



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

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΚΡΙΣΙΜΩΝ
ΤΙΜΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ
ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΓΡΑΜΜΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΛΟΓΩ
ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΤΣΙΡΩΝΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ

Επιβλέπων: Δάτριος Ζαχαρίας

Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

ΚΟΖΑΝΗ/ΙΟΥΛΙΟΣ/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



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

ESTIMATION OF OVERVOLTAGES AND CRITICAL CURRENTS CAUSING INSULATION FLASHOVER IN OVERHEAD TRANSMISSION LINES DUE TO SUBSEQUENT LIGHTNING STRIKES

THESIS

TSIRONIS ANASTASIOS

SUPERVISOR: Datsios Zacharias

Adjunct Lecturer

KOZANI/JULY/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 "Εκτίμηση υπερτάσεων και κρίσιμων τιμών ρεύματος που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων" 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) Τσιρώνης Αναστάσιος, Δάτσιος Ζαχαρίας, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Τσιρώνης Αναστάσιος

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

Τα κεραυνικά πλήγματα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες αιτίες σφαλμάτων στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση κεραυνικών υπερτάσεων και κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων μέσω του λογισμικού ATP-EMTP σε γραμμές μεταφοράς διαφορετικών επιπέδων τάσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η διερεύνηση επικεντρώνεται στα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα. Αρχικά παρουσιάζονται οι επιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Κατόπιν γίνεται αναφορά στα πρώτα και τα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα και τα χαρακτηριστικά τους και παρουσιάζονται οι γραμμές μεταφοράς που πρόκειται να μελετηθούν. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά τους. Οι προσομοιώσεις αφορούν επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα στον πυλώνα και στον αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης). Υπολογίζονται οι υπερτάσεις που καταπονούν τους μονωτήρες και τα κρίσιμα (ελάχιστα) κεραυνικά ρεύματα που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης της κάθε γραμμής με παραμέτρους την αντίσταση γείωσης και τη μεταβολή της εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας.

Λέξεις Κλειδιά

Ανάστροφη Διάσπαση

Γραμμές Μεταφοράς

Επακόλουθα Κεραυνικά Πλήγματα

Κεραυνικές Υπερτάσεις

Σφάλμα Θωράκισης

Abstract

Lightning strikes are one of the major causes of overhead transmission lines faults to ground. The goal of this thesis is the estimation of the lightning overvoltages and the critical lightning flashover currents using ATP-EMTP software to perform simulations of several overhead lines of different AC voltage levels and characteristics. The focus is subsequent lightning strikes. Initially, the effects of lightning strikes on overhead lines are discussed. Then the basic characteristics of first and subsequent strikes are presented. The characteristics of the overhead lines under study are also given. Simulations were performed with ATP-EMTP software and simulation results are presented and discussed. Simulations refer to strikes to the tower and to the phase conductors; the latter is called a shielding failure. The lightning overvoltages stressing insulators are estimated together with the critical (minimum) lightning currents causing flashover. The parameters considered are the ground resistance of the overhead line towers and the AC voltage variation.

Keywords

Backflashover

Lightning Overvoltages

Overhead Lines

Shielding Failure

Subsequent strikes

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Δάτσιο Ζαχαρία για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, τους γονείς μου για κάθε οικονομική και ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχαν, αλλά και κάθε έναν ξεχωριστά από το συγγενικό μου περιβάλλον για τη συνεχή υποστήριξή τους καθόλη τη διάρκεια των ετών σπουδών μου.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη | 7 |
| Abstract | 8 |
| Ευχαριστίες | 9 |
| Περιεχόμενα | 11 |
| Κατάλογος Σχημάτων | 13 |
| Κατάλογος Πινάκων | 20 |
| Πρόλογος | 21 |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή | 23 |
| 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ | 23 |
| 1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ | 23 |
| Κεφάλαιο 2: Κεραυνικά πλήγματα σε Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας | 25 |
| 2.1 ΚΕΡΑΥΝΙΚΑ ΠΛΗΓΜΑΤΑ | 25 |
| 2.1.1 Άμεσα Κεραυνικά Πλήγματα | 25 |
| 2.1.2 Σφάλμα Θωράκισης (Shielding Failure) | 25 |
| 2.1.3 Πλήγμα στον Αγωγό Προστασίας | 26 |
| Κεφάλαιο 3: Επακόλουθα Κεραυνικά Πλήγματα | 29 |
| 3.1 ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ ΑΝΑ ΚΕΡΑΥΝΟ | 29 |
| 3.2 ΠΡΩΤΑ ΠΛΗΓΜΑΤΑ | 29 |
| 3.3 ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΑ ΠΛΗΓΜΑΤΑ | 32 |
| Κεφάλαιο 4: Γραμμές Μεταφοράς προς Διερεύνηση και Μοντελοποίηση στο ATP-EMTP | 35 |
| 4.1 ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΠΟ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ | 35 |
| 4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ATP-EMTP/ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB | 44 |
| 4.2.1 Μοντελοποίηση στο ATP-EMTP | 44 |
| 4.2.2 Κώδικας προσομοιώσεων Matlab | 47 |
| Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα και Συζήτηση | 49 |
| 5.1 ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΟ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟ ΠΛΗΓΜΑ ΣΤΟΝ ΠΥΛΩΝΑ | 49 |

| | |
|---|----|
| 5.1.1 Υπερτάσεις (Backflashover) | 50 |
| 5.1.2 Κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα (Backflashover) | 65 |
| 5.2 ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΟ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟ ΠΛΗΓΜΑ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΦΑΣΗΣ (ΣΦΑΛΜΑ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ) | 76 |
| 5.2.1 Υπερτάσεις (Σφάλμα Θωράκισης) | 76 |
| 5.2.2 Κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα (Σφάλμα Θωράκισης) | 85 |
| Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα | 91 |
| Βιβλιογραφία | 93 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 2.1: Πλήγμα στον επάνω αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης), και οδεύοντα κύματα κατά μήκος της γραμμής [2] | 26 |
| Σχήμα 2.2: Πλήγμα στον αγωγό προστασίας (ανάστροφη διάσπαση) και οδεύοντα κύματα κατά μήκος της γραμμής [2]. | 27 |
| Σχήμα 3.1: Κατηγορίες κεραυνών [1]. | 29 |
| Σχήμα 3.2: Αθροιστική κατανομή τιμών κορυφής αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών [1]. | 30 |
| Σχήμα 3.3: Αθροιστική κατανομή τιμών κορυφής αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών κατά το τεχνικό εγχειρίδιο της CIGRE [1]. | 31 |
| Σχήμα 3.4: Κυματομορφή μέσων κεραυνικών ρευμάτων για πρώτα πλήγματα [1]. | 31 |
| Σχήμα 3.5: Τυπική κυματομορφή πρώτου κεραυνικού πλήγματος [1]. | 32 |
| Σχήμα 3.6: Κυματομορφή μέσων κεραυνικών ρευμάτων επακόλουθων πληγμάτων [1]. | 33 |
| Σχήμα 4.1: Τύποι πυλώνων εναέριων γραμμών μεταφοράς που μελετήθηκαν 1/2 [2]. | 36 |
| Σχήμα 4.2: Τύποι πυλώνων εναέριων γραμμών μεταφοράς που μελετήθηκαν 2/2 [2]. | 37 |
| Σχήμα 4.3: Περιβάλλον λογισμικού ATP-EMTP προσομοίωσης ΓΜ 150 kV με πλήγμα στον αγωγό προστασίας για υπολογισμό υπερτάσεων. | 45 |
| Σχήμα 4.4: Περιβάλλον λογισμικού ATP-EMTP προσομοίωσης ΓΜ 150 kV με πλήγμα στον αγωγό προστασίας για υπολογισμό κρίσιμων ρευμάτων. | 45 |
| Σχήμα 4.5: Αρχείο αποτελεσμάτων του κώδικα Matlab/Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα (backflashover - ΓΜ διπλού κυκλώματος). | 48 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 4.6: Αρχείο αποτελεσμάτων excel του κώδικα Matlab/Υπερτάσεις. | 48 |
| Σχήμα 5.1: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης(10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓM 66 kV μονού κυκλώματος(SC). | 50 |
| Σχήμα 5.2: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓM 66 kV μονού κυκλώματος(SC). | 50 |
| Σχήμα 5.3: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης(10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓM 66 kV διπλού κυκλώματος(DC). | 51 |
| Σχήμα 5.4: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓM 66 kV διπλού κυκλώματος(DC). | 51 |
| Σχήμα 5.5: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης(3, 10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓM 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη. | 52 |
| Σχήμα 5.6: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓM 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη. | 52 |
| Σχήμα 5.7: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓM 150 kV μονού κυκλώματος (SC). | 53 |
| Σχήμα 5.8: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓM 150 kV μονού κυκλώματος(SC). | 53 |
| Σχήμα 5.9: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (7, 10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓM 150 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 54 |
| Σχήμα 5.10: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓM 150 kV διπλού κυκλώματος(DC). | 54 |
| Σχήμα 5.11: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (17, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓM 220 kV μονού κυκλώματος (SC). | 55 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 5.12: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 220 kV μονού κυκλώματος (SC). | 55 |
| Σχήμα 5.13: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (7, 10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 220 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 56 |
| Σχήμα 5.14: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 220 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 56 |
| Σχήμα 5.15: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (22, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 275 kV μονού κυκλώματος (SC). | 57 |
| Σχήμα 5.16: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 275 kV μονού κυκλώματος (SC). | 57 |
| Σχήμα 5.17: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (14, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 275 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 58 |
| Σχήμα 5.18: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 275 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 58 |
| Σχήμα 5.19: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (22, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC). | 59 |
| Σχήμα 5.20: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC). | 59 |
| Σχήμα 5.21: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (17, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 400 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 60 |
| Σχήμα 5.22: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 400 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 60 |
| Σχήμα 5.23: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 500 kV μονού κυκλώματος (SC). | 61 |

Σχήμα 5.24: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 500 kV μονού κυκλώματος (SC). 61

Σχήμα 5.25: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (16, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 500 kV διπλού κυκλώματος (DC). 62

Σχήμα 5.26: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 500 kV διπλού κυκλώματος (DC). 62

Σχήμα 5.27: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC). 63

Σχήμα 5.28: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC). 63

Σχήμα 5.29: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 765 kV διπλού κυκλώματος (DC). 64

Σχήμα 5.30: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 765 kV διπλού κυκλώματος (DC). 64

Σχήμα 5.31: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 66 kV, μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 34.4 kA. 65

Σχήμα 5.32: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 66 kV, διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 22.8 kA. 66

Σχήμα 5.33: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 275 kV, μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 109.4 kA. 66

Σχήμα 5.34: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 400 kV, μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 131.6 kA. 67

| | |
|--|----|
| Σχήμα 5.35: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 400 kV, διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 118.7 kA. | 67 |
| Σχήμα 5.36: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 500 kV, διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 105.7 kA. | 68 |
| Σχήμα 5.37: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 735 kV, μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 126.2 kA. | 68 |
| Σχήμα 5.38: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 765 kV, διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 116.1 kA. | 69 |
| Σχήμα 5.39: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της AC τάσης των φάσεων A, B, C της ΓΜ ως προς τη γωνία φάσης. | 69 |
| Σχήμα 5.40: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσεως της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC). | 70 |
| Σχήμα 5.41: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσεως της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 66 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 70 |
| Σχήμα 5.42: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσεως της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη. | 71 |
| Σχήμα 5.43: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσεως της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 150 kV μονού κυκλώματος (SC). | 71 |
| Σχήμα 5.44: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσεως της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 150 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 72 |
| Σχήμα 5.45: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσεως της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC). | 72 |
| Σχήμα 5.46: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσεως της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 400 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 73 |
| Σχήμα 5.47: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσεως της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 765 kV διπλού κυκλώματος (DC). | 73 |
| Σχήμα 5.48α: Ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα ανά ΓΜ (66, 150, 220, 275 kV) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, μονού κυκλώματος (SC). | 74 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 5.48β: Ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα ανά ΓΜ (400, 500, 735 kV) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, μονού κυκλώματος (SC). | 75 |
| Σχήμα 5.49α: Ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα ανά ΓΜ (66, 110, 150, 220 kV) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, διπλού κυκλώματος (DC). | 75 |
| Σχήμα 5.49β: Ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα ανά ΓΜ (275, 400, 500, 765 kV) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, διπλού κυκλώματος (DC). | 76 |
| Σχήμα 5.50: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC). | 77 |
| Σχήμα 5.51: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC). | 78 |
| Σχήμα 5.52: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη. | 78 |
| Σχήμα 5.53: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη. | 79 |
| Σχήμα 5.54: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA, ΓΜ 150 kV διπλού και μονού κυκλώματος. | 79 |
| Σχήμα 5.55: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, ΓΜ 150 kV διπλού και μονού κυκλώματος. | 80 |
| Σχήμα 5.56: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA, ΓΜ 220 kV διπλού και μονού κυκλώματος. | 80 |
| Σχήμα 5.57: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, ΓΜ 220 kV διπλού και μονού κυκλώματος. | 81 |
| Σχήμα 5.58: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA, ΓΜ 220 kV διπλού και μονού κυκλώματος. | 81 |
| Σχήμα 5.59: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, ΓΜ 275 kV διπλού και μονού κυκλώματος. | 82 |
| Σχήμα 5.60: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC). | 82 |
| Σχήμα 5.61: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεως του ρεύματος, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC). | 83 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 5.62: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 500 kV μονού κυκλώματος (SC). | 83 |
| Σχήμα 5.63: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεϊ του ρεύματος, ΓΜ 500 kV μονού κυκλώματος (SC). | 84 |
| Σχήμα 5.64: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC). | 84 |
| Σχήμα 5.65: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεϊ του ρεύματος, ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC). | 85 |
| Σχήμα 5.66: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 66 kV διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 2.5 kA. | 86 |
| Σχήμα 5.67: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 2.5 kA. | 86 |
| Σχήμα 5.68: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη, κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 4.4 kA. | 87 |
| Σχήμα 5.69: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 150 kV διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 6.2 kA. | 87 |
| Σχήμα 5.70: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 150 kV μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 6.5 kA. | 88 |
| Σχήμα 5.71: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 400 kV διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 14.6 kA. | 88 |
| Σχήμα 5.72: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 15.5 kA. | 89 |
| Σχήμα 5.73: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 765 kV διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 24.1 kA. | 89 |
| Σχήμα 5.74: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 23 kA. | 90 |
| Σχήμα 5.75: Ραβδόγραμμα ελάχιστων κεραυνικών ρευμάτων διπλού και μονού κυκλώματος για όλες τις ΓΜ σε περίπτωση επακόλουθου κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης. | 90 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 3.1: Παράμετροι λογαριθμικής κανονικής κατανομής κατά CIGRE [1]. | 30 |
| Πίνακας 3.2: Διάρκεια μετώπου επακόλουθων πληγμάτων [1]. | 33 |
| Πίνακας 3.3: Μέγιστη κλίση επακόλουθων πληγμάτων [1]. | 34 |
| Πίνακας 3.4: Διάρκεια ημίσεος εύρους πρώτων και επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων [1]. | 34 |
| Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των υπό μελέτη εναέριων ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας 1/2 [2]. | 38 |
| Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά των υπό μελέτη εναέριων ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας 2/2 [2]. | 39 |

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων σε πολλαπλά επίπεδα τάσης λειτουργίας γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των γραμμών αυτών, προσδιορίζοντας τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις και τα κεραυνικά ρεύματα που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης των γραμμών μεταφοράς. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας μοντελοποιημένες γραμμές μεταφοράς με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP και κώδικα ανεπτυγμένου στο MATLAB για την εν μέρει αυτοματοποίηση των προσομοιώσεων. Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας, η οποία σχετίζεται με τον γενικότερο επιστημονικό αντικείμενο των Υψηλών Τάσεων, πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΤΗΜΜΥ) του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας (ΠΔΜ), στην Κοζάνη.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη εισαγωγή του θέματος της διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε, καθώς επίσης και αναφορά στο σκοπό της και το πρόβλημα που θεραπεύει.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Στα πλαίσια εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η καινοτόμος μελέτη των επακόλουθων κεραυνικών πλήγμάτων ως αίτιο σφαλμάτων στις εναέριες Γραμμές Μεταφοράς (ΓΜ) ηλεκτρικής ενέργειας, Υψηλής Τάσης (ΥΤ), διπλού και μονού κυκλώματος. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα τόσο στον αγωγό φάσης, όσο και στον αγωγό προστασίας. Με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων ATP-EMTP, ελήφθησαν και αναλύθηκαν οι υπερτάσεις που προκαλούνται από τα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα, μέσω των οποίων προκαλείται ενδεχομένως διάσπαση στις ΓΜ. Η διάσπαση ισοδυναμεί συνήθως με σφάλμα φάσης-γης στις ΓΜ. Οι προσομοιώσεις έγιναν σε παραπάνω από μία κατηγορία ΓΜ. Τα επίπεδα τάσης λειτουργίας που μελετήθηκαν είναι: 66 kV, 110 kV, 150 kV, 220 kV, 275 kV, 400 kV, 500 kV, 735 kV, 765 kV. Αυτά καλύπτουν πρακτικά τα πιο συνηθισμένα συστήματα που απαντώνται παγκοσμίως.

