθεί θωράκιση με ασφαλέστερο τρόπο από τους κεραυνούς, ώστε να μην υφίστανται ανεπιθύμητες συνέπειες στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (π.χ. διακοπές τροφοδοσίας, αντικατάσταση αγωγών φάσεων, προστασίας και μονωτήρων που έχουν καταπονηθεί με αποτέλεσμα οικονομική επιβάρυνση).

1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Συνοπτικά, ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση κεραυνικών υπερτάσεων και κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης ΓΜ μέσω του λογισμικού ATP-EMTP σε ΓΜ διαφορετικών επιπέδων τάσης. Η διερεύνηση θα επικεντρωθεί στα πρώτα κεραυνικά πλήγματα λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μεταβολή διάφορων παραμέτρων επίδρασης εντός του εύρους που εμφανίζεται στην πράξη. Στη διπλωματική αυτή θα διερευνηθούν γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος κατακόρυφης διάταξης φάσεων. Η επίδραση παραμέτρων των ΓΜ και της κυματομορφής του κεραυνικού πλήγματος θα προσδιοριστεί ποσοτικά και ποιοτικά.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 2: Συμπεριφορά ΓΜ σε Κεραυνικά Πλήγματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η συμπεριφορά των ΓΜ στα κεραυνικά πλήγματα που δέχονται και θα γίνει ο διαχωρισμός τους με την βοήθεια και σχηματικής αναπαράστασης.

2.1 Διαχωρισμός Κεραυνικών Πληγμάτων

Μία ΓΜ μπορεί να δεχθεί είτε άμεσα είτε έμμεσα κεραυνικά πλήγματα [4], [5]. Τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα είναι η συχνότερη αιτία η οποία οδηγεί σε σφάλματα που αφορούν την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο σύστημα, μέσω των υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου που δημιουργούνται (Fast-Front Overvoltages, FFO) και είναι ικανές να προκαλέσουν ακόμα και μόνιμες βλάβες στον εξοπλισμό της ΓΜ και να την θέσουν εκτός λειτουργίας, με αποτέλεσμα να έχουμε διακοπή ηλεκτροδότησης, αλλά και οικονομικές ζημιές. Τα έμμεσα κεραυνικά πλήγματα που δημιουργούνται συνήθως από την πτώση του κεραυνού κοντά σε ΓΜ (π.χ. στο έδαφος, σε κάποιο δέντρο ή γειτονική κατασκευή) δεν είναι ικανά συνήθως να προκαλέσουν κάποιο άμεσο σφάλμα, λόγω και του βασικού επιπέδου μόνωσης της ΓΜ (Basic Insulation Level, BIL) το οποίο είναι αρκετά υψηλό. Έμμεσα πλήγματα έχουν σημαντική επίδραση μόνο σε γραμμές διανομής όπου το βασικό επίπεδο μόνωσης είναι χαμηλό λόγω της σημαντικά πιο μικρής τάσης λειτουργίας. Επομένως, στο εξής θα εξεταστούν μόνο άμεσα κεραυνικά πλήγματα.

Τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα σε μία θωρακισμένη γραμμή μπορεί να καταλήξουν είτε:

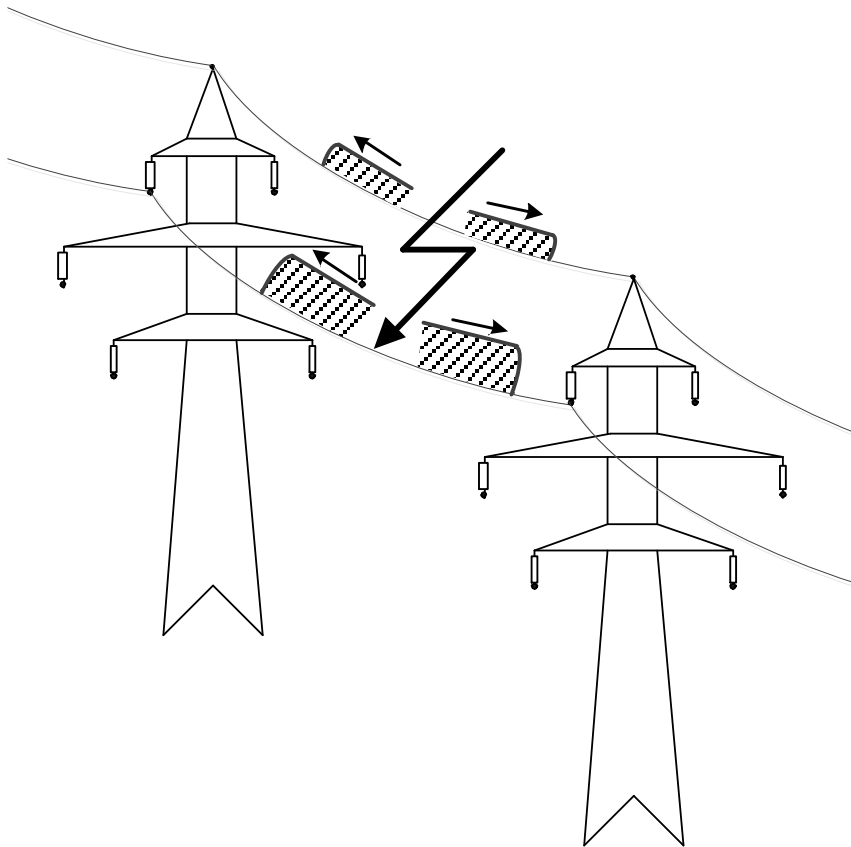
- Σε κάποιον από τους αγωγούς της φάσης
- Στον αγωγό προστασίας ή στον πυλώνα.

Αυτές οι δύο περιπτώσεις θα εξεταστούν στη συνέχεια.

2.1.1 Πλήγμα Κεραυνού σε Αγωγό Φάσης

Αν ο κεραυνός πλήξει κάποιον αγωγό φάσης (Σχήμα 2.1, σφάλμα θωράκισης), τότε το ρεύμα του κεραυνού μοιράζεται εξίσου προς τις δύο κατευθύνσεις του σημείου που έχει χτυπήσει και δημιουργούνται οδεύοντα κύματα κατά μήκος του αγωγού της συγκεκριμένης φάσης και επαγόμενα κύματα στους αγωγούς των υπολοίπων φάσεων και στον αγωγό προστασίας. Τα κύματα αυτά σταδιακά αποσβένονται λόγω της ωμικής αντίστασης της γραμμής και του φαινομένου κορώνα. Στην περίπτωση αυτή περισσότερο καταπονούνται οι μονωτήρες που βρίσκονται πιο κοντά στο σημείο πλήγματος του αντίστοιχου πυλώνα λόγω της διαφοράς δυναμικού, αφού ο πυλώνας είναι γειωμένος και έχει μηδενικό δυναμικό. Γενικότερα οι υπερτάσεις που δημιουργούνται εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά τόσο του κεραυνού (εύρος, παράμετροι κυματομορφής), όσο και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ΓΜ και την τιμή της εναλλασσόμενης τάσης τη χρονική στιγμή του πλήγματος του εκάστοτε αγωγού φάσης, διότι η διάρκεια του κεραυνού είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη διάρκεια της περιόδου της τάσης λειτουργίας της ΓΜ. Αν η υπέρταση που δημιουργείται ξεπεράσει την αντοχή

κάποιου μονωτήρα τότε προκαλείται διάσπαση από τον αγωγό προς τον πυλώνα (flashover) και στην πληθώρα των περιπτώσεων η γραμμή τίθεται εκτός λειτουργίας έστω και προσωρινά καθώς λειτουργούν οι διακόπτες ισχύος κάνοντας κύκλους επαναφοράς για να εκκαθαρίσουν το σφάλμα γης εφόσον είναι προσωρινό. Αν εξοπλισμός της ΓΜ υποστεί βλάβη τότε η τροφοδοσία της ΓΜ διακόπτεται και οι διακόπτες ισχύος παραμένουν ανοικτοί.



Σχήμα 2.1: Πλήγμα κεραυνού στον επάνω αγωγό φάσης, δημιουργία οδευόντων κυμάτων στον αγωγό φάσης που επλήγη και επαγόμενα κύματα στους υπόλοιπους αγωγούς [4].

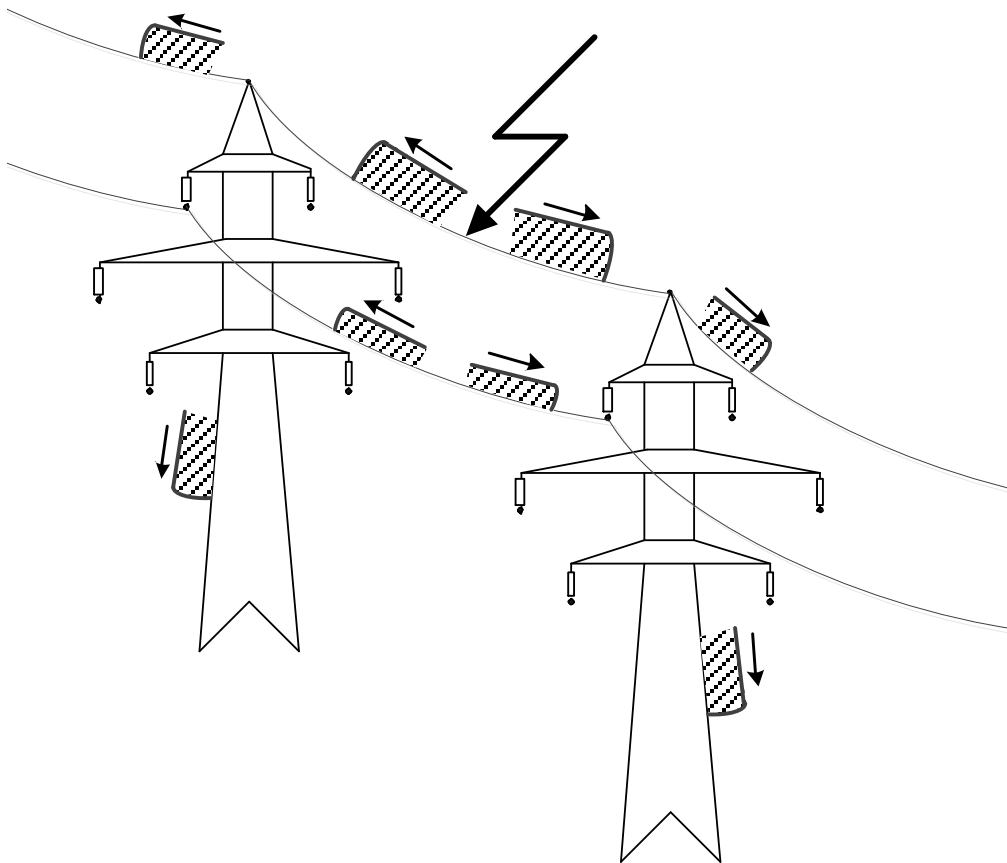
2.1.2 Πλήγμα Κεραυνού στον Αγωγό Προστασίας

Στην περίπτωση που ο κεραυνός πλήξει τον αγωγό προστασίας (Σχήμα 2.2) ή πυλώνα ΓΜ τα οδεύοντα κύματα που δημιουργούνται διαρρέουν μέσω αυτού και των πυλώνων προς την γη, ενώ στους αγωγούς φάσης αντίστοιχα οδεύουν επαγόμενα κύματα τα οποία σταδιακά αποσβένονται όπως και στην παραπάνω περίπτωση του σφάλματος θωράκισης με την απομάκρυνση από το σημείο πλήγματος [4]. Είναι φανερό λοιπόν, ότι οι μονωτήρες των πυλώνων εγγύτερα του πλήγματος καταπονούνται σε μεγάλο βαθμό. Η υπέρταση που τον καταπονεί εξαρτάται από το δυναμικό του πυλώνα στο σημείο του μονωτήρα και του αγωγού φάσης. Αν αυτή ξεπεράσει την αντίστοιχη επιτρεπτή τιμή αντοχής της μόνωσης προκαλείται στην περίπτωση αυτή ανάστροφη διάσπαση (backflashover, από τον πυλώνα προς τον αγωγό φάσης). Γίνεται κατανοητό λοιπόν, ότι η παραπάνω περίπτωση πτώσης του κεραυνού στον αγωγό προστασίας είναι πιο περίπλοκη προς μελέτη καθώς τα κύματα

προσπίπτουν σε διακλαδώσεις του συστήματος (αγωγός προστασίας-πυλώνας-σύστημα γείωσης πυλώνα). Δημιουργούνται λόγω της πρόσπτωσης των οδευόντων κυμάτων σε διακλαδώσεις άλλα οδευόντα κύματα στους αγωγούς, ενώ στον αγωγό που όδευε δημιουργείται ένα ανακλώμενο κύμα. Οι υπερτάσεις που καταπονούν στην συγκεκριμένη περίπτωση τους μονωτήρες της γραμμής μας εξαρτώνται από:

- Τα χαρακτηριστικά του κεραυνού (πλάτος, παράμετροι κυματομορφής)
- Το σημείο πλήγματος
- Τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γραμμής
- Την τιμή της εναλλασσόμενης τάσης του αγωγού φάσης την χρονική στιγμή του πλήγματος
- Το σύστημα γείωσης του πυλώνα.

Σημειώνεται ότι και η ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης μίας ΓΜ έχει τις ίδιες συνέπειες με τη διάσπαση λόγω πλήγματος στον αγωγό φάσης μίας ΓΜ. Επιπλέον, αν το κεραυνικό πλήγμα έχει πλάτος πολύ μεγαλύτερο από το κρίσιμο ρεύμα τότε μπορεί να οδηγήσει σε ανάστροφη διάσπαση σε περισσότερους από έναν μονωτήρες πυλώνα της ΓΜ.



Σχήμα 2.2: Πλήγμα κεραυνού στον αγωγό προστασίας, οδευόντα κύματα κατά μήκος του αγωγού προστασίας (μέσω των πυλώνων οδεύουν προς της γη), επαγόμενα κύματα στους υπόλοιπους αγωγούς [4].

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 3: Παράγοντες που επηρεάζουν τις Κεραυνικές Υπερτάσεις και τα Κρίσιμα Ρεύματα – Περιπτώσεις για Διερεύνηση

Στο 3^ο Κεφάλαιο της εργασίας θα αναλυθούν οι παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάζουν τις κεραυνικές υπερτάσεις και τα κρίσιμα ρεύματα για κεραυνικά πλήγματα που δέχεται τόσο ο αγωγός προστασίας όσο και ο πυλώνας και ο αγωγός φάσης. Επίσης θα περιγραφούν οι ΓΜ που επιλέχθηκαν προς διερεύνηση για τη διπλωματική εργασία.

Σε γενικές γραμμές, οι κεραυνικές υπερτάσεις που καταπονούν τη μόνωση εναέριων ΓΜ και τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα επηρεάζονται από τη θέση του κεραυνικού πλήγματος και τα χαρακτηριστικά του (κυματική αντίσταση καναλιού, παράμετροι κυματομορφής). Επίσης, επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά της ΓΜ (ηλεκτρικά, γεωμετρικά) και από αυτά των επιμέρους στοιχείων της (πυλώνες, σύστημα γείωσης κ.ά). Τέλος, η στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας επιδρά στις υπερτάσεις και στα κρίσιμα ρεύματα.

3.1 Πλήγμα στον Πυλώνα ή σε Αγωγό Προστασίας

Για τη μελέτη των πληγμάτων στον πυλώνα και στον αγωγό προστασίας διερευνήθηκαν διάφορα χαρακτηριστικά που αφορούν τις ΓΜ που μελετήθηκαν. Αυτά επικεντρώθηκαν κυρίως στα εξής:

- Ύψος πυλώνα της ΓΜ (κατ' επέκταση και ύψος ΓΜ)
- Μήκος μόνωσης της ΓΜ (βασικό επίπεδο μόνωσης, BIL)
- Απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα
- Αντίσταση γείωσης.

Επίσης έγινε παραμετρική διερεύνηση στις μεταβλητές που μπορούν να αλλάξουν σε κάθε κεραυνικό πλήγμα, οι οποίες είναι:

- Η τιμή του πλάτους (Amplitude, A) του ρεύματος στην πηγή του κεραυνού
- Η διάρκεια μετώπου (T_f, s)
- Η μέγιστη κλίση ($S_{max}, A/s$) που είναι συνάρτηση του πλάτους ρεύματος
- Η διάρκεια ημίσεος εύρους (T_h, s).

3.2 Πλήγμα σε Αγωγό Φάσης

Για τη μελέτη των πληγμάτων στους αγωγούς φάσης, όπως και στην προηγούμενη υποενότητα, διερευνήθηκαν διάφορες παράμετροι των ΓΜ που μελετήθηκαν. Αυτές αφορούν κυρίως:

- Ύψος πυλώνα της ΓΜ (κατ' επέκταση και ύψος ΓΜ)
- Μήκος μόνωσης της ΓΜ (βασικό επίπεδο μόνωσης, BIL)
- Απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα
- Ειδική αντίσταση εδάφους.

Επίσης έγινε παραμετρική διερεύνηση στις μεταβλητές που μπορούν να αλλάξουν σε κάθε κεραυνικό πλήγμα, οι οποίες, όπως και πριν, είναι:

- Η τιμή του πλάτους (Amplitude, Ampere) του ρεύματος στην πηγή του κεραυνού
- Η διάρκεια μετώπου (T_f , s)
- Η μέγιστη κλίση (S_{max} , Ampere/s) που είναι συνάρτηση του πλάτους ρεύματος
- Η διάρκεια ημίσεος εύρους (T_h , s).

3.3 ΓΜ προς Διερεύνηση

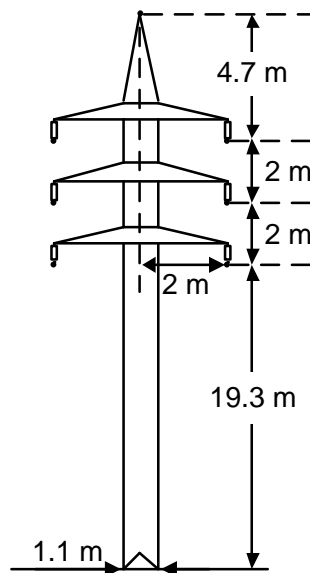
Για την εκπόνηση των παραπάνω διερευνήσεων επιλέχθηκαν τυπικές ΓΜ διπλού κυκλώματος κατακόρυφης διάταξης αγωγών, οι οποίες είναι θωρακισμένες (αγωγός προστασίας) των εξής κατηγοριών:

- 66 kV (Εικόνα 3.1, Σχήμα 3.1)
- 150 kV (Εικόνα 3.2, Σχήμα 3.2)
- 400 kV (Εικόνα 3.3, Σχήμα 3.3)
- 765 kV (Εικόνα 3.4, Σχήμα 3.4)

Τυπικά χαρακτηριστικά των ΓΜ που επιλέχθηκαν μπορούν να βρεθούν παρακάτω στα Σχήματα 3.1-3.4.



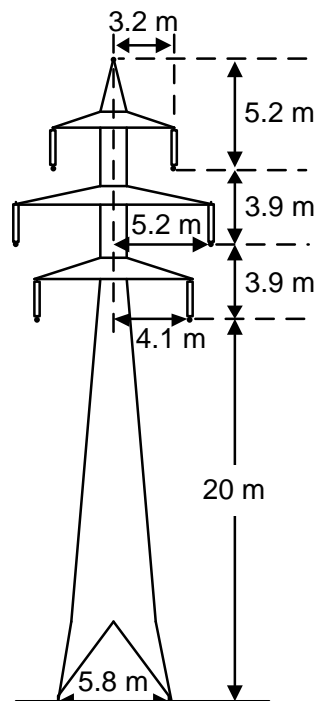
Εικόνα 3.1: ΓΜ 66 kV στην Κίνα με έναν αγωγό προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα [6].



Σχήμα 3.1: Σχέδιο ΓΜ 66 kV με έναν αγωγό προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα.
[Στο παραπάνω Σχήμα: Μήκος μόνωσης: 0.73 m, BIL: 325 kV, Αγωγός: ACSR Panther, Αγωγός προστασίας: Χαλύβδινος (διάμετρος: 9.45 mm).]



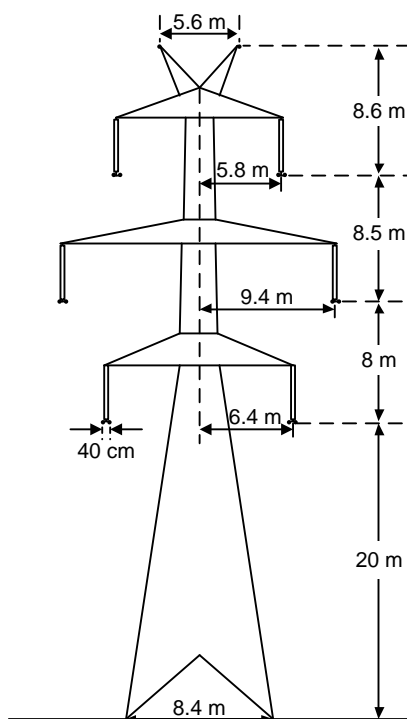
Εικόνα 3.2: ΓΜ 150 kV του ΕΣΜΗΕ με έναν αγωγό προστασίας με τη μεσαία φάση να προεξέχει έναντι των άλλων δύο. Η κάθε αλυσίδα μονωτήρων αποτελείται από 10-12 δισκοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 3.2: Σχέδιο ΓΜ 150 kV με έναν αγωγό προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα. [Στο παραπάνω Σχήμα: Μήκος μόνωσης: 1.86 m, ΒΙΛ: 750 kV, Αγωγός: ACSR Grosbeak, Αγωγός προστασίας: Χαλύβδινος (διάμετρος: 12.6 mm)].



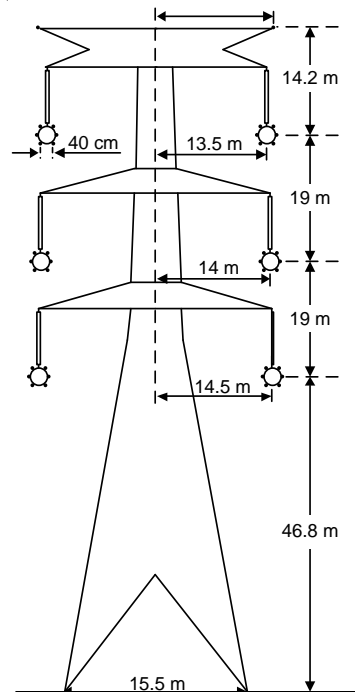
Εικόνα 3.3: ΓΜ 400 kV του ΕΣΜΗΕ με δύο αγωγούς προστασίας με τη μεσαία φάση προεξέχει έναντι των άλλων δύο. Στο κάτω μέρος των μονωτήρων υπάρχει ένας αγωγός δακτύλιος γύρω από τον τελευταίο δισκοειδή μονωτήρα (για την εξομάλυνση της κατανομής τάσης). Η κάθε αλυσίδα μονωτήρων αποτελείται από 17-19 δισκοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 3.3: Σχέδιο ΓΜ 400 kV με δύο αγωγούς προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα.
 [Στο παραπάνω Σχήμα: Μήκος μόνωσης: 3.62 m, ΒΙΛ: 1425 kV, Αγωγός: ACSR Cardinal, Αγωγός προστασίας: Χαλύβδινος (διάμετρος: 12.6 mm).]



Εικόνα 3.4: ΓΜ 765 kV με δύο αγωγούς προστασίας. Είναι αδύνατον να πληγεί κάποιος αγωγός φάσης από κεραυνό, παρά μόνο οι αγωγοί προστασίας βάσει ηλεκτρογεωμετρικών μοντέλων σύλληψης του κεραυνού καθώς η γωνία θωράκισης είναι αρνητική [7].



Σχήμα 3.4: Σχέδιο ΓΜ 765 kV με δύο αγωγούς προστασίας και 3 φάσεις εκατέρωθεν του πυλώνα. [Στο παραπάνω Σχήμα :Μήκος μόνωσης: 4.8 m, BIL: 1950 kV, Αγωγός: ACSR Cardinal, Αγωγός προστασίας: AWS 200 (διάμετρος: 18.5 mm)].

3.4 Παράμετροι προς Διερεύνηση των Επιλεγμένων ΓΜ

Στην υποενότητα αυτή θα γίνει μια αναλυτική αναφορά στις παραμέτρους των ΓΜ που μελετήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής με βάση τις προαναφερθείσες ενότητες 3.1 και 3.2 με αναλυτικές τιμές ανά γραμμή. Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των παραμέτρων είναι κατά το δυνατόν ρεαλιστικές με βάση τις πραγματικές τιμές των ΓΜ. Πιο συγκεκριμένα, οι μεταβολές του ύψους των πυλώνων και κατ' επέκταση της ΓΜ έγιναν με βάση τα πρότυπα σκέλη και τις επεκτάσεις του κάθε πυλώνα (οι αποστάσεις μεταξύ των φάσεων και των αγωγών προστασίας μένουν ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις). Το μήκος της μόνωσης επιλέχθηκε με βάση τους μονωτήρες που χρησιμοποιούνται στην πράξη και η αντίσταση γείωσης θεωρώντας μία μέγιστη τιμή 200 Ω, καθώς μεγαλύτερες τιμές δεν εμφανίζονται συχνά αν και έχουν μετρηθεί. Η ελάχιστη τιμή αντίστασης γείωσης είναι αυτή που οδηγεί σε ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης (χαμηλότερες τιμές οδηγούν σε αντοχή για τη μέγιστη τιμή κεραυνικού ρεύματος των 200 kA).

ΓΜ 66 kV

- **Ύψος Πυλώνων ΓΜ**

Αναλυτικότερα ορίστηκε μια περίπτωση αναφοράς για όλα τα ύψη (τυπικός πυλώνας, $h = \pm 0$ m) και στη συνέχεια προστέθηκε ή αφαιρέθηκε ύψος από τον πυλώνα: (-1.5 m, +1.5 m, +3 m, +6 m) όπου h το αρχικό ύψος του πυλώνα.

- **Μήκος μόνωσης της ΓΜ**

Μελετήθηκαν οι εξής περιπτώσεις:

1. 0.73 m (αντιστοιχεί στο σύνηθες βασικό επίπεδο μόνωσης των 66 kV)
2. 0.98 m
3. 1.13 m

- **Απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα**

Μελετήθηκαν οι εξής αποστάσεις:

1. 25 m
2. 50 m
3. 75 m
4. 100 m
5. 125 m

6. 137.5 m

Σημειώνεται ότι μετά τα 137.5 m (μέσο του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων) ο επόμενος πυλώνας γίνεται εγγύτερος στο σημείο πλήγματος. Επομένως, σε όλες τις ΓΜ το σημείο πλήγματος μεταβλήθηκε από τη θέση του πυλώνα (0 m) έως τη θέση στο μέσο του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων (midspan).

- **Αντίσταση Γείωσης**

Μελετήθηκαν οι εξής τιμές αντίστασης γείωσης:

1. 1 Ω
2. 10 Ω
3. 25 Ω
4. 50 Ω
5. 100 Ω
6. 200 Ω

Για τις παραπάνω τιμές έχουν γίνει πίνακες αποτελεσμάτων για όλες τις παραμετροποιήσεις στις ΓΜ που έχουν προαναφερθεί. Παραδείγματος χάριν, για μήκος μόνωσης 0.73 m, 0.98 m και 1.13 m στη ΓΜ των 66 kV έχουν γίνει προσομοιώσεις με όλες τις τιμές αντίστασης γείωσης (το ίδιο ισχύει και για τις άλλες παραμέτρους και ΓΜ).

ΓΜ 150 kV

- **Ύψος Πυλώνων ΓΜ**

Ορίστηκε μια περίπτωση αναφοράς για όλα τα ύψη ($h=\pm 0$ m) και στη συνέχεια προστέθηκε ή αφαιρέθηκε ύψος από τον πυλώνα όπου h το ύψος σημείου αναφοράς. Μελετήθηκαν λοιπόν τα κάτωθι ύψη:

1. h m
2. $h-1,5$ m
3. $h+1,5$ m
4. $h+3$ m
5. $h+6$ m

- **Μήκος μόνωσης της ΓΜ**

Μελετήθηκαν οι εξής περιπτώσεις:

1. 1.86 m (αντιστοιχεί στο σύνηθες βασικό επίπεδο μόνωσης των 150 kV)
2. 1.57 m
3. 1.72 m

- **Απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα**

Μελετήθηκαν οι εξής αποστάσεις:

1. 25 m
2. 50 m
3. 75 m
4. 100 m
5. 125 m
6. 150 m

- **Αντίσταση Γείωσης**

Μελετήθηκαν οι εξής τιμές αντίστασης γείωσης:

1. 7 Ω
2. 10 Ω
3. 25 Ω
4. 50 Ω
5. 100 Ω
6. 200 Ω

ΓΜ 400 kV

- **Ύψος Πυλώνων ΓΜ**

Ορίστηκε μια περίπτωση αναφοράς για όλα τα ύψη ($h=\pm 0$ m) και στην συνέχεια προστέθηκε ή αφαιρέθηκε ύψος από τον πυλώνα όπου h το ύψος σημείου αναφοράς. Μελετήθηκαν λοιπόν τα κάτωθι ύψη:

1. h m
2. $h-4$ m
3. $h+4$ m
4. $h+8$ m
5. $h+12$ m
6. $h+16$ m

- **Μήκος μόνωσης της ΓΜ**

Μελετήθηκαν οι εξής περιπτώσεις:

1. 3.62 m (αντιστοιχεί στο σύνηθες βασικό επίπεδο μόνωσης των 400 kV)
2. 3 m
3. 3.34 m

- **Απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα**

Μελετήθηκαν οι εξής αποστάσεις:

1. 25 m
2. 50 m
3. 75 m
4. 100 m
5. 125 m
6. 150 m
7. 175 m

- **Αντίσταση Γείωσης**

Μελετήθηκαν οι εξής τιμές αντίστασης γείωσης:

1. 17 Ω
2. 25 Ω
3. 50 Ω
4. 100 Ω
5. 200 Ω

ΓΜ 765 kV

- **Ύψος Πυλώνων ΓΜ**

Ορίστηκε μια περίπτωση αναφοράς για όλα τα ύψη ($h=\pm 0$ m) και στην συνέχεια προστέθηκε ή αφαιρέθηκε ύψος από τον πυλώνα όπου h το ύψος σημείου αναφοράς. Μελετήθηκαν λοιπόν τα κάτωθι ύψη:

1. h m
2. $h-4$ m
3. $h+4$ m
4. $h+8$ m
5. $h+12$ m
6. $h+16$ m

- **Μήκος μόνωσης της ΓΜ**

Μελετήθηκαν οι εξής περιπτώσεις:

1. 4.8 m (αντιστοιχεί στο σύνηθες βασικό επίπεδο μόνωσης των 765 kV)
2. 4.6 m
3. 5 m

- **Απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα**

Μελετήθηκαν οι εξής αποστάσεις:

1. 50 m
2. 100 m
3. 150 m
4. 200 m
5. 250 m

- **Αντίσταση Γείωσης**

Μελετήθηκαν οι εξής τιμές αντίστασης γείωσης:

1. 25 Ω
2. 50 Ω
3. 100 Ω
4. 150 Ω
5. 200 Ω

Για όλες τις παραπάνω ΓΜ έγινε επιπρόσθετα και μεταβολή των διαφόρων χαρακτηριστικών του κεραυνού τα οποία μεταβλήθηκαν ως εξής:

- **Η τιμή του πλάτους (amplitude, A) του ρεύματος στην πηγή του κεραυνού.**

Αυτή μεταβαλλόταν πρώτα μέσω του λογισμικού ATP-EMTP (στις περιπτώσεις πληγμάτων στους αγωγούς φάσης) και στη συνέχεια όταν μελετήθηκαν κεραυνικά πλήγματα στον πυλώνα και τους αγωγούς προστασίας χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB. Η μεταβολή έγινε με βήμα στα 100 A ανά τρέξιμο μέχρι να βρεθεί το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα που προκαλεί διάσπαση της μόνωσης για κάθε φάση, καθώς και για συγκεκριμένες τιμές όσον αφορά τον υπολογισμό υπερτάσεων στους μονωτήρες.

- **Η διάρκεια μετώπου (T_f , s)**

Η τιμή αυτή είναι συνάρτηση της τιμής του πλάτους. Η αντίστοιχη συνάρτηση μεταβλήθηκε βάσει των κατανομών της CIGRE που μετρήθηκαν σε πύργους στις κορυφές βουνών λαμβάνοντας υπόψη το 5%, 50% και 95% των περιπτώσεων κεραυνικών ρευμάτων που ξεπερνούν τις υπολογισμένες τιμές.

- **Η μέγιστη κλίση (S_{max} , A/s)**

Σε αντιστοιχία με τη διάρκεια μετώπου, η τιμή της μέγιστης κλίσης είναι συνάρτηση της τιμής του πλάτους. Η αντίστοιχη συνάρτηση μεταβλήθηκε βάσει των κατανομών της CIGRE που μετρήθηκαν σε πύργους στις κορυφές βουνών λαμβάνοντας υπόψη το 5%, 50% και 95% των περιπτώσεων κεραυνικών ρευμάτων που ξεπερνούν τις υπολογισμένες τιμές.

- **Η διάρκεια ημίσεος εύρους (T_h , s)**

Η διάρκεια ημίσεος εύρους δεν εξαρτάται από το πλάτος του κεραυνικού ρεύματος. Για την παράμετρο αυτή χρησιμοποιήθηκαν 3 συγκεκριμένες σταθερές τιμές: 30 μ s, 77.5 μ s και 200.2 μ s που ξεπερνιούνται από το 5%, 50% και 95% των περιπτώσεων κεραυνικών ρευμάτων.

Σημειώνεται ότι όσον αφορά τις παραμέτρους των κεραυνικών ρευμάτων (διάρκεια μετώπου, μέγιστη κλίση και διάρκεια ημίσεος εύρους), κάθε φορά μεταβαλλόταν μία παράμετρος και οι άλλες ήταν αυτές που αντιστοιχούν στο 50% των περιπτώσεων κεραυνικών ρευμάτων που τις ξεπερνούν.