Μέσω της παρούσας εργασίας λοιπόν, δίνεται έμφαση στα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα ως παράγοντα σφάλματος θωράκισης των ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων των συγκεκριμένων φαινομένων, καθώς επίσης και την ασφαλέστερη διαφύλαξη του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τα κατάλληλα μέτρα προστασίας. Τελικός στόχος είναι η αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής

Εν ολίγοις, η διπλωματική εργασία στοχεύει στην εκτίμηση και ανάλυση των υπερτάσεων που προκαλούνται από επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα και την εκτίμηση των ελάχιστων (κρίσιμων) επακόλουθων κεραυνικών ρευμάτων, τα οποία οδηγούν σε διάσπαση της μόνωσης στις ΓΜ. Η διερεύνηση αφορά ΓΜ διπλού και μονού κυκλώματος από 66 kV έως 765 kV. Οι γεωμετρίες είναι τυπικές και απαντώνται συχνά ώστε να εξαχθούν κατά το δυνατόν γενικά συμπεράσματα.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 2: Κεραυνικά Πλήγματα Σε Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο πώς συμπεριφέρονται οι ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση κεραυνικών πληγμάτων. Οι πληροφορίες για τα κεραυνικά πλήγματα και για τη συμπεριφορά των εναέριων ΓΜ αντλούνται από τις αναφορές [1], [2].

2.1 Κεραυνικά πλήγματα

Τα κεραυνικά πλήγματα όπως αναφέρθηκε, είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες σφαλμάτων στις ΓΜ με πολλές φορές καταστροφικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του υλικού εξοπλισμού των ΓΜ, με επακόλουθο την οικονομική ζημία. Μεταξύ των έμμεσων και άμεσων κεραυνικών πληγμάτων, απασχολούν ιδιαίτερα τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα, καθώς στις εναέριες ΓΜ που διερευνώνται, το βασικό επίπεδο μόνωσης BIL (Basic Insulation Level) δεν επιτρέπει στις επαγόμενες υπερτάσεις λόγω έμμεσων κεραυνικών πληγμάτων να επηρεάσουν τις ΓΜ. Οι επαγόμενες υπερτάσεις είναι επικίνδυνες για εναέριες γραμμές μέσης τάσης και χαμηλής τάσης όπου τα μήκη των μονώσεων είναι μικρά.

2.1.1 Άμεσα κεραυνικά πλήγματα

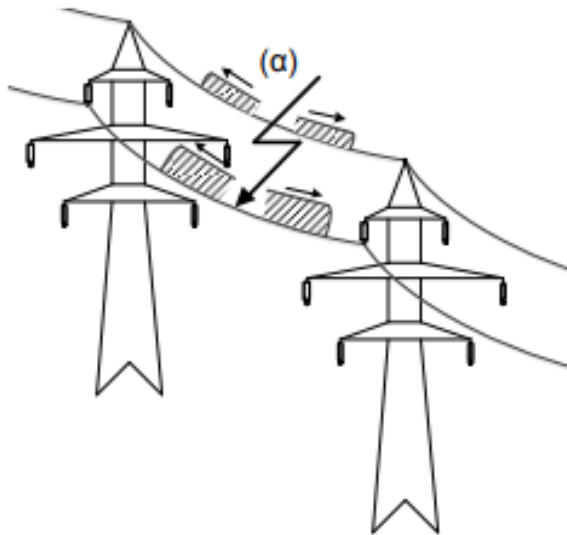
Τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα προκαλούν υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου (fast-front overvoltages), οι οποίες είναι υπεύθυνες για καταστροφή ή υπολειτουργία εξοπλισμού, καθώς επίσης και διακοπές ηλεκτροδότησης. Τα συγκεκριμένα κεραυνικά πλήγματα στις εναέριες ΓΜ καταλήγουν είτε στον αγωγό φάσης, είτε στον αγωγό προστασίας, είτε στον πυλώνα. Στην περίπτωση που καταλήξει στον αγωγό φάσης λέμε ότι έχουμε σφάλμα θωράκισης (shielding failure). Αυτό γιατί ο αγωγός προστασίας (θωράκισης) εγκαθίσταται για να προστατεύσει τις γραμμές μεταφοράς από κεραυνικά πλήγματα στις φάσεις.

2.1.2 Σφάλμα θωράκισης (Shielding failure)

Όταν ο αγωγός φάσης πλήττεται από έναν κεραυνό (Σχήμα 2.1), παρατηρείται η δημιουργία οδευόντων κυμάτων κατά μήκος της διεύθυνσης του αγωγού, όπως επίσης και επαγόμενα κύματα στους υπόλοιπους αγωγούς φάσης ή προστασίας. Όσο αυξάνεται η απόσταση από τη θέση πλήγματος πραγματοποιείται σταδιακή απόσβεση των κυμάτων αυτών, λόγω των απωλειών κατά μήκος της γραμμής, αλλά και του φαινομένου κορώνα. Ως εκ τούτου, η μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων παρατηρείται στους εγγύτερους πυλώνες από το σημείο πλήγματος. Στην περίπτωση όπου οι

προαναφερθείσες υπερτάσεις υπερβούν τη διηλεκτρική αντοχή κάποιου μονωτήρα, τότε συμβαίνει το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάσπασης (flashover), κατά το οποίο δημιουργείται αρχικά σπινθήρας και στη συνέχεια ηλεκτρικό τόξο από τον αγωγό φάσης προς τον πυλώνα (βραχυκύκλωμα φάσης-γης). Ο πυλώνας είναι γειωμένος και έχει μηδενικό δυναμικό, συνεπώς οι παράγοντες που επηρεάζουν το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι οι εξής:

- Η κυματομορφή και το εύρος (μέγιστο ρεύμα) του κεραυνού.
- Η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης του αγωγού φάσης κατά το πλήγμα, καθώς αυτή παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια του φαινομένου.
- Τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής.



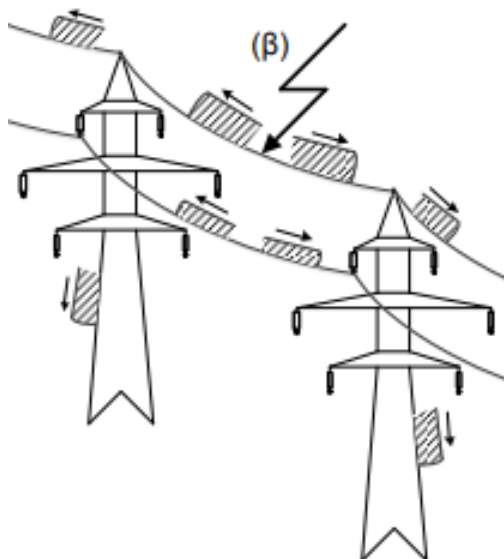
Σχήμα 2.1: (α) Πλήγμα στον επάνω αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης), και οδεύοντα κύματα κατά μήκος της γραμμής [2].

2.1.3 Πλήγμα στον αγωγό προστασίας

Όταν παρατηρείται πλήγμα στον αγωγό προστασίας μιας ΓΜ, συμβαίνει διαμοιρασμός του κεραυνικού ρεύματος σε οδεύοντα κύματα κατά μήκος του αγωγού προστασίας, αλλά και επαγόμενα κύματα στους πλησιέστερους αγωγούς φάσης. Το μεγαλύτερο μέρος του κεραυνικού ρεύματος οδηγείται στη γη από τους εγγύτερους πυλώνες, όπου κατά συνέπεια παρατηρείται και η εντονότερη καταπόνηση των μονωτήρων. Όπως και στην περίπτωση πλήγματος στον αγωγό φάσης, όσο αυξάνεται η απόσταση από το σημείο πλήγματος τα προαναφερθέντα κύματα αποσβένονται. Εάν οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις ξεπεράσουν τη διηλεκτρική αντοχή των μονωτήρων, τότε παρατηρείται το φαινόμενο

της ανάστροφης ηλεκτρικής διάσπασης (backflashover), δηλαδή διάσπαση από τον πυλώνα προς τον αγωγό φάσης. Αξίζει να σημειωθεί η πολυπλοκότητα της συγκεκριμένης περίπτωσης κεραυνικού πλήγματος, λόγω των διακλαδώσεων που συναντώνται (αγωγός φάσης-πυλώνας, πυλώνας-αγωγός φάσης) και των σημείων ασυνέχειας (σύστημα γείωσης των πυλώνων), όπου δημιουργούνται ανακλώμενα κύματα στον αγωγό όπου όδευε αρχικά το προσπίπτον κύμα πριν τη διακλάδωση. Επιπρόσθετα λοιπόν, ένας σημαντικός παράγοντας επίδρασης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η κρουστική συμπεριφορά του συστήματος γείωσης, καθώς ευθύνεται για τη διαμόρφωση του ανακλώμενου κύματος από το σύστημα γείωσης προς την κορυφή του πυλώνα. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες επίδρασης στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό προστασίας (ή στον πυλώνα) είναι οι εξής:

- Η κυματομορφή και το εύρος (μέγιστο ρεύμα) του κεραυνού.
- Τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής.
- Η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης του αγωγού φάσης κατά το πλήγμα, καθώς και στην περίπτωση αυτή παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια του φαινομένου.
- Η κρουστική συμπεριφορά του συστήματος γείωσης του πυλώνα που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.
- Το σημείο πλήγματος του κεραυνού (ο διαμοιρασμός του κεραυνικού ρεύματος διαφέρει αναλόγως της θέσης του πλήγματος, στον πυλώνα ή τον αγωγό προστασίας).



Σχήμα 2.2: (β) Πλήγμα στον αγωγό προστασίας (ανάστροφη διάσπαση) και οδεύοντα κύματα κατά μήκος της γραμμής [2].

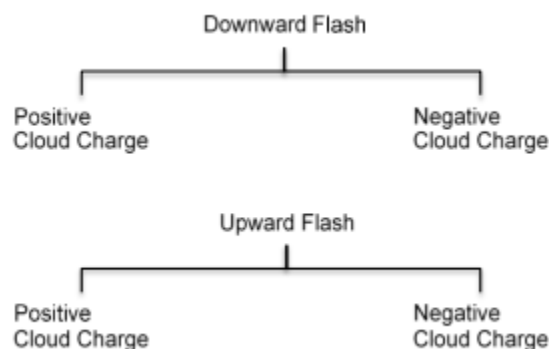
ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 3: Επακόλουθα Κεραυνικά Πλήγματα

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά και τη συχνότητα των πρώτων και των επακόλουθων κεραυνικών πλήγμάτων. Τα στατιστικά στοιχεία και τα γραφήματα προκύπτουν από την αναφορά [1].

3.1 Αριθμός πλήγμάτων ανά κεραυνό

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες κεραυνών: κατερχόμενοι και ανερχόμενοι (Σχήμα 3.1, αρνητικοί ή θετικοί, ανάλογα με το φορτίο του σύννεφου).



Σχήμα 3.1: Κατηγορίες κεραυνών [1].

Στην περίπτωση των ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας όπου δεν ξεπερνούν το ύψος των 100 μέτρων, δεν παρατηρούνται ανερχόμενοι κεραυνοί. Επίσης το 90% των κατερχόμενων πλήγμάτων είναι αρνητικά με ένα 45-50% αυτών να αποτελούνται μόνο από πρώτα πλήγματα. Οι υπόλοιποι δίνουν κατά μέσο όρο 3 επακόλουθα πλήγματα, μεταξύ των οποίων ο χρόνος που μεσολαβεί δεν ξεπερνά τα 50 ms. Υπάρχει ένα 5% των περιπτώσεων όπου μπορεί να παρατηρηθούν έως και 10 ή παραπάνω επακόλουθα πλήγματα.

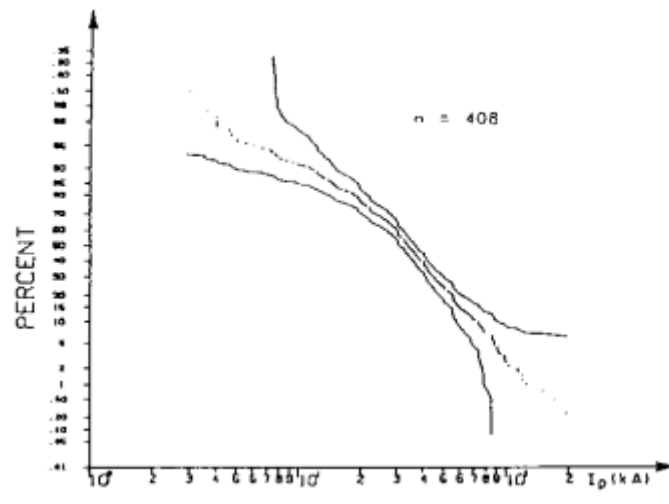
Σημειώνεται ότι οι πιο σπάνιοι θετικοί κεραυνοί συνήθως έχουν ένα πλήγμα. Επίσης, τα ποσοστά θετικών και αρνητικών κεραυνών και ο αριθμός επακόλουθων πλήγμάτων παρουσιάζει εποχικότητα και μεταβολές από περιοχή σε περιοχή.

3.2 Πρώτα πλήγματα

Όσον αφορά τα κατερχόμενα αρνητικά κεραυνικά πλήγματα, το δείγμα συμβάντων που χρησιμοποιείται συχνά, καθώς προτείνεται από το τεχνικό εγχειρίδιο της CIGRE [1], μετρά συνολικά 408 παρατηρήσεις

τέτοιων φαινομένων σε πολλές τοποθεσίες ανά τον κόσμο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ένα μέσο κεραυνικό ρεύμα της τάξεως των 33 kA, με τις τιμές να μην ξεπερνούν τα 200 kA, ενώ στις ακραίες περιπτώσεις του 1% έχουμε περίπου 130 kA, με μόλις 5 τιμές να ξεπερνούν τα 100 kA. Παρακάτω παρουσιάζεται η συχνότητα κατανομής των ρευμάτων αυτών, η οποία ακολουθεί λογαριθμική κανονική κατανομή (log-normal distribution) με παραμέτρους:

- $M = 31.1 \text{ kA}$, μέση τιμή
- $\beta = 0.484$, τυπική απόκλιση.

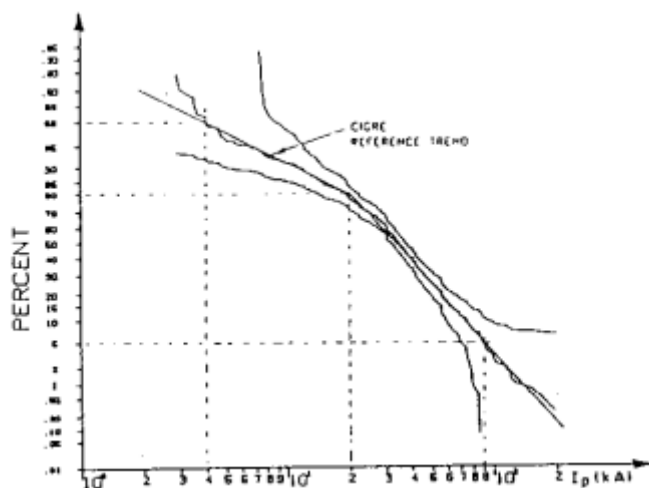


Σχήμα 3.2: Αθροιστική κατανομή τιμών κορυφής αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών [1].

Κατά το τεχνικό εγχειρίδιο της CIGRE όμως, πραγματοποιείται καλύτερη εκτίμηση με δύο ευθείες γραμμές κατά μήκος των μετρούμενων τιμών, οπότε και κατηγοριοποιούνται σε τιμές κορυφής σφαλμάτων θωράκισης ($< 20 \text{ kA}$) και ανάστροφης διάσπασης ($> 20 \text{ kA}$). Κατά συνέπεια, η παραπάνω κατανομή τροποποιείται ως εξής:

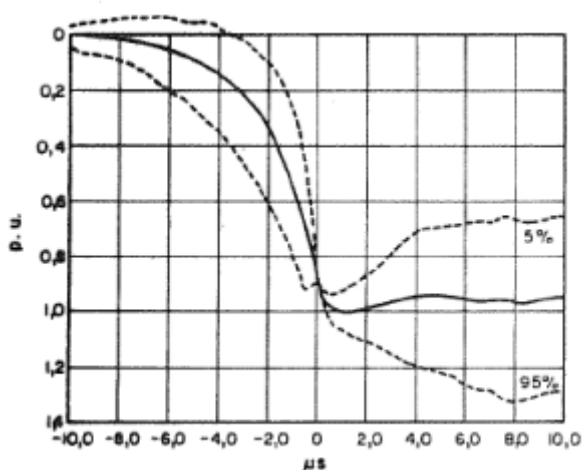
Πίνακας 3.1: Παράμετροι λογαριθμικής κανονικής κατανομής κατά CIGRE [1].

| Parameter | Shielding failure Domain ($I < 20 \text{ kA}$) | Backflash domain Domain ($I > 20 \text{ kA}$) |
|-----------|--|---|
| M | 61 | 33.3 |
| β | 1.33 | 0.605 |



Σχήμα 3.3: Αθροιστική κατανομή τιμών κορυφής αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών κατά το τεχνικό εγχειρίδιο της CIGRE [1].

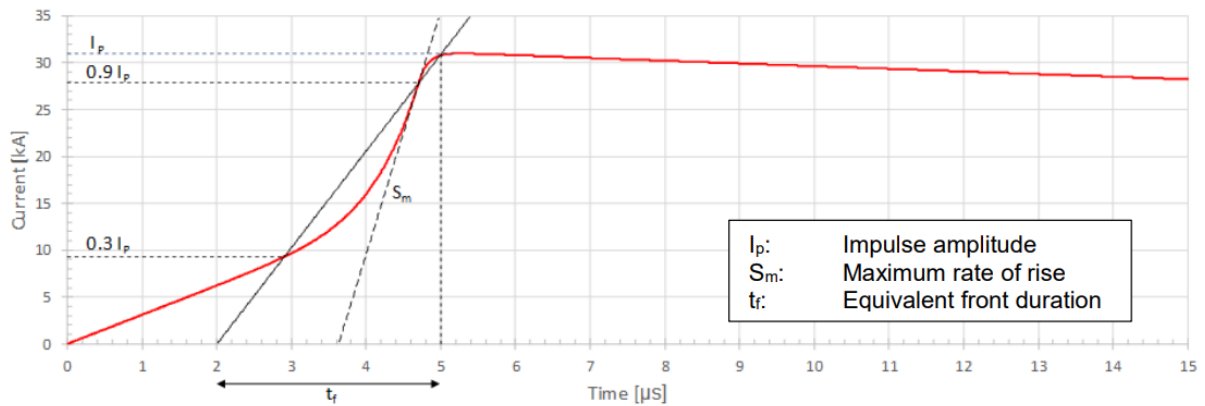
Η κυματομορφή των μέσων ρευμάτων των πρώτων κεραυνικών πλήγμάτων αναπαρίστανται παρακάτω στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Κυματομορφή μέσων κεραυνικών ρευμάτων για πρώτα πλήγματα [1].

Επιπλέον, δίνεται στο Σχήμα 3.5 και η αναλυτική κυματομορφή ρεύματος ως προς τον χρόνο, η οποία προκύπτει από τις εξής μέσες τιμές που παρατηρούνται στα πρώτα κεραυνικά πλήγματα:

- $I = 31 \text{ kA}$
- $S_m = 26 \text{ kA}/\mu\text{s}$
- $t_f = 3 \mu\text{s}$
- $t_h = 75 \mu\text{s}$



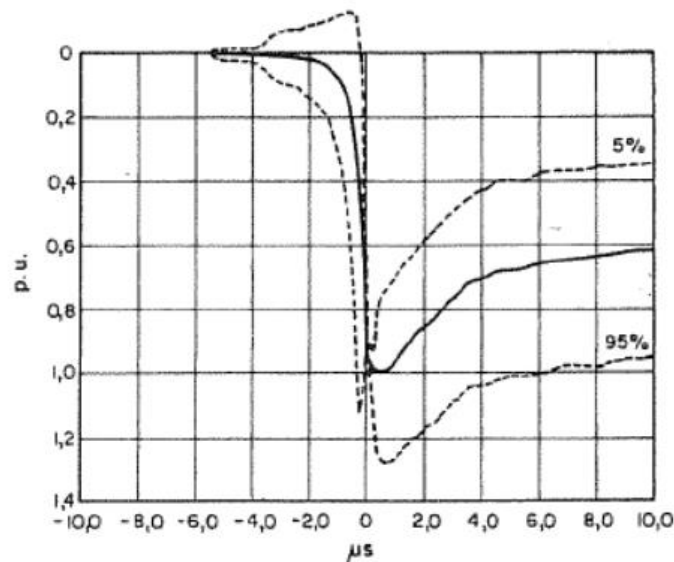
Σχήμα 3.5: Τυπική κυματομορφή πρώτου κεραυνικού πλήγματος [1].

Η παραπάνω κυματομορφή χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε μελέτες που σχετίζονται με επιπτώσεις άμεσων κεραυνικών ρευμάτων. Έχει αρχικά μια σχετικά βραδεία αύξηση και μετά μία απότομη πριν την κορυφή του ρεύματος και μοιάζει με τα ρεύματα του Σχήματος 3.4.

3.3 Επακόλουθα πλήγματα

Όσον αφορά τα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα κατερχόμενων αρνητικών κεραυνών, από το διαθέσιμο δείγμα αποτελεσμάτων, πηγάζει ότι κατά μέσο όρο προσεγγίζουν περίπου το 40% της τιμής του πρώτου πλήγματος. Παρόλα αυτά, υπάρχει προσεγγιστικά 12% πιθανότητα, στην περίπτωση σφάλματος θωράκισης, να έχουμε επακόλουθο πλήγμα μεγαλύτερο έως και 200% επί της τιμής του πρώτου πλήγματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι δεν έχει παρατηρηθεί επακόλουθο πλήγμα, το οποίο να ξεπερνάει τα 80 kA. Αυτό θα ληφθεί υπόψη και στην παρούσα εργασία. Η λογαριθμική κανονική κατανομή μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω λογαριθμικής κανονικής κατανομής με παραμέτρους $M = 12.3$ kA και $\beta = 0.53$.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η κυματομορφή των μέσων ρευμάτων των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων.



Σχήμα 3.6: Κυματομορφή μέσων κεραυνικών ρευμάτων επακόλουθων πληγμάτων [1].

Η τυπική κυματομορφή των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων ταυτίζεται σε γενική μορφή με αυτή των πρώτων κεραυνικών πληγμάτων όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.5. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διάρκεια μετώπου είναι μικρότερη και η κλίση είναι μεγαλύτερη στα επακόλουθα πλήγματα. Επίσης, η διάρκεια της ουράς είναι πιο μικρή. Αυτό αναμένεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στα αποτελέσματα προσομοιώσεων με πρώτα και επακόλουθα πλήγματα. Σημειώνεται ότι η κυματομορφή της CIGRE που παρουσιάστηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις δύο κατηγορίες κεραυνικών πληγμάτων (πρώτα και επακόλουθα) με τις κατάλληλες παραμέτρους.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η διάρκεια μετώπου των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων, όπου αξίζει να σημειωθεί ότι σε σχέση με τα πρώτα κεραυνικά πλήγματα είναι σημαντικά μικρότερη, όπως ειπώθηκε ήδη.

Πίνακας 3.2: Διάρκεια μετώπου επακόλουθων πληγμάτων [1].

| First-stroke front duration | | % Cases exceeding tabulated value | | |
|-----------------------------|---------|-----------------------------------|-----|-----|
| | | 95% | 50% | 5% |
| t_d | μs | 0.2 | 1.1 | 4.5 |
| $t_{d10} = T_{10}/0.8$ | μs | 0.1 | 0.8 | 3.5 |
| $t_{d30} = T_{30}/0.6$ | μs | 0.2 | 0.7 | 3.0 |

Επιπλέον ενδιαφέρον παρουσιάζεται στη μέγιστη κλίση (steepness), η οποία σε αντίθεση με τη διάρκεια μετώπου, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των πρώτων πληγμάτων, ενώ την ίδια στιγμή

παρουσιάζει και υψηλότερη τυπική απόκλιση. Πληροφορίες σχετικά με τη μέγιστη κλίση δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.3: Μέγιστη κλίση επακόλουθων πληγμάτων [1].

| First-stroke front duration | | % Cases exceeding tabulated value | | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----|-----|
| | | 95% | 50% | 5% |
| $S_{10/90}$ | $kA.\mu s^{-1}$ | 3.3 | 15 | 72 |
| $S_{30/90}$ | $kA.\mu s^{-1}$ | 4.1 | 20 | 99 |
| S_m | $kA.\mu s^{-1}$ | 10 | 40 | 162 |

Επιπρόσθετα, η διάρκεια ημίσεος εύρους τόσο για τα πρώτα πλήγματα (negative first), όσο και για τα επακόλουθα (negative following stroke), παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.4: Διάρκεια ημίσεος εύρους πρώτων και επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων [1].

| Stroke duration t_h | | % Cases exceeding tabulated value | | |
|---------------------------|---------|-----------------------------------|------|-----|
| | | 95% | 50% | 5% |
| Negative First | μs | 30 | 77.5 | 200 |
| Negative following stroke | μs | 6.5 | 30.2 | 140 |

Κεφάλαιο 4: Γραμμές Μεταφοράς προς Διερεύνηση και Μοντελοποίηση στο ΑΤΡ-ΕΜΤΡ

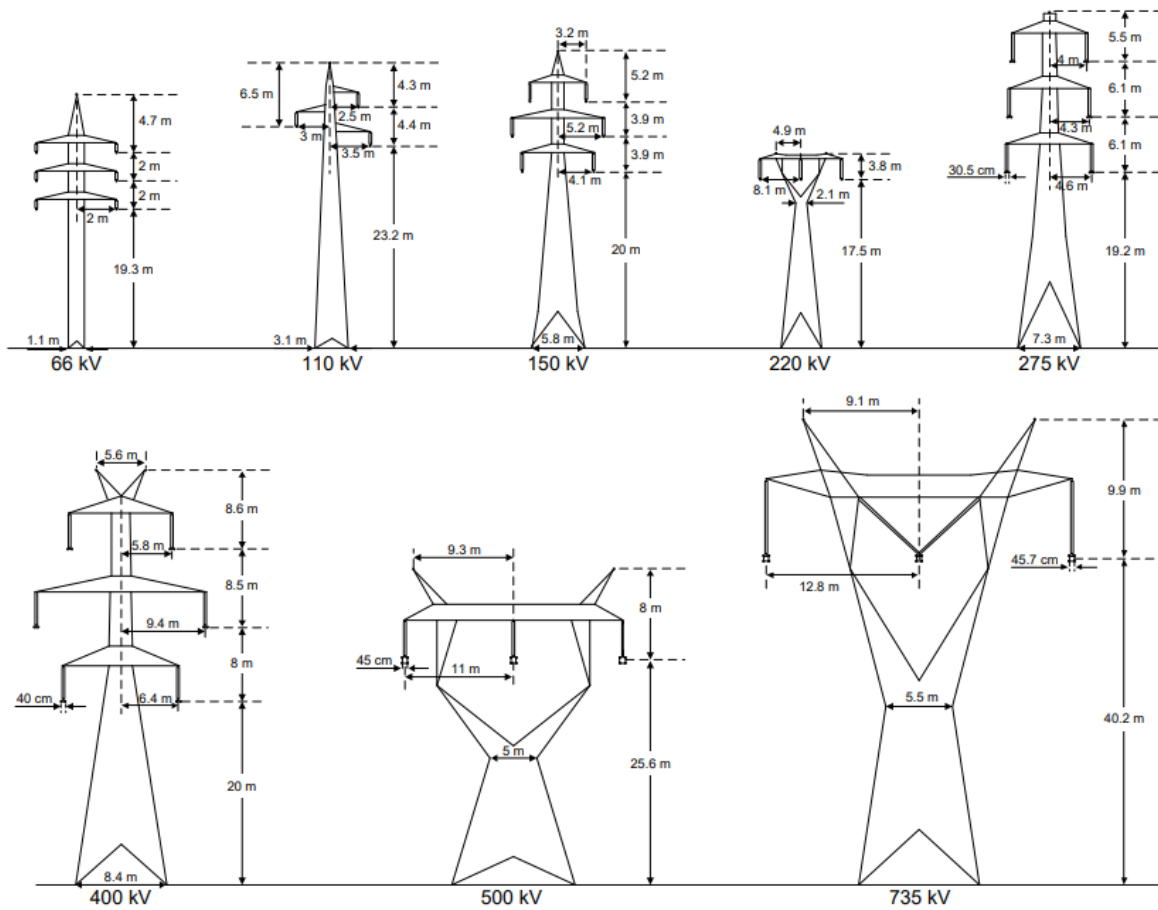
Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας που διερευνήθηκαν και γίνεται αναφορά στο λογισμικό και τον κώδικα που αξιοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Οι γενικές πληροφορίες αντιλούνται από την αναφορά [2].