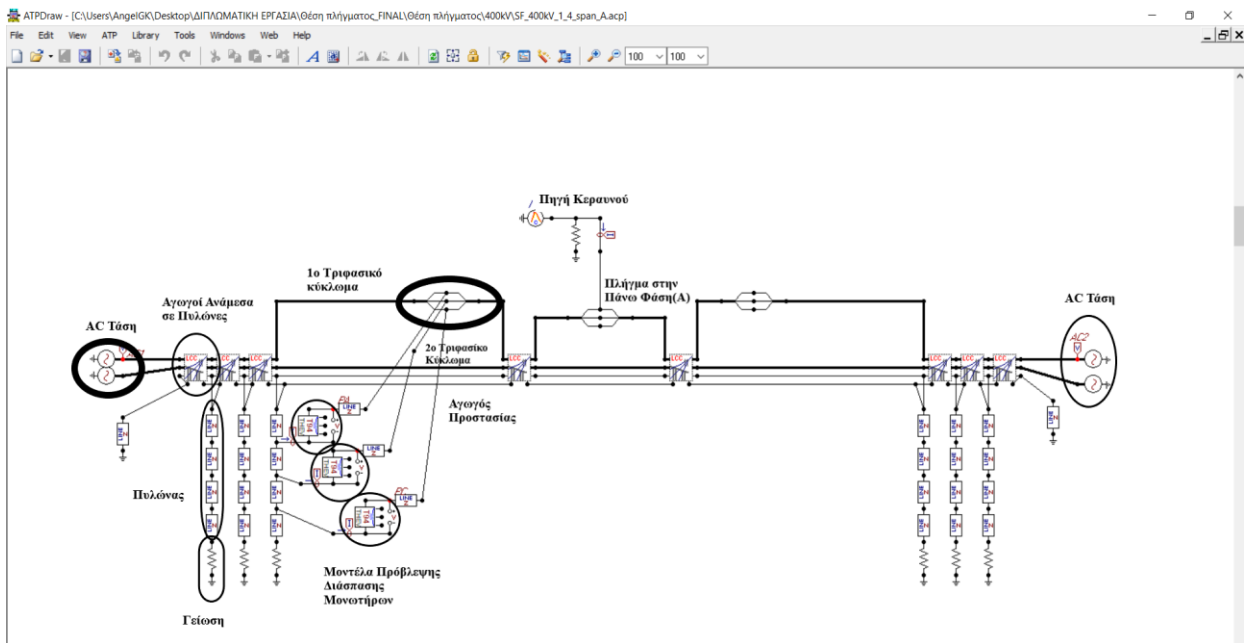
ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 4: Μοντέλα Προσομοίωσης ΓΜ Ηλεκτρικής Ενέργειας

Προκειμένου να επιτευχθούν οι προσομοιώσεις στις ΓΜ για την διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις κεραυνικές υπερτάσεις και τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης ΓΜ χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα προσομοίωσης στο λογισμικό ATP-EMTP για την κάθε ΓΜ που εξετάστηκε. Οι προσομοιώσεις των πληγμάτων σε πυλώνες και αγωγούς προστασίας εκτελέστηκαν μαζικά με τη χρήση κώδικα που είχε αναπτυχθεί στο MATLAB. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται συνοπτικά τα μοντέλα των ΓΜ και η λειτουργία του κώδικα του MATLAB.

4.1 Μοντέλα Προσομοίωσης στο Λογισμικό ATP-EMTP

Αρχικά για την εξοικείωση με τις προσημειώσεις χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα στο λογισμικό ATP-EMTP (Σχήμα 4.1), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη των μεταβατικών φαινομένων σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) με απώτερο σκοπό την κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος και την εγκατάσταση εξοπλισμού προστασίας, όπως είναι οι εκτροπείς υπέρτασης.



Εικόνα 4.1: Περιβάλλον λογισμικού ATP-EMTP με μοντέλο προσομοίωσης ΓΜ 400 kV που πλήττεται από κεραυνό

Στο παραπάνω Σχήμα από το περιβάλλον του λογισμικού φαίνονται με πιο έντονα γράμματα και κυκλωμένα κάποια βασικά στοιχεία της ΓΜ [4].

- **Πηγή κεραυνού:** Αναπαρίσταται σαν μία πηγή ρεύματος η οποία, όπως έχουμε προαναφέρει και στα παραπάνω κεφάλαια της εργασίας, παράγει το κεραυνικό ρεύμα με βάση κάποιες παραμέτρους: το πλάτος I_{peak} , η διάρκεια ημίσειος εύρους η οποία είναι ανεξάρτητη από το I_{peak} , η διάρκεια μετώπου t_f (μs) και η μέγιστη κλίση S_m ($kA/\mu s$) οι

οποίες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις ακολουθώντας το τεχνικό εγχειρίδιο της CIGRE [5]:

$$t_f = \begin{cases} 1,77 \times I_{peak}^{0,188}, & 3 \leq I_{peak} \leq 20kA \\ 0,906 \times I_{peak}^{0,411}, & I_{peak} > 20kA \end{cases}$$

$$S_m = \begin{cases} 12 \times I_{peak}^{0,171}, & 3 \leq I_{peak} \leq 20kA \\ 6,5 \times I_{peak}^{0,376}, & I_{peak} > 20kA \end{cases}$$

Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για τις ενδιάμεσες τιμές (50% των περιπτώσεων υπερβαίνουν τις τιμές που υπολογίζονται). Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν και για τα 5% και 95% που μελετήθηκαν.

Παράλληλα στην πηγή υπάρχει μία αντίσταση που προσομοιώνει την κυματική αντίσταση του καναλιού του κεραυνού. Δηλαδή, ένα μέρος του κεραυνικού ρεύματος ρέει στο κανάλι και όχι προς τη ΓΜ.

- **AC τάση:** Αναπαριστάται στο κύκλωμα με AC γειωμένες πηγές στην αρχή της εκάστοτε γραμμής και στο τέλος της. Επιλέγοντας το εικονίδιο της πηγής μπορεί να τροποποιηθεί η τιμή της τάσης της πηγής ανάλογα με την προς διερεύνηση ΓΜ και να οριστούν και άλλα στοιχεία, π.χ. συχνότητα, μονοφασικό ή τριφασικό κύκλωμα.
- **Σύστημα γείωσης πυλώνων:** Αναπαρίσταται κλασσικά σαν μια αντίσταση που υπάρχει στους πυλώνες της κάθε ΓΜ στο κύκλωμα. Η απλοποιημένη προσέγγιση μέσω απλής αντίστασης οδηγεί σε αποτελέσματα στην ασφαλή πλευρά (μεγαλύτερες υπερτάσεις) όταν το σύστημα γείωσης είναι σχεδιασμένο σωστά.
- **Πυλώνες:** Προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας γραμμές σταθερών παραμέτρων, οι οποίες δεν εξαρτώνται από την συχνότητα, χωρίς απώλειες. ΣΣτις ΓΜ κατακόρυφης διάταξης αγωγών χωρίζονται σε τέσσερα τμήματα συνήθως, που μπορούν να αναπαρασταθούν σαν μια γραμμή με μήκος ίσο με το ύψος του αντίστοιχου τμήματος. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η κυματική αντίσταση των επιμέρους τμημάτων από τα οποία αποτελείται ένας πυλώνας της ΓΜ που στην περίπτωση που δεχθεί ένα κεραυνικό πλήγμα στην κορυφή του δίνεται από τον τύπο:

$$Z_T = 60 \times \ln \left(\sqrt{2} \times \frac{\sqrt{r_{Tb}^2 + h_T^2}}{r_{Tb}} \right)$$

Όπου $r_{Tb}(m)$ είναι η ακτίνα βάσης του πυλώνα και $h_T(m)$ το ύψος του.

- **Αγωγοί ανάμεσα σε πυλώνες:** Απεικονίζονται στο λογισμικό με το εικονίδιο του στοιχείου LCC. Οι αγωγοί φάσης και προστασίας προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο JMarti σε συχνότητα 50 kHz (πίνακας μετασχηματισμού) μέσω της ρουτίνας υποστήριξης LINE CONSTANTS του λογισμικού ATP-EMTP.

- **Μοντέλα πρόβλεψης διάσπασης μονωτήρων:** Βοηθούν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της ΓΜ όταν καταπονείται από υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE, το οποίο βάσει του μηχανισμού διάσπασης μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων μπορεί με είσοδο την εφαρμοζόμενη τάση στον μονωτήρα να προβλέψει αν θα γίνει διάσπαση ή όχι.
- **Σύνδεση μοντέλων πρόβλεψης διάσπασης με τριφασικό κύκλωμα ΓΜ:** Η σύνδεση γίνεται μέσω δύο Splitter καθώς κάθε μοντέλο πρόβλεψης μονωτήρων συνδέεται και με μία φάση (αφορά έναν μονωτήρα).

Τέλος στο Σχήμα 4.1 διακρίνονται τόσο ο αγωγός προστασίας και τα δύο κυκλώματα της ΓΜ 400 kV όσο και το πλήγμα του κεραυνού, όπου στην προκειμένη περίπτωση πλήττει την επάνω φάση.

4.2 Κώδικας Προσομοίωσης στο MATLAB

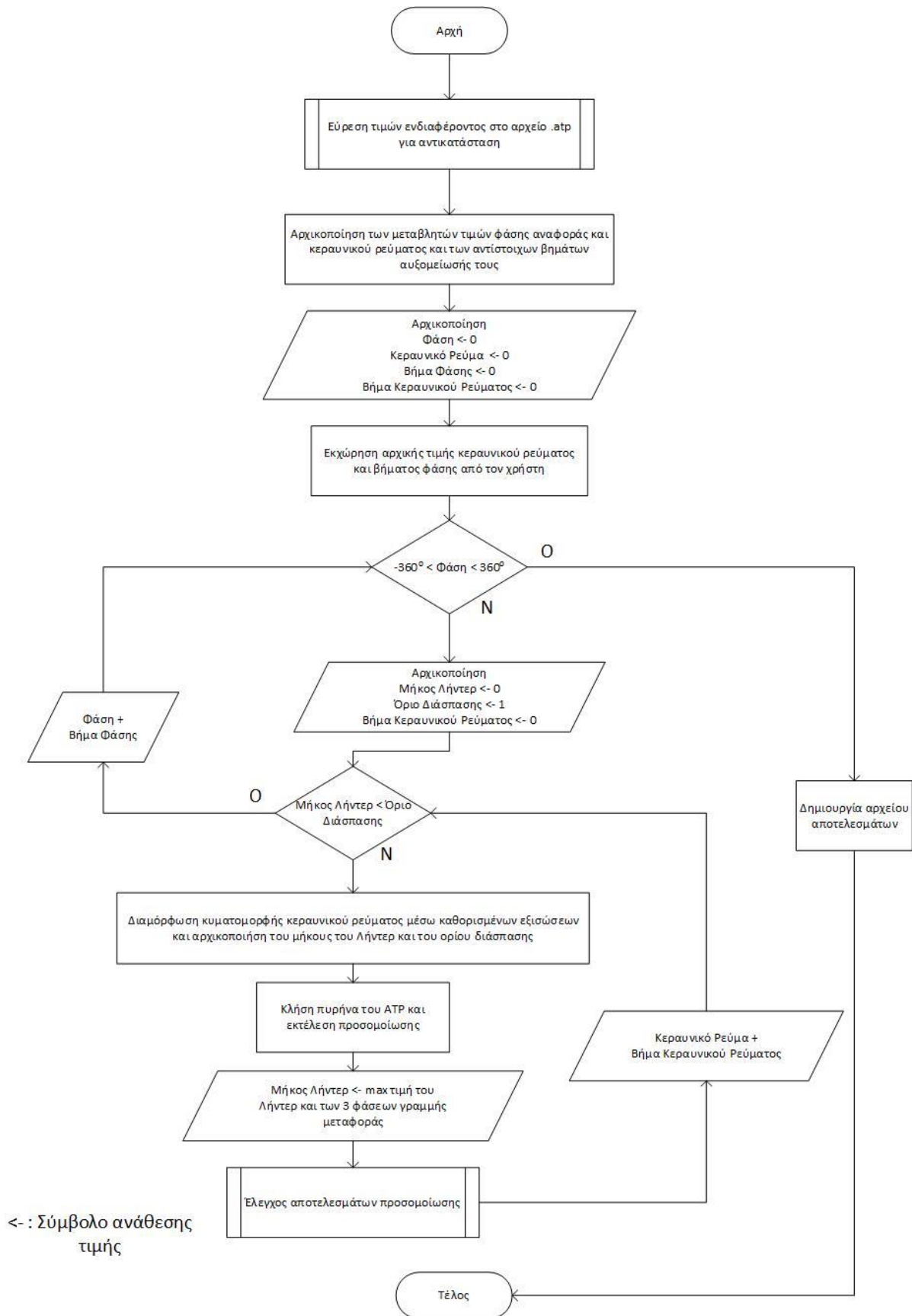
Προκειμένου να εκτελεστεί ο μεγάλος όγκος προσομοιώσεων που αφορούν πλήγματα στον πυλώνα και στον αγωγό προστασίας, κατά το δυνατόν αυτόματα και με μεγαλύτερη ταχύτητα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της MATLAB (έκδοση R2018a). Στο λογισμικό με την βοήθεια του κατάλληλου κώδικα [8] προσδιορίστηκαν με ακρίβεια μέσω προσομοιώσεων για αρκετές παραμέτρους τόσο τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης όσο και υπερτάσεις που καταπονούν τους μονωτήρες της ΓΜ. Στις επόμενες παραγράφους θα ακολουθήσει μία σύντομη περιγραφή σχετικά με το πώς λειτουργεί ο κώδικας τόσο για τον υπολογισμό των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων όσο και για τις υπερτάσεις.

4.2.1 Υπολογισμός Κρίσιμων Κεραυνικών Ρευμάτων με την βοήθεια του Κώδικα

Αρχικά δημιουργείται ένα αρχείο εισόδου για τον κώδικα MATLAB χρησιμοποιώντας τον γραφικό προεπεξεργαστή του ATP-EMTP, ο οποίος ονομάζεται ATPDraw. Το αρχείο αυτό έχει κατάληξη .atp, περιέχει το μοντέλο προσομοίωσης της ΓΜ, αποτελεί το εκτελέσιμο αρχείο του πυρήνα (solver) του ATP-EMTP και εισάγεται αρχικά στον κώδικα MATLAB (Σχήμα 4.2). Μέσα σε αυτό το αρχείο περιέχονται όλοι οι παράμετροι που ενδιαφέρουν τον χρήστη και μέσω ενός βοηθητικού αρχείου. m μπορεί ο κώδικας να επεξεργαστεί ότι χρειάζεται από δεδομένα και τιμές (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, παράμετροι της κυματομορφής του κεραυνού, γωνία φάσης της AC τάσης της γραμμής). Στη συνέχεια αφού καταχωρηθούν όλες οι παράμετροι στις συνθήκες μέσα του κώδικα, και γίνει εκτέλεση του κώδικα, ζητείται από τον χρήστη να εισάγει μια αρχική τιμή του ρεύματος του κεραυνού σε A και το βήμα της γωνίας φάσης της εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας. Προφανώς η αρχική τιμή του ρεύματος πρέπει να είναι μικρότερη από το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα που προκαλεί διάσπαση της μόνωσης. Έπειτα ξεκινά η εκτέλεση κατά την οποία, αν γίνει διάσπαση της μόνωσης κατευθείαν με την αρχική τιμή ρεύματος σταματάει η εκτέλεση του κώδικα και τότε θα πρέπει ο χρήστης να βάλει μια μικρότερη τιμή, ώστε να εκτελεστεί ξανά η προσομοίωση. Σε αντίθετη περίπτωση (αρχικό ρεύμα μικρότερο από το κρίσιμο), ξεκινά η προσομοίωση με

βήματα των 2500A και στην συνέχεια των 500A και των 100A (όσο πλησιάζει η εύρεση του κρίσιμου κεραυνικού ρεύματος τόσο μικρότερο γίνεται το βήμα που τρέχει ο κώδικας) έως ότου βρεθεί το κρίσιμο ρεύμα. Κατόπιν αυξάνεται η γωνία φάσης της εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας και η προσομοίωση ξεκινά εκ νέου. Παράλληλα με τα παραπάνω δημιουργούνται τα αρχεία των κυματομορφών για κάθε ρεύμα που έχει τρέξει ο κώδικας τα οποία μπορούν να μελετηθούν για το αν υπάρχει κάποιο σφάλμα σε κάποιο τρέξιμο, π.χ. αν το μήκος του λήντερ κεραυνού δεν έγινε ίσο με το μήκος μόνωσης που υπάρχει. Σημειώνεται ότι ο έλεγχος για το αν έγινε διάσπαση ή όχι πραγματοποιείται συγκρίνοντας το μήκος του λήντερ (μέγιστη τιμή) που έχει υπολογιστεί με το μήκος της μόνωσης της ΓΜ.

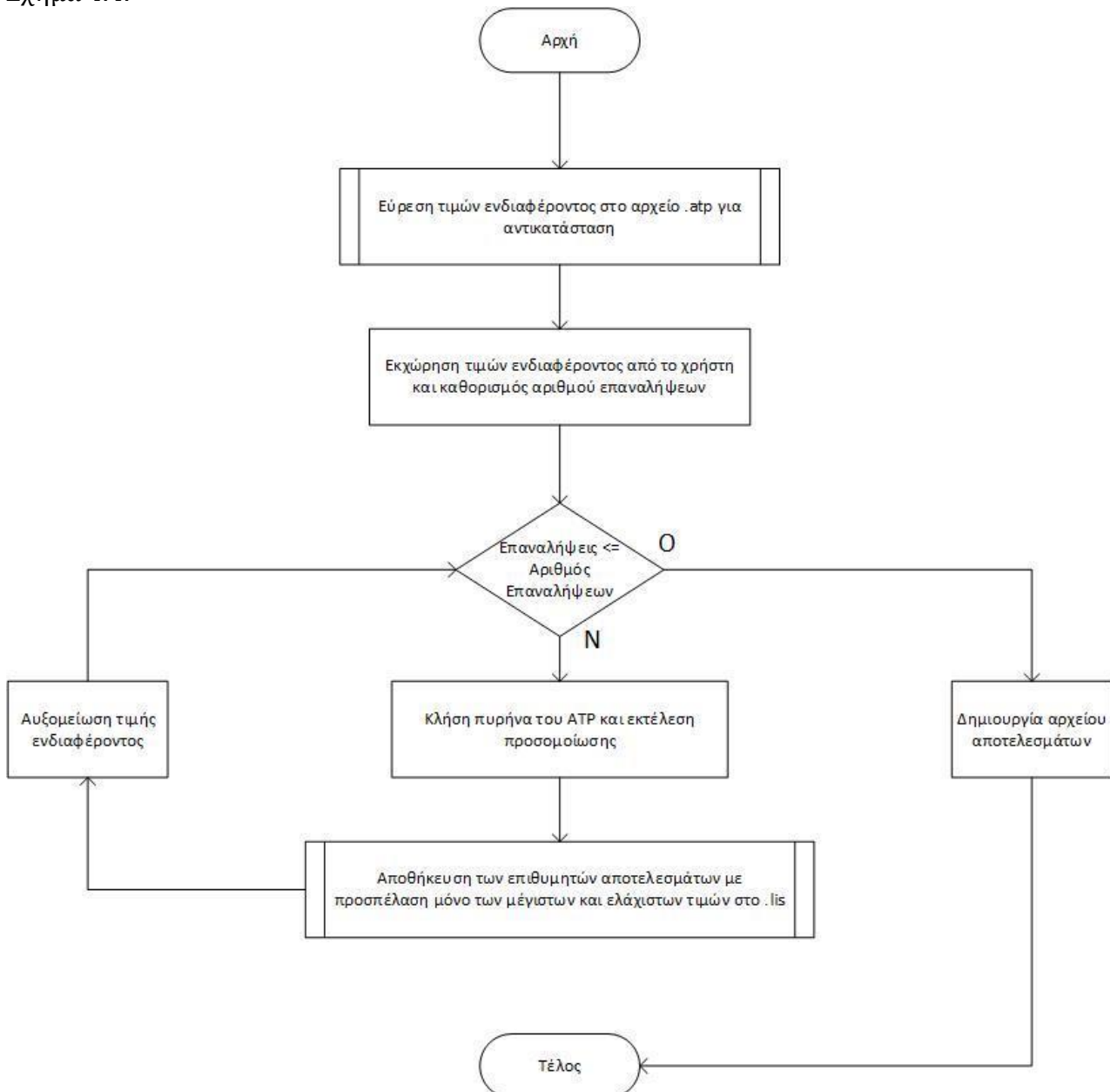
Όταν ολοκληρωθούν όλες οι γωνίες φάσης της εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας της ΓΜ (σε αυτή την εργασία από 0° έως 360°, βήμα: 30°) ο κώδικας MATLAB εξάγει ένα αρχείο xlsx το οποίο περιέχει τις τιμές του κρίσιμου ρεύματος συναρτήσει της γωνίας φάσης καθώς και τη φάση της ΓΜ στην οποία έγινε διάσπαση. Επίσης, το αρχείο Excel περιλαμβάνει το μέγιστο μήκος του λήντερ και μία ένδειξη σχετικά με το αν έγινε έλεγχος ανά 100 A (βήμα αύξησης του ρεύματος κατά τις διαδοχικές προσομοιώσεις).



Σχήμα 4.2.1 Διάγραμμα ροής εκτίμησης κρίσιμου κεραυνικού ρεύματος με μεταβλητή φάση αναφοράς, μεταβλητό κεραυνικό ρεύμα [8].

4.2.2 Υπολογισμός Υπερτάσεων που Καταπονούν τους Μονωτήρες με την βοήθεια του Κώδικα

Όπως και στον κώδικα για την εύρεση των κρίσιμων ρευμάτων, αρχικά δημιουργείται από το περιβάλλον του ATPDraw το αντίστοιχο αρχείο με την κατάληξη .atp το οποίο εισάγεται στον κώδικα. Στη συνέχεια ζητείται από τον χρήστη να εισάγει ένα αρχικό ρεύμα από το οποίο θα ξεκινήσει η εκτέλεση του κώδικα, ο αριθμός των προσομοιώσεων, καθώς και το βήμα ρεύματος σε A με το οποίο θα τρέχει ο κώδικας. Αφού γίνει η εκτέλεση δημιουργείται ένα αρχείο excel, όπου περιέχονται αναλυτικά όλες οι εκτελέσεις που έγιναν για όλα τα ρεύματα και οι υπερτάσεις που καταπονούν τους αντίστοιχους μονωτήρες της κάθε φάσης. Το διάγραμμα ροής του κώδικα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3 και τυπικά αποτελέσματα στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.2.2.1 Διάγραμμα ροής για αλγόριθμο εξαγωγής αποτελεσμάτων μέσω πίνακα μεγίστων και ελαχίστων τιμών (καταγραφή μεγίστων/ελάχιστων τιμών υπερτάσεων) [8].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	CURarray	AC2A	AC2B	AC2C	AC1A	AC1B	AC1C	AA	AB	AC	CUR	XX0060	XX0061	XX0062
2	-10000	0	0	0	0	0	0	449587,918	529074,768	588602,908	0	0	0	0
3	-20000	0	0	0	0	0	0	890121,72	1044087	1159600	0	0	0	0
4	-30000	0	0	0	0	0	0	1312770	1537218	1703632	0	0	0	0
5	-40000	0	0	0	0	0	0	1719838	2010002	2225079	0	0	0	0
6	-50000	0	0	0	0	0	0	2112936	2467090	2726811	0	0	0	0
7	-60000	0	0	0	0	0	0	2501105	2917829	3221744	0	0	0	0
8	-70000	0	0	0	0	0	0	2884581	3362623	3710187	0	0	0	0
9	-80000	0	0	0	0	0	0	3260315	3798121	4188284	0	0	0	0
10	-90000	0	0	0	0	0	0	3631289	4227844	4659976	0	0	0	0
11	-100000	0	0	0	0	0	0	3991274	4644292	5116864	0	0	0	0
12	-110000	0	0	0	0	0	0	4349079	5058293	5570891	0	0	0	0
13	-120000	0	0	0	0	0	0	4692831	5455568	6006044	0	0	0	0
14	-130000	0	0	0	0	0	0	5037159	5853558	6442166	0	0	0	0
15	-140000	0	0	0	0	0	0	5400088	6273533	6903134	0	0	0	0
16	-150000	0	0	0	0	0	0	5720993	6643780	7308080	0	0	0	0
17	-160000	0	0	0	0	0	0	6037247	7008941	7707978	0	0	0	0
18	-170000	0	0	0	0	0	0	6370495	7393759	8129411	0	0	0	0
19	-180000	0	0	0	0	0	0	6692546	7765590	8536633	0	0	0	0
20	-190000	0	0	0	0	0	0	7068425	8200659	9014388	0	0	0	0
21	-200000	0	0	0	0	0	0	7329246	8500602	9341511	0	0	0	0

Σχήμα 4.2.2.2 Πίνακας αποτελεσμάτων υπερτάσεων (AA, AB, AC) των μονωτήρων των τριών φάσεων σε ΓΜ 765 kV με αντίσταση γείωσης 200 Ω, με αρχικό ρεύμα 10 kA και βήμα προσομοίωσης 10 kA. Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Συζήτηση

Στο 5^ο Κεφάλαιο της Εργασίας θα γίνει ευρεία ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων των κεραυνικών πλήγμάτων στις ΓΜ. Αυτό θα πραγματοποιηθεί μέσω κυματομορφών που έχουν εξαχθεί από το λογισμικό του ATP-EMTP, με τη βοήθεια των πολλαπλών αρχείων που δημιουργήθηκαν από το λογισμικό της MATLAB (για πλήγματα στον πυλώνα ή σε αγωγό προστασίας). Με βάση τα παραπάνω αρχεία θα προκύψουν τα συμπεράσματα που αφορούν τόσο τις υπερτάσεις όσο και τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα.

5.1 Πλήγμα στον Πυλώνα ή σε Αγωγό Προστασίας

5.1.1 Υπερτάσεις από το ATP-EMTP με όλες τις Παραμέτρους Επίδρασης και όλες τις ΓΜ σε Σταθερό Κεραυνικό Ρεύμα

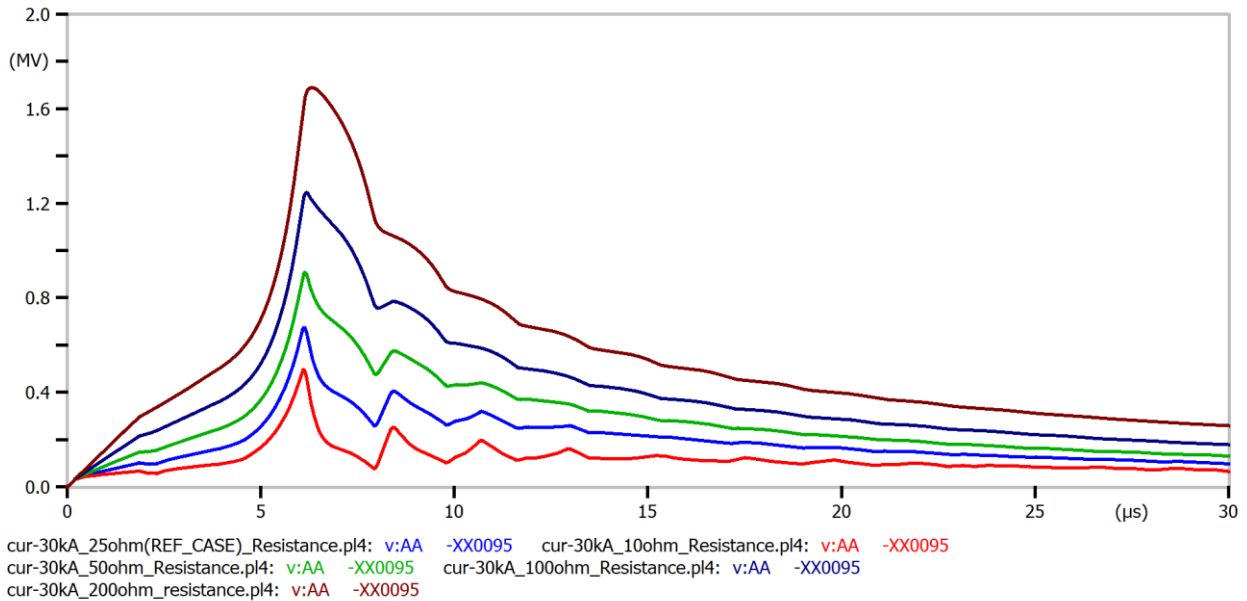
Στην υποενότητα αυτή θα γίνει η γραφική απεικόνιση των υπερτάσεων που προκαλούνται στις ΓΜ συναρτήσει των διαφόρων παραμέτρων, όπως έχει προαναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια και επηρεάζουν την συμπεριφορά των ΓΜ, πιο συγκεκριμένα οι παράμετροι που θα μελετηθούν εδώ είναι:

- Αντίσταση γείωσης
- Ύψος του πυλώνα
- Απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα
- Παράμετροι κεραυνού.

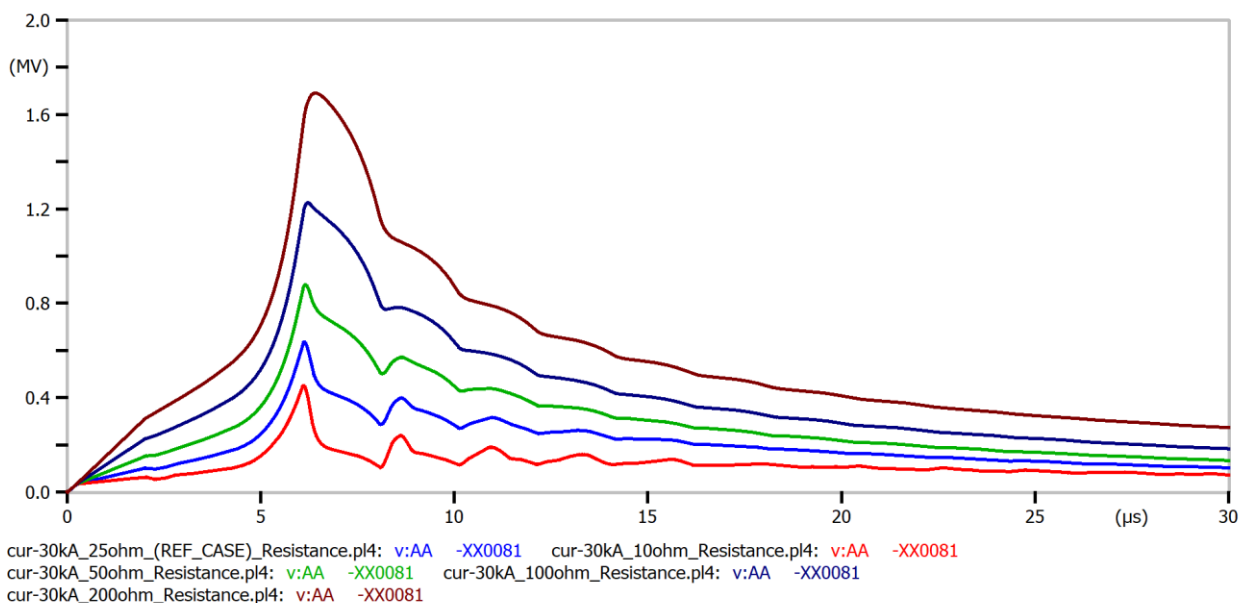
Σε όλες τις περιπτώσεις μελετήθηκαν μέσω των προσομοιώσεων τα ρεύματα από 10 kA με βήμα 10 kA μέχρι και τα 200 kA. Στην εργασία θα παρουσιαστούν στα ακόλουθα σχήματα που προέκυψαν από το ATP-EMTP μέσω των αρχείων αποτελεσμάτων r14, οι υπερτάσεις στα 30 kA με περίπτωση αναφοράς τα 25 Ω αντίστασης γείωσης, η οποία αναπαρίσταται γραφικά με μπλε χρώμα στα σχήματα των r14 αρχείων που θα απεικονιστούν. Τα 30 kA επιλέχθηκαν διότι είναι κοντά στην ενδιάμεση τιμή της κατανομής των κεραυνικών ρευμάτων [5]. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από τις υπόλοιπες τιμές ρεύματος που μελετήθηκαν.

Αντίσταση Γείωσης

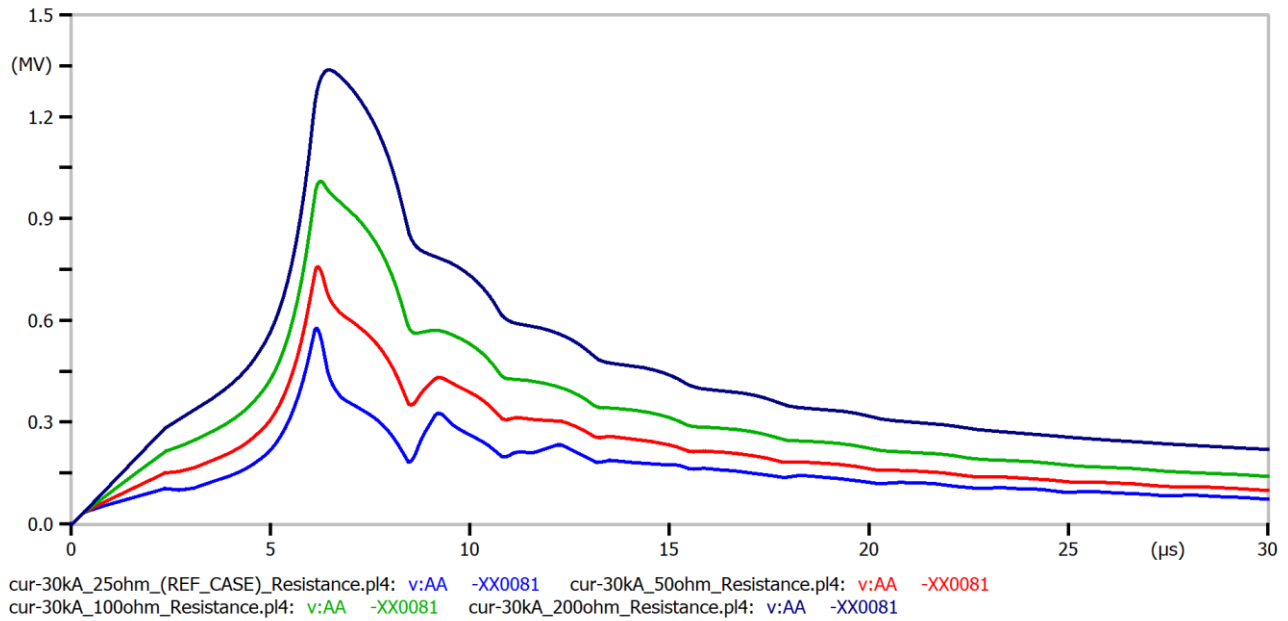
Τα Σχήματα 5.1.1 έως 5.1.4 παρουσιάζουν την επίδραση της αντίστασης γείωσης των πυλώνων στις κεραυνικές υπερτάσεις που καταπονούν τον επάνω μονωτήρα των γραμμών μεταφοράς 66 kV έως 765 kV. Είναι εμφανές ότι η αύξηση της αντίστασης γείωσης για σταθερό ρεύμα κεραυνού έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των υπερτάσεων. Επομένως αναμένεται το κρίσιμο ρεύμα να μειώνεται έντονα με την αύξηση της αντίστασης γείωσης. Επίσης, από τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι με την αύξηση της αντίστασης γείωσης η ουρά των υπερτάσεων γίνεται πιο ομαλή (λιγότερες ταλαντώσεις).



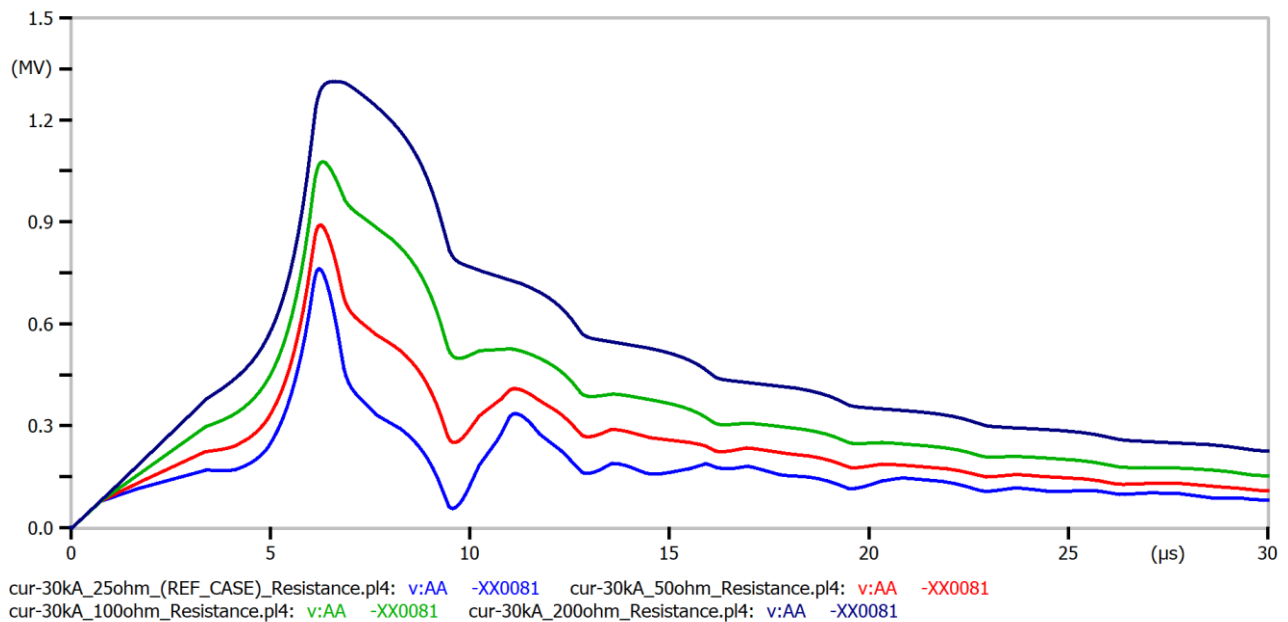
Σχήμα 5.1.1.1: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 66 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης των πυλώνων της γραμμής.