4.1 Γραμμές μεταφοράς υπό διερεύνηση

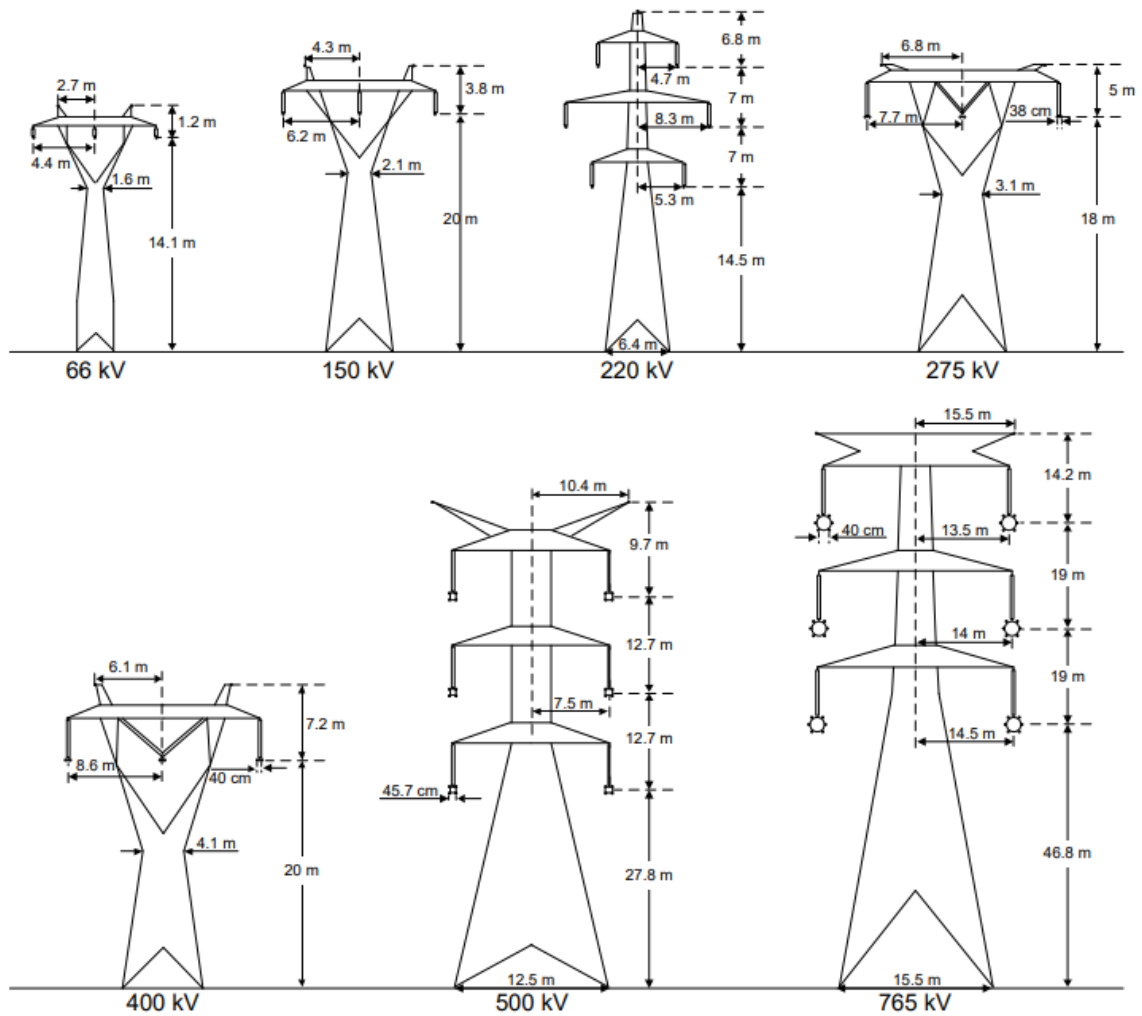
Η διερεύνηση διαχωρίζεται σε:

- πλήγματα στον αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης), όπου οι υπερτάσεις και τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα ενδέχεται να προκαλέσουν διάσπαση της μόνωσης λόγω σφάλματος θωράκισης
- πλήγματα στον αγωγό προστασίας, όπου προκαλείται ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης.

Επιπρόσθετα, τα επίπεδα τάσης των ΓΜ που μελετήθηκαν περιελάμβαναν μονά και διπλά τριφασικά κυκλώματα. Παρακάτω δίνονται όλοι οι τύποι γραμμών μεταφοράς, οι οποίοι διερευνήθηκαν, καθώς επίσης και πίνακες με τα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 4.1: Τύποι πυλώνων εναέριων γραμμών μεταφοράς που μελετήθηκαν 1/2 [2].



Σχήμα 4.2: Τύποι πυλώνων εναέριων γραμμών μεταφοράς που μελετήθηκαν 2/2 [2].

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των υπό μελέτη εναέριων ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας 1/2 [2].

| Τάση λειτουργίας (kV) | Μήκος ανοίγματος (m) | Είδος αγωγού | Διάμετρος αγωγού (mm) | Αριθμός αγωγών ανά φάση | Βέλος αγωγού (m) | Είδος αγωγού προστασίας | Διάμετρος αγωγού προστασίας (mm) | Βέλος αγωγού προστασίας (m) | Γωνία θωράκισης του πυλώνα (deg) | Μήκος μονωτήρα (m) | BIL (kV) |
|-----------------------|----------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|----------|
| 66 | 275 | ACSR Panther | 21.00 | 1 | 6 | Glv steel | 9.45 | 4 | 23.1 | 0.73 | 325 |
| 110 | 300 | ACSR 240/40 | 21.90 | 1 | 6 | ACSR 240/40 | 21.90 | 5 | 30.2 | 1.3 | 550 |
| 150 | 300 | ACSR Grosbeak | 25.15 | 1 | 6.3 | Glv steel | 12.60 | 4.1 | 31.6 | 1.86 | 750 |
| 220 | 300 | ACSR Elk | 31.50 | 1 | 7 | ACSR Lion | 22.26 | 6 | 40.1 | 2.5 | 1050 |
| 275 | 300 | ACSR Lynx | 19.53 | 2 | 7.1 | ACSR Lynx | 19.53 | 6.7 | 36 | 3.3 | 1300 |
| 400 | 350 | ACSR Cardinal | 30.42 | 2 | 8.6 | Glv steel | 12.60 | 5.5 | 19.2 | 3.62 | 1425 |
| 500 | 350 | ACSR Camel | 30.00 | 4 | 12 | ACSR Camel | 30.00 | 9.5 | 12 | 3.79 | 1550 |
| 735 | 500 | ACSR Besfort | 35.56 | 4 | 25.6 | Glv steel | 12.57 | 24.1 | 20.5 | 4.80 | 1950 |

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά των υπό μελέτη εναέριων ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας 2/2 [2].

| Τάση λειτουργίας (kV) | Μήκος ανοίγματος (m) | Είδος αγωγού | Διάμετρος αγωγού (mm) | Αριθμός αγωγών ανά φάση | Βέλος αγωγού (m) | Είδος αγωγού προστασίας | Διάμετρος αγωγού προστασίας (mm) | Βέλος αγωγού προστασίας (m) | Γωνία θωράκισης του πυλώνα (deg) | Μήκος μονωτήρα (m) | BIL (kV) |
|-----------------------|----------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|----------|
| 66 | 250 | ACSR Raccoon | 12.30 | 1 | 4 | Glv steel | 6.16 | 3 | 34.1 | 0.73 | 325 |
| 150 | 300 | ACSR Grosbeak | 25.15 | 1 | 6.3 | Glv steel | 9.50 | 4.1 | 27.3 | 1.86 | 750 |
| 220 | 300 | ACSR Elk | 31.50 | 1 | 7 | ACSR Lion | 22.26 | 6 | 35.3 | 2.5 | 1050 |
| 275 | 350 | ACSR Bear | 23.45 | 2 | 10.5 | Glv steel | 13.30 | 8 | 15 | 3.3 | 1300 |
| 400 | 350 | ACSR Cardinal | 30.42 | 2 | 8.6 | Glv steel | 12.60 | 5.5 | 19.2 | 3.62 | 1425 |
| 500 | 400 | ACSR Lapwing | 38.22 | 4 | 18.5 | Glv steel | 15.77 | 12 | -16.7 | 3.79 | 1550 |
| 765 | 500 | ACSR Cardinal | 30.42 | 6 | 18.8 | AWS 200 | 18.50 | 15 | -8 | 4.80 | 1950 |

Επίσης, ακολουθούν οι τιμές των αντιστάσεων γείωσης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τόσο των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων, όσο και των υπερτάσεων. Έτσι για τις ΓΜ μονού κυκλώματος με κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό προστασίας (Single Circuit/ Backflashover) έχουμε:

- ΓΜ 66 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 2 Ω, 10 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 150 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 10 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 220 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 17 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 275 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 22 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 400 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 22 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 500 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 735 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

Για τις ΓΜ διπλού κυκλώματος με κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό προστασίας (Double Circuit/ Backflashover):

- ΓΜ 66 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 1 Ω, 10 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 110 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 3 Ω, 10 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 150 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 7 Ω, 10 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 220 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 9 Ω, 10 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 275 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 14 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 400 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

➤ 17 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 500 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

- 16 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω

- ΓΜ 765 kV

Αντιστάσεις γείωσης:

- 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω για τις υπερτάσεις.
- 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 150 Ω, 200 Ω για τα κρίσιμα ρεύματα.

Για τις ΓΜ μονού κυκλώματος με κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης (Single Circuit/Shielding Failure):

- ΓΜ 66 kV

- Αντίσταση γείωσης: 12.6 Ω

- ΓΜ 150 kV

- Αντίσταση γείωσης: 11.8 Ω

- ΓΜ 220 kV

- Αντίσταση γείωσης: 11.87 Ω

- ΓΜ 275 kV

- Αντίσταση γείωσης: 11.61 Ω

- ΓΜ 400 kV

- Αντίσταση γείωσης: 11.4 Ω

- ΓΜ 500 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 11.24 Ω
- ΓΜ 735 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 11.2 Ω

Για τις ΓΜ διπλού κυκλώματος με κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης (Double Circuit/Shielding Failure):

- ΓΜ 66 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 15.1 Ω
- ΓΜ 110 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 12.57 Ω
- ΓΜ 150 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 11.7 Ω
- ΓΜ 220 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 11.58 Ω
- ΓΜ 275 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 11.45 Ω
- ΓΜ 400 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 11.3 Ω

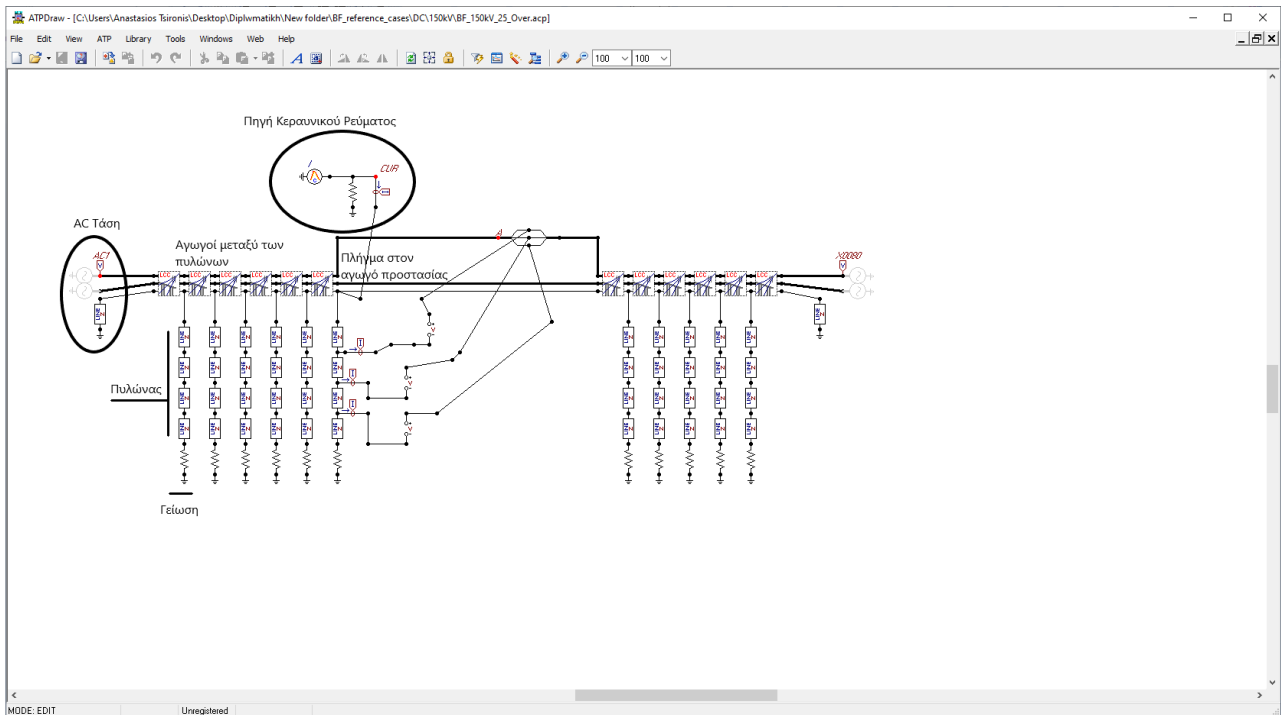
- ΓΜ 500 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 10.99 Ω
- ΓΜ 765 kV
 - Αντίσταση γείωσης: 10.9 Ω

Σημειώνεται ότι οι τιμές της αντίστασης γείωσης για το πλήγμα στον πυλώνα (ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης) έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε κοινές τιμές που εμφανίζονται στην πράξη αλλά και να οδηγούν σε ανάστροφη διάσπαση για λογικές τιμές επακόλουθων πληγμάτων. Οι τιμές στην περίπτωση του πλήγματος στον αγωγό φάσης αντιστοιχούν σε ειδική αντίσταση εδάφους 100 Ωm στην περιοχή της γραμμής. Ο διαχωρισμός στον τρόπο αντιμετώπισης έγινε διότι η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα ιδιαίτερα στην περίπτωση του πλήγματος στον αγωγό φάσης όταν μεταβάλλεται εντός του κοινού εύρους που βρίσκεται στην πράξη.

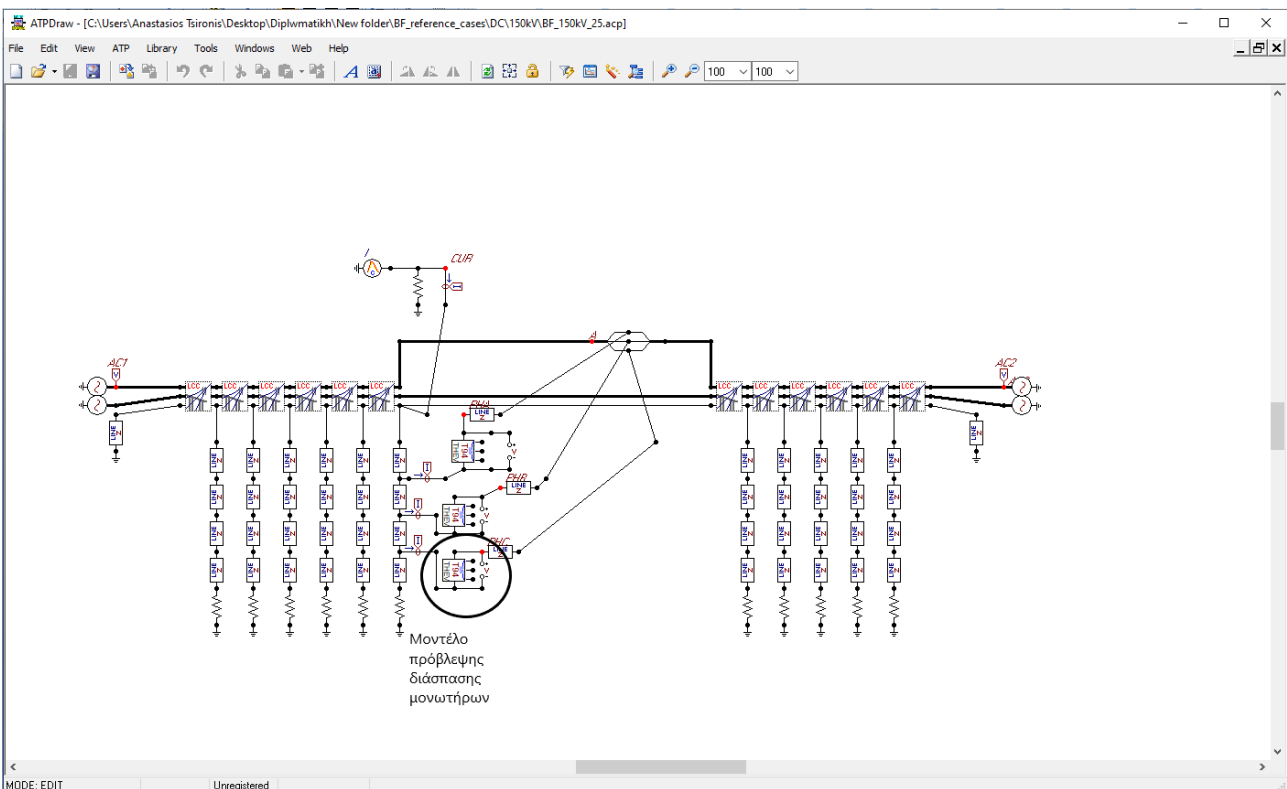
4.2 Μοντελοποίηση ATP-EMTP/Κώδικας Matlab

4.2.1 Μοντελοποίηση στο ATP-EMTP

Η μοντελοποίηση των ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε στο ευρέως διαδεδομένο εργαλείο μεταβατικών φαινομένων ATP-EMTP με βάση το [2], προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά των συγκεκριμένων ΓΜ κατά την έκθεσή τους στα επακόλουθα αρνητικά κατερχόμενα κεραυνικά πλήγματα, με στόχο τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας του δικτύου μεταφοράς και των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέονται σε αυτό. Για την καλύτερη εξοικείωση με το ATP-EMTP παρατίθεται παρακάτω (Σχήμα 4.3 και 4.4) το περιβάλλον στο οποίο μοντελοποιήθηκαν οι ΓΜ ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 4.3: Περιβάλλον λογισμικού ATP-EMTP προσομοίωσης ΓΜ 150 kV με πλήγμα στον αγωγό προστασίας για υπολογισμό υπερτάσεων.



Σχήμα 4.4: Περιβάλλον λογισμικού ATP-EMTP προσομοίωσης ΓΜ 150 kV με πλήγμα στον αγωγό προστασίας για υπολογισμό κρίσιμων ρευμάτων.

Παρακάτω γίνεται αναφορά στα στοιχεία που μπορούμε να διακρίνουμε στις παραπάνω εικόνες και αποτελούν το μοντέλο της ΓΜ.

ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΑ ΚΕΡΑΥΝΙΚΑ ΠΛΗΓΜΑΤΑ ΣΕ ΓΜ

- Πηγή κεραυνικού ρεύματος: Για την προσομοίωση του κεραυνού υιοθετείται η σημαντικά ρεαλιστική κυματομορφή της CIGRE. Η προσομοίωση γίνεται με τη βοήθεια της πηγής CIGRE τύπου 15 που υπάρχει στο ATP-EMTP. Οι παράμετροι της κυματομορφής είναι οι ενδιάμεσες τιμές των κατανομών όπως αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3. Επιπλέον η διάρκεια μειώπου t_f (μs) παραμένει σταθερή και ίση με την ενδιάμεση τιμή της στα 0.67 μs και η μέγιστη κλίση S_m (kA/μs) δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί συναρτήσει του ρεύματος I_f :

$$S_m = 4.17 \times I_f^{0.9}.$$

Η διάρκεια ημίσεος εύρους t_h παραμένει σταθερή και ίση με την ενδιάμεση τιμή της (ομοίως με την t_f) στα 30.2 μs. Περαιτέρω, αξίζει να σημειωθεί ότι προσομοιώνεται και το κανάλι του κεραυνού μέσω μίας αντίστασης παράλληλα στην πηγή του κεραυνικού ρεύματος.

- Γείωση των πυλώνων: Προσομοιώνεται μέσω μιας αντίστασης που τοποθετείται για κάθε πυλώνα στο μοντέλο προσομοίωσης. Κατά αυτόν τον τρόπο οδηγούμαστε στην ασφαλή πλευρά των αποτελεσμάτων, δεδομένης της ορθής σχεδίασης του συστήματος γείωσης, δηλαδή το ενεργό μήκος είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό.
- AC πηγές τάσης: Η εναλλασσόμενη τάση της ΓΜ μοντελοποιείται μέσω κλασικών πηγών τάσης με συνημιτονοειδή συνάρτηση. Στην περίπτωση διερεύνησης των κρίσιμων ρευμάτων ανάστροφης διάσπασης πραγματοποιήθηκε μεταβολή της γωνίας φάσης ανά 30°, από 0° έως 330°. Στα κρίσιμα ρεύματα σφάλματος θωράκισης αυτό δεν έγινε γιατί η μέση τιμή του AC είναι μηδέν αν ενδιαφέρει η κάθε φάση ξεχωριστά.
- Πυλώνες: Προσομοιώνονται ρεαλιστικά με τη βοήθεια ομοιογενών ΓΜ σταθερών παραμέτρων, χωρίς απώλειες και χωρίς να εξαρτώνται από τη συχνότητα. Επιπλέον, η κυματική αντίσταση των τμημάτων παραμένει ίδια, ενώ στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στην κορυφή του πυλώνα με κατακόρυφη διάταξη προσεγγίζεται με βάση τη σχέση:

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

Και στην περίπτωση πυλώνα με οριζόντια διάταξη φάσεων από τη σχέση:

$$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h_T}{r_{T_w}} \right) - 60$$

Στις παραπάνω σχέσεις h_T είναι το ύψος του πυλώνα και όπου r η ακτίνα του πυλώνα στη βάση και τη μέση του αντίστοιχα.

- Μοντέλα πρόβλεψης διάσπασης μονωτήρων: Γίνεται χρήση του μοντέλου προόδου λήντερ της CIGRE, βασισμένο στη διάσπαση μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων, το οποίο αναλόγως την εφαρμοζόμενη τάση προβλέπει αν θα προκύψει διάσπαση ή όχι. Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για μη κανονικές κυματομορφές όπως αυτές που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις.
- Αγωγοί φάσης/προστασίας: Οι αγωγοί μεταξύ των πυλώνων μοντελοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά της γραμμής, με τη βοήθεια του μοντέλου JMarti. Οι παράμετροι είναι εξαρτώμενες από τη συχνότητα, ο πίνακας μετασχηματισμού όμως όχι.

4.2.2 Κώδικας προσομοιώσεων Matlab

Για την υλοποίηση του μεγάλου όγκου των προσομοιώσεων για την εξαγωγή των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων και υπερτάσεων των ΓΜ, έγινε κατάλληλη χρήση ήδη ανεπτυγμένου κώδικα [3] στο λογισμικό Matlab. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιούνται τα ανεπτυγμένα αρχεία με κατάληξη.atp του ATP-EMTP, σε συνδυασμό με ένα αρχείο με κατάληξη.m του Matlab, όπου γίνεται πρόσβαση σε όλες τις παραμέτρους του αρχείου.atp που χρειάζεται.

Στην περίπτωση υπολογισμού των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων αρχικά πρέπει να δημιουργηθεί το αρχείο.atp μέσω του αρχείου.acp του γραφικού προεπεξεργαστή ATPDraw. Αφού εισαχθούν οι παράμετροι που αναφέρθηκαν νωρίτερα στο παρόν κεφάλαιο, εκτελείται το αρχείο.acp και παράγεται το αντίστοιχο.atp. Κατόπιν εκτελείται το αρχείο.m στο Matlab, στο οποίο πρέπει να εισαχθεί η αρχική τιμή του κεραυνικού πλήγματος και το βήμα αλλαγής της γωνίας φάσης (30^0). Στη συνέχεια ο κώδικας ξεκινάει τις προσομοιώσεις, και κάθε φορά που εντοπίζεται διάσπαση αυξάνει τη γωνία κατά 30^0 και ξεκινάει από την αρχή. Η προσομοίωση τελειώνει όταν έχει εντοπιστεί διάσπαση σε κάθε γωνία φάσης (12 τιμές). Δημιουργούνται από το Matlab που καλεί το ATP-EMTP αυτόματα αρχεία.pl4 (ανοίγουν με το πρόγραμμα PlotXY), για κάθε μία από τις προσομοιώσεις, όπου φαίνονται αναπαράστασεις των διάφορων κυματομορφών (π.χ. τάση σε συνάρτηση με

το μήκος του μονωτήρα) και ένα τελικό αρχείο.xlsx (MS Excel) με τα αποτελέσματα των κρίσιμων ρευμάτων (Σχήμα 4.5).

| | A | B | C | D | E |
|----|-------|--------|--------|-------------|------------|
| 1 | Theta | Imin | Phase | Step100Flag | Lmax |
| 2 | 0 | -39600 | Upper | 1 | 1.85805544 |
| 3 | 30 | -40500 | Upper | 1 | 1.86 |
| 4 | 60 | -40200 | Middle | 1 | 1.86 |
| 5 | 90 | -38200 | Middle | 1 | 1.86 |
| 6 | 120 | -37600 | Middle | 1 | 1.86 |
| 7 | 150 | -38300 | Middle | 1 | 1.86 |
| 8 | 180 | -39200 | Lower | 1 | 1.86 |
| 9 | 210 | -37300 | Lower | 1 | 1.86 |
| 10 | 240 | -36500 | Lower | 1 | 1.86 |
| 11 | 270 | -37200 | Lower | 1 | 1.86 |
| 12 | 300 | -39100 | Lower | 1 | 1.86 |
| 13 | 330 | -40400 | Upper | 1 | 1.85826057 |

Σχήμα 4.5: Αρχείο αποτελεσμάτων του κώδικα Matlab/Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα(backflashover - ΓΜ διπλού κυκλώματος).

Για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων λόγω επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων η διαδικασία εκτελείται ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, με τη διαφορά ότι όταν εκτελείται ο κώδικας πρέπει να εισαχθεί το αρχικό ρεύμα και έπειτα το βήμα μείωσης του αρχικού ρεύματος. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν το αρχικό ρεύμα ήταν τα -100 kA με βήμα 10 kA. Έτσι πραγματοποιήθηκαν 10 επαναλήψεις μέχρι και τα 0 kA. Στο τέλος της προσομοίωσης το Matlab καλώντας το APT-EMTP παράγει ξανά τα προαναφερθέντα αρχεία αποτελεσμάτων (.pl4, .xlsx, Σχήμα 4.6).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων ΓΜ διπλού και μονού κυκλώματος στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης (shielding failure), πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητα στο APT-EMTP, χωρίς τη βοήθεια του κώδικα. Αναλυτική περιγραφή αυτών γίνεται στο Κεφάλαιο 5.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|----|----------|------|------|------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|------------|-----|------------|------------|
| 1 | CURarray | AC1A | AC1B | AC1C | X0080A | X0080B | X0080C | AA | AB | AC | XX0028 | CUR | XX0030 | XX0029 |
| 2 | -100000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3201723 | 3137921 | 2943596 | 0.00157214 | 0 | 3.961E-05 | 0.00085207 |
| 3 | -90000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2899162 | 2842564 | 2667166 | 0.00180884 | 0 | 0.0003398 | 0.00112194 |
| 4 | -80000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2586671 | 2537594 | 2382511 | 0.00165357 | 0 | 0.00035269 | 0.00104641 |
| 5 | -70000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2272097 | 2230829 | 2095880 | 0.00144389 | 0 | 0.0003288 | 0.00092158 |
| 6 | -60000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1958348 | 1924242 | 1809078 | 0.00134463 | 0 | 0.00036974 | 0.00089279 |
| 7 | -50000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1642185 | 1615151 | 1519908 | 0.00119621 | 0 | 0.00037435 | 0.0008188 |
| 8 | -40000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1321989 | 1301813 | 1226526 | 0.00096684 | 0 | 0.00032902 | 0.00067216 |
| 9 | -30000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 995903.85 | 982481.47 | 927396.18 | 0.00062406 | 0 | 0.00018659 | 0.00042216 |
| 10 | -20000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 677138.79 | 669250.74 | 632706.42 | 0.00061893 | 0 | 0.00027597 | 0.00046024 |
| 11 | -10000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 346340.56 | 343588.16 | 325986.34 | 0.00035988 | 0 | 0.00018719 | 0.00028021 |

Σχήμα 4.6: Αρχείο αποτελεσμάτων excel του κώδικα Matlab/Υπερτάσεις.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα και Συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας σε μορφή κυματομορφών, γραφημάτων και ραβδογραμμάτων, μέσω των οποίων θα αναλυθούν οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις και τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα τόσο για τα πλήγματα στον αγωγό προστασίας ή στον πυλώνα, όσο και για αυτά στον αγωγό φάσης, σε συνάρτηση με τις αντιστάσεις γείωσης και το βασικό επίπεδο μόνωσης (Basic Insulation Level-BIL) κάθε γραμμής μεταφοράς.

5.1 Επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Παρακάτω, από το Σχήμα 5.1 έως Σχήμα 5.30, θα παρατεθούν γραφήματα με πληροφορίες σχετικά με τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις στις ΓΜ διπλού και μονού κυκλώματος στην περίπτωση επακόλουθου κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα (backflashover).

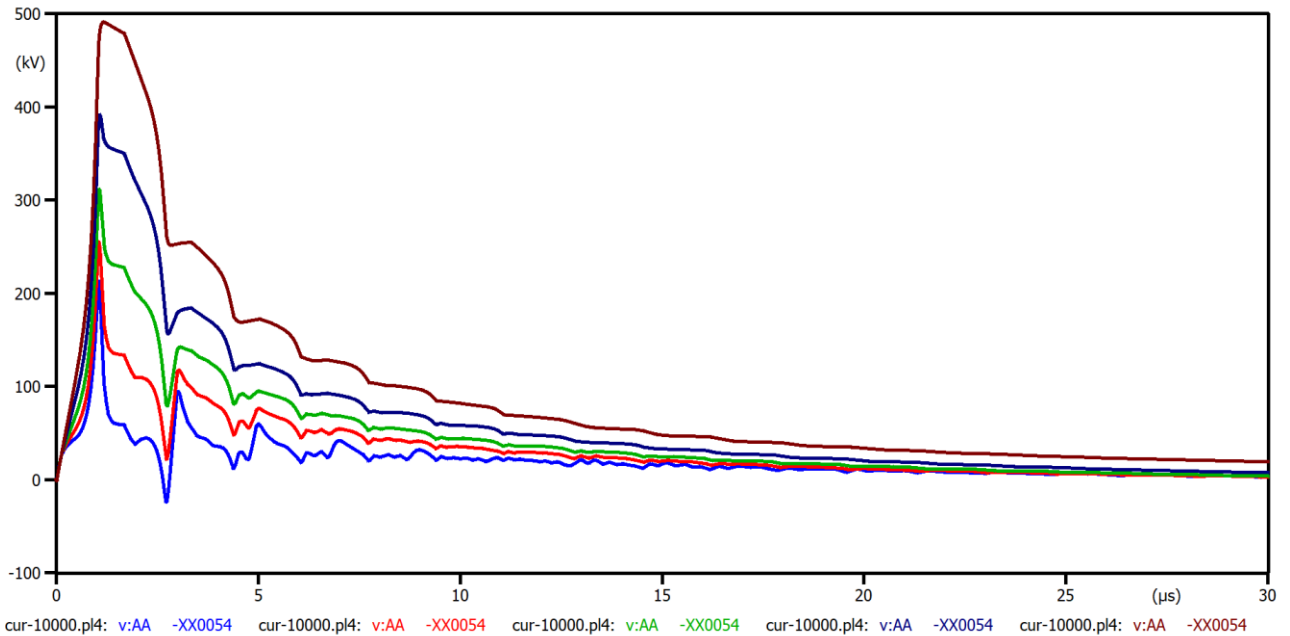
Για κάθε ΓΜ δίνεται πρώτα η κυματομορφή των υπερτάσεων που αναπτύσσονται για τον επάνω αγωγό Α (ΓΜ διπλού κυκλώματος) ή τον εξωτερικό αγωγό Α (ΓΜ μονού κυκλώματος), με παράμετρο την αντίσταση γείωσης και έπειτα το γράφημα υπερτάσεων ως προς το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL) της ΓΜ συναρτήσει του κεραυνικού ρεύματος. Συνολικά για κάθε ΓΜ δίνονται 4 σχήματα, 2 για το μονό κύκλωμα και 2 για το διπλό. Το κεραυνικό ρεύμα σε κάθε περίπτωση για τα σχήματα των κυματομορφών είναι τα 10 kA, ενώ για τα γραφήματα των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων ως προς το BIL το κεραυνικό ρεύμα έχει εύρος από τα 10 έως τα 80 kA, καθώς αποτελεί ένα ικανοποιητικό και ρεαλιστικό δείγμα επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων που παρατηρούνται και καταγράφονται στη φύση.