Σχήμα 5.1.1.2: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 150 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης των πυλώνων της γραμμής.



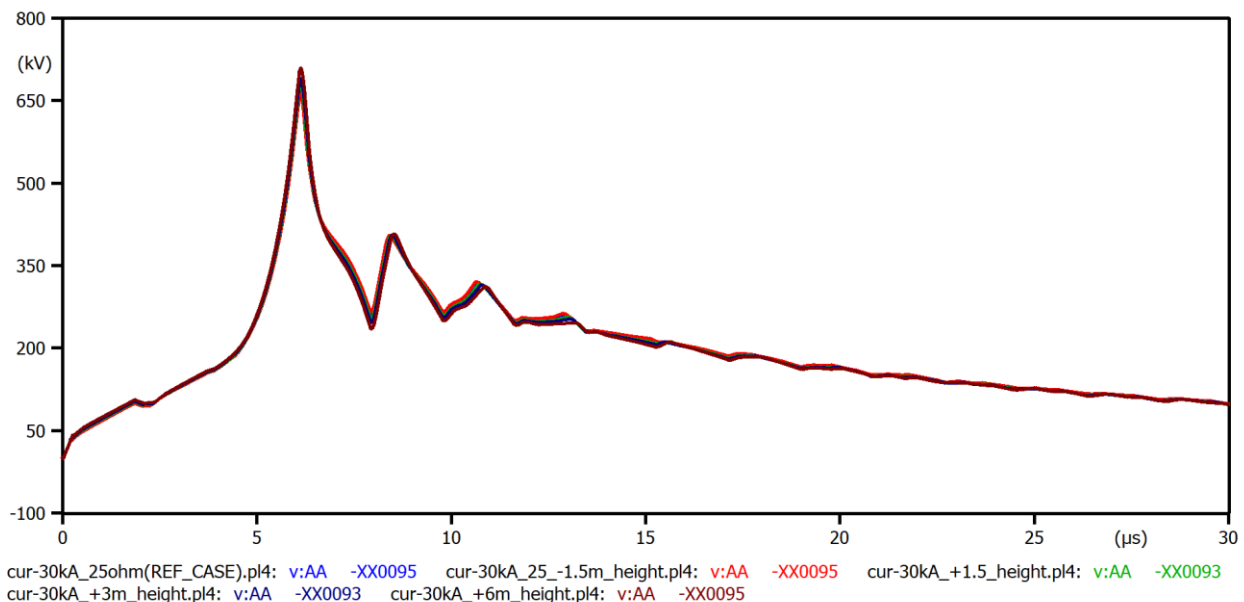
Σχήμα 5.1.3: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 400 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης των πυλώνων της γραμμής.



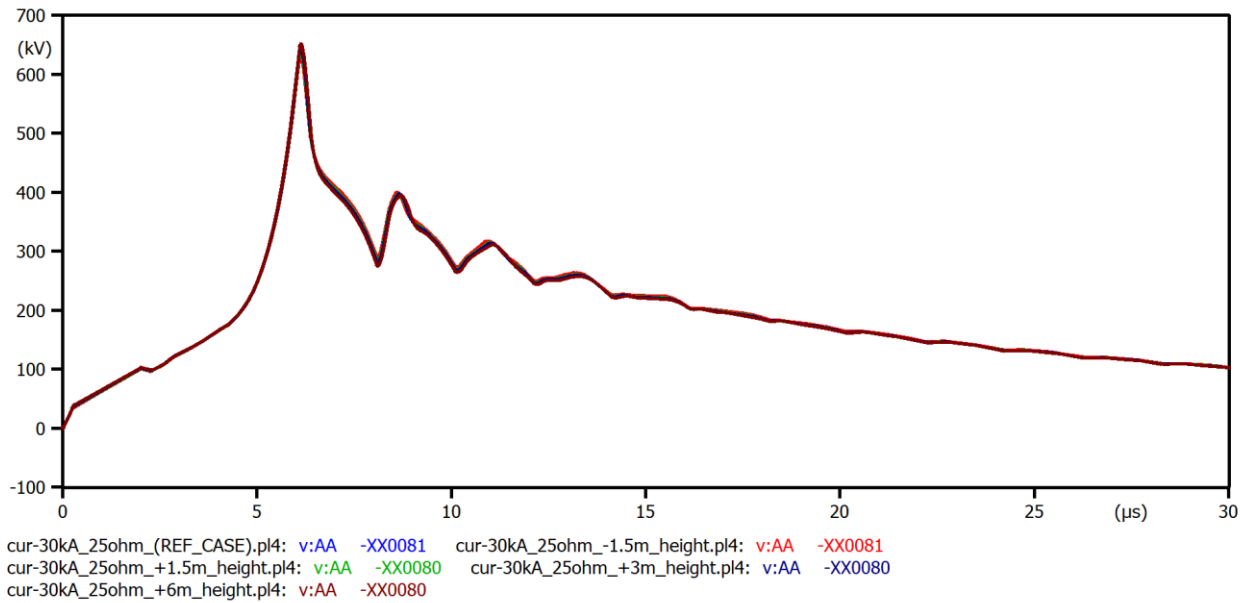
Σχήμα 5.1.1.4: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 765 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης των πυλώνων της γραμμής.

Ύψος Πυλώνα ΓΜ

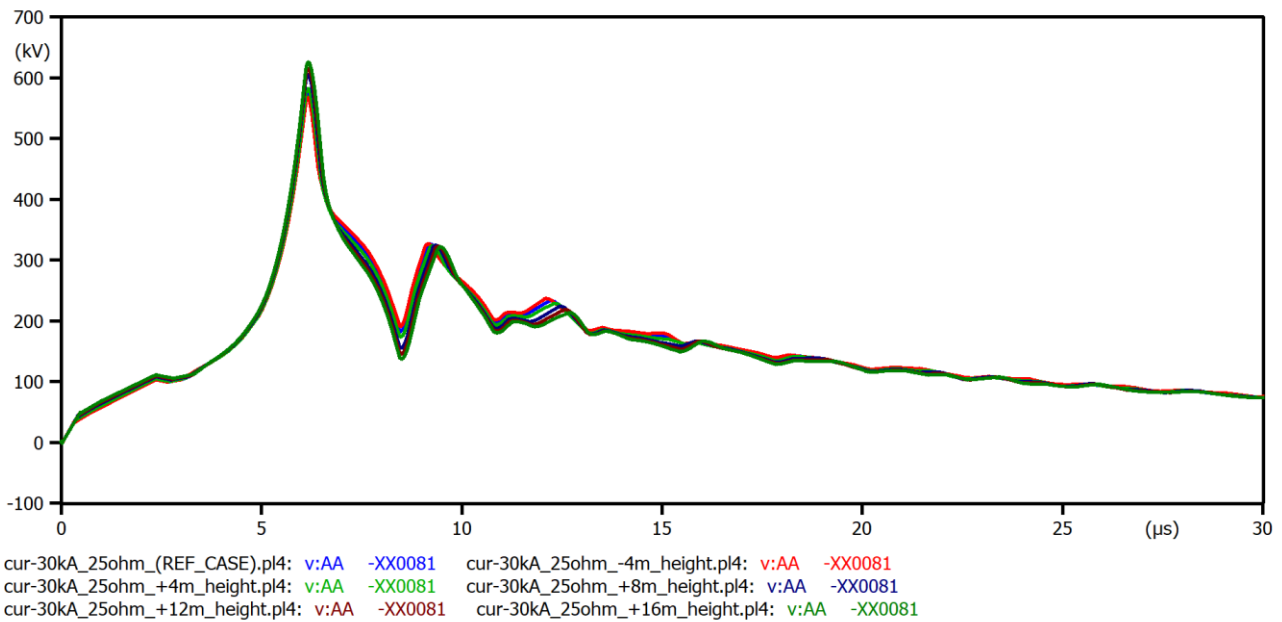
Στα Σχήματα 5.1.5 έως 5.1.8 γίνεται αναπαράσταση των υπερτάσεων που δημιουργούνται στις ΓΜ συναρτήσει του ύψους του κάθε πυλώνα της ΓΜ για αντίσταση γείωσης 25 Ω και κεραυνικό ρεύμα 30 kA. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ύψος του πυλώνα ενώ διατηρείται σταθερό το κεραυνικό ρεύμα και η αντίσταση γείωσης οι υπερτάσεις που καταπονούν τον επάνω μονωτήρα γίνονται ελαφρώς μεγαλύτερες κατά μέγιστη τιμή. Στην ουρά τους ωστόσο ισχύει το αντίστροφο. Ειδικότερα η μεγαλύτερη επίδραση παρουσιάζεται στις ΓΜ των 400 kV και των 765 kV (Σχήματα 5.1.7 και 5.1.8), ενώ ταυτόχρονα ουρά των υπερτάσεων αυτών παρουσιάζει τις περισσότερες ταλαντώσεις μέχρι να σταθεροποιηθεί. Σημειώνεται ότι λόγω των σχετικά μικρών διαφορών που παρατηρούνται στις υπερτάσεις δεν αναμένεται να υπάρχει ιδιαίτερη επίδραση στα κρίσιμα ρεύματα που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης.



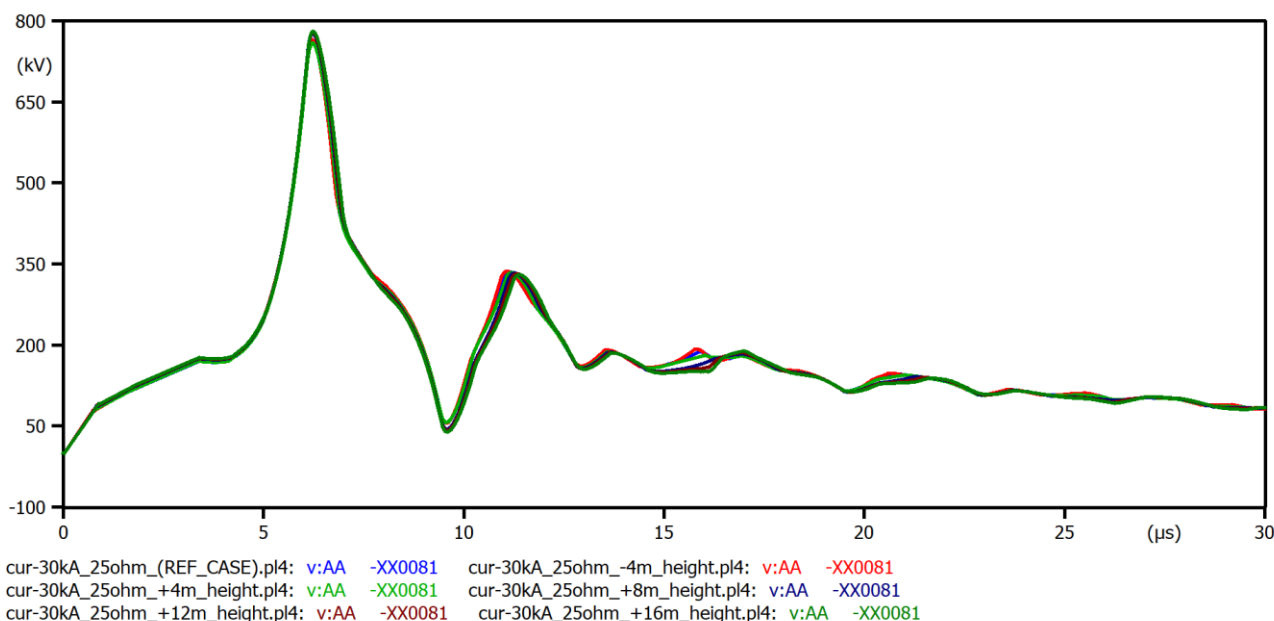
Σχήμα 5.1.1.5: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 66 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.



Σχήμα 5.1.1.6: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 150 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.



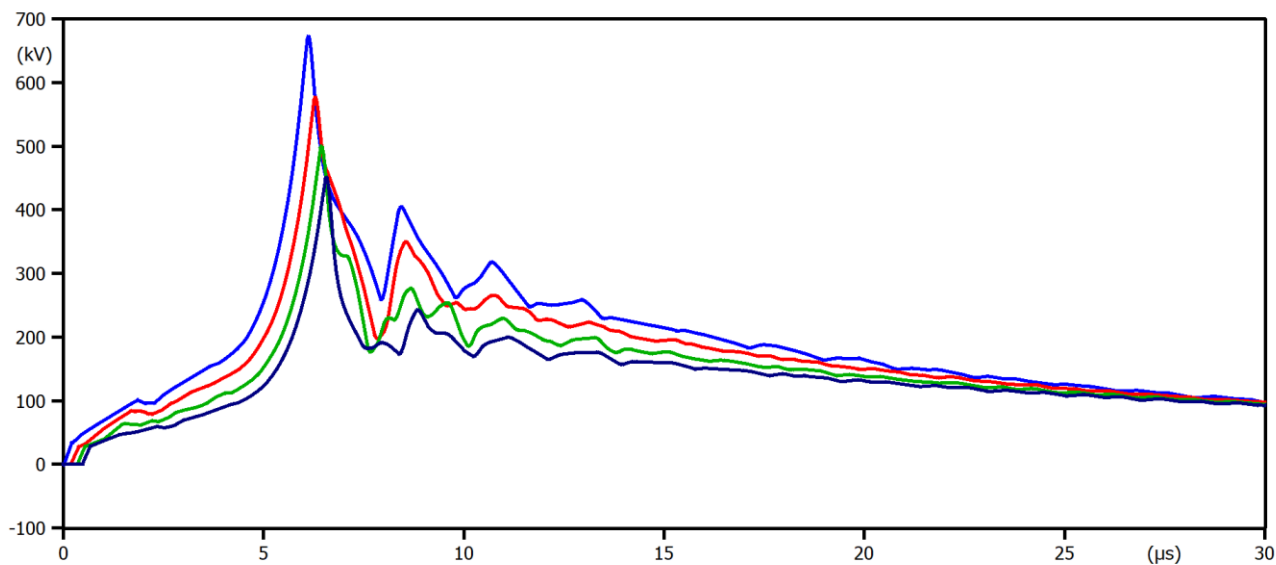
Σχήμα 5.1.1.7: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 400 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.



Σχήμα 5.1.1.8: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 765 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.

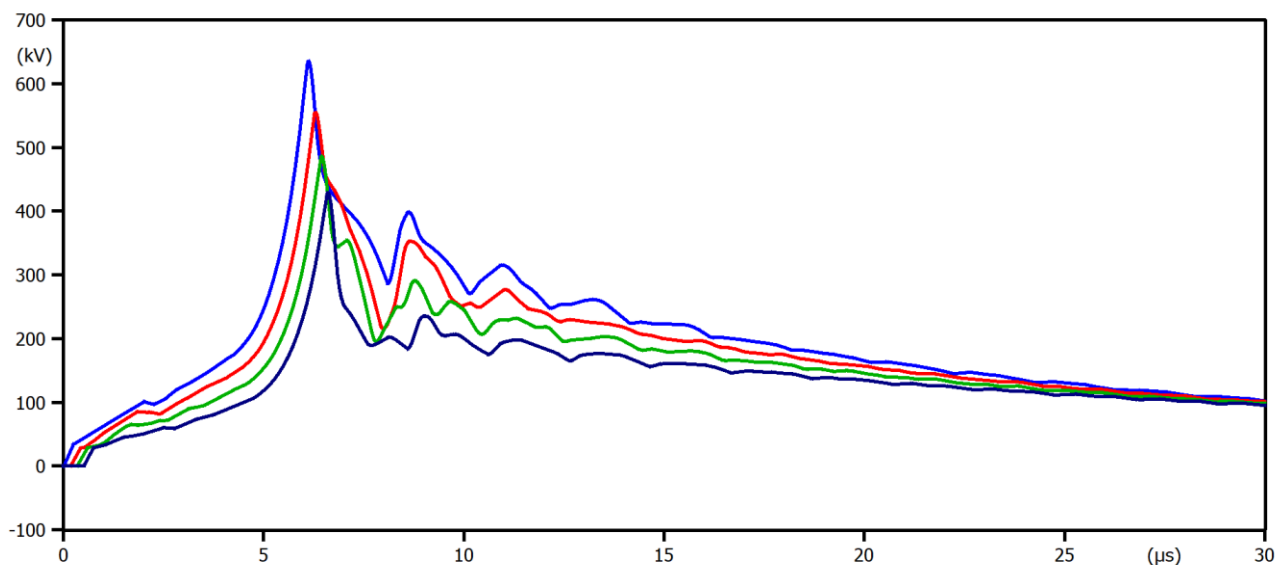
Σημείο πλήγματος

Στα παρακάτω σχήματα (5.1.9 έως 5.1.12) απεικονίζονται οι υπερτάσεις που προκύπτουν μεταβάλλοντας το σημείο του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο διαδοχικών πυλώνων των ΓΜ. Είναι αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από τον πυλώνα προς το μέσο του ανοίγματος της εκάστοτε ΓΜ με σταθερή τόσο την αντίσταση γείωσης όσο και το κεραυνικό ρεύμα οι υπερτάσεις που καταπονούν τον επάνω μονωτήρα είναι μικρότερες. Αυτό οφείλεται στον διαχωρισμό του κεραυνικού ρεύματος στις διαθέσιμες διαδρομές. Επίσης η ουρά των υπερτάσεων σε όλες τις περιπτώσεις πλην των 765 kV αποσβένει ομαλότερα και σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Η περίπτωση αναφοράς αντιστοιχεί σε κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα.



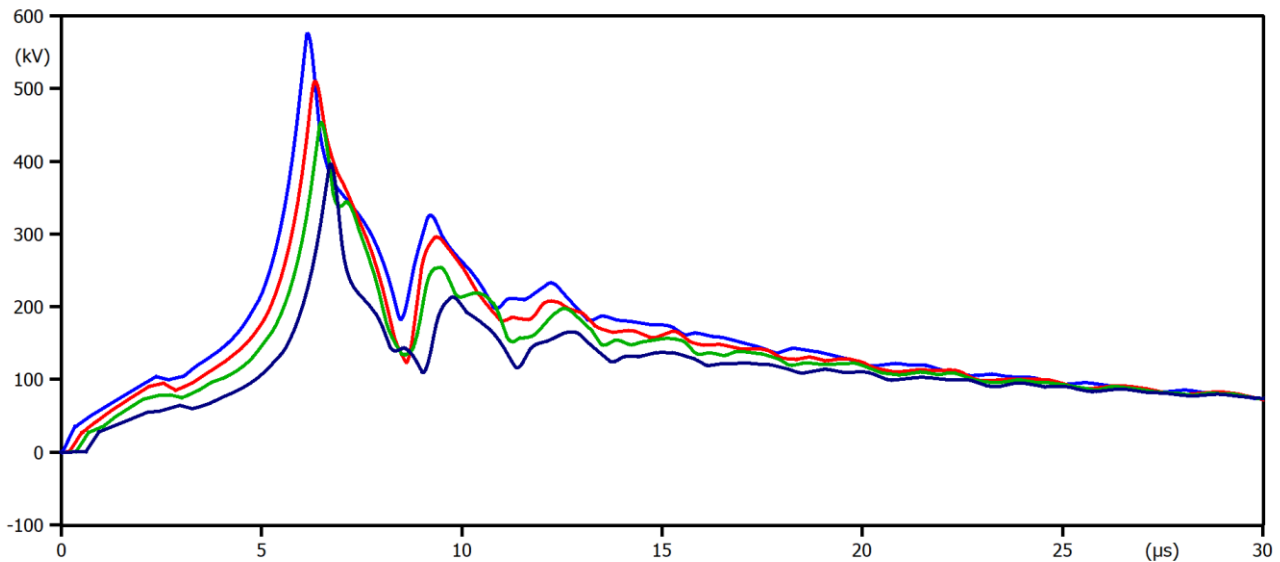
cur-30kA_25ohm(REF_CASE).pl4: v:AA -XX0095 cur-30kA_25ohm_50m_distance.pl4: v:AA -XX0089
 cur-30kA_25ohm_100m_distance.pl4: v:AA -XX0089 cur-30kA_25ohm_137.5m_distance.pl4: v:AA -XX0089

Σχήμα 5.1.1.9: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 66 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.



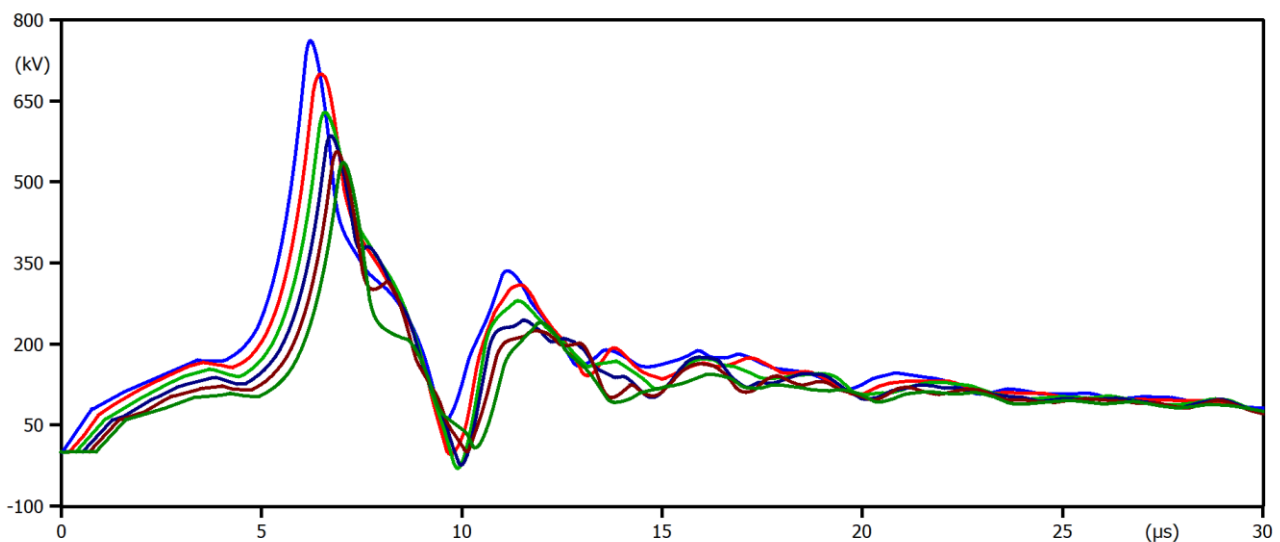
cur-30kA_25ohm(REF_CASE).pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_50m_distance.pl4: v:AA -XX0074
 cur-30kA_25ohm_100m_distance.pl4: v:AA -XX0074 cur-30kA_25ohm_150m_distance.pl4: v:AA -XX0074

Σχήμα 5.1.1.10: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 150 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.



cur-30kA_25ohm_(REF_CASE).pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_50m_distance.pl4: v:AA -XX0078
 cur-30kA_25ohm_100m_distance.pl4: v:AA -XX0078 cur-30kA_25ohm_175m_distance.pl4: v:AA -XX0078

Σχήμα 5.1.1.11 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 400 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.



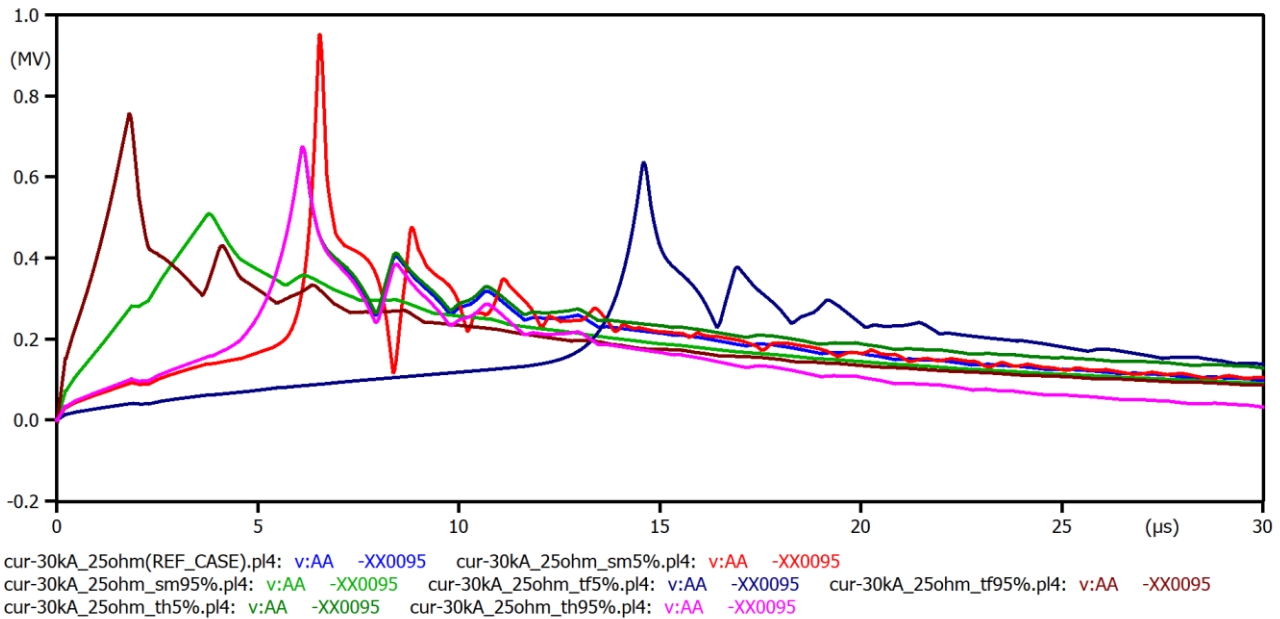
cur-30kA_25ohm_(REF_CASE).pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_50m_distance.pl4: v:AA -XX0074
 cur-30kA_25ohm_100m_distance.pl4: v:AA -XX0074 cur-30kA_25ohm_150m_distance.pl4: v:AA -XX0074
 cur-30kA_25ohm_200m_distance.pl4: v:AA -XX0074 cur-30kA_25ohm_250m_distance.pl4: v:AA -XX0074

Σχήμα 5.1.1.12: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 765 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.

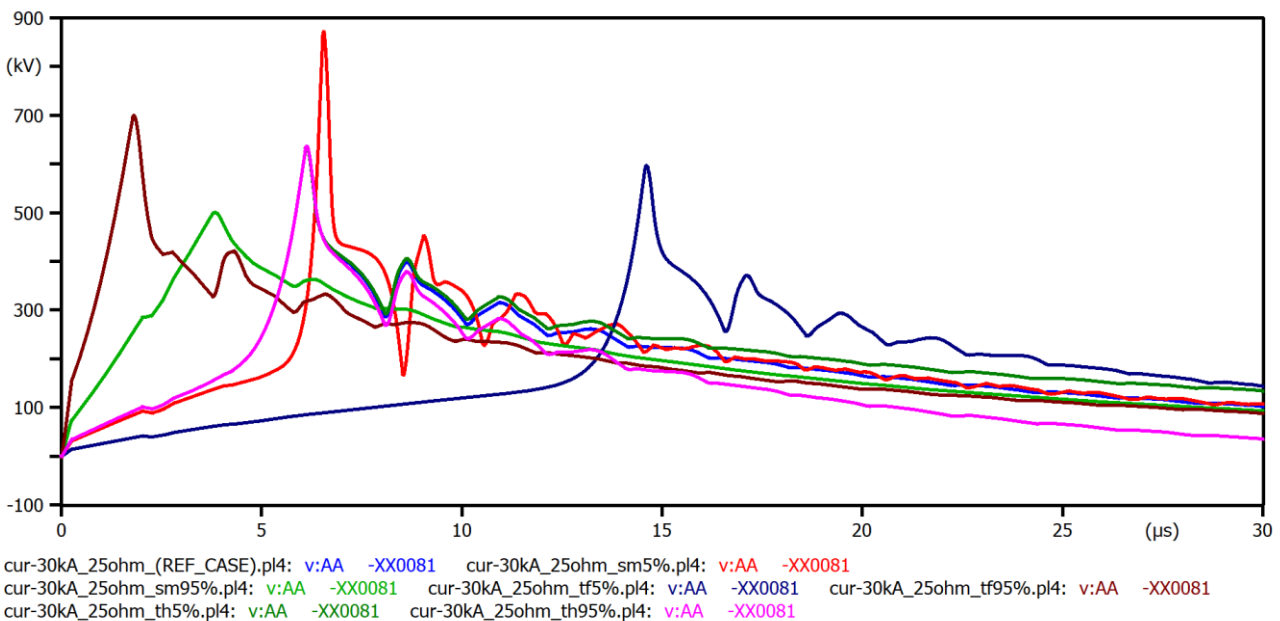
Παράμετροι κεραυνού

Στα Σχήματα 5.1.13 έως 5.1.16 γίνεται γραφική αναπαράσταση των κυματομορφών των υπερτάσεων που προκαλούν τα κεραυνικά πλήγματα στον επάνω μονωτήρα της εκάστοτε ΓΜ συναρτήσει των παραμέτρων της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος με σταθερό μέγιστο ρεύμα (30 kA) και αντίσταση γείωσης (25 Ω). Από τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι η διάρκεια της ουράς επηρεάζει ελάχιστα τις κυματομορφές με την επίδραση να περιορίζεται στην ουρά. Αντίθετα η μέγιστη κλίση S_m και η διάρκεια μετώπου παίζουν σημαντικό ρόλο.

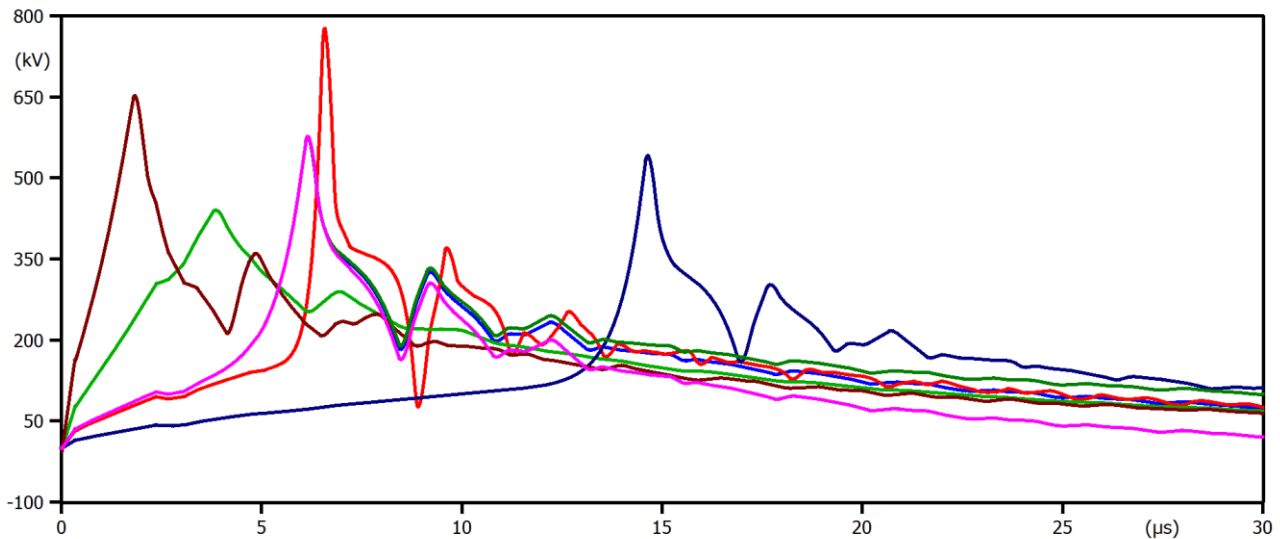
Γενικά, μικρότερες τιμές μετώπου και μεγαλύτερες κλίσεις οδηγούν σε μεγαλύτερες υπερτάσεις και αναμένεται να οδηγήσουν επίσης σε μικρότερα κρίσιμα ρεύματα. Η μεταβολή των παραμέτρων γίνεται με βάση τις στατιστικές κατανομές που καταγράφηκαν σε πύργους με κατάλληλα όργανα. Η περίπτωση αναφοράς αντιστοιχεί στις ενδιάμεσες τιμές (50%).



Σχήμα 5.1.1.13: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 66 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.