Από τα παρακάτω αποτελέσματα διακρίνεται ότι για μεγαλύτερες αντιστάσεις γείωσης αναπτύσσονται υψηλότερες υπερτάσεις οπότε και μεγαλύτερη καταπόνηση των μονωτήρων. Επιπρόσθετα, στις ΓΜ μεγαλύτερων τάσεων λειτουργίας, οι οποίες έχουν μεγαλύτερο BIL η αναλογία υπερτάσεων ως προς αυτό είναι σημαντικά μικρότερη για το ίδιο κεραυνικό ρεύμα. Επομένως, είναι πιο δύσκολο να επέλθει διάσπαση στις γραμμές αυτές. Επίσης, παρατηρείται ότι για τις υπερτάσεις στις ΓΜ για ίδια τάση λειτουργίας και ίδιο κεραυνικό ρεύμα, γενικά βρέθηκε ανάπτυξη υψηλότερων υπερτάσεων σε αυτές οι οποίες φέρουν διπλό κύκλωμα. Άρα σε αυτές αναμένεται να γίνει διάσπαση της μόνωσης σε μικρότερο κεραυνικό ρεύμα. Ακόμη μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι έχουμε διαφορετική μορφή των κυματομορφών διπλού και μονού κυκλώματος, γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στη μορφολογία των κυκλωμάτων: διαφορετική γεωμετρία πυλώνα, δύο αγωγοί προστασίας σε όλες τις γραμμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τις σημαντικά χαμηλές αντιστάσεις

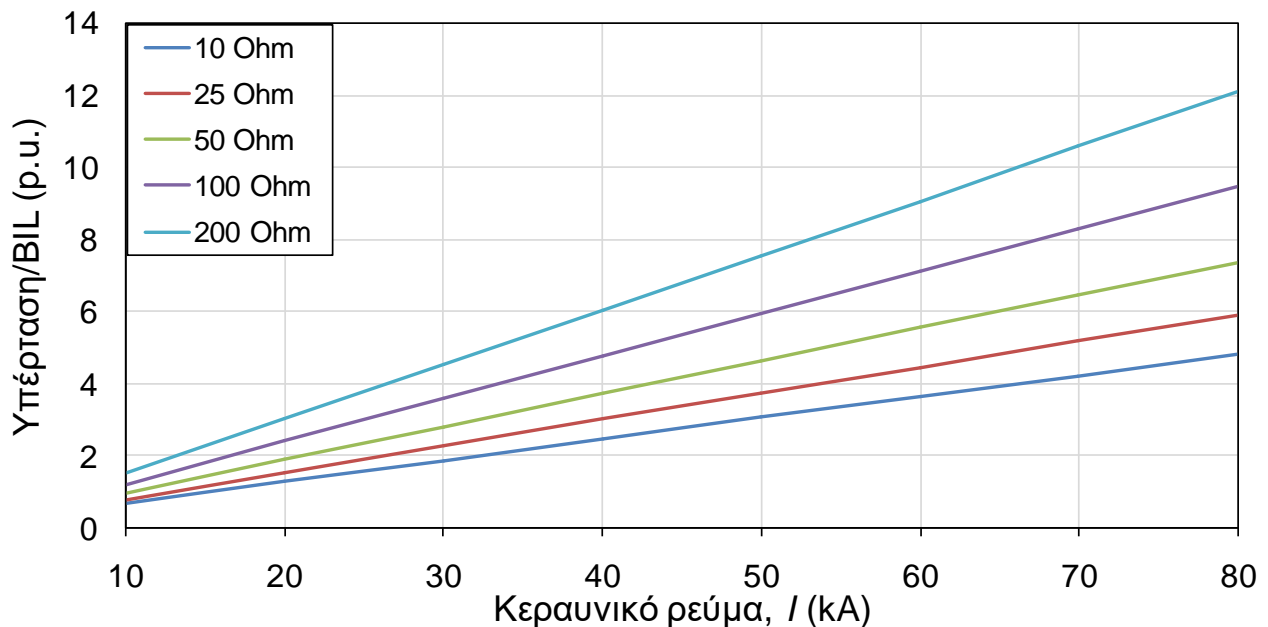
γείωσης παρατηρούνται και αρνητικές υπερτάσεις μετά το μέγιστο της κυματομορφής. Τέλος, όσον αφορά τα γραφήματα για τις υπερτάσεις ως προς το BIL, παρατηρείται ότι χαρακτηρίζονται από γραμμικότητα. Αυτό δεν ισχύει για τα πρώτα πλήγματα [4] πιθανόν λόγω των διαφορετικών παραμέτρων της εφαρμοζόμενης κυματομορφής κεραυνικού ρεύματος.

5.1.1 Υπερτάσεις (Backflashover)

➤ ΓΜ 66 kV, εξωτερική φάση Α (μονού κυκλώματος), BIL: 325 kV

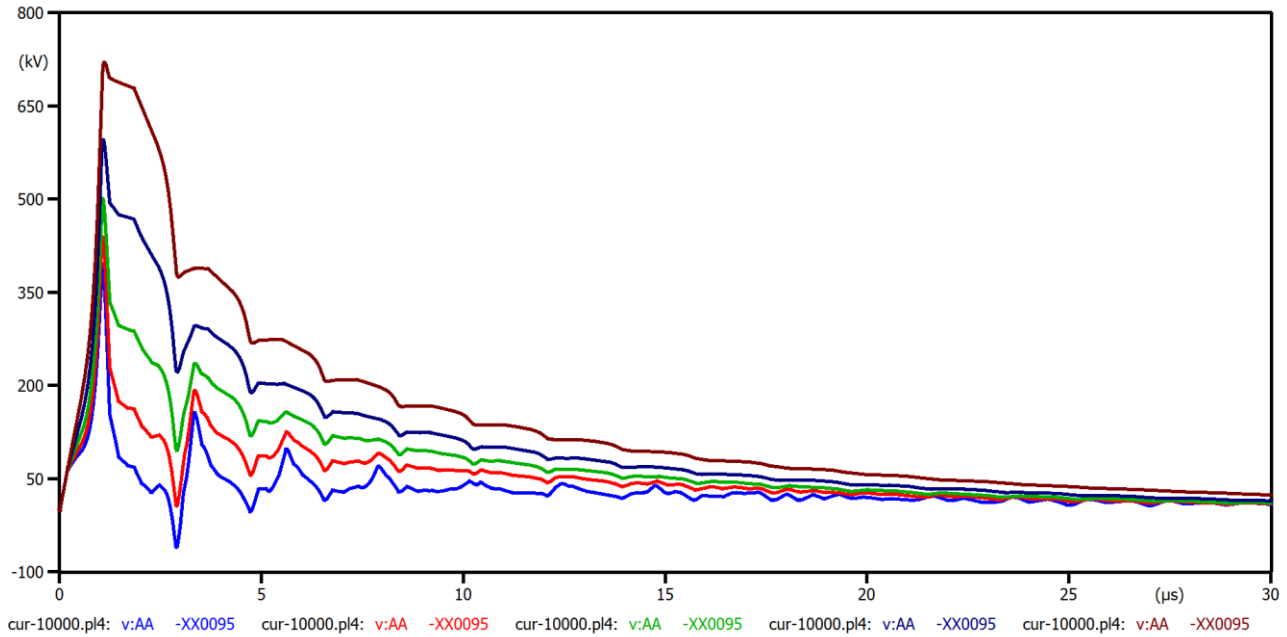


Σχήμα 5.1: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC).

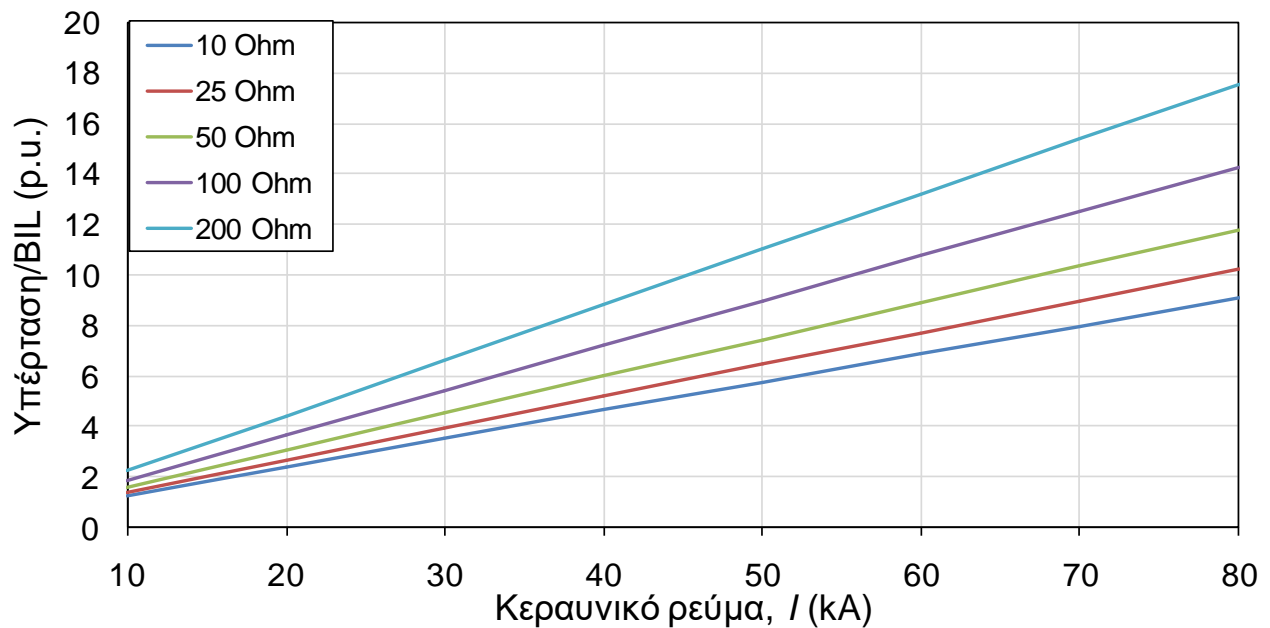


Σχήμα 5.2: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC).

➤ ΓΜ 66 kV, επάνω φάση Α (διπλού κυκλώματος), BIL: 325 kV

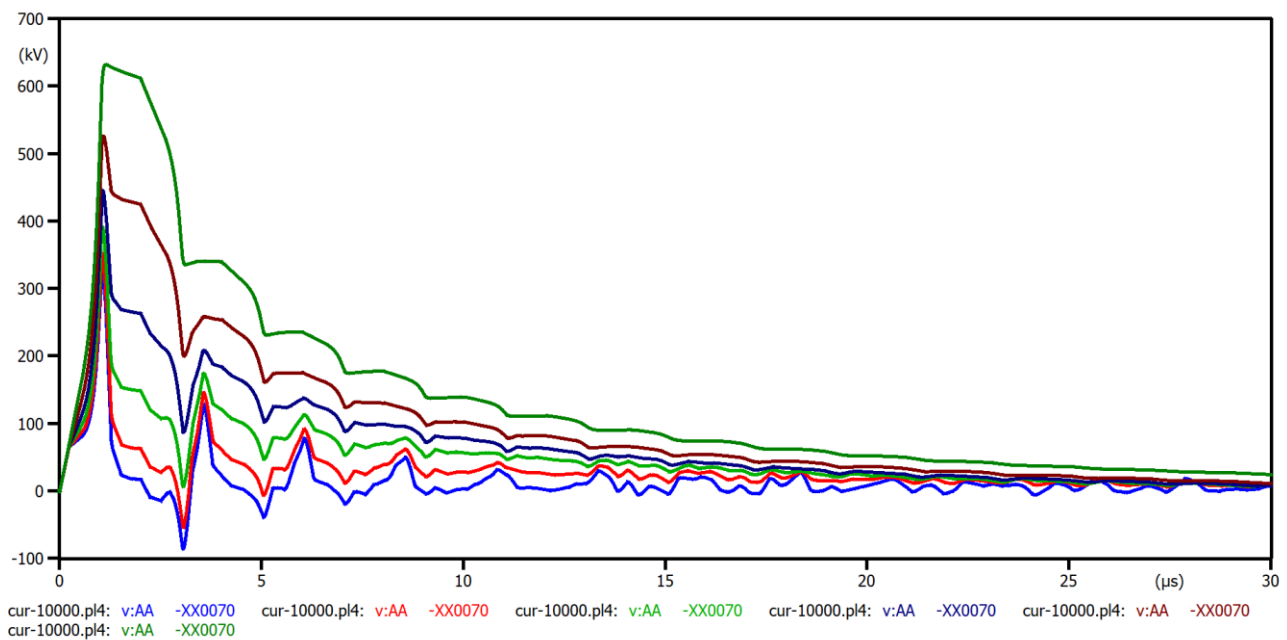


Σχήμα 5.3: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 66 kV διπλού κυκλώματος (DC).

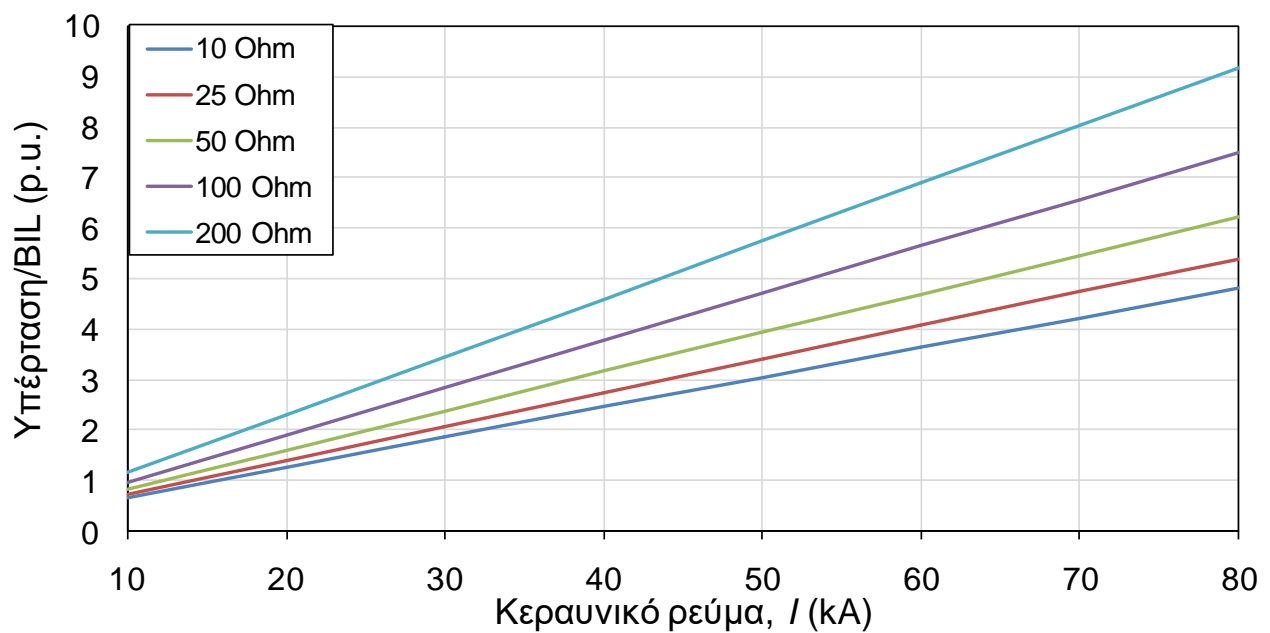


Σχήμα 5.4: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσεσι του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 66 kV διπλού κυκλώματος (DC).