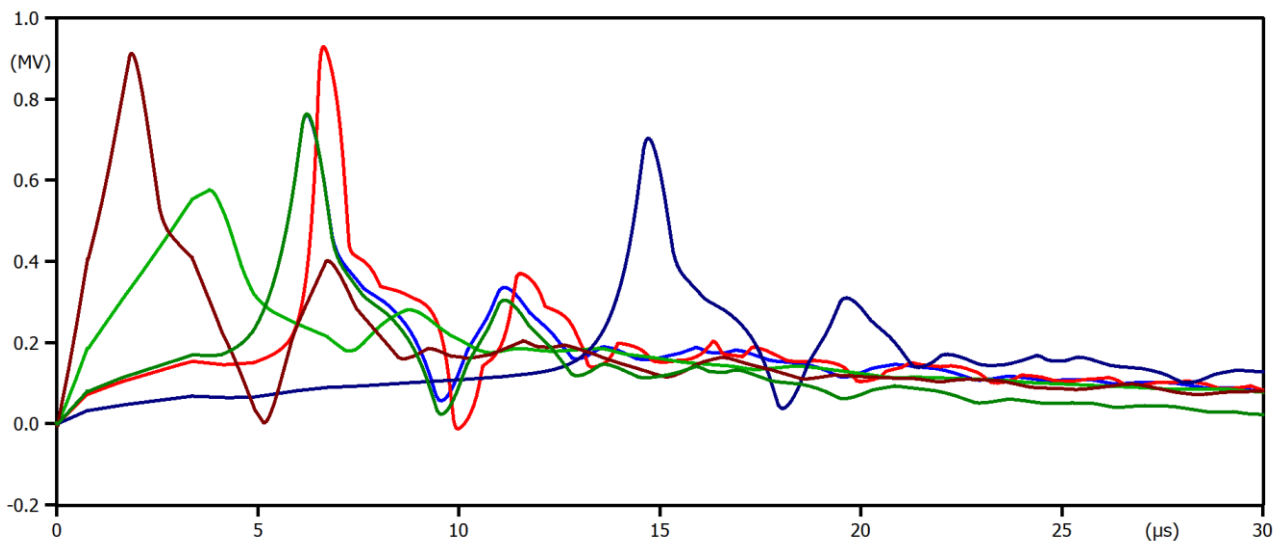


Σχήμα 5.1.1.14: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 150 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.



cur-30kA_25ohm_(REF_CASE).pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_sm5%.pl4: v:AA -XX0081
 cur-30kA_25ohm_sm95%.pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_tf5%.pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_tf95%.pl4: v:AA -XX0081
 cur-30kA_25ohm_th5%.pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_th95%.pl4: v:AA -XX0081

Σχήμα 5.1.1.15: Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων της ΓΜ 400 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.



cur-30kA_25ohm_(REF_CASE)_Resistance.pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_sm5%.pl4: v:AA -XX0081
 cur-30kA_25ohm_sm95%.pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_tf5%.pl4: v:AA -XX0081 cur-30kA_25ohm_tf95%.pl4: v:AA -XX0081
 cur-30kA_25ohm_th95%.pl4: v:AA -XX0081

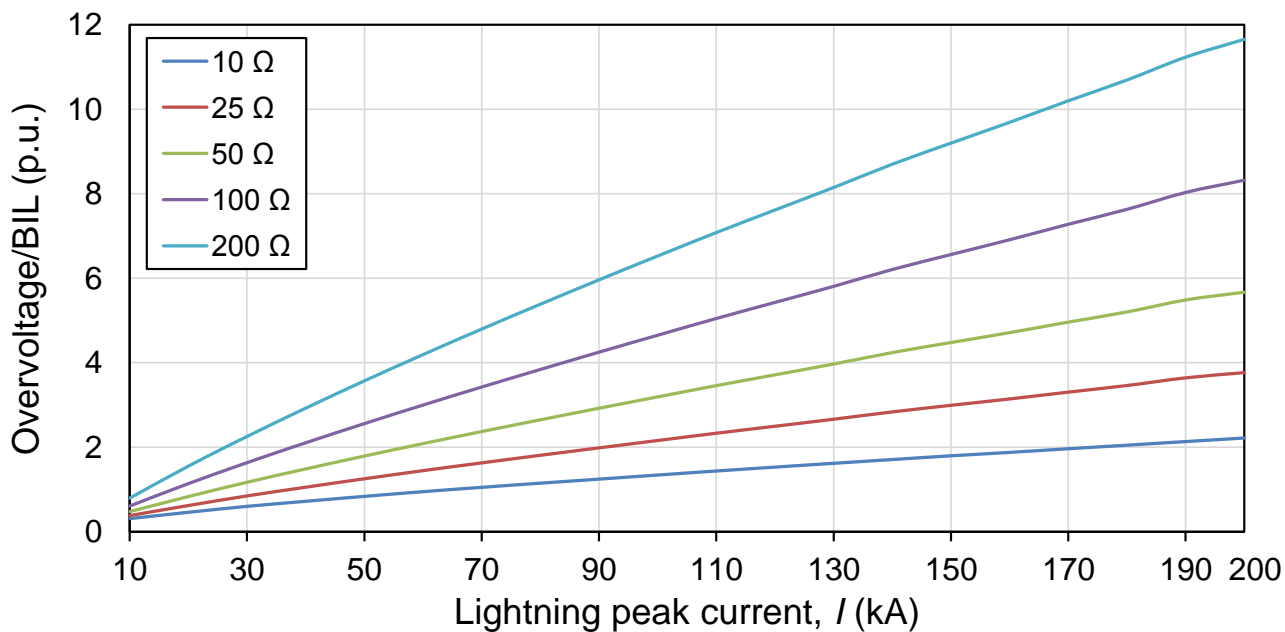
Σχήμα 5.1.1.16 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων ΓΜ 765 kV (επάνω μονωτήρας) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.

5.1.2 Γραφήματα Υπέρτασης συναρτήσεσι του Ρεύματος για τη ΓΜ των 150 kV για κάθε Παράμετρο Επίδρασης

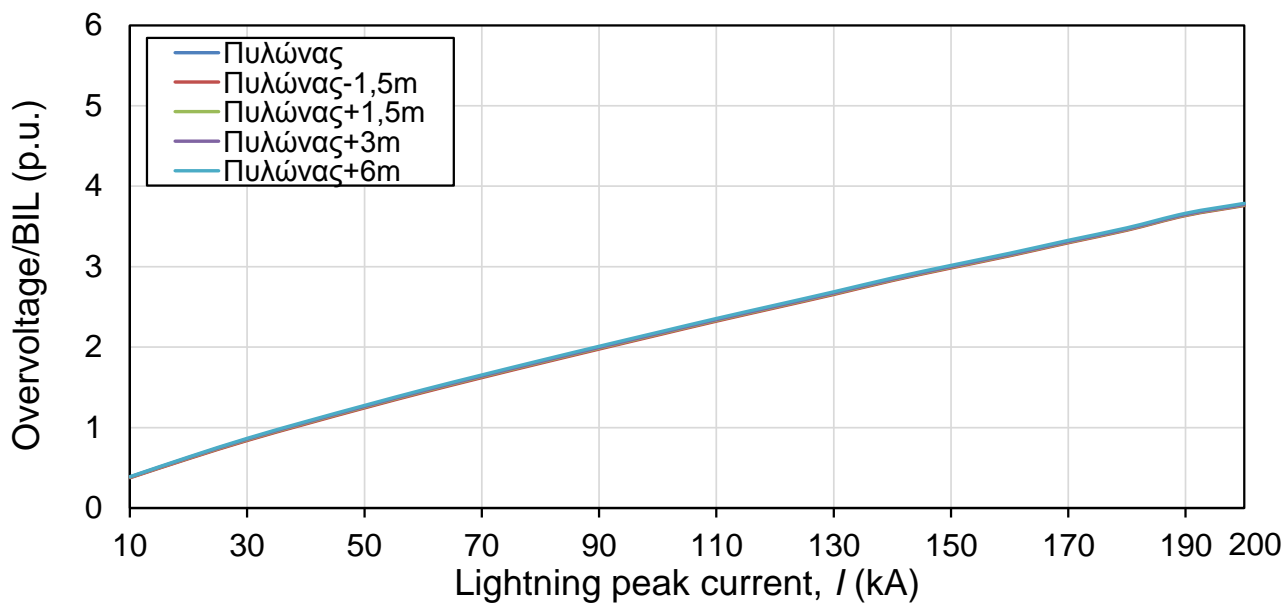
Στην υποενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η μεταβολή των κεραυνικών υπερτάσεων συναρτήσει του κεραυνικού ρεύματος για κάθε παράμετρο επίδρασης. Για την αποφυγή επαναλαμβανόμενων αποτελεσμάτων επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για την τυπική ΓΜ των 150 kV. Σημειώνεται ότι οι υπερτάσεις στα παρακάτω γραφήματα είναι κανονικοποιημένες με το βασικό επίπεδο μόνωσης (*BIL*, για τα 150 kV το *BIL* είναι 750 kV). Επίσης, τα παρακάτω γραφήματα αφορούν την επάνω φάση (φάση A) και δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του Excel με τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τα τρεξίματα του κώδικα στην MATLAB. Για κάθε μία από τις κάτωθι περιπτώσεις γίνεται αναπαράσταση αποτελεσμάτων για την αντίσταση γείωσης μόνο των 25 Ω (για λόγους συντομίας και επανάληψης αποτελεσμάτων), για όλες τις παραμέτρους που μελετήθηκαν.

Στα σχήματα 5.1.2.1 έως 5.1.2.6 απεικονίζονται οι υπερτάσεις που καταπονούν την επάνω φάση A της ΓΜ. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, μεγαλύτερο ρόλο στις υπερτάσεις παίζει η παράμετρος της αντίστασης γείωσης, όπως αναμενόταν και από τις κυματομορφές της προηγούμενης ενότητας, αφού είναι περίπου ανάλογη της τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την ΓΜ, δηλαδή όσο περισσότερο αυξάνεται η αντίσταση γείωσης, τόσο περισσότερο αυξάνεται η υπέρταση, όπως αποτυπώνεται και στο πρώτο σχήμα (5.1.2.1) με τη μέγιστη τιμή στα 200 Ω.

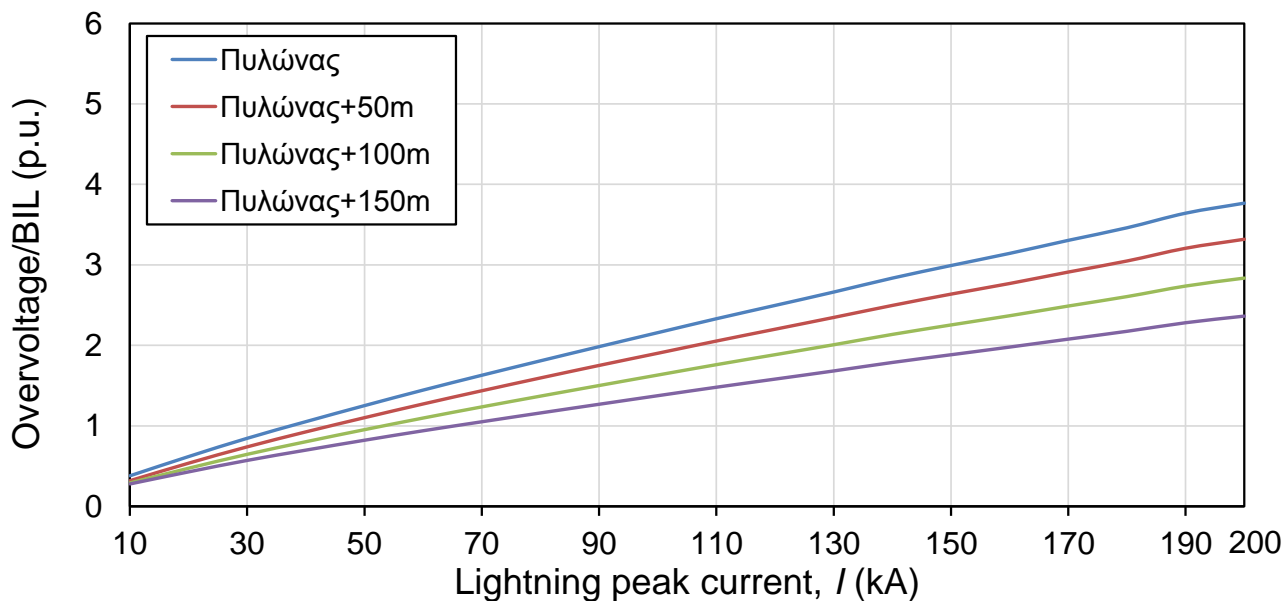
Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, όπου υπάρχει σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης στα 25 Ω, στην περίπτωση του ύψους πυλώνα παρατηρείται μηδαμινή διαφορά στις υπερτάσεις που δημιουργούνται με τη μεγαλύτερη εξ αυτών να είναι στην περίπτωση του μεγίστου δυνατού ύψους του πυλώνα (Σχήμα 5.1.2.2, Πυλώνας+6m). Στην περίπτωση της παραμέτρου της απόστασης του σημείου πλήγματος από τον πυλώνα βάσει του γραφήματος προκύπτει το συμπέρασμα, ότι με την αύξηση της απόστασης η υπέρταση γίνεται μικρότερη με ελάχιστη τιμή να έχει ληφθεί στη μέγιστη δυνατή απόσταση, δηλαδή στο μέσο του ανοίγματος μεταξύ των πυλώνων (Σχήμα 5.1.2.3 Πυλώνας+150m). Τέλος όσον αφορά τις παραμέτρους του κεραυνού παρατηρείται ότι για τη διάρκεια μετώπου (t_f), όσο μικρότερη είναι τόσο μεγαλύτερες είναι επιμέρους υπερτάσεις που δημιουργούνται (Σχήμα 5.1.2.4), ενώ το ανάποδο συμβαίνει στην περίπτωση της μέγιστης κλίσης (S_m), όπου όσο μικρότερη γίνεται τόσο μικραίνουν οι αντίστοιχες υπερτάσεις (Σχήμα 5.1.2.5), ενώ τελείως διαφορετική είναι η περίπτωση της διάρκειας ημίσεος εύρος (t_f), όπου και στις τρεις περιπτώσεις που απεικονίζονται οι καμπύλες συμπίπτουν μεταξύ τους με ελάχιστη διαφορά να διακρίνεται, όταν η t_f γίνεται 5%, δηλαδή με την ελάττωση της τιμής της διάρκειας ημίσεος εύρους παρατηρείται μια ελάχιστη μείωση των υπερτάσεων (Σχήμα 5.1.2.6).



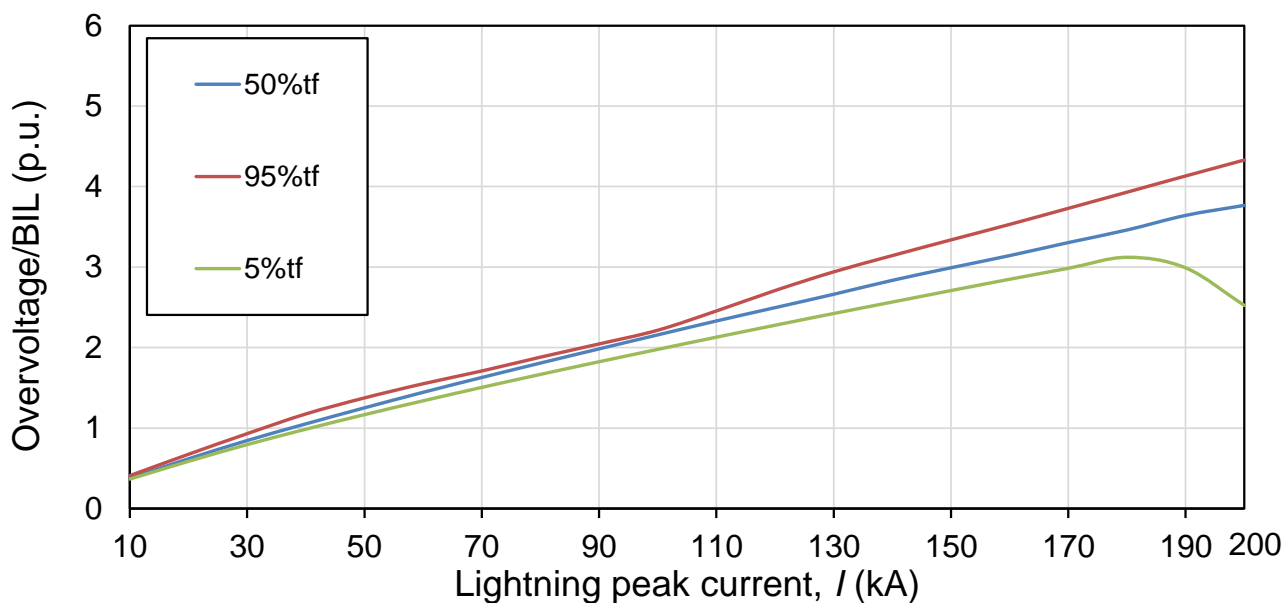
Σχήμα 5.1.2.1: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: η αντίσταση γείωσης.



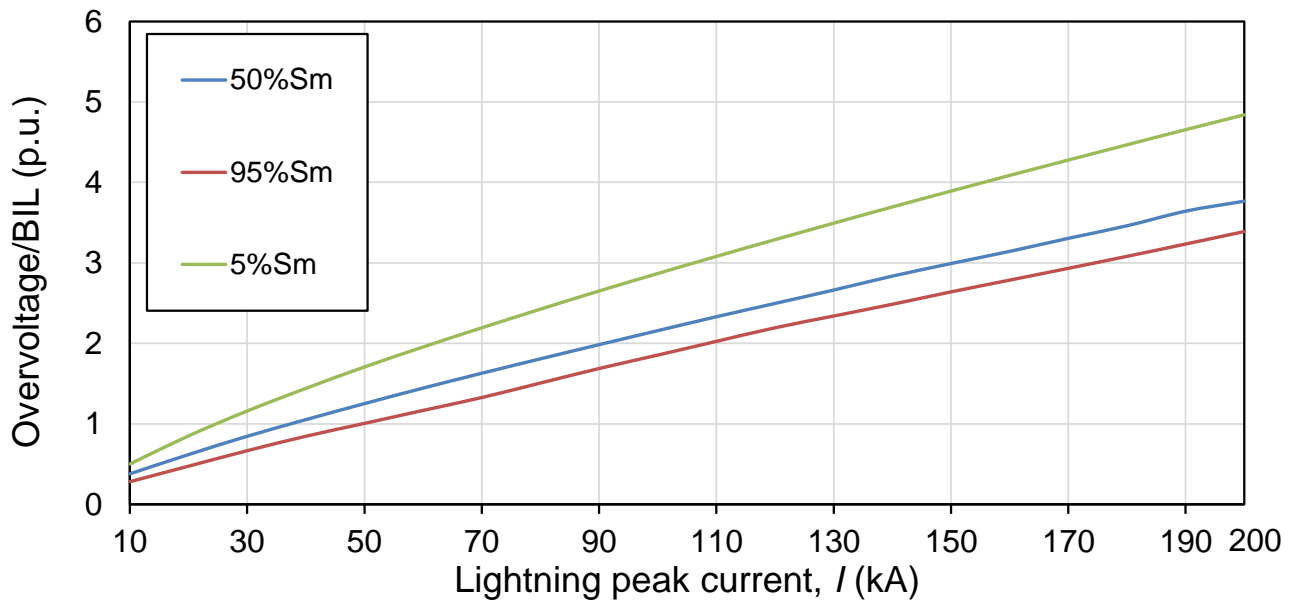
Σχήμα 5.1.2.2: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος επίδρασης: το ύψος του πυλώνα.



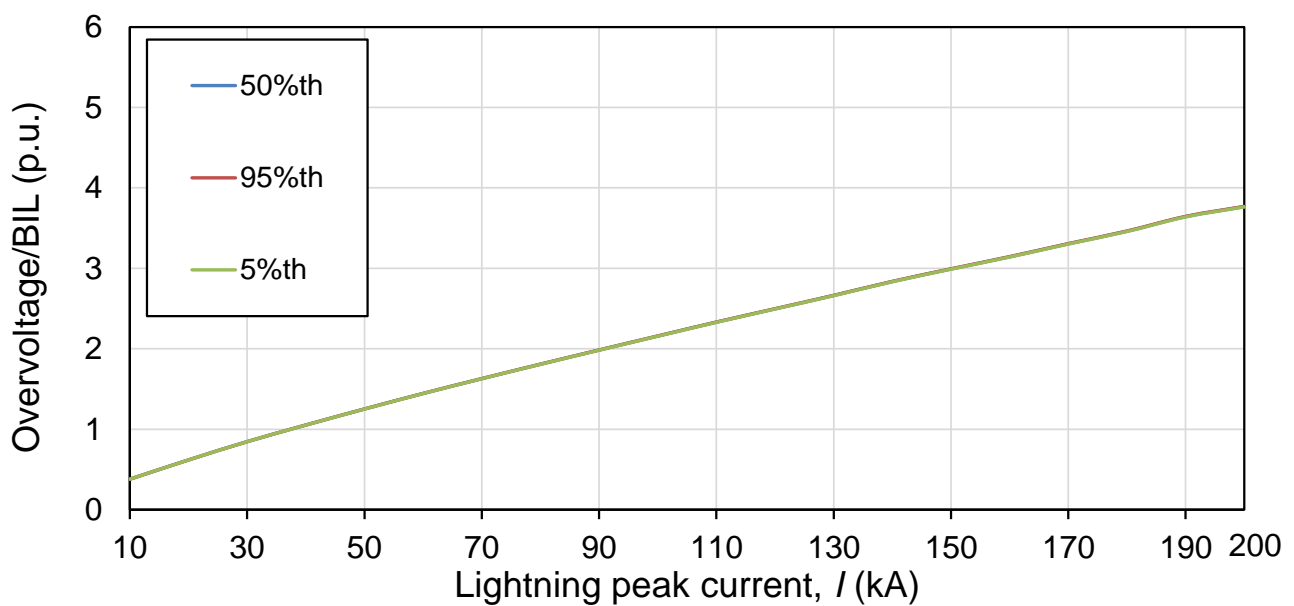
Σχήμα 5.1.2.3: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος: το σημείο πλήγματος.



Σχήμα 5.1.2.4: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος επίδρασης: διάρκεια μετώπου του κεραυνικού ρεύματος.



Σχήμα 5.1.2.5.: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος επίδρασης: η μέγιστη κλίση (S_m) του κεραυνικού ρεύματος.



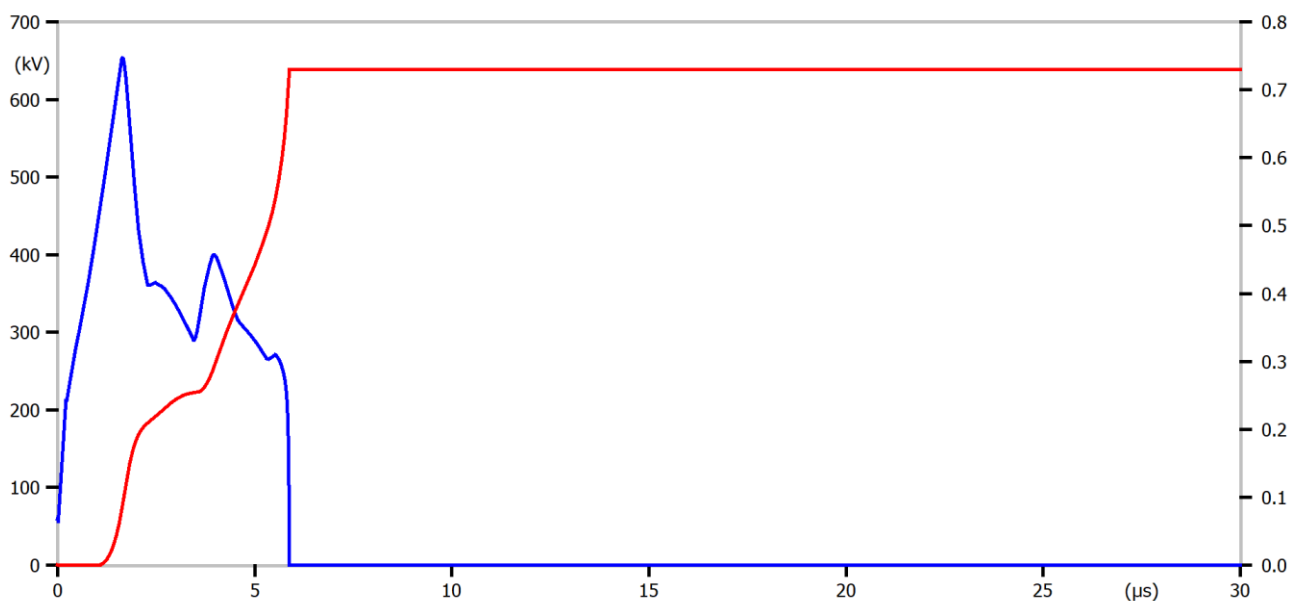
Σχήμα 5.1.2.6.: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί των επάνω μονωτήρα της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω. Παράμετρος επίδρασης: η διάρκεια ημίσειος εύρους (t_h) κεραυνικού πλήγματος.

5.1.3 Κρίσιμο Κεραυνικό Ρεύμα που προκαλεί Διάσπαση της Μόνωσης Εναέριων ΓΜ λόγω Ανάστροφης Διάσπασης

5.1.3.1 Κυματομορφές Υπερτάσεων Κρίσιμης Ανάστροφης Διάσπασης

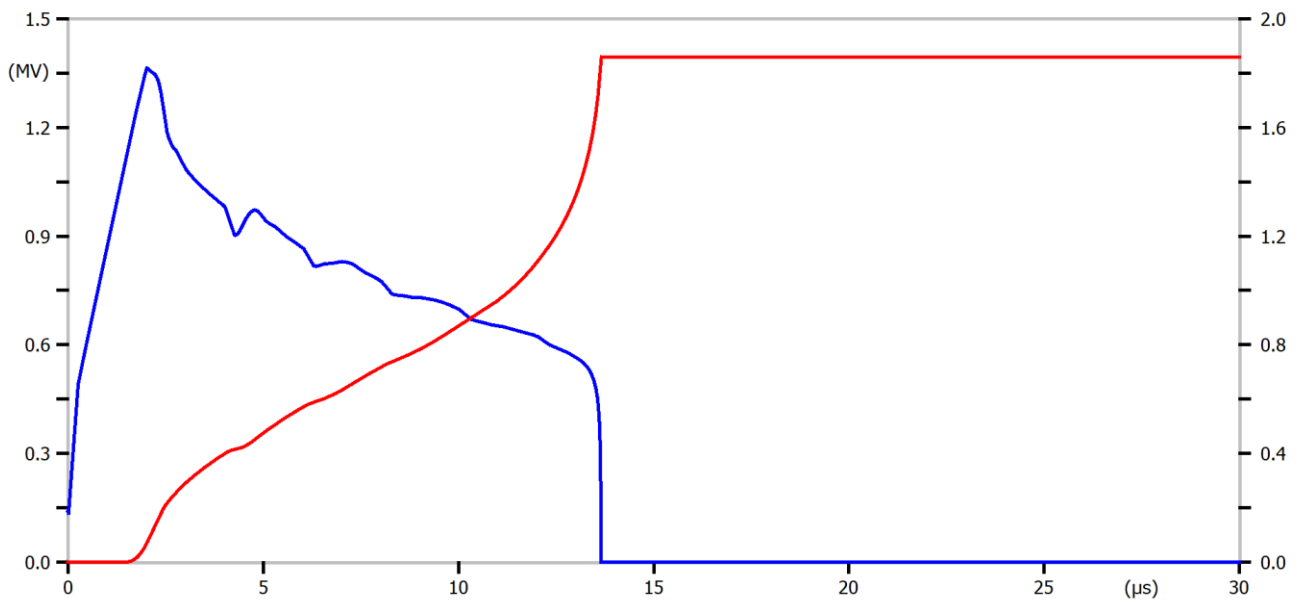
Στην υποενότητα αυτή θα γίνει γραφική απεικόνιση κάποιων τυπικών κυματομορφών υπερτάσεων που αντιστοιχούν σε κρίσιμα ρεύματα ανάστροφης διάσπασης, δηλαδή στην ελάχιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος που προκαλεί διάσπαση της μόνωσης της γραμμής. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι υπερτάσεις που αφορούν την αντίσταση γείωσης στην τιμή των 25 Ω για τη διάρκεια μετώπου (t_f) του κεραυνικού ρεύματος που αντιστοιχεί στο 95%, δηλαδή 95% των κεραυνικών ρευμάτων έχουν μεγαλύτερη διάρκεια μετώπου. Επιλέχθηκε, επίσης, να αναπαρασταθεί η υπέρταση στην επάνω φάση Α της κάθε γραμμής όταν η εναλλασσόμενη τάση λειτουργίας βρίσκεται στις 0° που αντιστοιχεί στη στιγμή της μέγιστης θετικής εναλλασσόμενης τάση λειτουργίας της γραμμής. Στα Σχήματα 5.1.3.1 έως 5.1.3.4 εμπεριέχεται επιπλέον η μεταβολή του μήκους του λήντερ με τον χρόνο παράλληλα στον μονωτήρα της ΓΜ, όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό ATP-EMTP. Όταν ο λήντερ γίνει ίσος με το μήκος της μόνωσης τότε προκαλείται διάσπαση της μόνωσης της ΓΜ (επιφανειακή διάσπαση του μονωτήρα) και η τάση καταρρέει στο μηδέν. Αυτό αντιστοιχεί σε σφάλμα φάσης-γης για τη ΓΜ.

Τα σχήματα 5.1.3.1 έως 5.1.3.4 είναι τυπικά και αντίστοιχα σχήματα προκύπτουν για όλες τις περιπτώσεις. Είναι σημαντικό ότι αν αυξηθεί το ρεύμα του κεραυνού πάνω από το κρίσιμο τότε η διάσπαση συμβαίνει νωρίτερα χρονικά και με μεγάλη αύξηση του ρεύματος μπορεί να συμβεί στο μέτωπο της κυματομορφής.



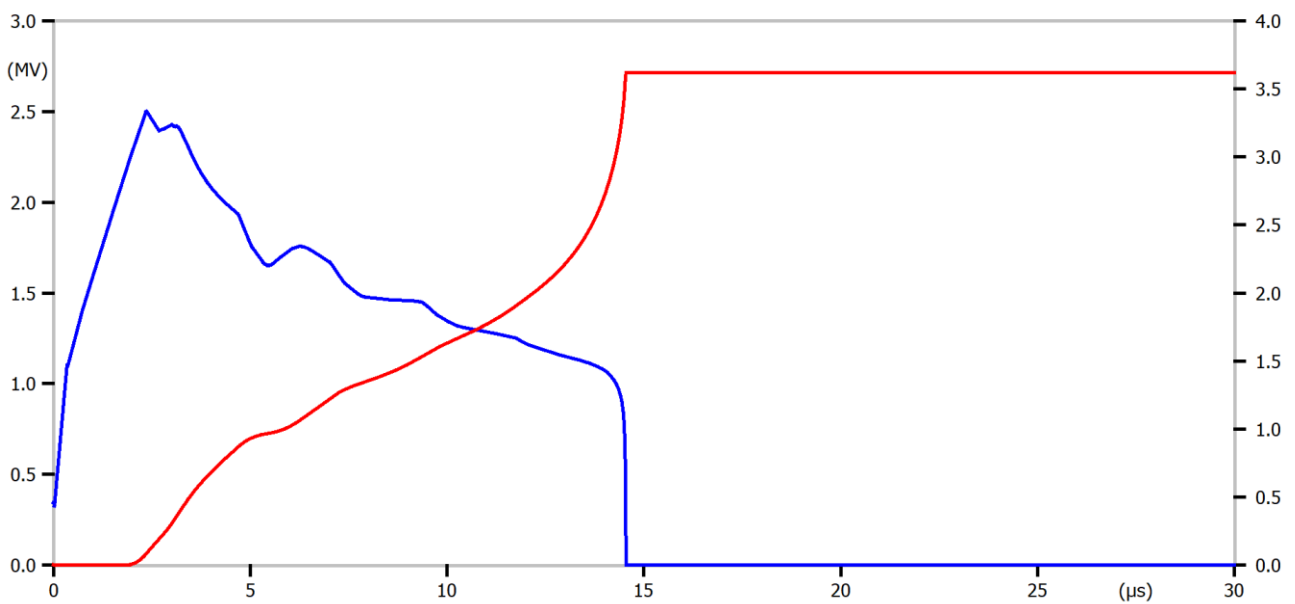
(file phase0cur-25400.pl4; x-var t) v:PHA -XX0104 m:LA

Σχήμα 5.1.3.1.1: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 66 kV (επάνω φάσης Α για τις γωνία φάσης 0°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -25,4 kA.



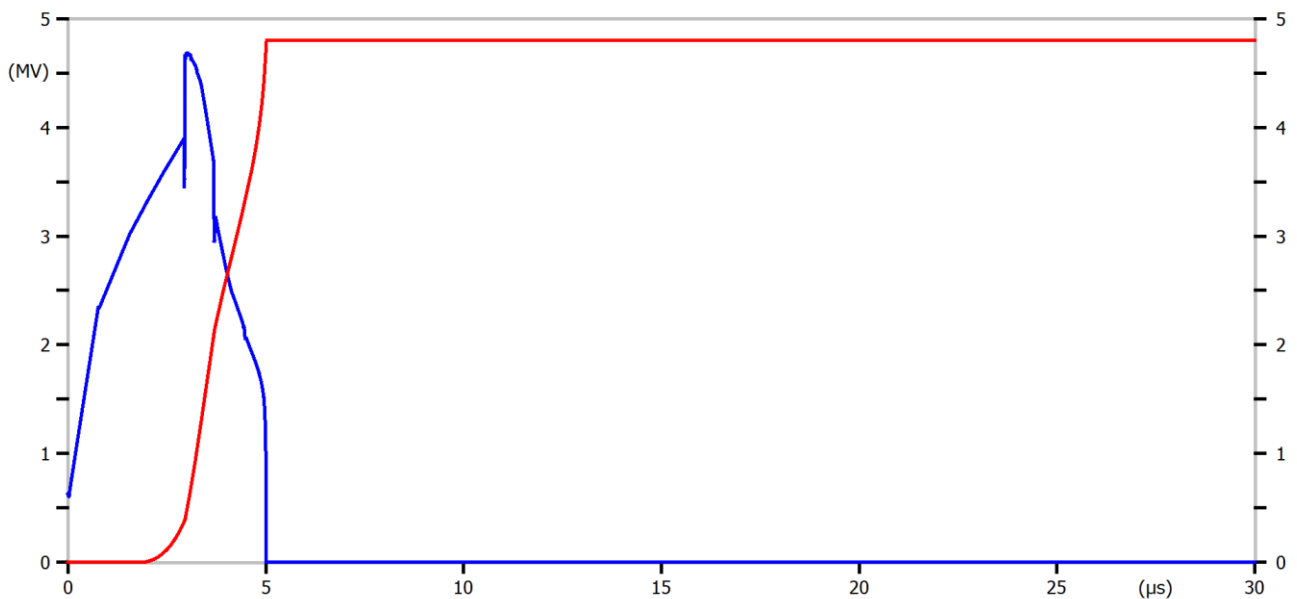
(file phase0cur-71100.pl4; x-var t) v:PHA -XX0089 m:LA

Σχήμα 5.1.3.1.2: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 150 kV (επάνω φάσης A για τις γωνία φάσης 0°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -71,1 kA.



(file phase0cur-163000.pl4; x-var t) v:PHA -XX0090 m:LA

Σχήμα 5.1.3.1.3: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 400 kV (επάνω φάσης A για τις γωνία φάσης 0°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -173 kA.



(file phase0cur-161200.pl4; x-var t) v:PHA -XX0004 m:LA

Σχήμα 5.1.3.1.4: Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 765 kV (επάνω φάσης Α για τις γωνία φάσης 0°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -161,2 kA.

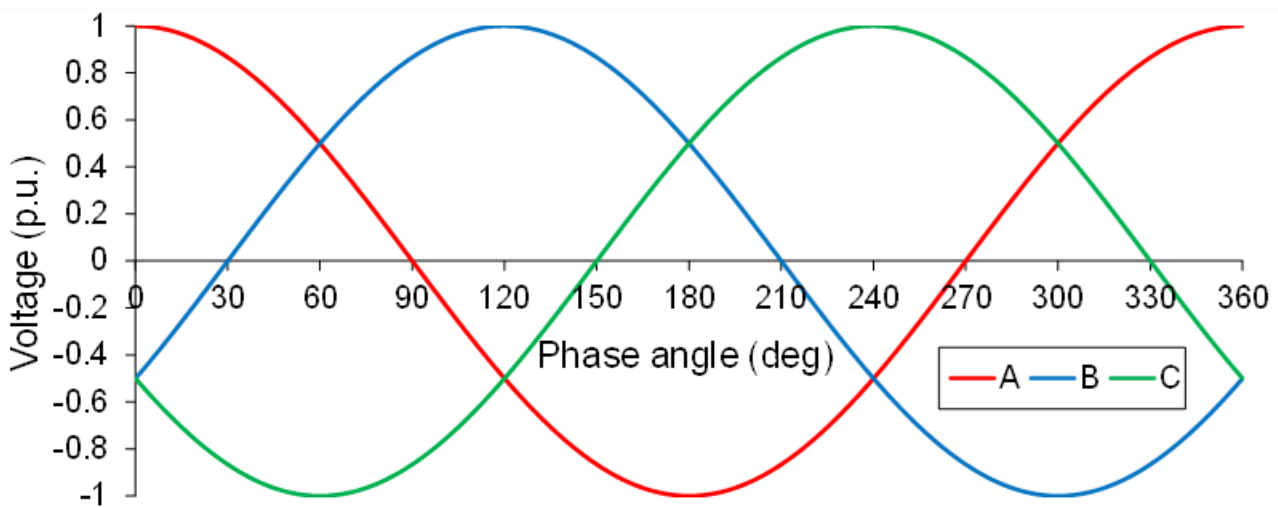
5.1.3.2 Μεταβολή Κρίσιμου Ρεύματος συναρτήσει της Γωνίας Φάσης της Εναλλασσόμενης Τάσης

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει απεικόνιση με τη βοήθεια διαγραμμάτων της μεταβολής του κρίσιμου ρεύματος ανάστροφης διάσπασης σε συνάρτηση με τις μοίρες της εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας (Σχήμα 5.1.3.5). Η εναλλασσόμενη τάση λόγω της αργής μεταβολής της σε σχέση με το κεραυνικό ρεύμα και τις κεραυνικές υπερτάσεις υπερτίθεται σε αυτές επηρεάζοντας σημαντικά τις τιμές των κρίσιμων ρευμάτων. Οι παρακάτω καμπύλες έγιναν με την βοήθεια του προγράμματος MS Excel, χρησιμοποιώντας τα αρχεία που δημιουργήθηκαν για κάθε ΓΜ μέσω της MATLAB μετά τις αυτοματοποιημένες προσομοιώσεις με το ATP-EMTP. Εδώ επιλέχθηκε να παρουσιαστούν όλες οι περιπτώσεις που αφορούν τη ΓΜ των 150 kV, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως τυπικές.