- ΓΜ 110 kV, επάνω φάση Α μονού κυκλώματος (κατακόρυφες φάσεις), BIL: 550 kV

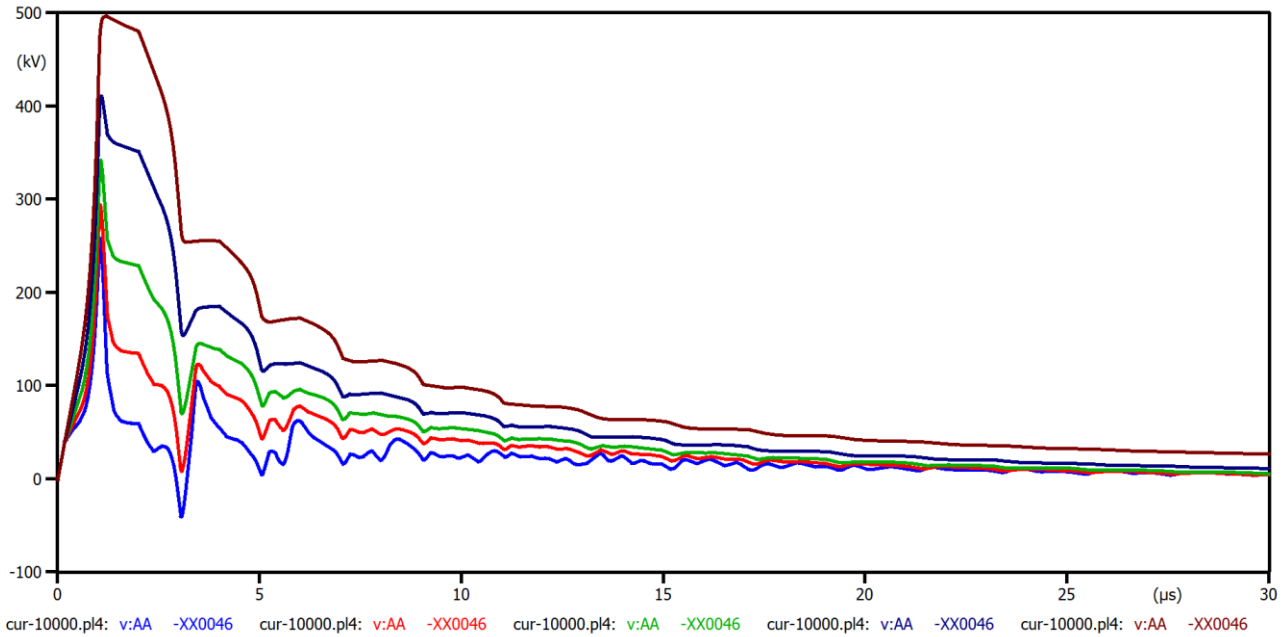


Σχήμα 5.5: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (3, 10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη.

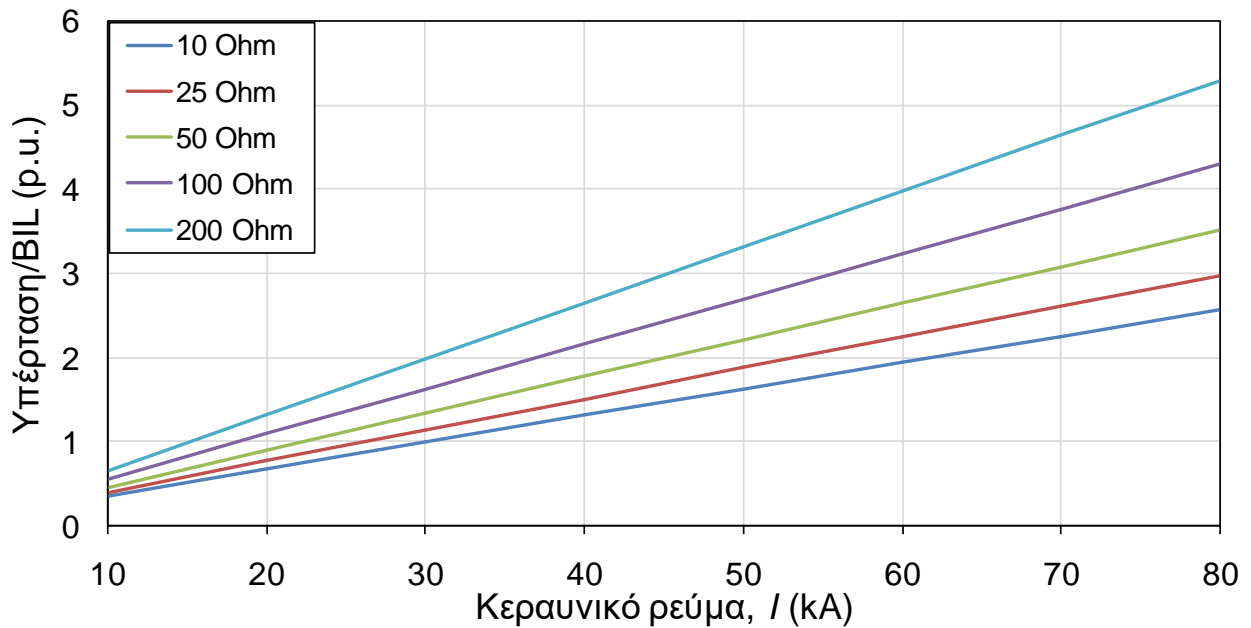


Σχήμα 5.6: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη.

➤ ΓΜ 150 kV, εξωτερική φάση Α (μονού κυκλώματος), BIL: 750 kV

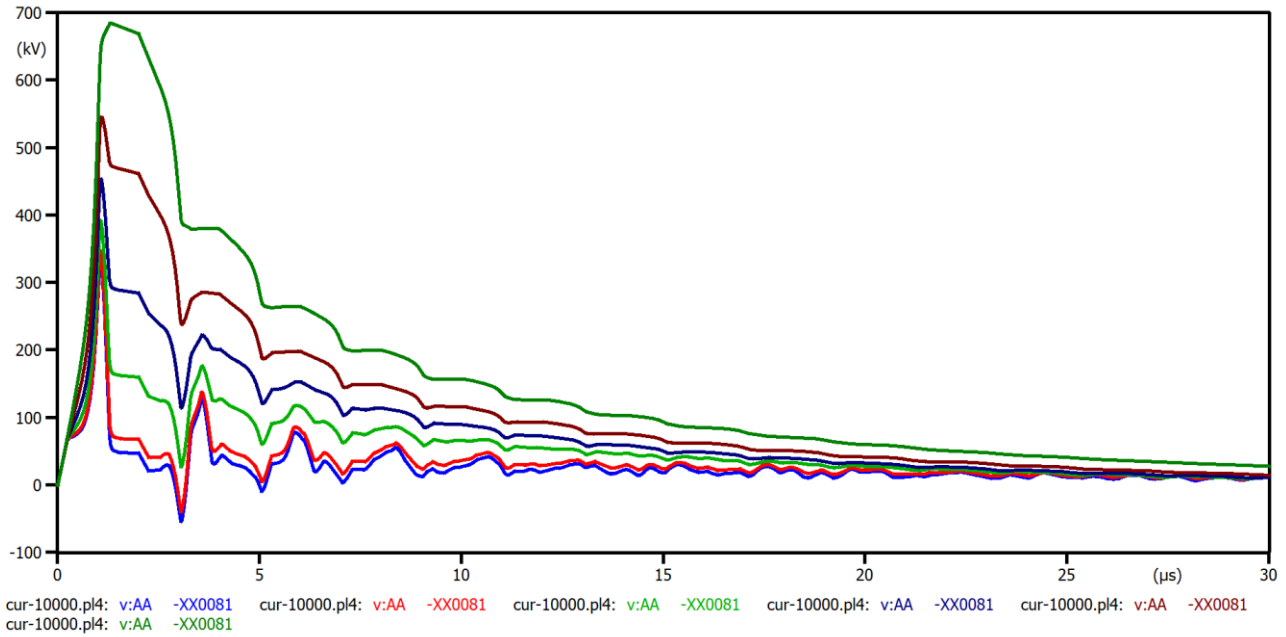


Σχήμα 5.7: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 150 kV μονού κυκλώματος (SC).

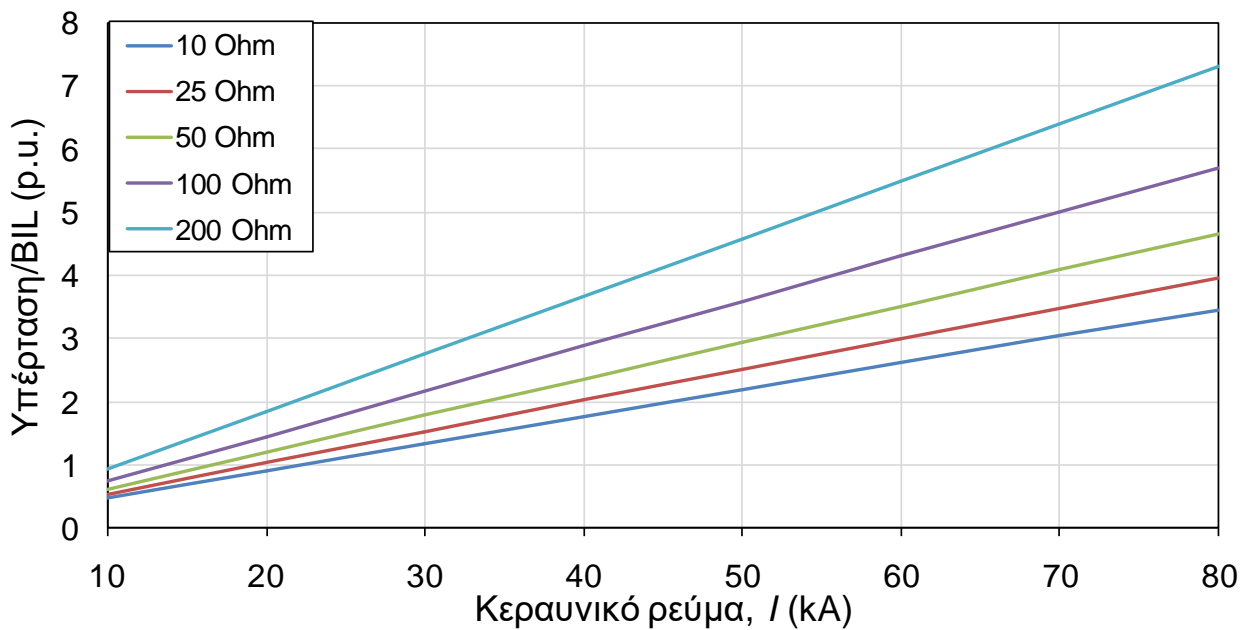


Σχήμα 5.8: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 150 kV μονού κυκλώματος (SC).

➤ ΓΜ 150 kV, επάνω φάση Α (διπλού κυκλώματος), BIL: 750 kV

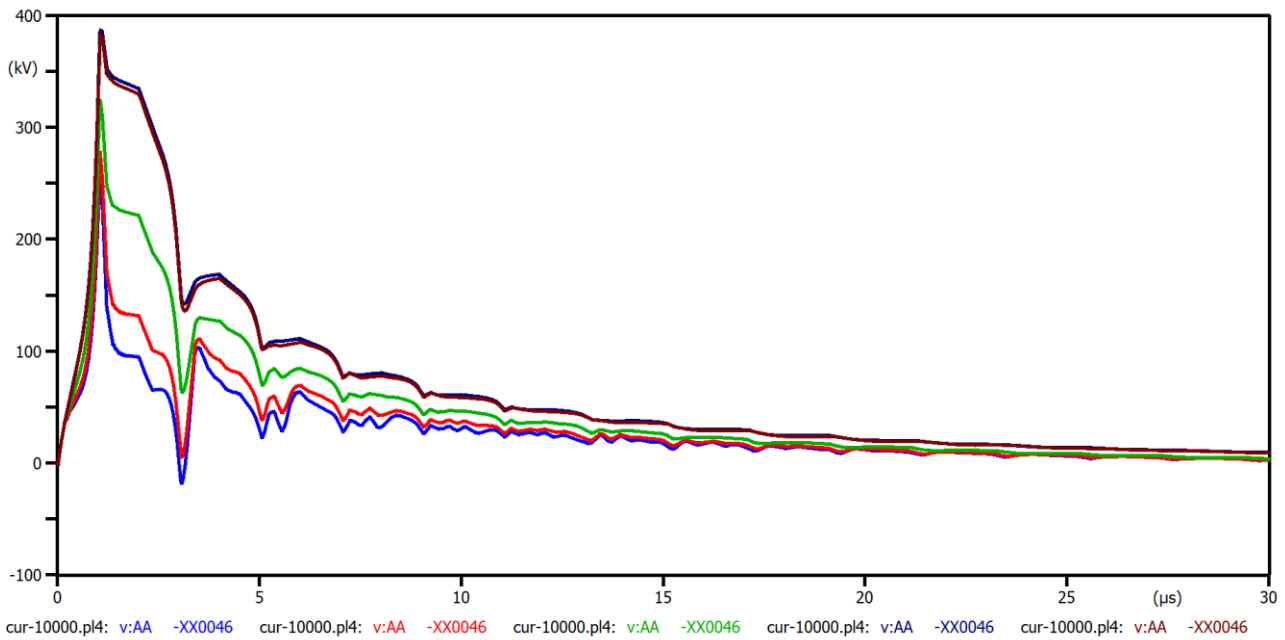


Σχήμα 5.9: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (7, 10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 150 kV διπλού κυκλώματος (DC).

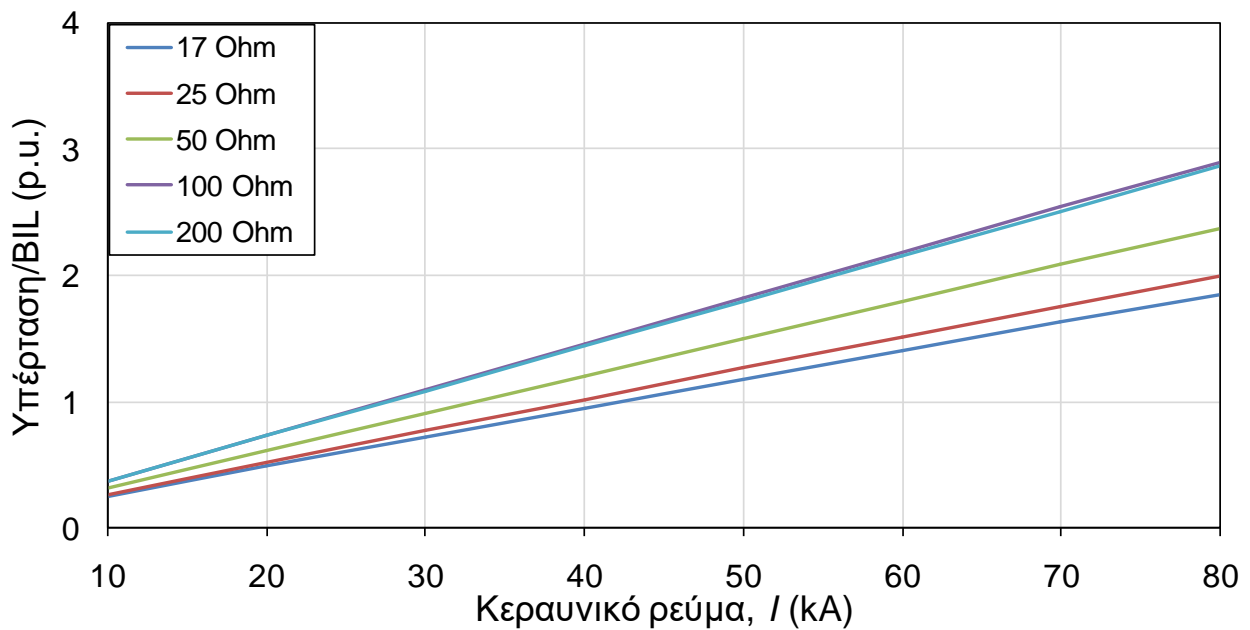


Σχήμα 5.10: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 150 kV διπλού κυκλώματος (DC).