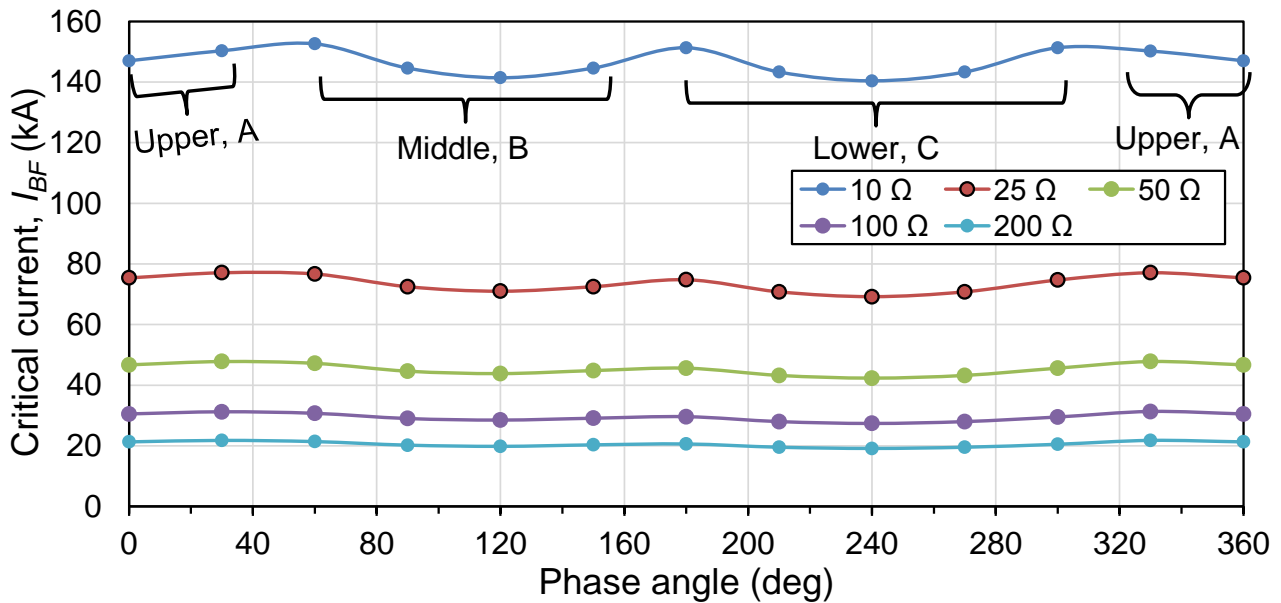
Στα παρακάτω σχήματα 5.1.3.6 έως 5.1.3.11 αναπαρίστανται οι γραφικές παραστάσεις μεταβολής του κρίσιμου ρεύματος συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης για τις τρεις φάσεις της γραμμής των 150 kV. Τα γραφήματα αφορούν μόνο τη ΓΜ των 150 kV σε σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης των 25 Ω, πλην του σχήματος 5.1.3.6, όπου παράμετρος είναι οι τιμές των αντιστάσεων γείωσης που έχουν προαναφερθεί. Παρατηρείται βάσει των ακόλουθων σχημάτων, ότι η μεγαλύτερη τιμή κρίσιμου ρεύματος όλων των περιπτώσεων που μελετήθηκαν βρίσκεται στην περίπτωση των 10 Ω στην παράμετρο αντίστασης γείωσης (Σχήμα 5.1.3.6), καθώς στο ίδιο σχήμα παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η αντίσταση γείωσης τόσο μειώνεται το κρίσιμο ρεύμα της ΓΜ. Ακολουθώντας στις επόμενες περιπτώσεις και συγκεκριμένα στο ύψος του πυλώνα όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος τόσο μεγαλύτερη είναι προσεγγιστικά η τιμή που παίρνει το κρίσιμο ρεύμα, χωρίς όμως να υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των τιμών για τα διάφορα ύψη (Σχήμα 5.1.3.7). Στην περίπτωση της απόστασης του σημείου πλήγματος από τον πυλώνα εξάγεται το συμπέρασμα ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση τόσο μεγαλύτερο γίνεται και το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα στην

εκάστοτε ΓΜ (Σχήμα 5.1.3.8). Τέλος στα σχήματα που αφορούν τις παραμέτρους του κεραυνού, παρατηρείται ότι στην περίπτωση της διάρκειας μετώπου (t_f), όταν αυτή μειώνεται αρκετά μειώνεται το κρίσιμο ρεύμα, ενώ όταν αυτή αυξάνεται το κρίσιμο ρεύμα αυξάνεται και αυτό (Σχήμα 5.1.3.9), ακολούθως για τη μέγιστη κλίση ισχύει ότι όσο αυτή αυξάνεται, μειώνεται το κρίσιμο ρεύμα (Σχήμα 5.1.3.10), ενώ για τη διάρκεια ημίσεως εύρους μεγαλύτερες τιμές οδηγούν γενικά σε λίγο μικρότερα κρίσιμα ρεύματα (Σχήμα 5.1.3.11). Γενικά όμως στις παραμέτρους του κεραυνού σε όλες τις περιπτώσεις δεν παρουσιάζονται τεράστιες αποκλίσεις σχετικά με το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα.

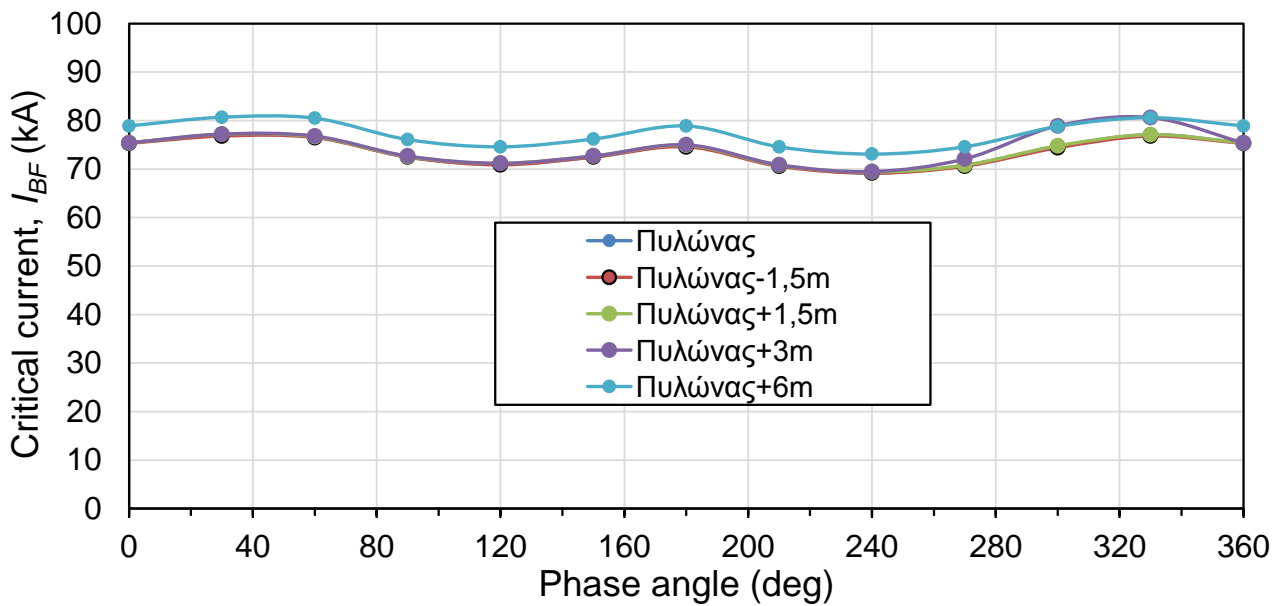
Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η μεταβολή της AC τάσης της ΓΜ, όπου όπως γίνεται αντιληπτό οι τιμές που λαμβάνει η κάθε φάση σε κάθε χρονική στιγμή είναι διαφορετικές και αυτό οδηγεί άμεσα σε διαφορετικές τιμές κρίσιμων ρευμάτων την στιγμή που ο κεραυνός πλήττει την ΓΜ και δημιουργεί τις υπερτάσεις. Το παρακάτω σχήμα βοηθά στην καλύτερη κατανόηση των Σχημάτων 5.1.3.6 έως 5.1.3.1. Σημειώνεται ότι τα παραπάνω συνάδουν με τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις που μελετήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.



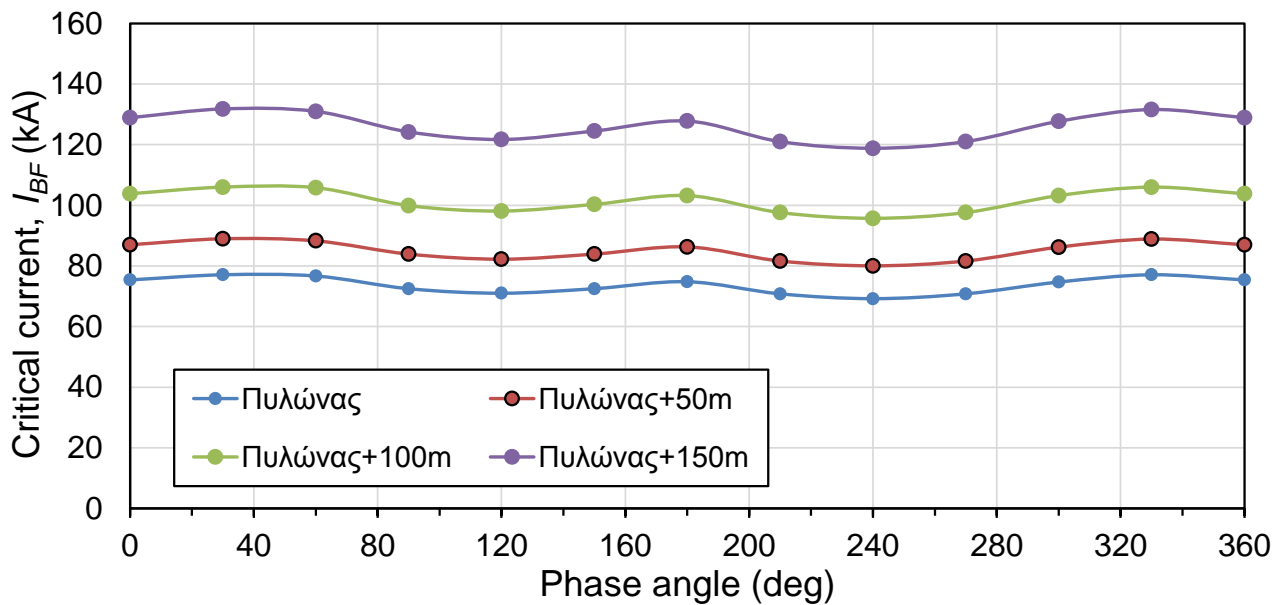
Σχήμα 5.1.3.2.1 Αναπαράσταση της μεταβολής της AC τάσης των τριών φάσεων της γραμμής μεταφοράς συναρτήσει της φάσης της τάσης.



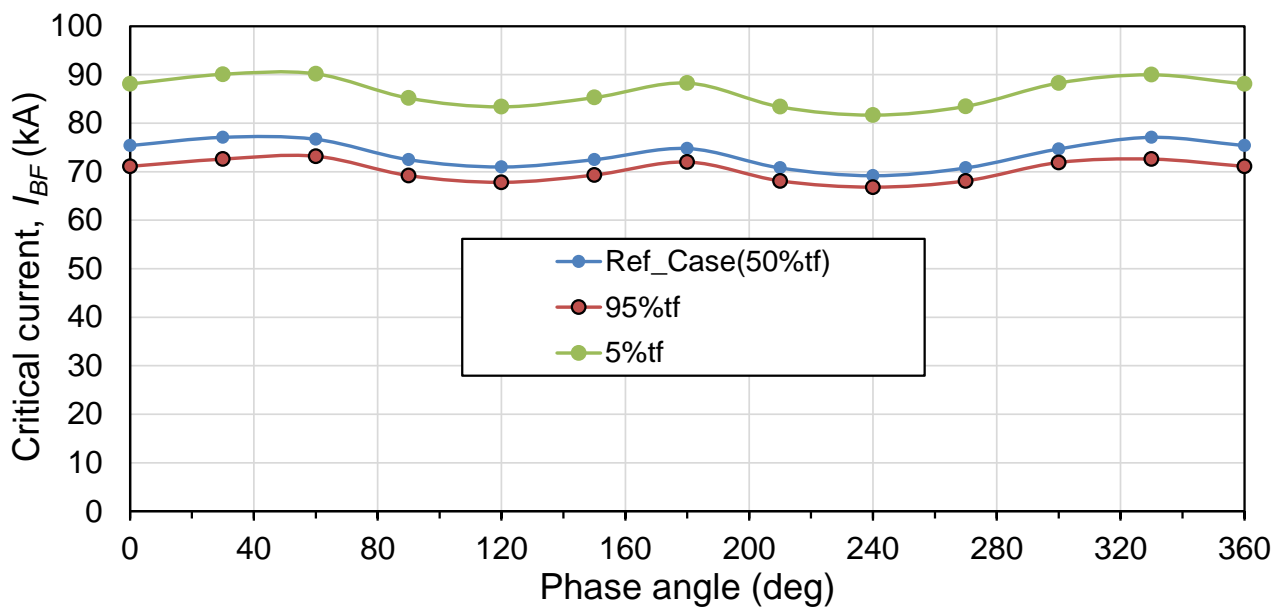
Σχήμα 5.1.3.2.2 Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης για την αντίσταση γείωσης στη ΓΜ 150 kV. Στην καμπύλη των 10 Ω απεικονίζονται και οι τρεις Φάσεις [A (upper), B (Middle), C (Lower)] στις οποίες συμβαίνει διάσπαση στη κάθε περίπτωση, ανάλογα ισχύουν και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.



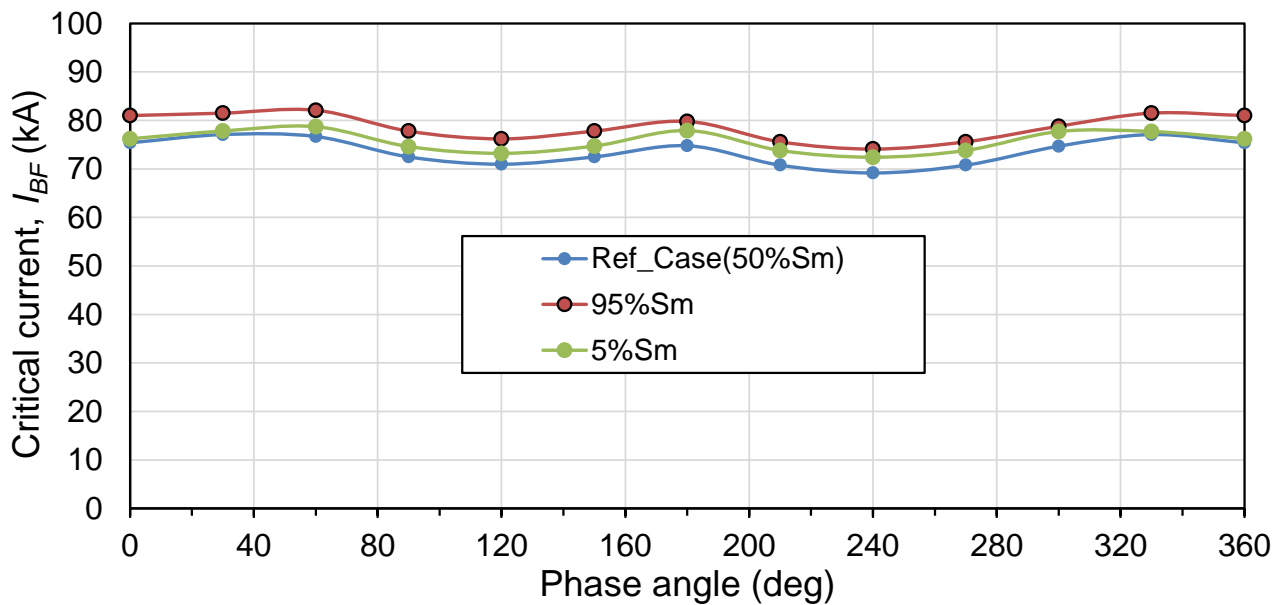
Σχήμα 5.1.3.2.3 Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης για το ύψος του πυλώνα της ΓΜ 150 kV σε σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω .



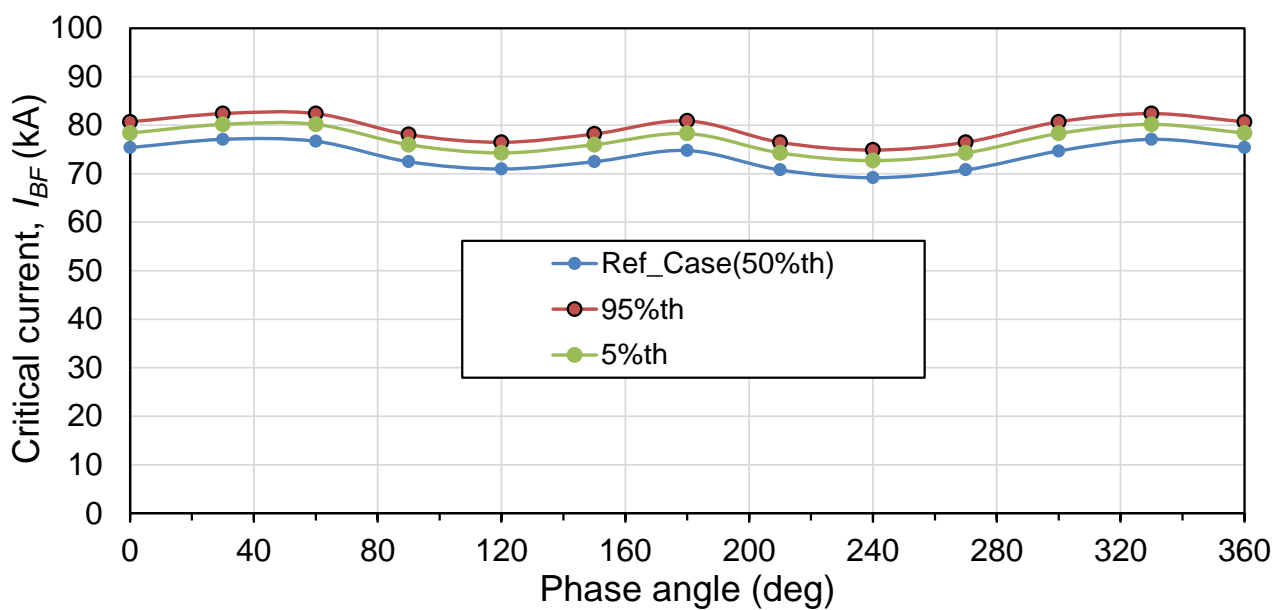
Σχήμα 5.1.3.2.4 Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης για την απόσταση του σημείου πλήγματος της ΓΜ 150 kV για σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης στα 25 Ω.



Σχήμα 5.1.3.2.5 Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης της ΓΜ 150 kV για τη διάρκεια μετώπου (t_f) που χαρακτηρίζει το κεραυνικό πλήγμα για σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω.



Σχήμα 5.1.3.2.6 Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης της ΓΜ 150 kV για τη μέγιστης κλίση (S_m) που χαρακτηρίζει το κεραυνικό πλήγμα για σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω.



Σχήμα 5.1.3.2.7 Γραφική απεικόνιση των κρίσιμων ρευμάτων συναρτήσει των μοιρών της γωνίας φάσης της AC τάσης της ΓΜ 150 kV για τη διάρκειας ημίσεος εύρους (t_h) που χαρακτηρίζει το κεραυνικό πλήγμα για σταθερή τιμή αντίστασης γείωσης 25 Ω.

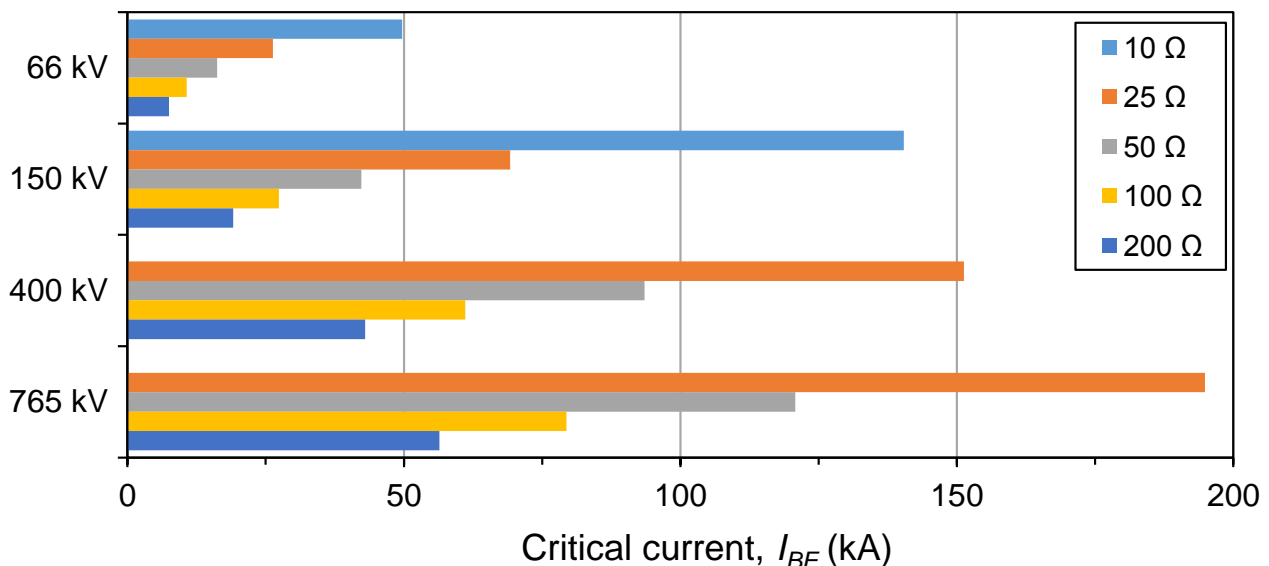
5.1.4 Ραβδογράμματα Κρίσιμων Ρευμάτων

Στην παρακάτω υποενότητα ακολουθεί η παρουσίαση ραβδογραμμάτων για τα κρίσιμα ρεύματα ανάστροφης διάσπασης (κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα ή τον αγωγό προστασίας) σε όλες τις ΓΜ που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα θα γίνει αναπαράσταση των κρίσιμων ρευμάτων που αφορούν την κάτω φάση των ΓΜ και πιο συγκεκριμένα για τις 240°, ώστε να γίνει αντιληπτό πιο εύκολα πόσο επηρεάζει η κάθε παράμετρος τα κρίσιμα ρεύματα στις ΓΜ. Σημειώνεται ότι, όπως φαίνεται από τα σχήματα της προηγούμενης υποενότητας, η γωνία των 240° αντιστοιχεί συνήθως στο μικρότερο κρίσιμο ρεύμα των ΓΜ.

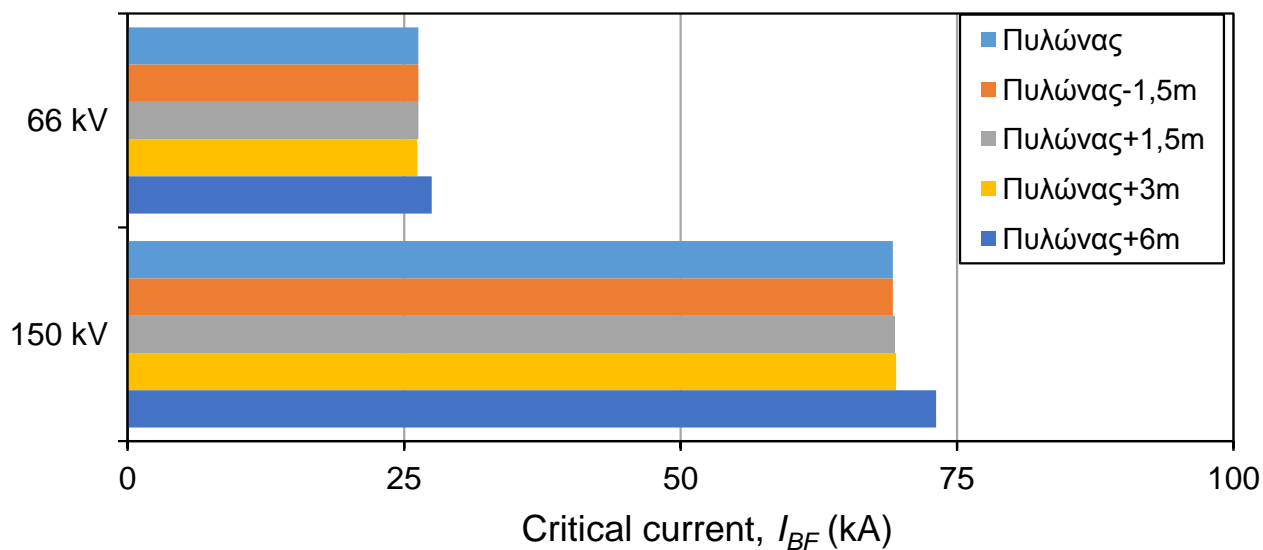
Σε ορισμένες περιπτώσεις όπως π.χ. στο Σχήμα 5.1.3.12 απουσιάζει η αντίσταση γείωσης των 10 Ω για τις περιπτώσεις των ΓΜ των 400 kV, 765 kV και στο Σχήμα 5.1.3.15 έχουμε απουσία της ΓΜ των 765 kV από την παράμετρο της απόστασης του σημείου πλήγματος από τον πυλώνα. Αυτό είτε οφείλεται στην ελάχιστη αντίσταση γείωσης που απαιτείται για να προκληθεί διάσπαση της μόνωσης είτε σε σφάλματα της συγκεκριμένης έκδοσης του λογισμικού ATP-EMTP.

Από τα σχήματα αυτά επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα της προηγούμενης υποενότητας, δηλαδή την εξάρτηση του κρίσιμου ρεύματος ανάστροφης διάσπασης κυρίως από την αντίσταση γείωσης των πυλώνων και τη θέση του σημείου πλήγματος στο άνοιγμα ανάμεσα σε δύο πυλώνες. Η επίδραση της διάρκειας μετώπου και της μέγιστης κλίσης του κεραυνικού ρεύματος είναι μικρότερη αλλά υπαρκτή. Αντίθετα η διάρκεια ημίσεος εύρους και το ύψος του πυλώνα δεν επιδρούν στο κρίσιμο ρεύμα.

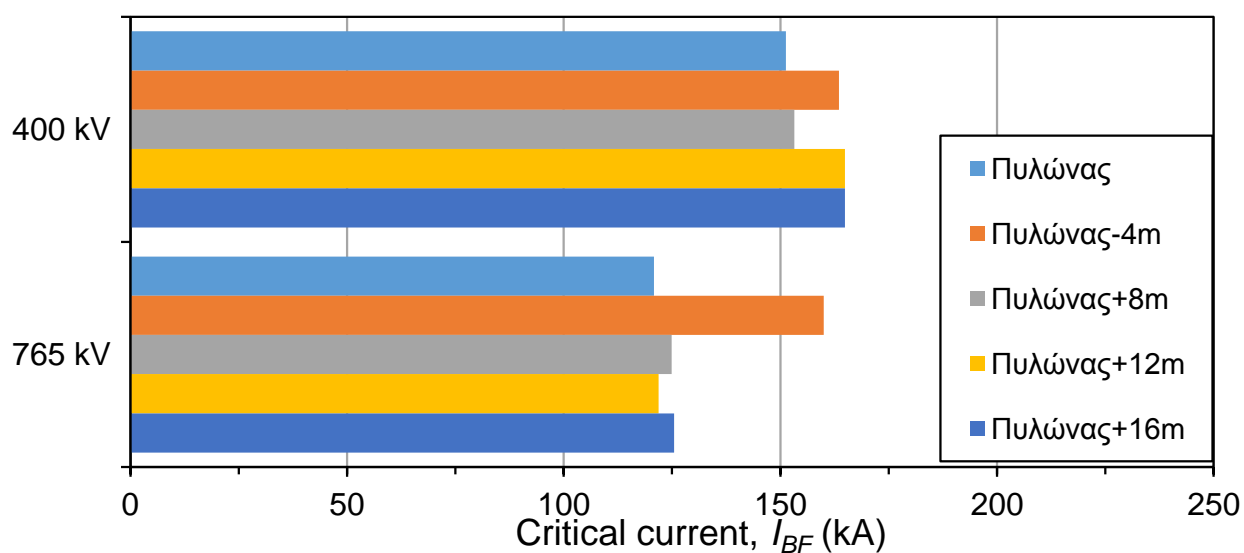
Επιπρόσθετη παράμετρος διερεύνησης είναι το μήκος της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς, η οποία, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.1.3.16-5.1.3.19, επιδρά σημαντικά στις τιμές του κρίσιμου ρεύματος (μείωση με τη μείωση του μήκους των μονωτήρων, δηλαδή με τη μείωση του βασικού επιπέδου μόνωσης).



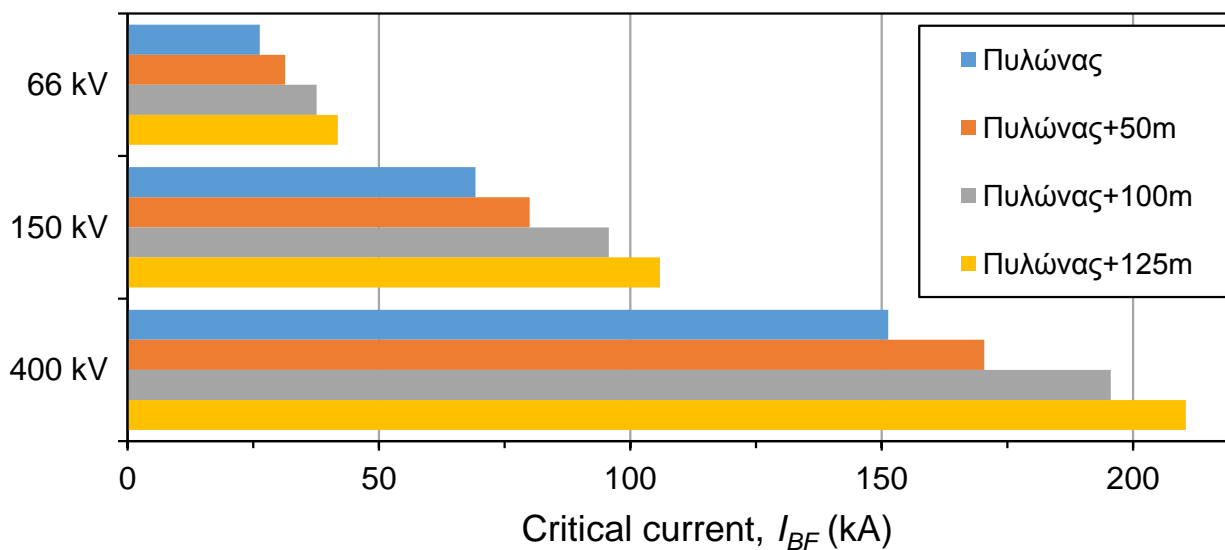
Σχήμα 5.1.4.1 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής τις αντιστάσεις γείωσης.



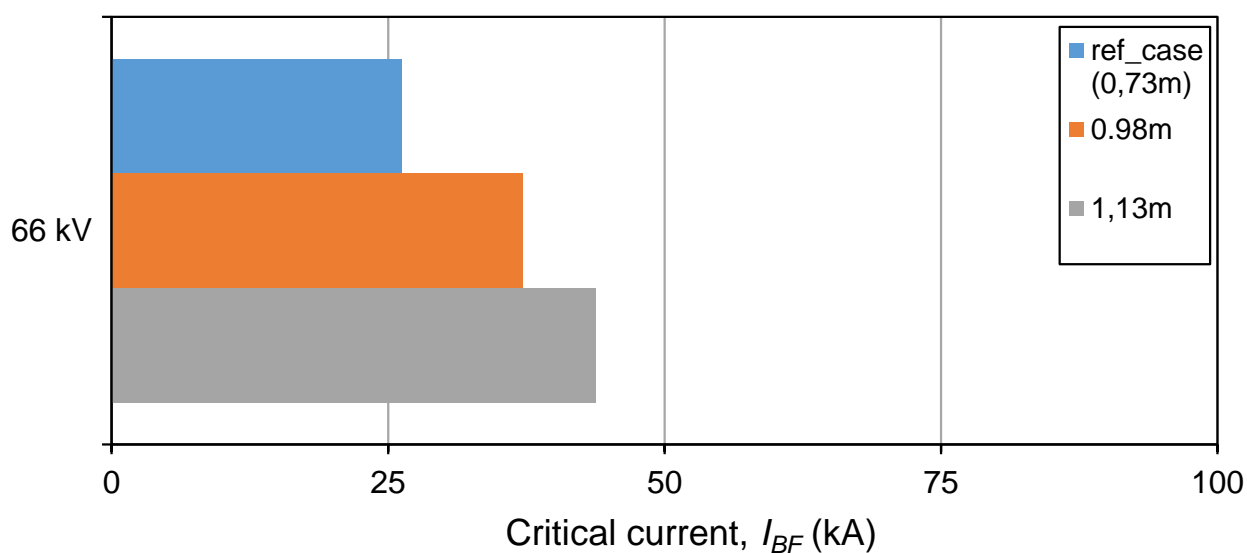
Σχήμα 5.1.4.2 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το ύψος του πυλώνα στις ΓΜ 66 kV και 150 kV.



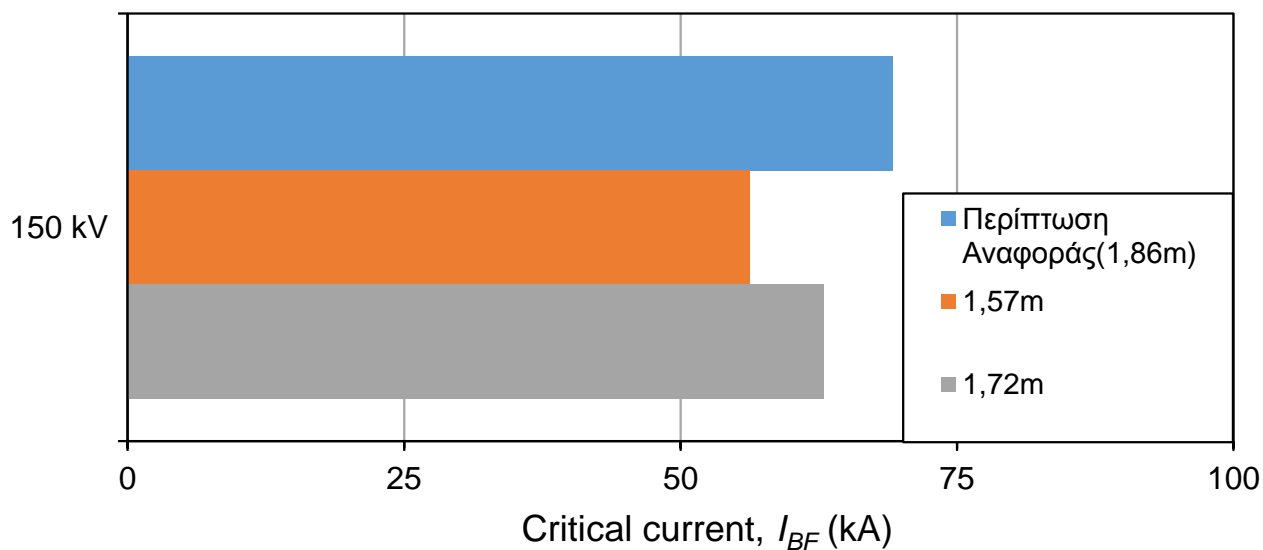
Σχήμα 5.1.4.3 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το ύψος του πυλώνα στις ΓΜ 400 kV και 765 kV.



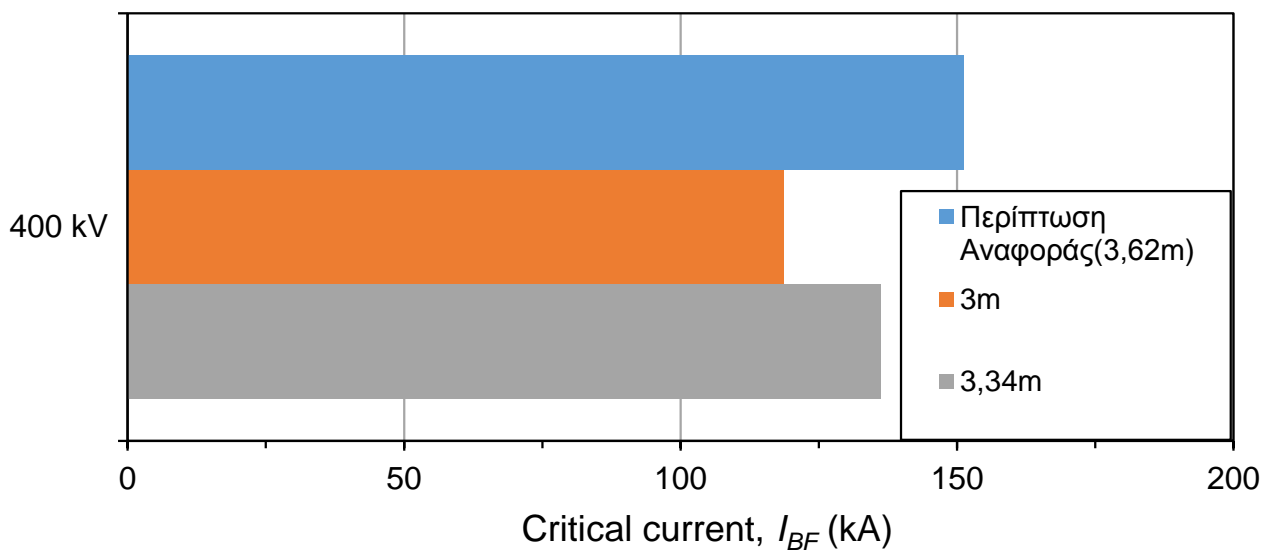
Σχήμα 5.1.4.4 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής την απόσταση του σημείου πλήγματος από τον πυλώνα.



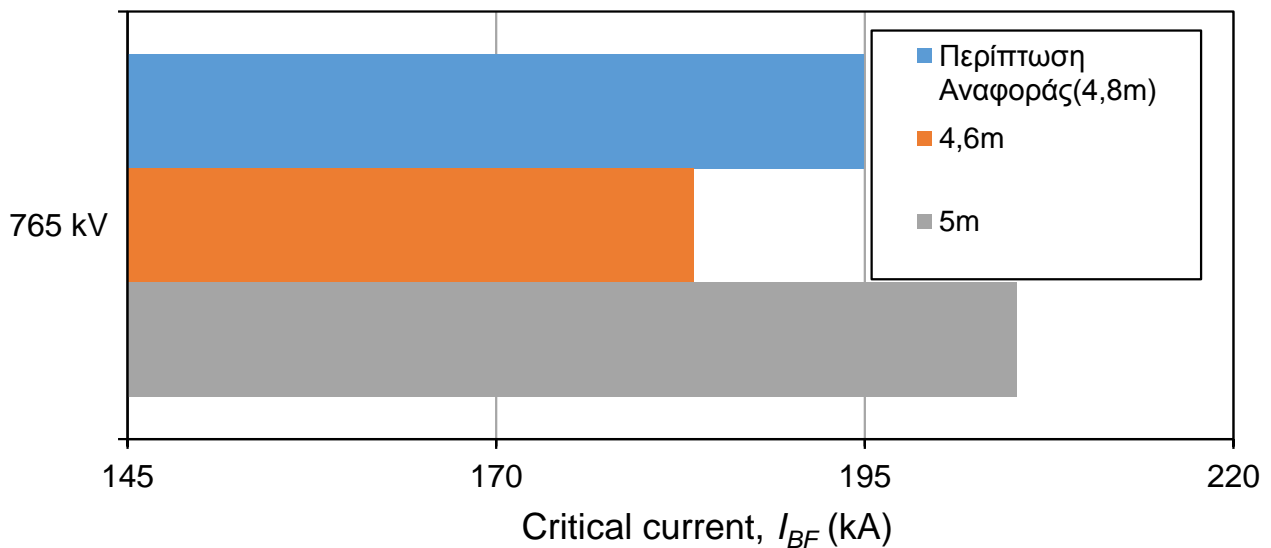
Σχήμα 5.1.4.5 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στη ΓΜ 66 kV για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.



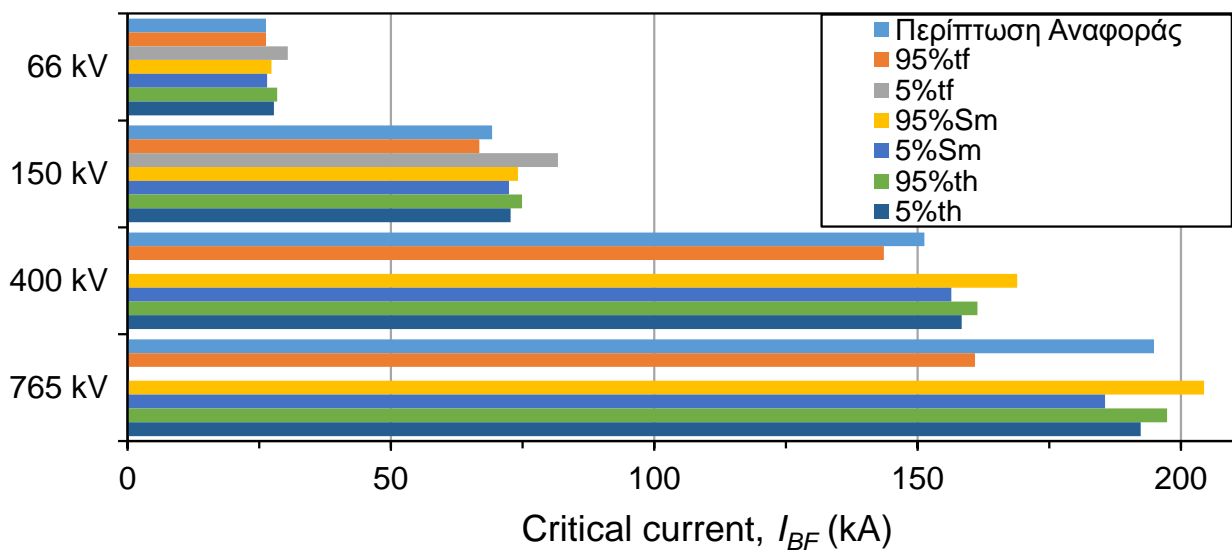
Σχήμα 5.1.4.6 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στη ΓΜ 150 kV για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.



Σχήμα 5.1.4.7 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στη ΓΜ 400 kV για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.



Σχήμα 5.1.4.8 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στη ΓΜ 66 kV για την κάτω φάση (γωνία φάσης AC τάσης: 240°) με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.



Σχήμα 5.1.4.9 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την κάτω φάση στις 240° με παράγοντα επιρροής τις παραμέτρους του κεραυνού (διάρκεια μετώπου (t_f), μέγιστη κλίση (S_m), διάρκεια ημίσεος εύρους (t_h)).

5.2 Πλήγμα σε Αγωγό Φάσης

5.2.1 Υπερτάσεις από το ATP-EMTP με όλες τις Παραμέτρους Επίδρασης και όλες τις ΓΜ σε Σταθερό Κεραυνικό Ρεύμα

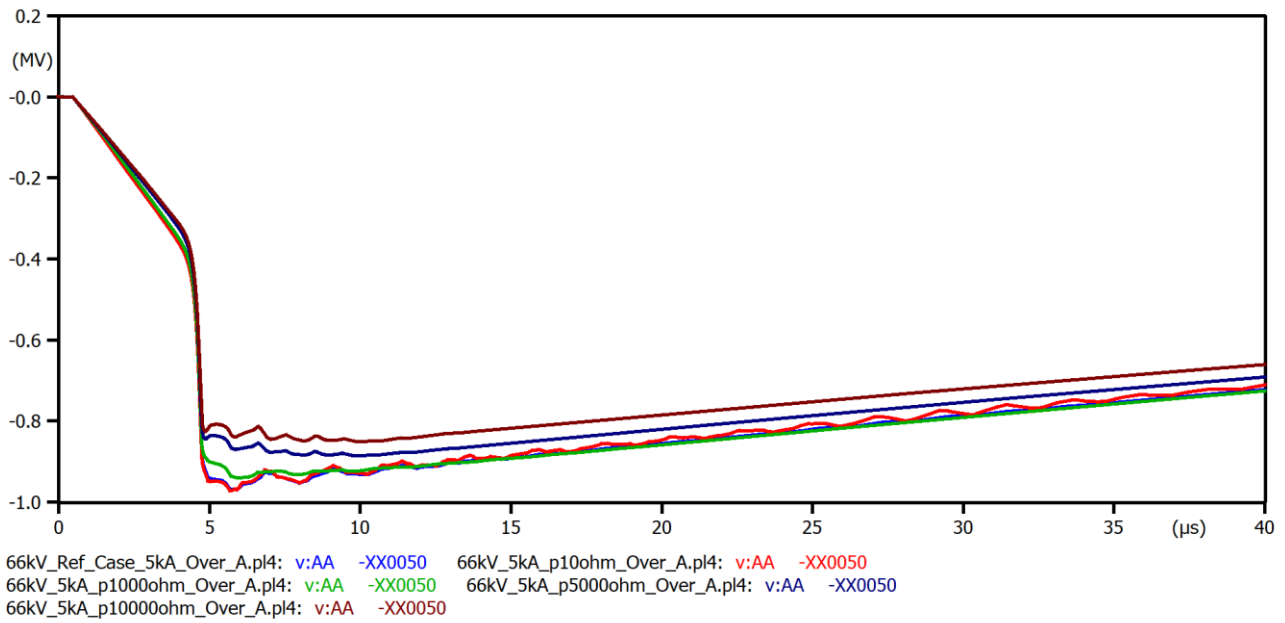
Στην υποενότητα αυτή θα γίνει η γραφική απεικόνιση των υπερτάσεων που προκαλούνται στις ΓΜ από πλήγμα σε αγωγό φάσης συναρτήσει των διαφόρων παραμέτρων, όπως έχει προαναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια και επηρεάζουν την συμπεριφορά των ΓΜ, πιο συγκεκριμένα οι παράμετροι που θα μελετηθούν εδώ είναι:

- Ειδική αντίσταση εδάφους
- Ύψος του πυλώνα
- Απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα πυλώνων
- Παράμετροι κεραυνού.

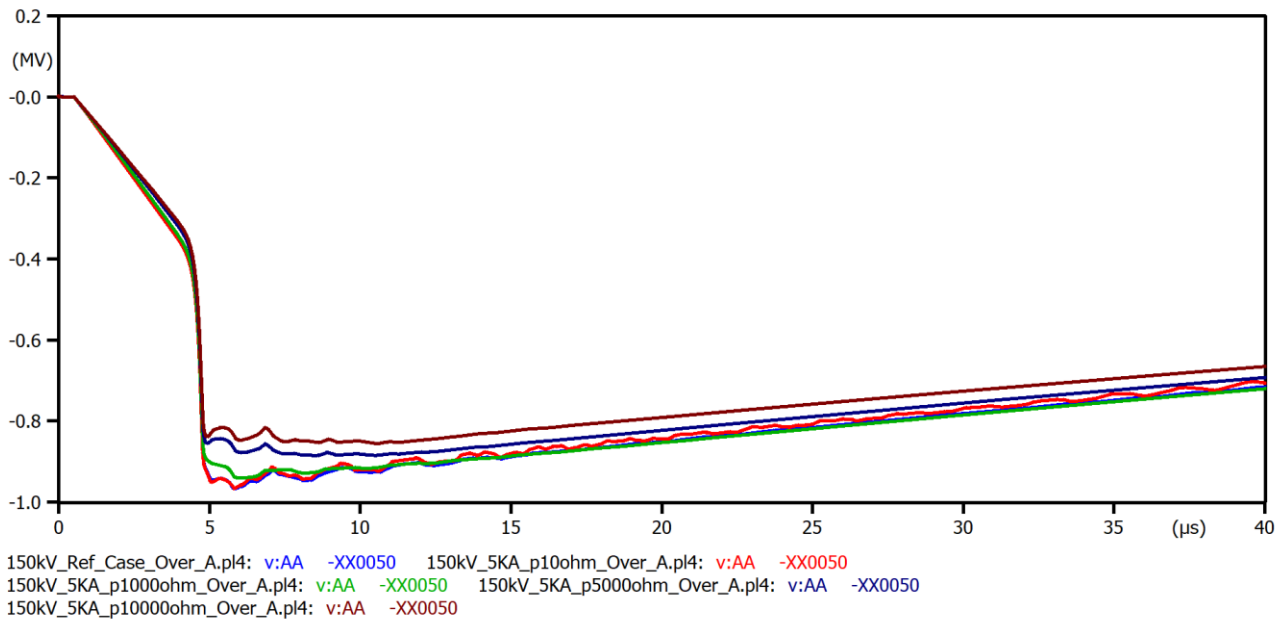
Στο κεφάλαιο αυτό επιλέχθηκαν να αναπαρασταθούν όλες οι παραπάνω περιπτώσεις για όλες τις ΓΜ για την τιμή κεραυνικού ρεύματος των 5 kA όταν πληγεί ο επάνω αγωγός φάσης. Οι παρακάτω κυματομορφές προέκυψαν μέσω του προγράμματος του ATP-EMTP με τρεξίματα που έγιναν χωρίς τη βοήθεια κώδικα σε MATLAB (αυτοματοποιημένα) αλλά «χειροκίνητα», όπου για κάθε ένα τρέξιμο κάθε περίπτωσης δημιουργούνταν το αντίστοιχο αρχείο του προγράμματος και εν συνεχεία μέσω του r14 αρχείου που αποθηκεύονται οι καμπύλες απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα της ενότητας αυτής. Στη ΓΜ των 765 kV δεν έγιναν τα τρεξίματα για τις υπερτάσεις, αφού είναι αδύνατο να δεχθεί κεραυνικό πλήγμα η επάνω φάση λόγω του αγωγού προστασίας που «εξέχει» σε σχέση με τις φάσης (αρνητική γωνία θωράκισης).

Ειδική αντίσταση εδάφους

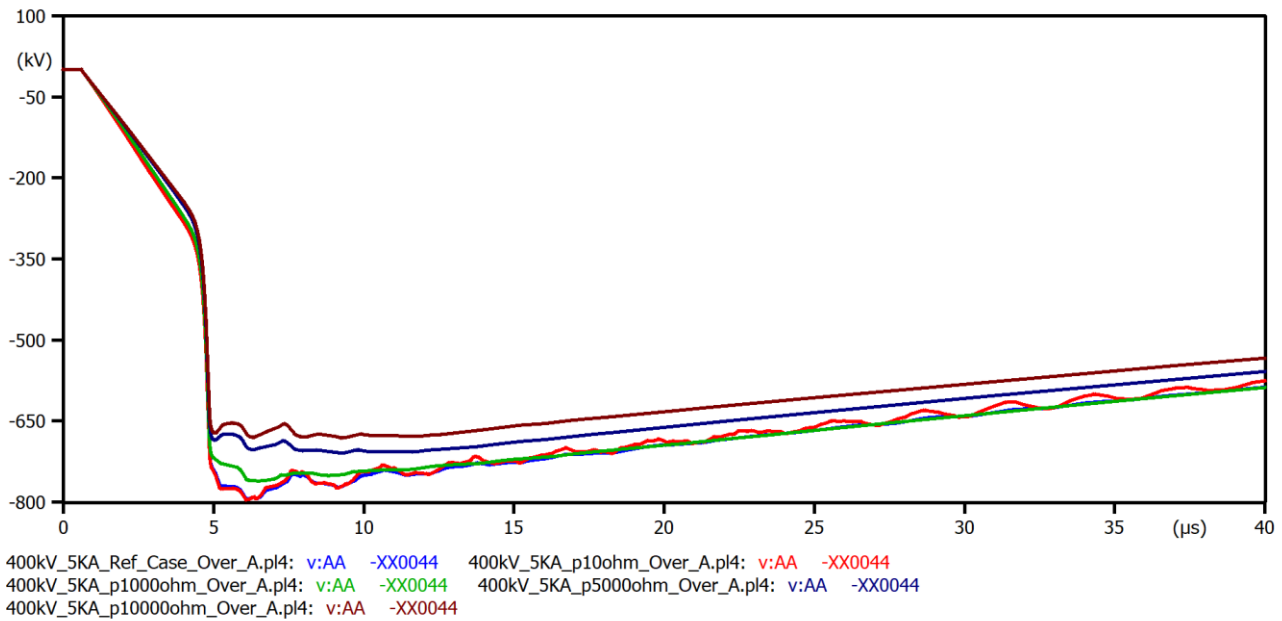
Τα Σχήματα 5.2.1 έως 5.2.4 παρουσιάζουν την επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και κατ' επέκταση της αντίστασης γείωσης των πυλώνων στις κεραυνικές υπερτάσεις που καταπονούν τον μονωτήρα της επάνω φάσης των γραμμών μεταφοράς 66 kV έως 400 kV. Είναι εμφανές ότι η αύξηση της ειδικής αντίστασης για σταθερό ρεύμα κεραυνού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των υπερτάσεων. Επομένως αναμένεται το κρίσιμο ρεύμα να αυξάνεται με την αύξηση της ειδικής αντίστασης. Επίσης, από τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι με την αύξηση της αντίστασης γείωσης η ουρά των υπερτάσεων γίνεται πιο ομαλή (λιγότερες ταλαντώσεις). Είναι σημαντικό ότι για τις πιο συνηθισμένες τιμές (έως 1000 Ωm) οι επιδράσεις είναι μικρές.



Σχήμα 5.2.1.1 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση) με παράμετρο την ειδική αντίσταση του εδάφους.



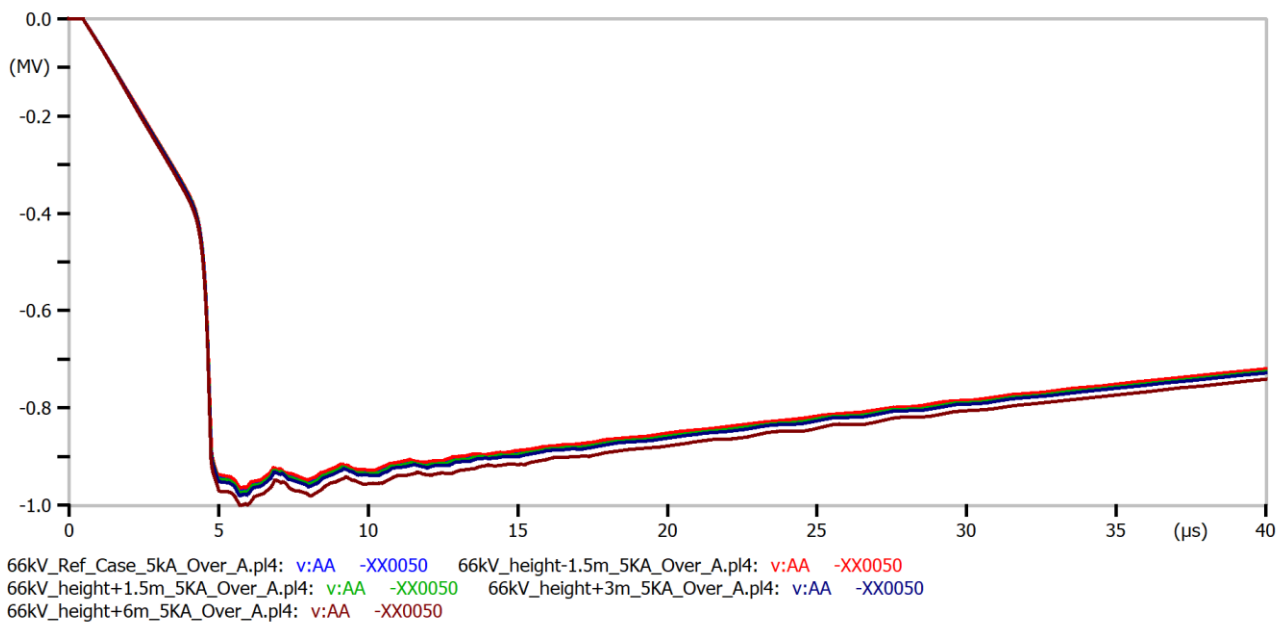
Σχήμα 5.2.1.2 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 150 kV (επάνω φάση) με παράμετρο την ειδική αντίσταση του εδάφους.



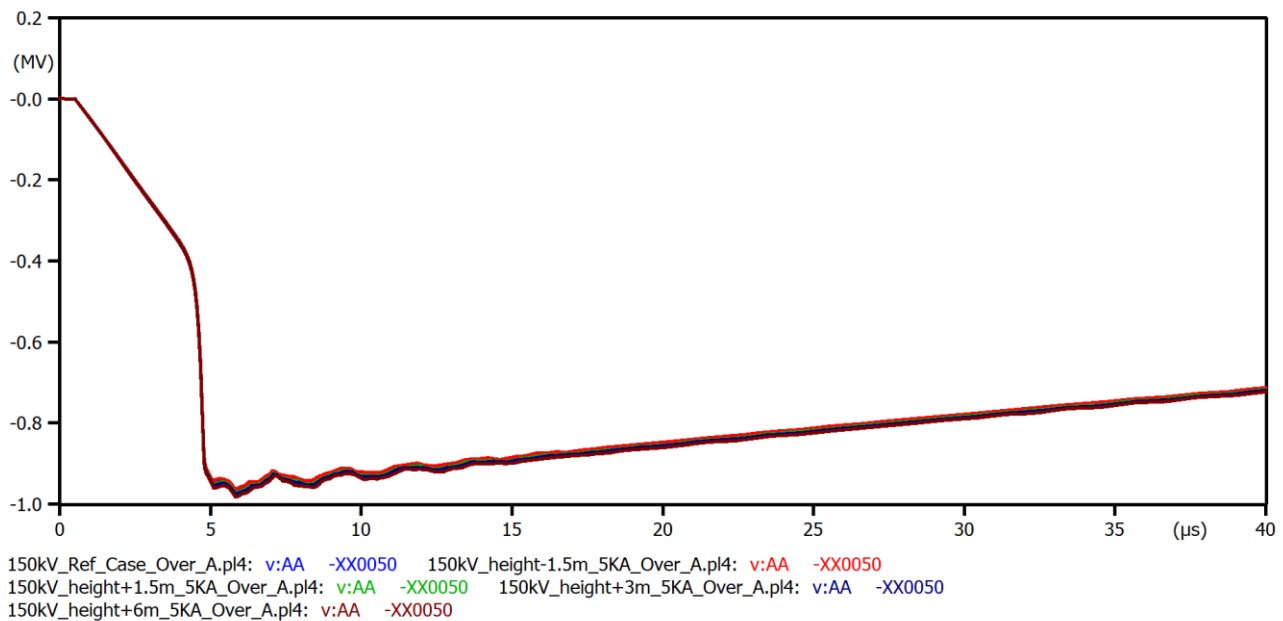
Σχήμα 5.2.1.3 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 765 kV (επάνω φάση) με παράμετρο την ειδική αντίσταση του εδάφους.

Ύψος πυλώνα ΓΜ

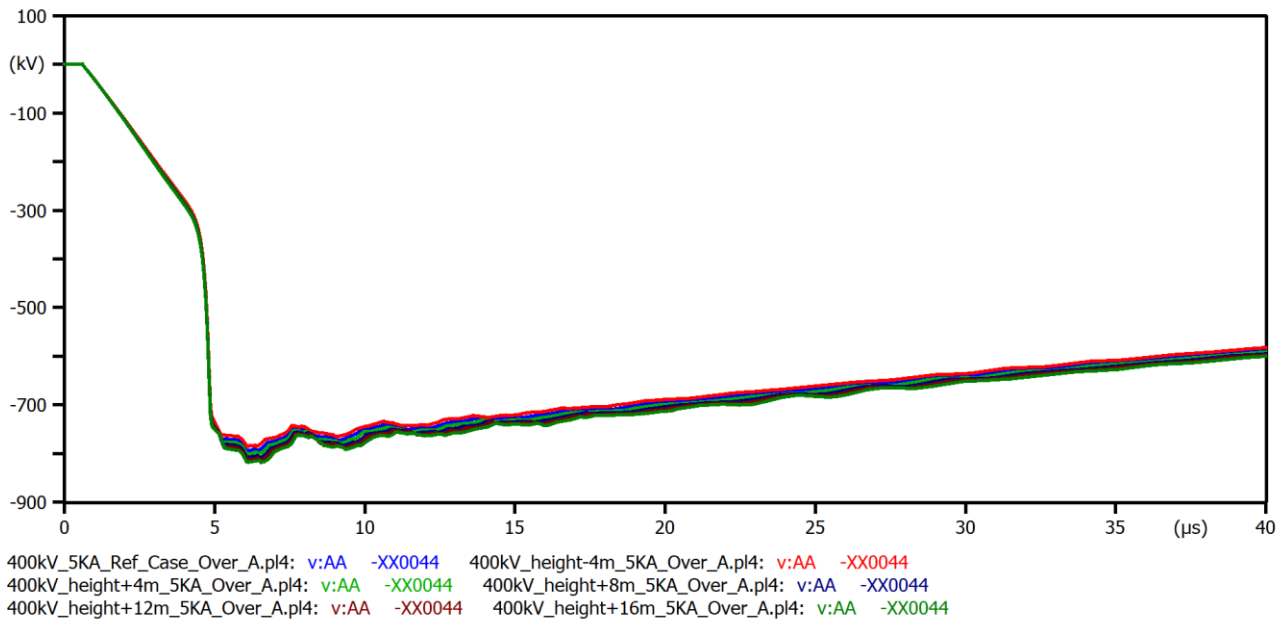
Στα Σχήματα 5.2.4 έως 5.2.6 γίνεται η απεικόνιση των υπερτάσεων που δημιουργούνται στις ΓΜ συναρτήσει του ύψους του κάθε πυλώνα της ΓΜ. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ύψος του πυλώνα ενώ διατηρείται σταθερό το κεραυνικό ρεύμα και η ειδική αντίσταση του εδάφους οι υπερτάσεις που καταπονούν την επάνω φάση των ΓΜ γίνονται ελαφρώς μεγαλύτερες κατά μέγιστη τιμή. Η εξομάλυνση της υπέρτασης γίνεται σχετικά σε γρήγορο χρόνο σε όλες τις περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι λόγω των σχετικά μικρών διαφορών που παρατηρούνται στις υπερτάσεις δεν αναμένεται να υπάρχει ιδιαίτερη επίδραση στα κρίσιμα ρεύματα που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης. Η τιμή της ειδικής αντίστασης για την οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είναι τα $\rho=100 \Omega\text{m}$.



Σχήμα 5.2.1.4 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.



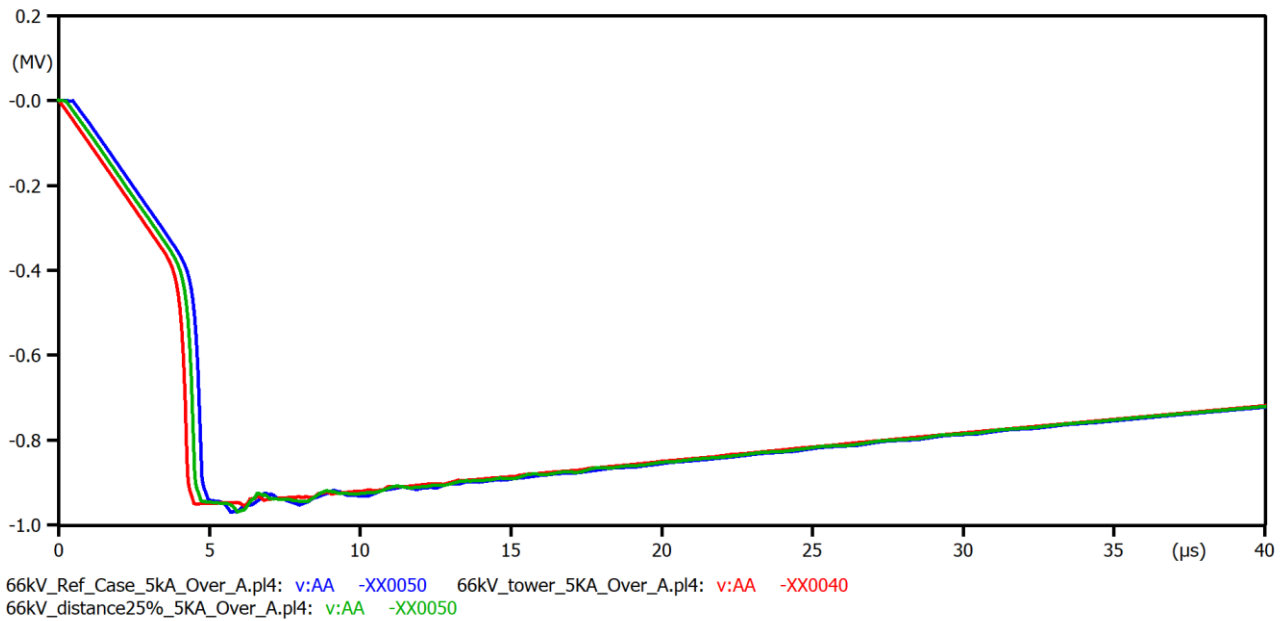
Σχήμα 5.2.1.5 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 150 kV (επάνω φάση) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.



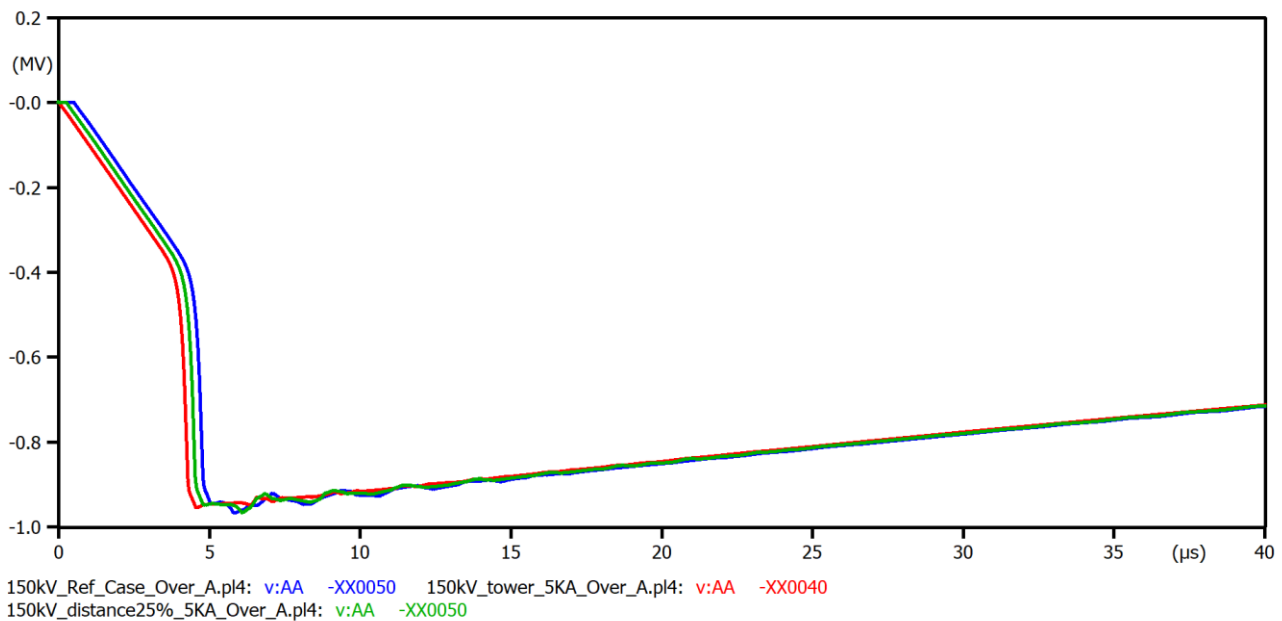
Σχήμα 5.2.1.6 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 400 kV (επάνω φάση) με παράμετρο το ύψος των πυλώνων της γραμμής.

Σημείο πλήγματος

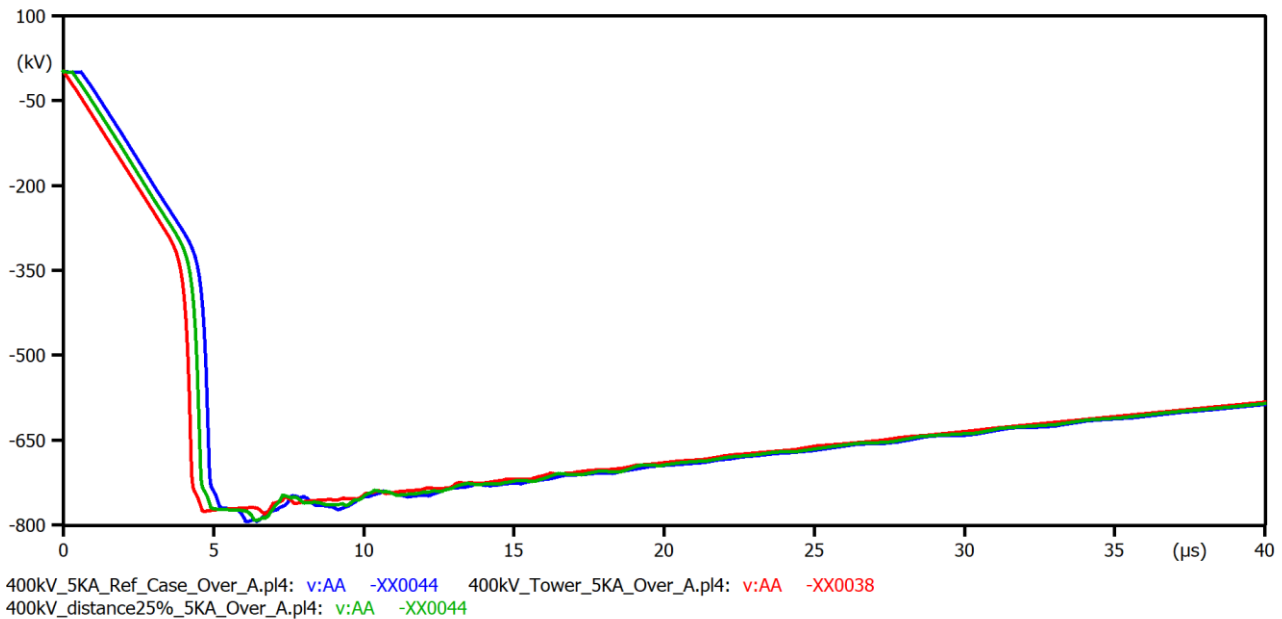
Στα παρακάτω σχήματα (5.2.7 έως 5.2.9) απεικονίζονται οι υπερτάσεις που προκύπτουν μεταβάλλοντας το σημείο του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο διαδοχικών πυλώνων των ΓΜ. Είναι αντιληπτό ότι οι διαφορές των υπερτάσεων που καταπονούν την επάνω φάση της ΓΜ είναι ασήμαντες με την τιμή της υπέρτασης να γίνεται μέγιστη όταν το πλήγμα είναι στο 25% της απόστασης (πράσινη καμπύλη στα σχήματα). Επομένως και στις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν δεν παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές και το σημείο πλήγματος δεν είναι παράγοντας επίδρασης. Η τιμή της ειδικής αντίστασης για την οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είναι τα $\rho=100 \Omega\text{m}$. Η χρονική καθυστέρηση που παρατηρείται στην εμφάνιση της υπέρτασης στον μονωτήρα οφείλεται στην όδευση του κύματος επάνω στη γραμμή. Η περίπτωση αναφοράς αντιστοιχεί σε κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης στη θέση του πυλώνα.



Σχήμα 5.2.1.7 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.



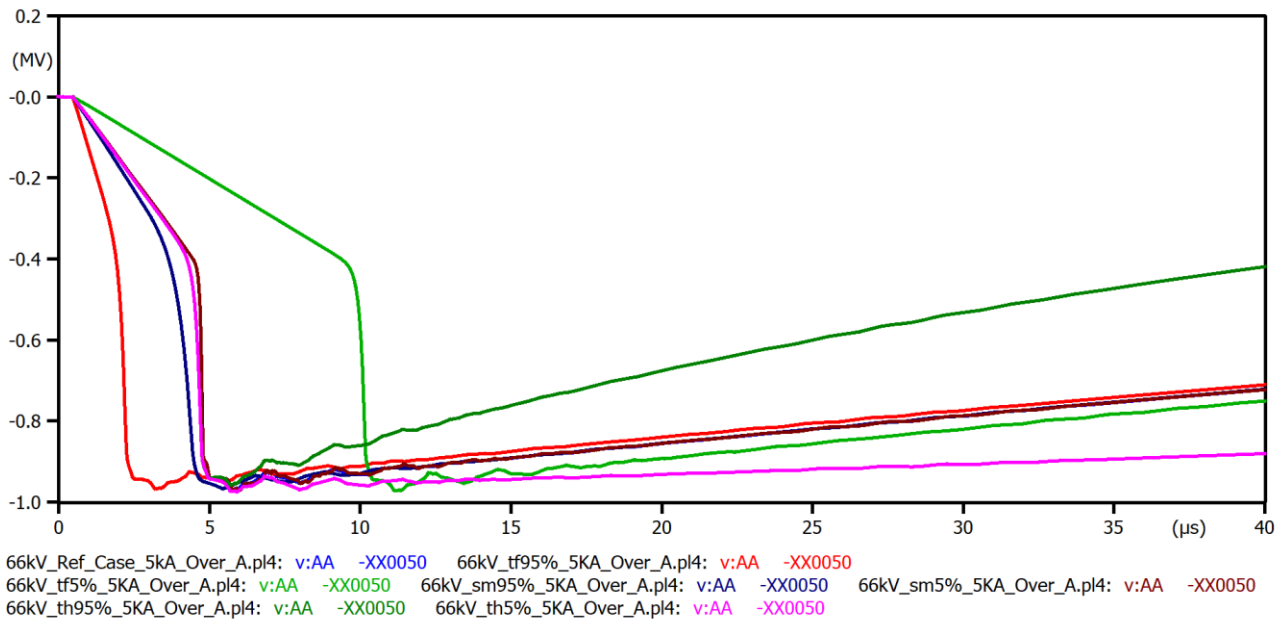
Σχήμα 5.2.1.8 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων ΓΜ 150 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.



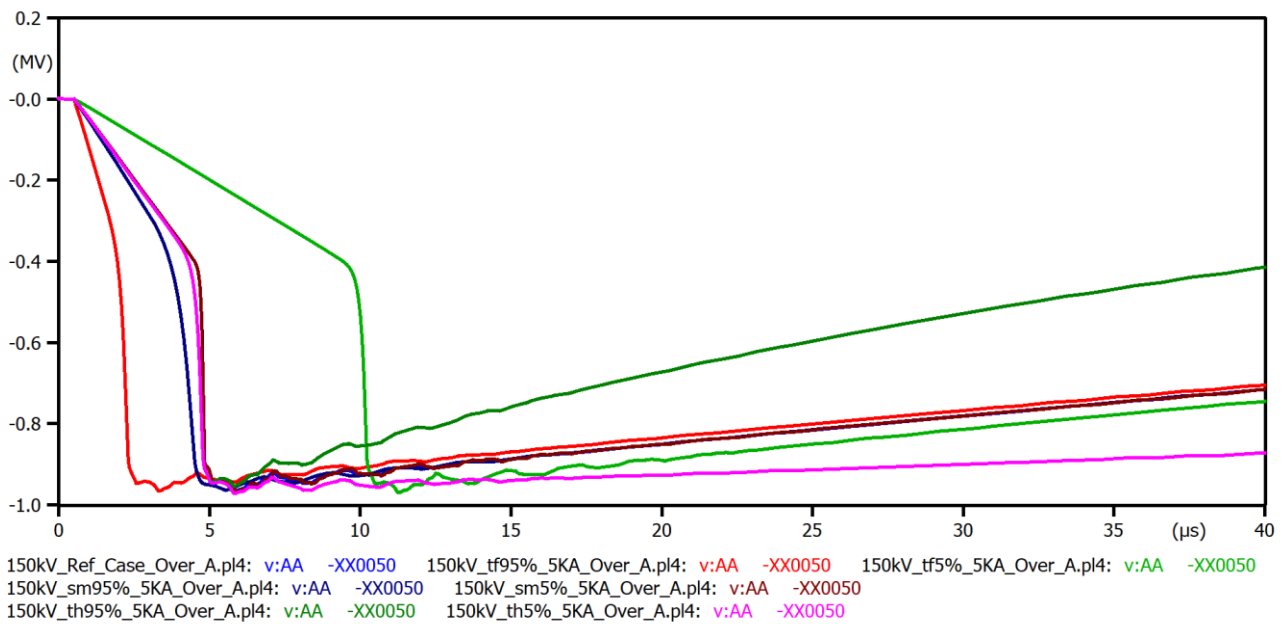
Σχήμα 5.2.1.9 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων ΓΜ 400 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τη θέση του σημείου του κεραυνικού πλήγματος κατά μήκος του ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.

Παράμετροι κεραυνού

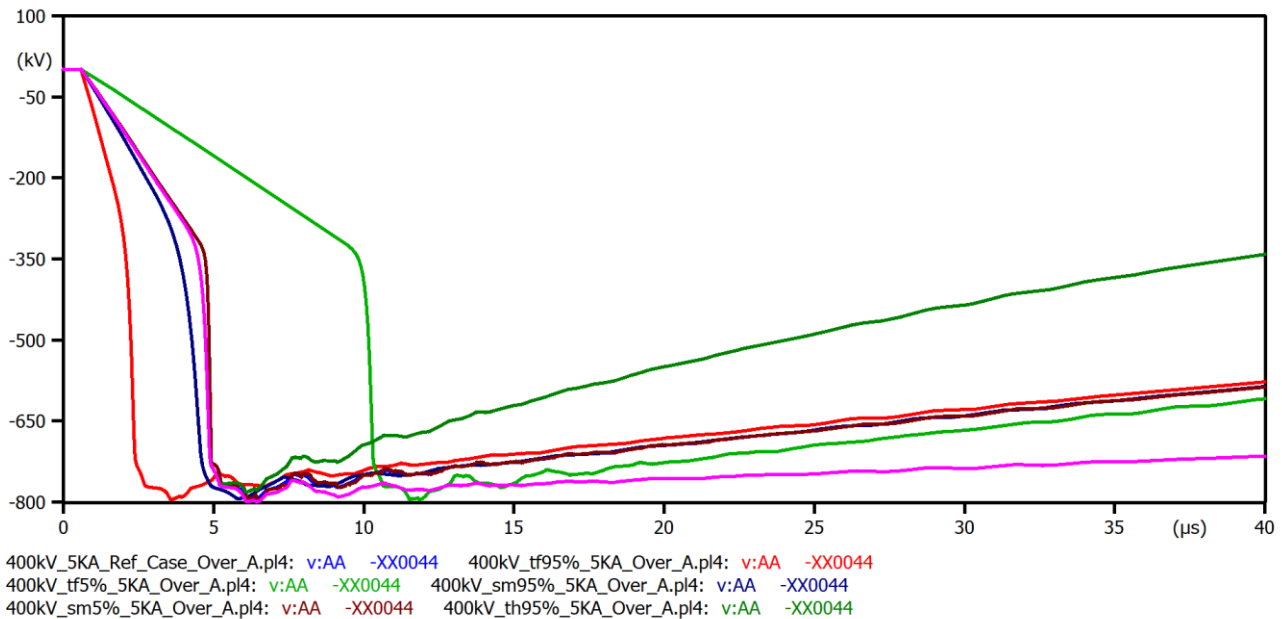
Στα παρακάτω σχήματα από 5.2.10 έως 5.2.12 παρουσιάζονται οι υπερτάσεις που καταπονούν την ΓΜ, με παράγοντα την μεταβολή των παραμέτρων του κεραυνικού πλήγματος (διάρκεια μετώπου (t_f), μέγιστη κλίση (S_m), διάρκεια ημίσεως εύρους (t_h)). Αρχικά, φαίνεται στα σχήματα που έχουν εξαχθεί από το ATP-EMTP ότι οι μέγιστες τιμές των υπερτάσεων είναι συγκρίσιμες σε όλες τις περιπτώσεις, άρα δεν αναμένεται τα κρίσιμα ρεύματα να επηρεαστούν έντονα. Για t_f 5% (ανοιχτό πράσινο), οι υπερτάσεις αργούν περισσότερο από όλες τις περιπτώσεις να φτάσουν στη μέγιστη τιμή τους (πιο ομαλή αύξηση στο αρχικό τμήμα του μετώπου της κυματομορφής). Και εδώ, η τιμή της ειδικής αντίστασης για την οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είναι τα $\rho=100 \Omega\text{m}$. Η μεταβολή των παραμέτρων γίνεται με βάση τις στατιστικές κατανομές που καταγράφηκαν σε πύργους με κατάλληλα όργανα. Η περίπτωση αναφοράς αντιστοιχεί στις ενδιάμεσες τιμές (50%).



Σχήμα 5.2.1.10 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.



Σχήμα 5.2.1.11 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 150 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.



Σχήμα 5.2.1.12 Γραφική απεικόνιση κυματομορφών υπερτάσεων στη ΓΜ 400 kV (επάνω φάση) με παράμετρο τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος.

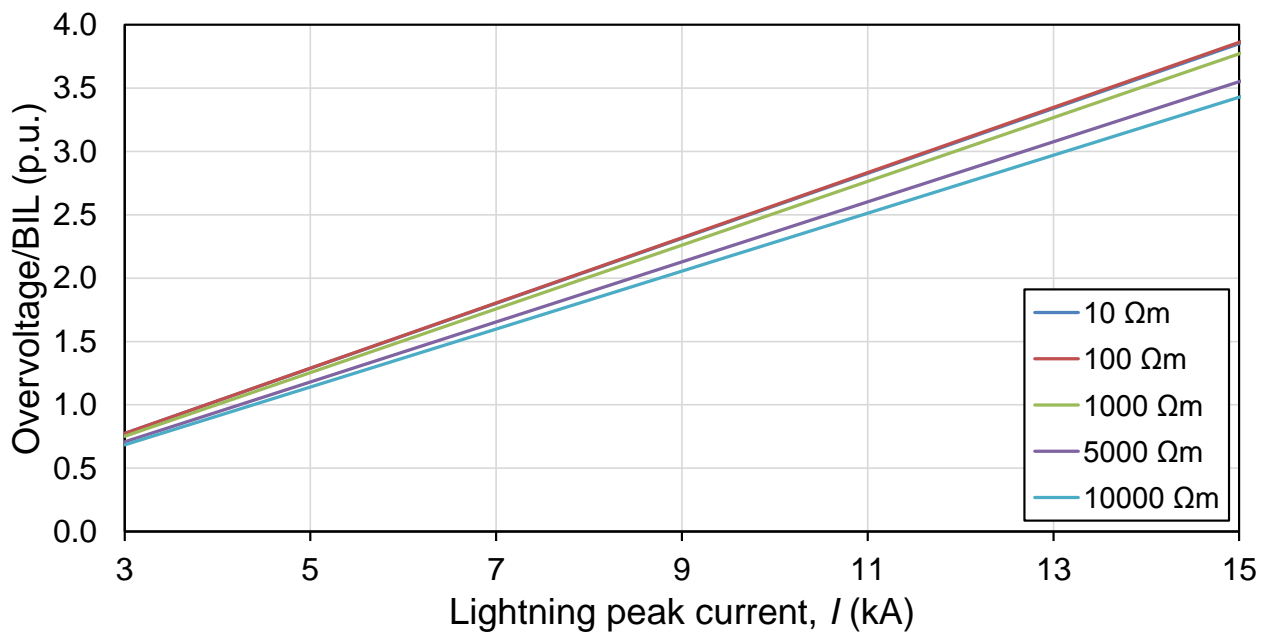
5.2.2 Γραφήματα Υπέρτασης συναρτήσεως του Ρεύματος για τη ΓΜ των 150 kV για κάθε Παράμετρο Επίδρασης

Στην υποενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η μεταβολή των κεραυνικών υπερτάσεων συναρτήσεως του κεραυνικού ρεύματος για κάθε παράμετρο επίδρασης. Για την αποφυγή επαναλαμβανόμενων αποτελεσμάτων επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για την τυπική ΓΜ των 150 kV. Σημειώνεται ότι οι υπερτάσεις στα παρακάτω γραφήματα είναι κανονικοποιημένες με το βασικό επίπεδο μόνωσης (*BIL*, για τα 150 kV το *BIL* είναι 750 kV). Στα παρακάτω γραφήματα που δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του Excel έγιναν με τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τα χειροκίνητα τρεξίματα στο ATP-EMTP και έπειτα, με την βοήθεια του Excel έγινε η γραφική τους απεικόνιση.

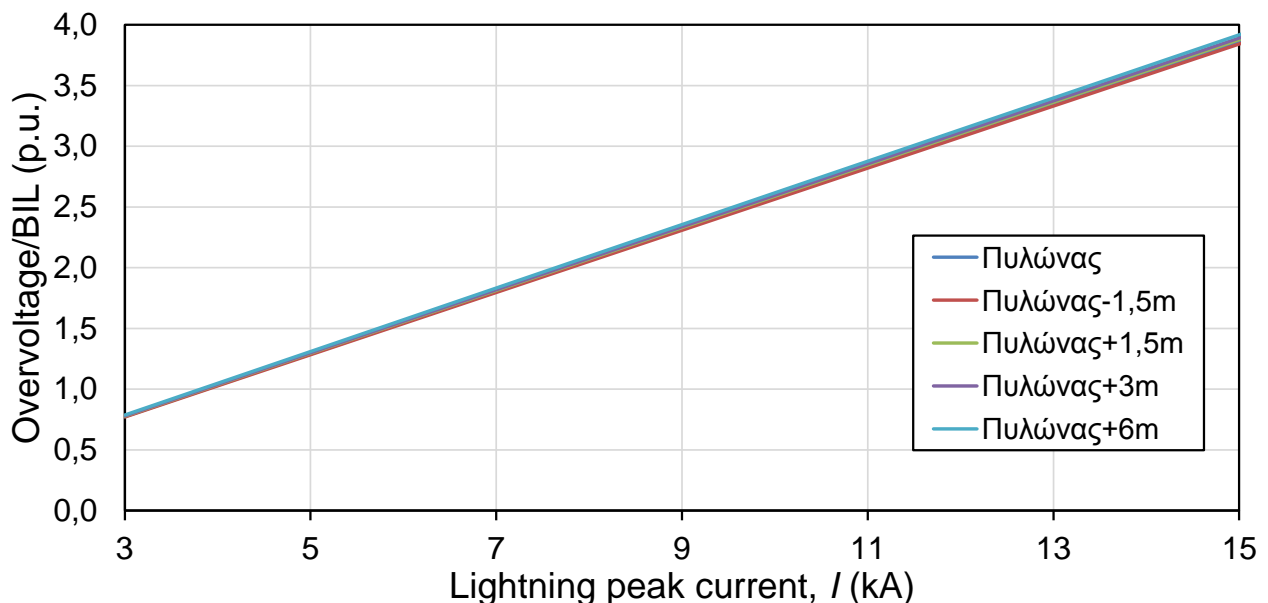
Στα σχήματα 5.2.2.1 έως 5.2.2.6 απεικονίζονται οι υπερτάσεις που καταπονούν την επάνω φάση (φάση Α) της ΓΜ. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, μεγαλύτερο ρόλο στις υπερτάσεις παίζει η παράμετρος η ειδική αντίσταση του εδάφους. Όσο περισσότερο αυξάνεται η ειδική αντίσταση, τόσο μειώνεται η υπέρταση, όπως αποτυπώνεται και στο πρώτο σχήμα (5.2.2.1) με την μέγιστη τιμή στα 10000 Ωm. Αυτό συμβαίνει γιατί η απόσβεση των οδοντών κυμάτων είναι μεγαλύτερη.

Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, όπου υπάρχει σταθερή τιμή ειδικής αντίστασης στα $\rho=100 \Omega\text{m}$, στην περίπτωση του ύψους πυλώνα και της απόστασης από το σημείο πλήγματος παρατηρείται μηδαμινή διαφορά στις υπερτάσεις που δημιουργούνται, με τη μεγαλύτερη στην περίπτωση του ύψους να δημιουργείται στο μέγιστο ύψος και στην περίπτωση της απόστασης του πλήγματος όπου διακρίνεται ελαφρώς ότι μεγαλύτερες υπερτάσεις υπάρχουν στο 25% απόστασης. Όσον αφορά τις παραμέτρους του κεραυνού, οι οποίες απεικονίζονται στα Σχήματα από 5.2.2.4 έως 5.2.2.6 παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις (διάρκεια

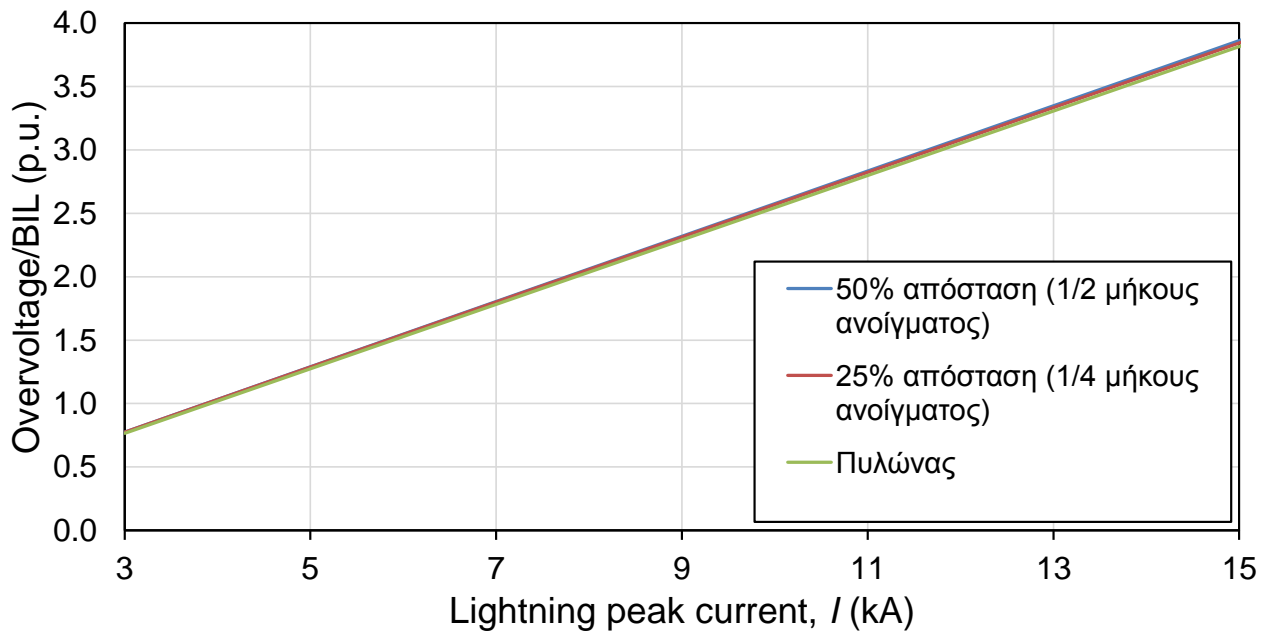
μετώπου (t_f), μέγιστη κλίση (S_m), διάρκεια ημίσεος εύρους (t_h)), παρατηρείται μηδαμινή μεταβολή στις υπερτάσεις συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς (50%).



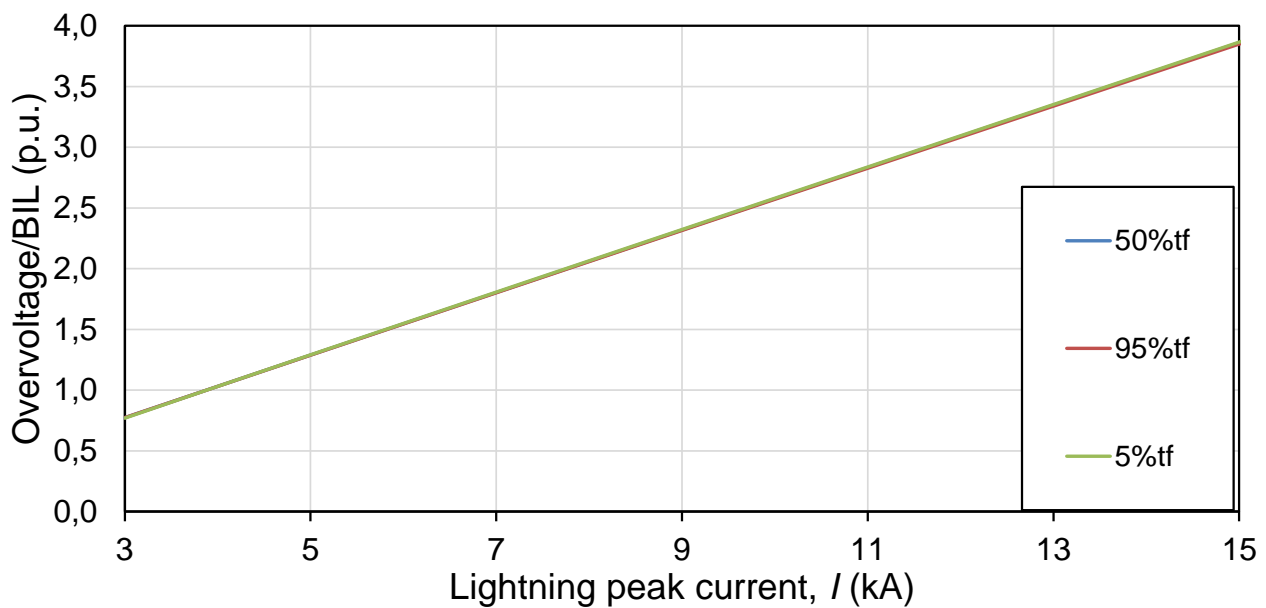
Σχήμα 5.2.2.1 Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: η ειδική αντίσταση εδάφους.



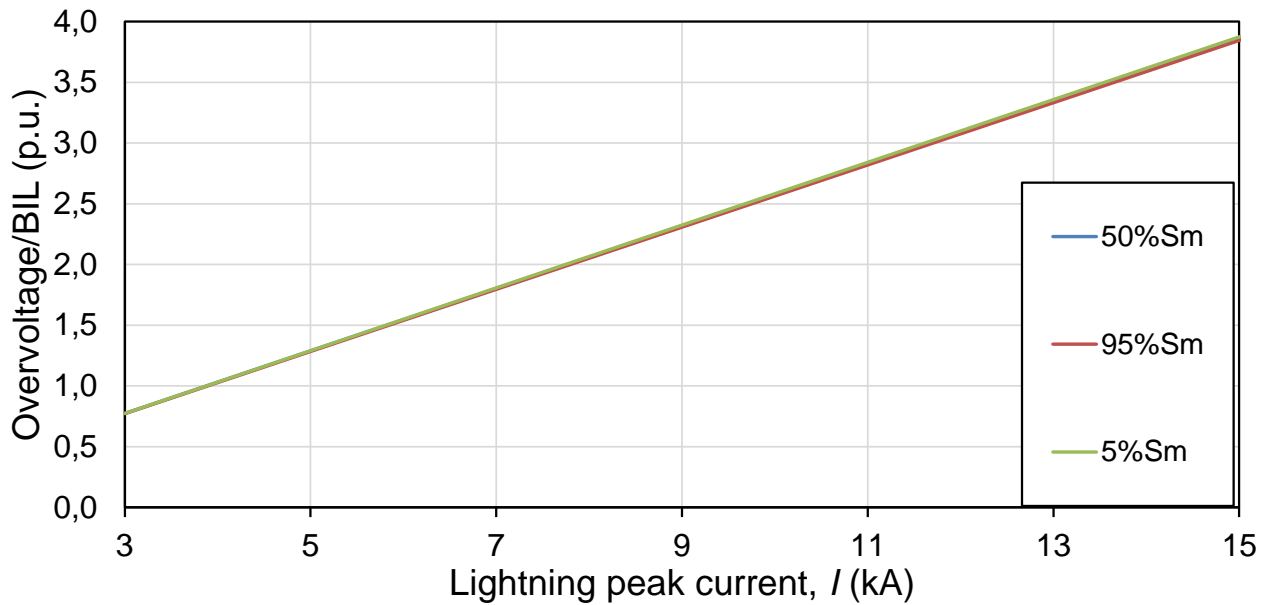
Σχήμα 5.2.2.2 Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: ύψος πυλώνα.



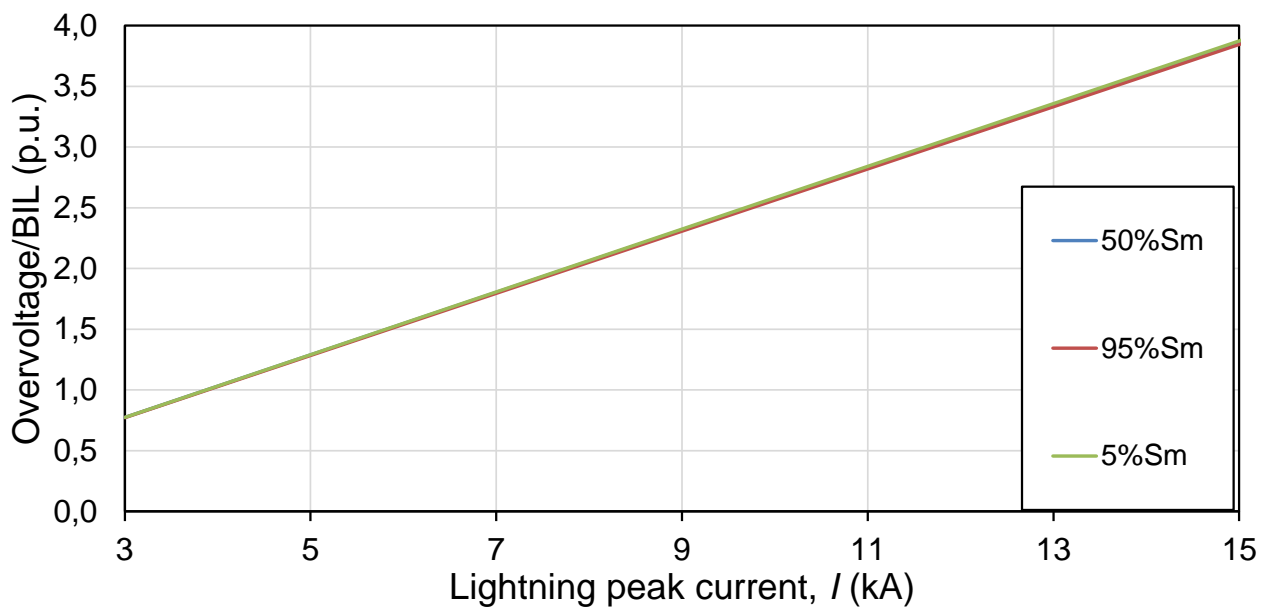
Σχήμα 5.2.2.3 Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: απόσταση πλήγματος.



Σχήμα 5.2.2.4 Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: διάρκεια μετώπου (t_f).



Σχήμα 5.2.2.5 Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: μέγιστη κλίση (S_m).



Σχήμα 5.2.2.6 Μεταβολή της μέγιστης τιμής της υπέρτασης που καταπονεί την επάνω φάση της ΓΜ των 150 kV με τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Παράμετρος επίδρασης: διάρκεια ημίσεος εύρους (t_b).

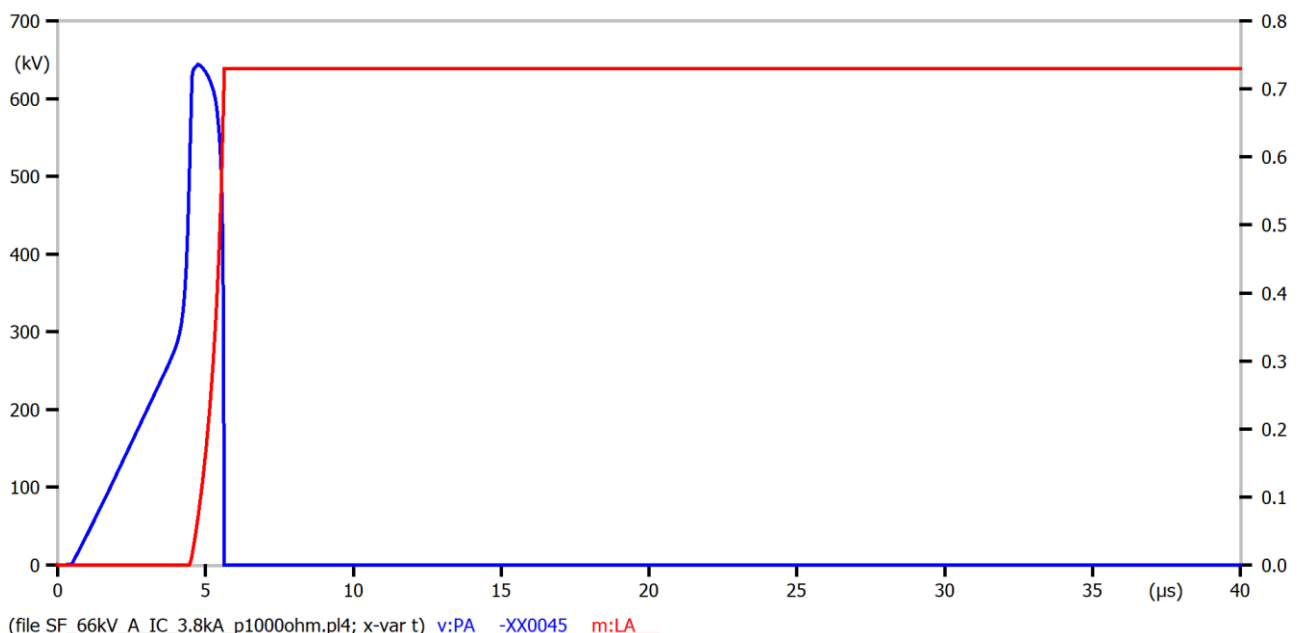
5.2.3 Κρίσιμο Κεραυνικό ρεύμα που προκαλεί Διάσπαση της Μόνωσης Εναέριων ΓΜ λόγω Κεραυνικού Πλήγματος στον Αγωγό Φάσης

5.2.3.1 Κυματομορφές Υπερτάσεων Κρίσιμης Διάσπασης

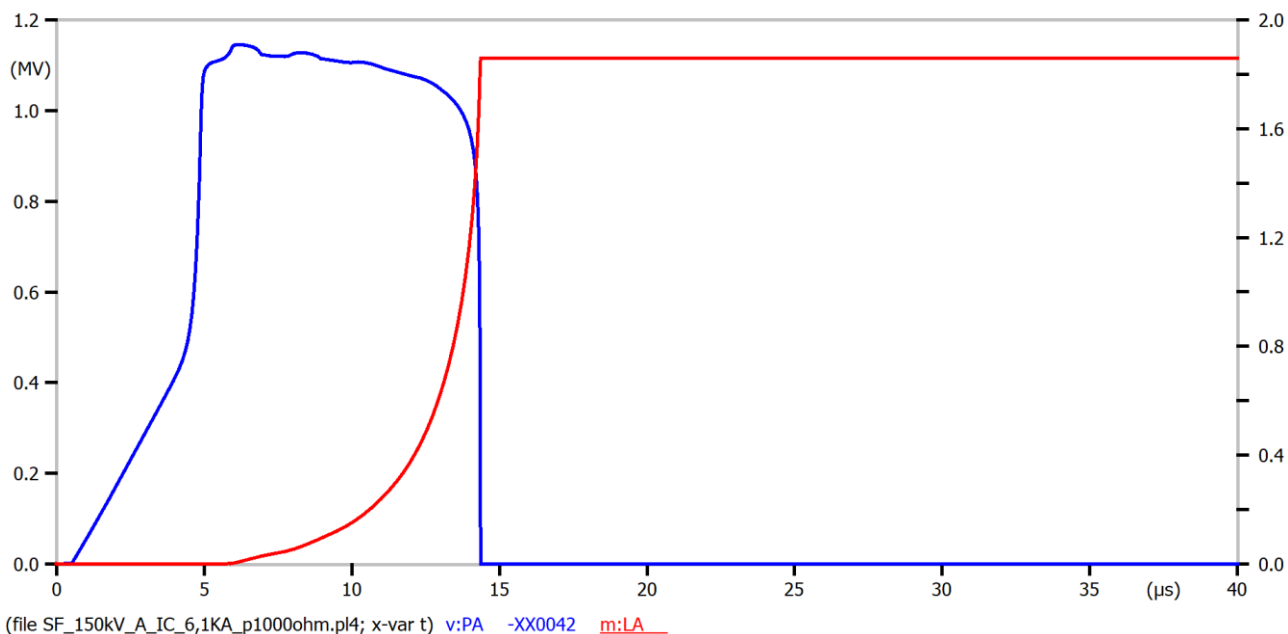
Στην υποενότητα αυτή θα γίνει γραφική απεικόνιση κάποιων κυματομορφών υπερτάσεων που αντιστοιχούν σε κρίσιμα ρεύματα λόγω κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης ή όπως λέγονται αλλιώς κρίσιμα ρεύμα σφάλματος θωράκισης. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι υπερτάσεις που αφορούν την ειδική αντίσταση του εδάφους στην τιμή των 100 Ωm. Επιλέχθηκε, επίσης, να αναπαρασταθεί η υπέρταση στην επάνω φάση Α της κάθε γραμμής όταν η εναλλασσόμενη τάση λειτουργίας βρίσκεται στις 90° , δηλαδή σε AC τάση ίση με 0. Στα Σχήματα 5.2.3.1 έως 5.2.3.4 εμπεριέχεται επιπλέον η μεταβολή του μήκους του λήντερ με τον χρόνο παράλληλα στον μονωτήρα της ΓΜ. Όταν ο λήντερ γίνει ίσος με το μήκος της μόνωσης τότε προκαλείται διάσπαση της μόνωσης της ΓΜ (επιφανειακή διάσπαση του μονωτήρα) και η τάση καταρρέει στο μηδέν. Αυτό αντιστοιχεί σε σφάλμα φάσης-γης για τη ΓΜ.

Τα σχήματα 5.2.1.1 έως 5.2.1.4 είναι τυπικά και αντίστοιχα σχήματα προκύπτουν για όλες τις περιπτώσεις. Είναι σημαντικό ότι αν αυξηθεί το ρεύμα του κεραυνού πάνω από το κρίσιμο τότε η διάσπαση συμβαίνει νωρίτερα χρονικά και με μεγάλη αύξηση του ρεύματος μπορεί να συμβεί στο μέτωπο της κυματομορφής, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της ανάστροφης διάσπασης (κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα).

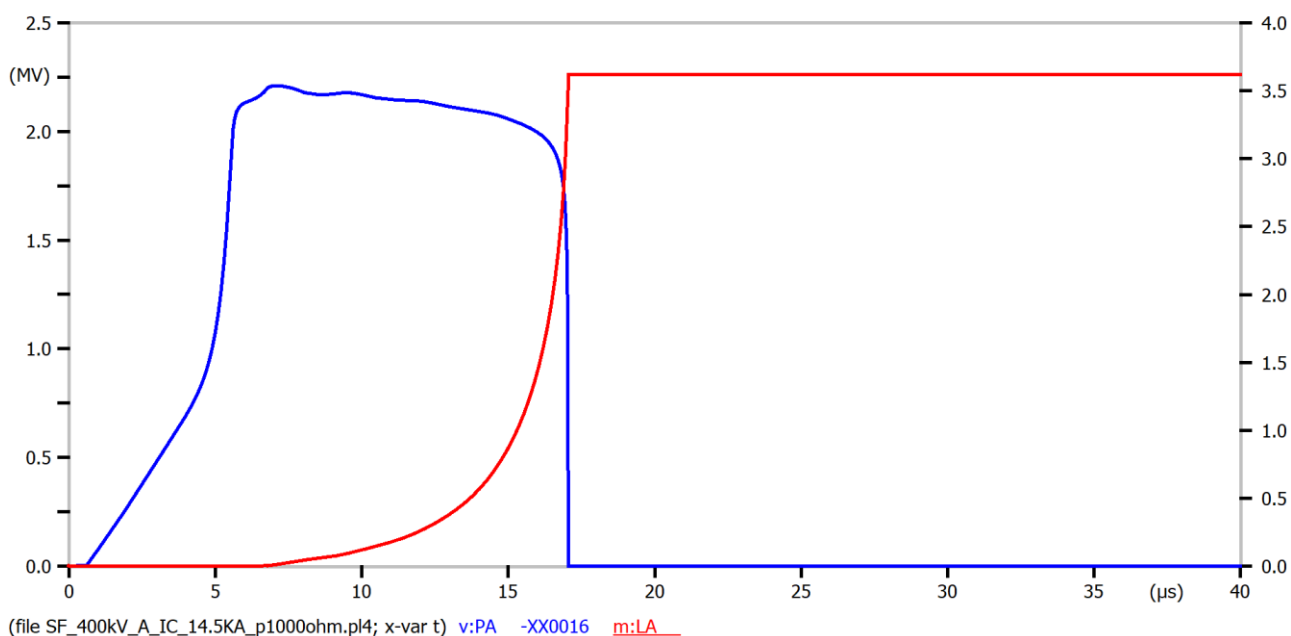
Στις παρακάτω περιπτώσεις προσομοιώθηκε και η γραμμή των 765 kV παρότι δεν αναμένονται κεραυνικά πλήγματα στις φάσης της, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα.



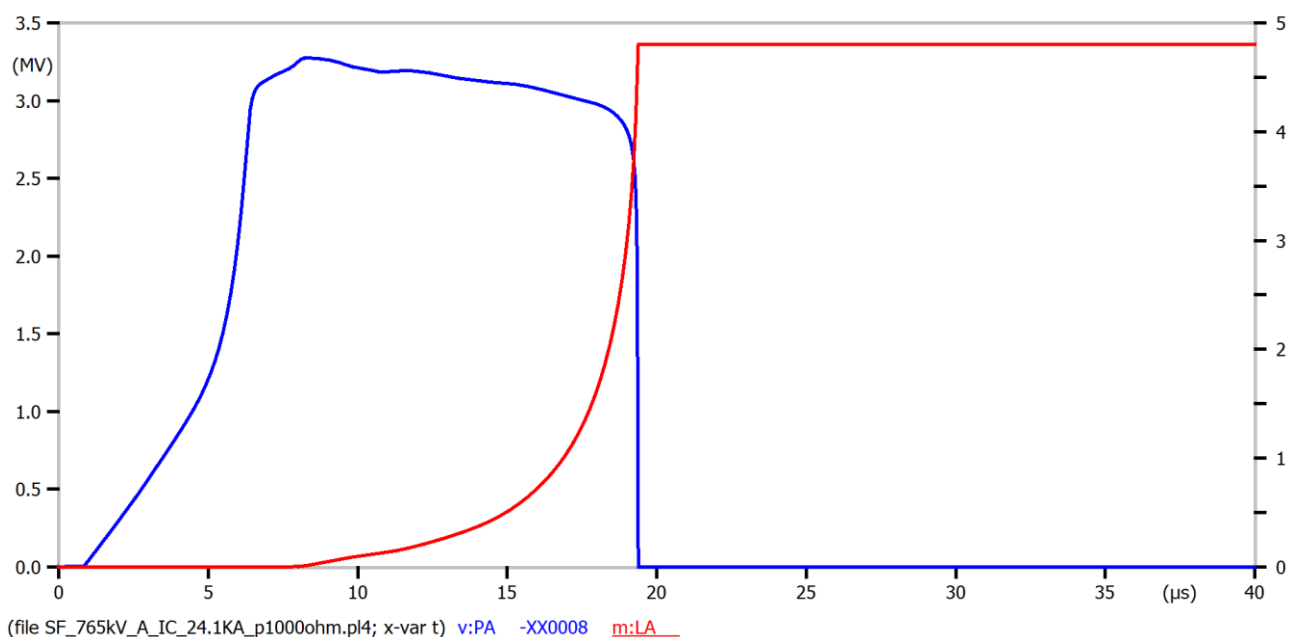
Σχήμα 5.2.3.1 Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 66 kV (επάνω φάση Α για γωνία φάσης 90°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -3,8 kA.



Σχήμα 5.2.3.2 Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 150 kV (επάνω φάση A για γωνία φάσης 90°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -6,1 kA.



Σχήμα 5.2.3.3 Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 400 kV (επάνω φάση A για γωνία φάσης 90°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -14,5 kA.

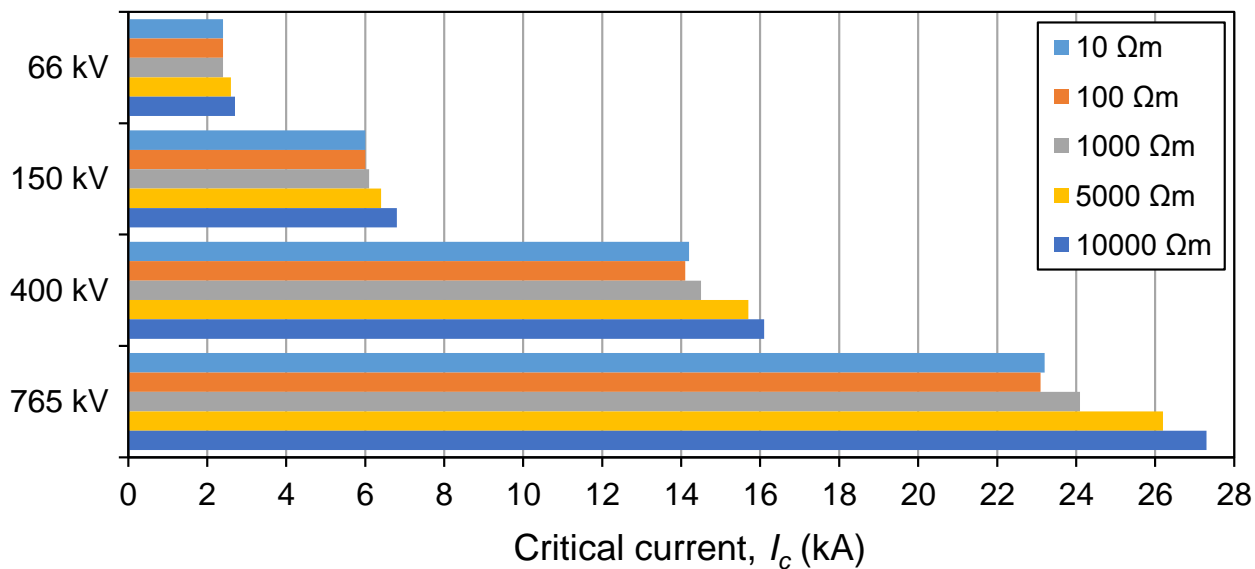


Σχήμα 5.2.3.4 Γραφική απεικόνιση της κυματομορφής της υπέρτασης για τη ΓΜ 765 kV (επάνω φάση A για γωνία φάσης 90°). Το κρίσιμο ρεύμα που δίνει διάσπαση είναι -24,1 kA.

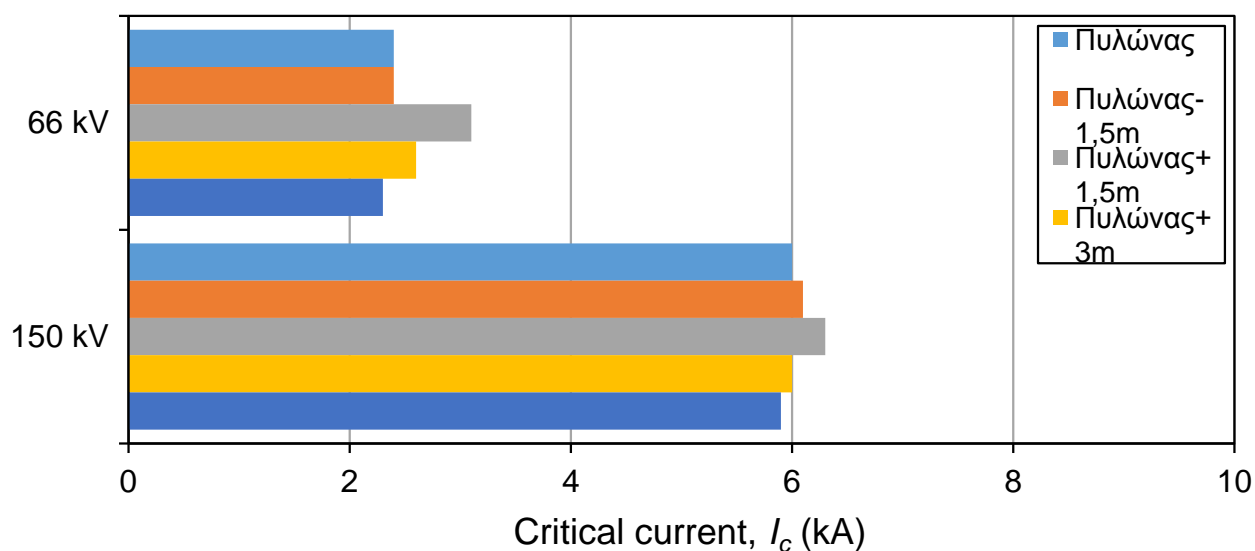
5.2.4 Ραβδογράμματα Κρίσιμων Ρευμάτων

Στην παρακάτω υποενότητα ακολουθεί η παρουσίαση ραβδογραμμάτων για τα κρίσιμα ρεύματα σε όλες τις ΓΜ που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα θα γίνει αναπαράσταση των κρίσιμων ρευμάτων που αφορούν την πάνω φάση των ΓΜ και πιο συγκεκριμένα για τις 90°, ώστε να γίνει αντιληπτό πιο εύκολα πόσο επηρεάζει η κάθε παράμετρος που αφορά τα ρεύματα αυτά στις ΓΜ.

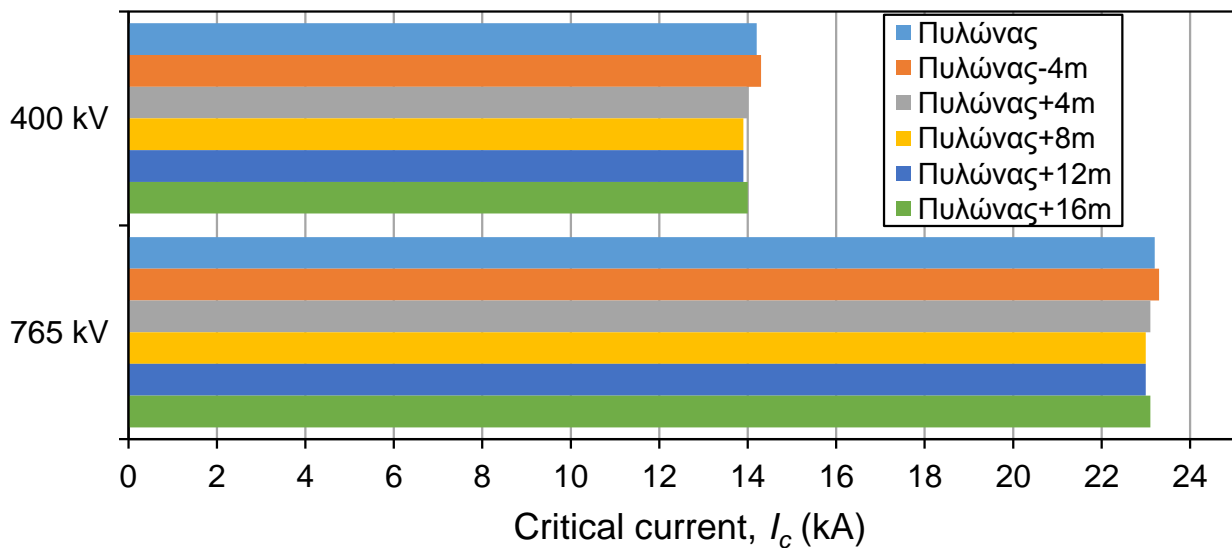
Από τα ραβδογραφήματα αυτά προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα, τα οποία είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των υπερτάσεων που συζητήθηκαν παραπάνω. Οι παράμετροι που επιδρούν σημαντικά στα κρίσιμα ρεύματα είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους και το μήκος της μόνωσης των γραμμών. Μικρότερη επίδραση διακρίνεται στις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος και στο ύψος του πυλώνα, ενώ η θέση του σημείου πλήγματος δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους οδηγεί σε αύξηση του κρίσιμου ρεύματος, το ίδιο και η μείωση του ύψους πυλώνα και η αύξηση του μήκους της μόνωσης.



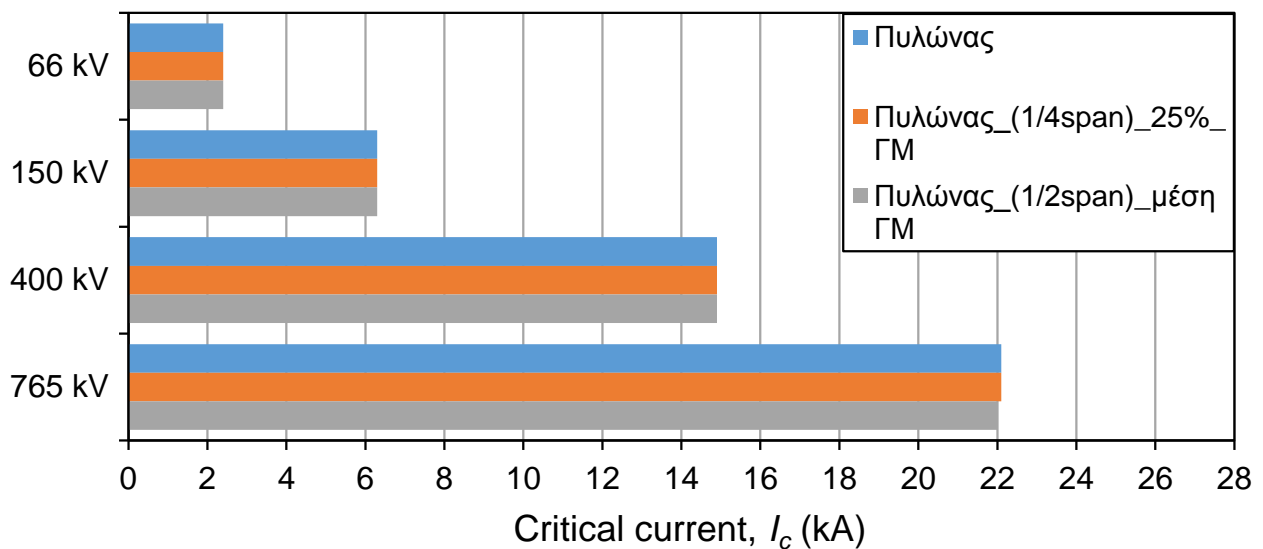
Σχήμα 5.2.4.1 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής την ειδική αντίσταση του εδάφους.



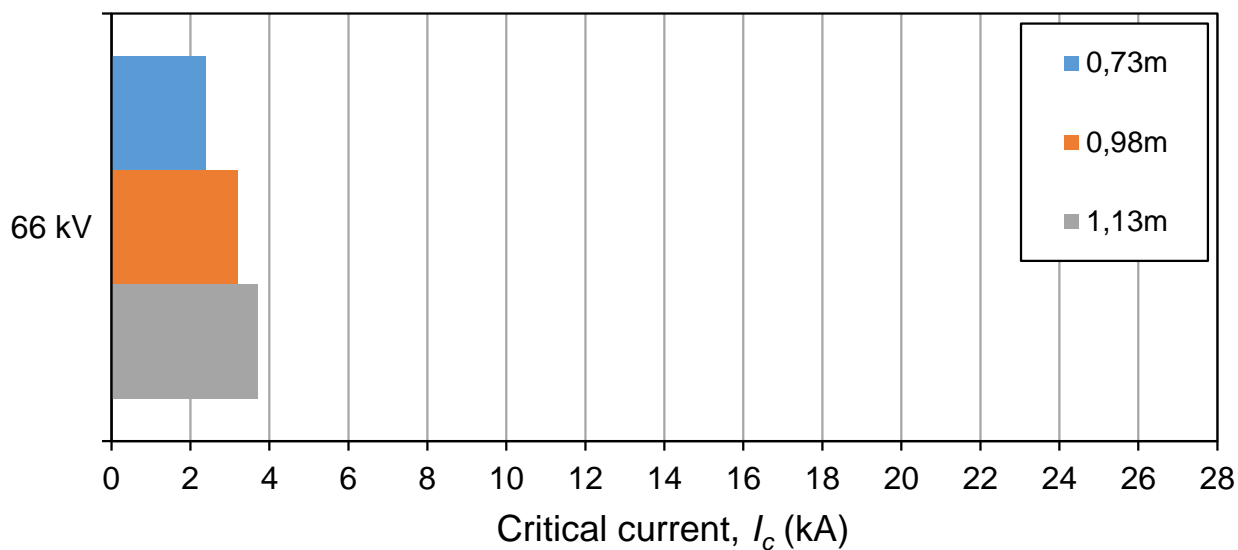
Σχήμα 5.2.4.2 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ των 66 kV και των 150 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το ύψος πυλώνα.



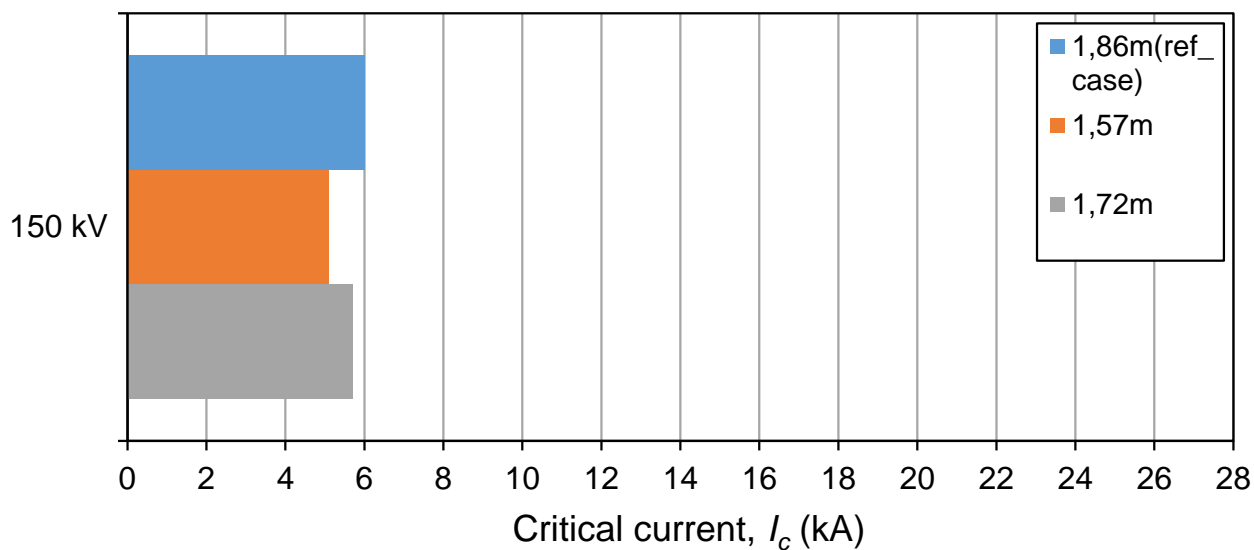
Σχήμα 5.2.4.3 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ των 400 kV και των 765 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το ύψος πυλώνα.



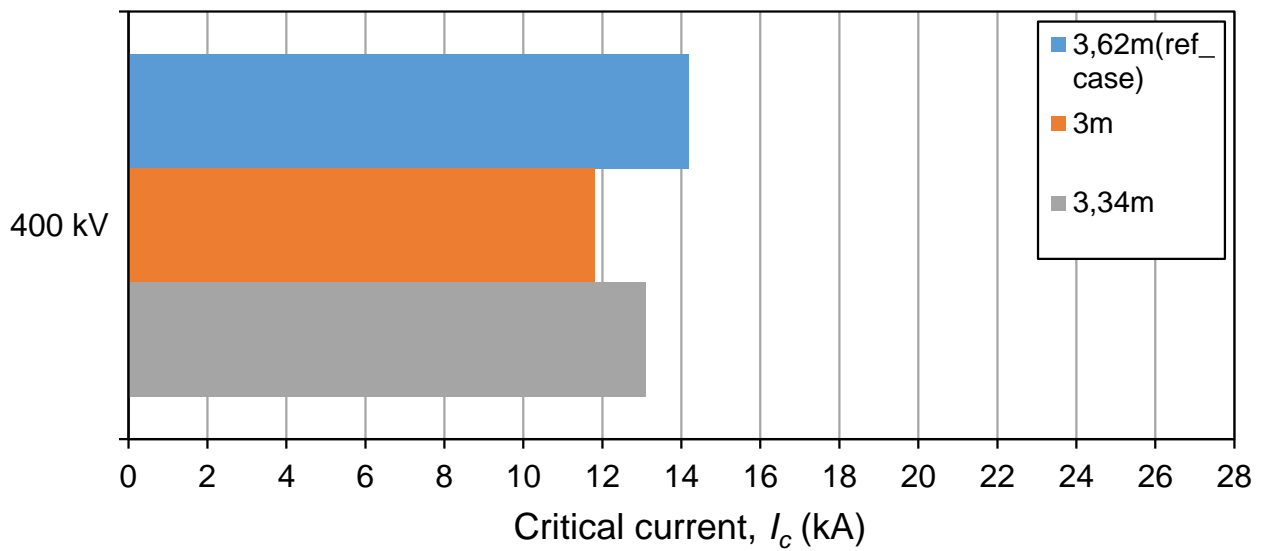
Σχήμα 5.2.4.4 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής την απόσταση πλήγματος.



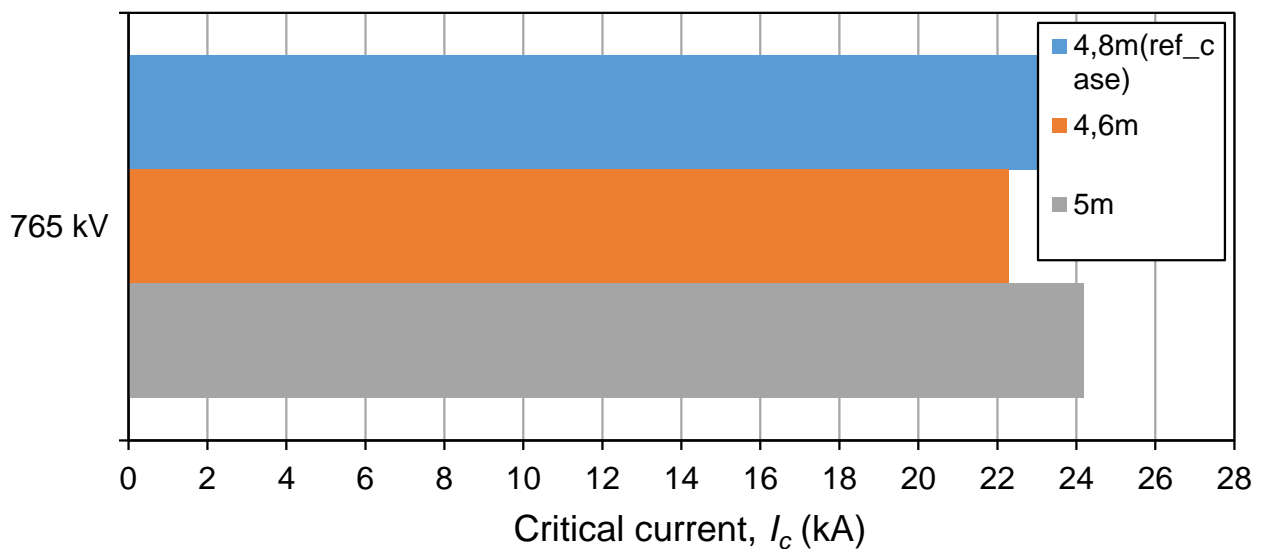
Σχήμα 5.2.4.5 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.



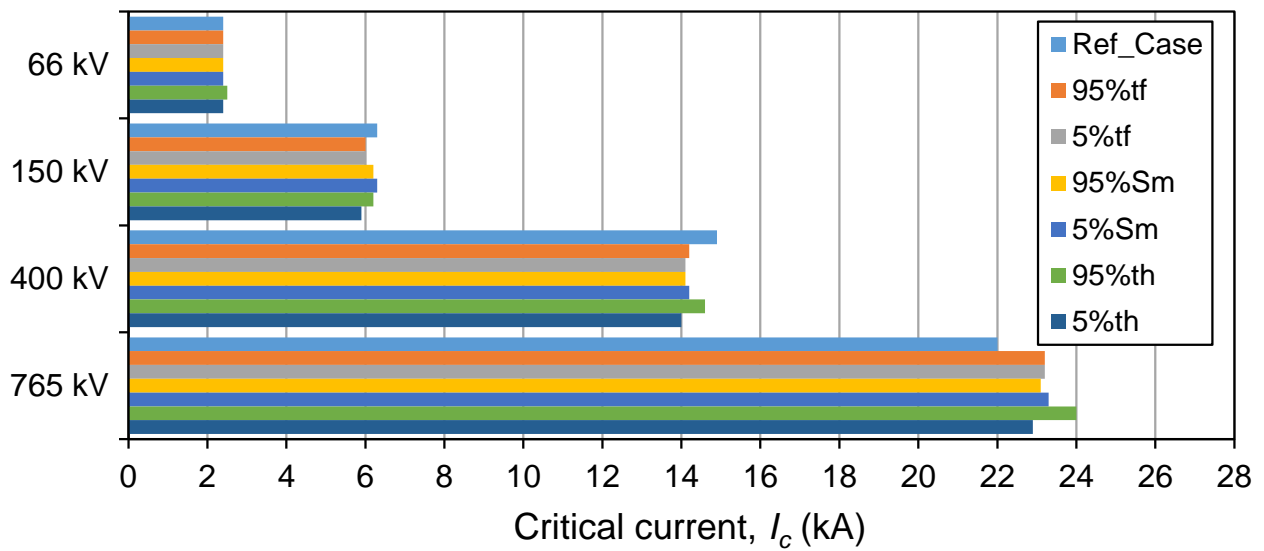
Σχήμα 5.2.4.6 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στην ΓΜ 150 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.



Σχήμα 5.2.4.7 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στην ΓΜ 400 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.



Σχήμα 5.2.4.8 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στην ΓΜ 765 kV για την επάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής το μήκος της μόνωσης.



Σχήμα 5.2.4.9 Ραβδόγραμμα κρίσιμου ρεύματος στις ΓΜ για την πάνω φάση στις 90° με παράγοντα επιρροής τις παραμέτρους του κεραυνού (διάρκεια μετώπου (t_f), μέγιστη κλίση (S_m), διάρκεια ημίσεως εύρους (t_h)).

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΓΜ), όταν αυτές πλήττονται από κεραυνούς. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διερεύνησης παραμέτρων των ΓΜ (αντίσταση γείωσης πυλώνων, ύψος πυλώνων, μήκος μόνωσης, τιμή εναλλασσόμενης τάσης τη στιγμή του κεραυνικού πλήγματος) και των κεραυνικών πληγμάτων (απόσταση σημείου πλήγματος από τον πυλώνα, παράμετροι κεραυνού) που μπορεί να επηρεάσουν τις υπερτάσεις που καταπονούν τον εκάστοτε μονωτήρα της ΓΜ και τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα τα οποία οδηγούν σε διάσπαση της μόνωσης των ΓΜ και προκαλούν διακοπές τροφοδοσίας και βλάβες στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η διερεύνηση έγινε μέσω προσομοιώσεων και με τον διαχωρισμό των περιπτώσεων σε πλήγματα που αφορούν τον αγωγό προστασίας των ΓΜ και σε πλήγματα στις φάσεις των ΓΜ. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των λογισμικών του ATP-EMTP και της MATLAB έγιναν προσομοιώσεις μέσω των οποίων μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τις τυπικές ΓΜ 66 kV, 150 kV, 400 kV και 765 kV διπλού κυκλώματος που μελετήθηκαν.

Για τα κεραυνικά πλήγματα στον αγωγό προστασίας και στην κορυφή του πυλώνα, ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει καθοριστικά τις υπερτάσεις που καταπονούν τη ΓΜ, και κατ' επέκταση τα κρίσιμα ρεύματα ανάστροφης διάσπασης, είναι η αντίσταση γείωσης. Αυτό συμβαίνει διότι διαμορφώνει την κυματομορφή και τη μέγιστη τιμή των υπερτάσεων μέσω των ανακλάσεων των οδοντών κυμάτων και του διαχωρισμού του κεραυνικού ρεύματος στις διάφορες διευθύνσεις. Η αύξηση της αντίστασης γείωσης οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης τιμής των υπερτάσεων και μείωση του κρίσιμου ρεύματος. Πολύ μεγάλη επίδραση έχει και η θέση του κεραυνικού πλήγματος στο άνοιγμα ανάμεσα σε δύο πυλώνες λόγω της αλλαγής του διαχωρισμού των ρευμάτων στις διάφορες διευθύνσεις (μείωση υπερτάσεων και αύξηση κρίσιμου ρεύματος με την αύξηση της απόστασης από τον πυλώνα). Αντίθετα, το ύψος του πυλώνα δεν επιδρά στα αποτελέσματα, όπως και η διάρκεια ημίσεως εύρους του κεραυνικού ρεύματος. Ωστόσο, κεραυνικά ρεύματα με μικρότερο μέτωπο και μεγαλύτερη κλίση οδηγούν σε μεγαλύτερες υπερτάσεις και μικρότερα κρίσιμα ρεύματα, χωρίς ωστόσο η επίδραση να είναι τόσο σημαντική όσο της αντίστασης γείωσης και της θέσης του κεραυνικού πλήγματος. Η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας των φάσεων της ΓΜ τη στιγμή του κεραυνικού πλήγματος επιδρά καθοριστικά καθώς σε αυτή υπερτίθενται οι υπερτάσεις. Τέλος, το μήκος της μόνωσης της ΓΜ επηρεάζει τα κρίσιμα ρεύματα αλλά όχι τις υπερτάσεις διότι αλλάζει το βασικό επίπεδο μόνωσης των ΓΜ και κατ' επέκταση την αντοχή τους στις κεραυνικές υπερτάσεις.

Οι τελευταίοι δύο παράγοντες επιδρούν σημαντικά και στην περίπτωση των κεραυνικών πληγμάτων στους αγωγούς φάσης (σφάλμα θωράκισης). Όσον αφορά τους υπόλοιπους παράγοντες επίδρασης, ο πιο σημαντικός είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους (μείωση υπερτάσεων και αύξηση κρίσιμου ρεύματος με την αύξησή της). Μικρότερη επίδραση βρέθηκε στις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος και στο ύψος του πυλώνα, ενώ η θέση του σημείου πλήγματος δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Οι παραπάνω παράγοντες που επιδρούν στα κρίσιμα ρεύματα ανάστροφης διάσπασης και σφάλματος θωράκισης θα επιδράσουν και στην εκτίμηση της κεραυνικής συμπεριφοράς των ΓΜ (συχνότητα σφαλμάτων ανά μονάδα μήκους της ΓΜ και ανά έτος). Για την ποσοτικοποίηση των επιδράσεων αυτών πρέπει να γίνει περαιτέρω έρευνα.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Βιβλιογραφία

- [1] CIGRE WG C4.301, "Use of surge arresters for lightning protection of transmission lines," Technical Brochure 440, Dec. 2010.
- [2] Canadian-American EMTP Users Group, *ATP Rule Book*. Portland, OR, USA, 1997.
- [3] H. W. Dommel, *Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*, Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.
- [4] Ζ. Δάτσιος, *Διερεύνηση του φαινομένου ιονισμού του εδάφους γύρω από συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης: Επίδραση στην κεραυνική συμπεριφορά εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας*, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2017.
- [5] CIGRE WG 33.01 "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," Technical Brochure 63, Oct. 1991.
- [6] ΓΜ 66 kV, Σύνδεσμος, Τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2022.
- [7] ΓΜ 765 kV, Σύνδεσμος, Τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2022
- [8] Δ. Καραμουσλής και Α. Αντώνιος, *Ανάπτυξη κώδικα στο περιβάλλον του MATLAB για την αυτόματη εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων με το λογισμικό ATP-EMTP με έμφαση σε προσομοιώσεις κεραυνικών πληγμάτων σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2022.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