➤ ΓΜ 220 kV, εξωτερική φάση Α (μονού κυκλώματος), BIL: 1050 kV

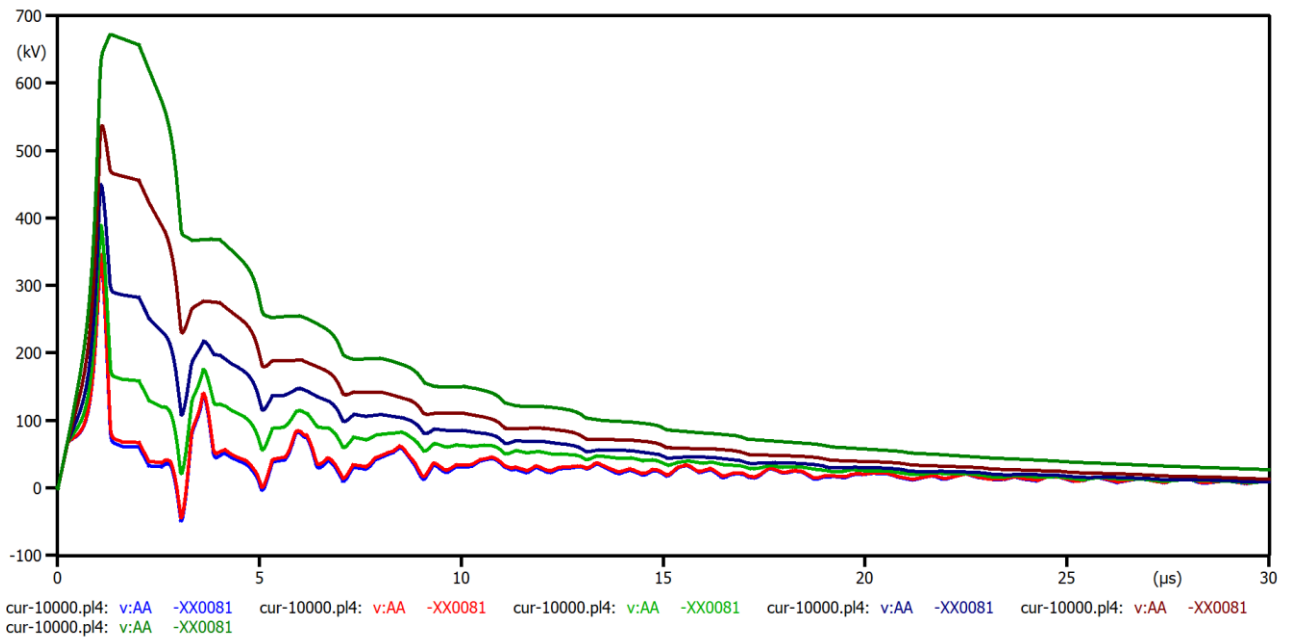


Σχήμα 5.11: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (17, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 220 kV μονού κυκλώματος (SC).

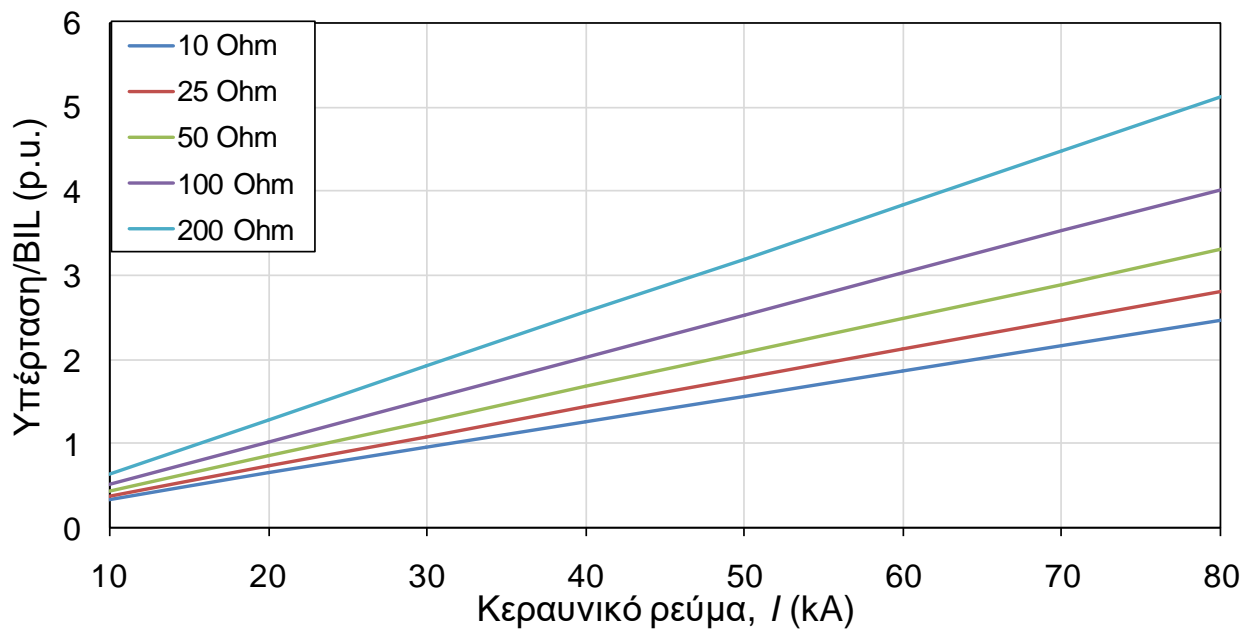


Σχήμα 5.12: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 220 kV μονού κυκλώματος (SC).

➤ ΓΜ 220 kV, επάνω φάση Α (διπλού κυκλώματος), BIL: 1050 kV

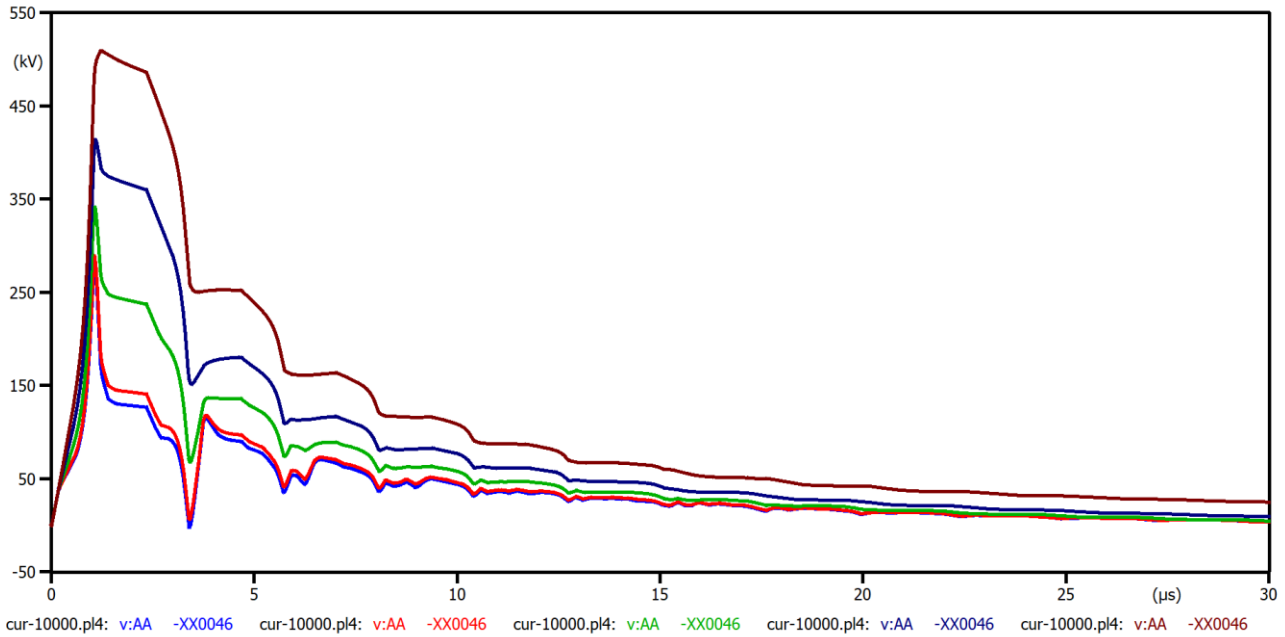


Σχήμα 5.13: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (7, 10, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 220 kV διπλού κυκλώματος (DC).

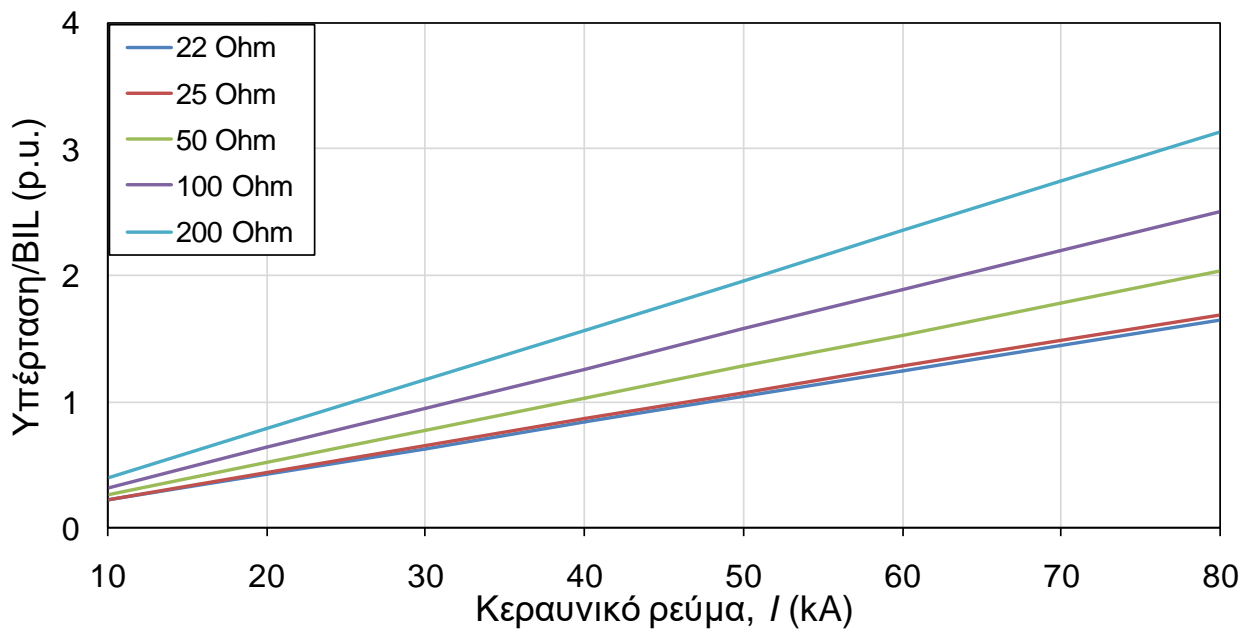


Σχήμα 5.14: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 220 kV διπλού κυκλώματος (DC).

➤ ΓΜ 275 kV, εξωτερική φάση Α (μονού κυκλώματος), BIL: 1300 kV

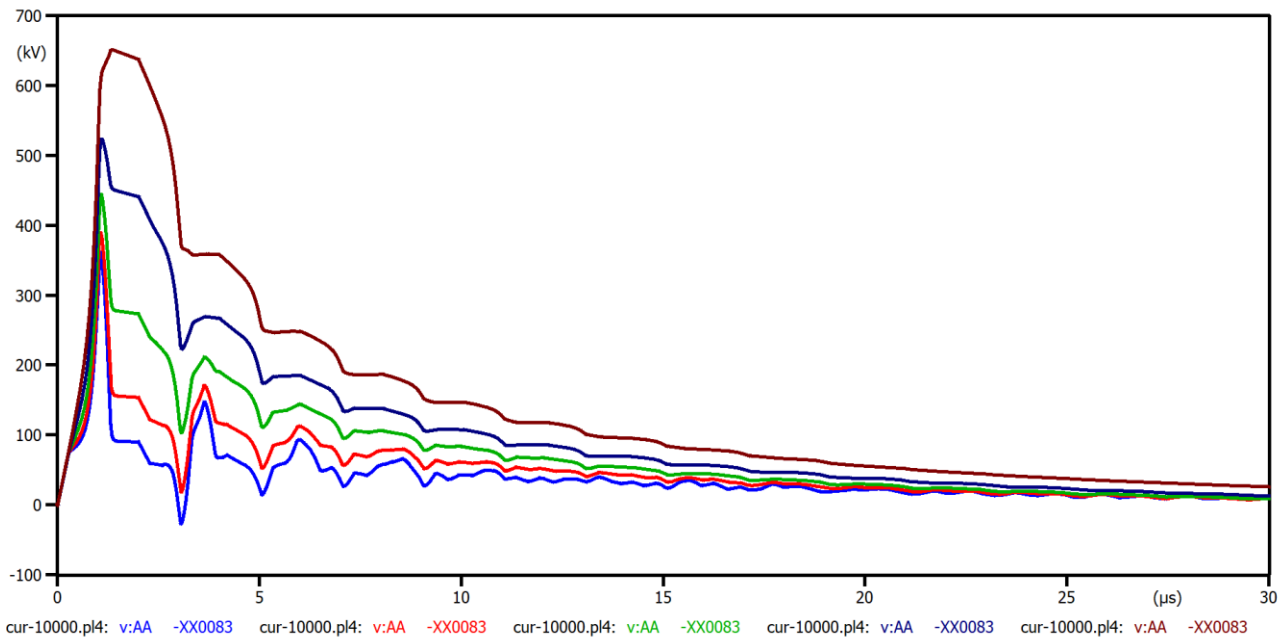


Σχήμα 5.15: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (22, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 275 kV μονού κυκλώματος (SC).

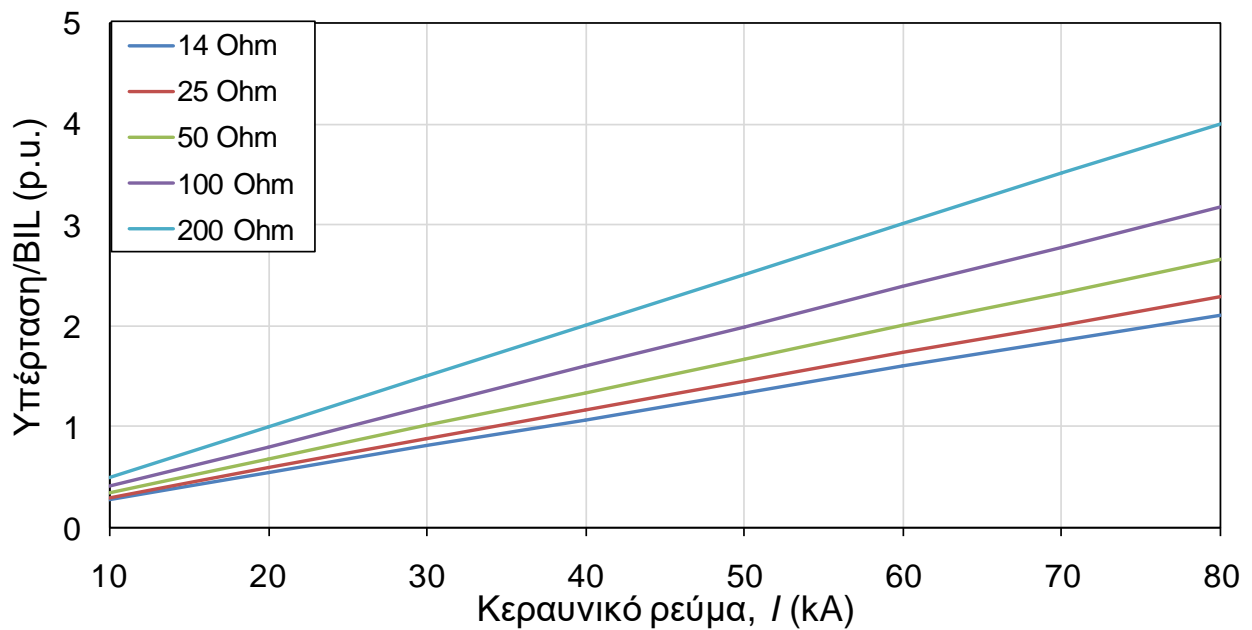


Σχήμα 5.16: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 275 kV μονού κυκλώματος (SC).

➤ ΓΜ 275 kV, επάνω φάση Α (διπλού κυκλώματος), BIL: 1300 kV

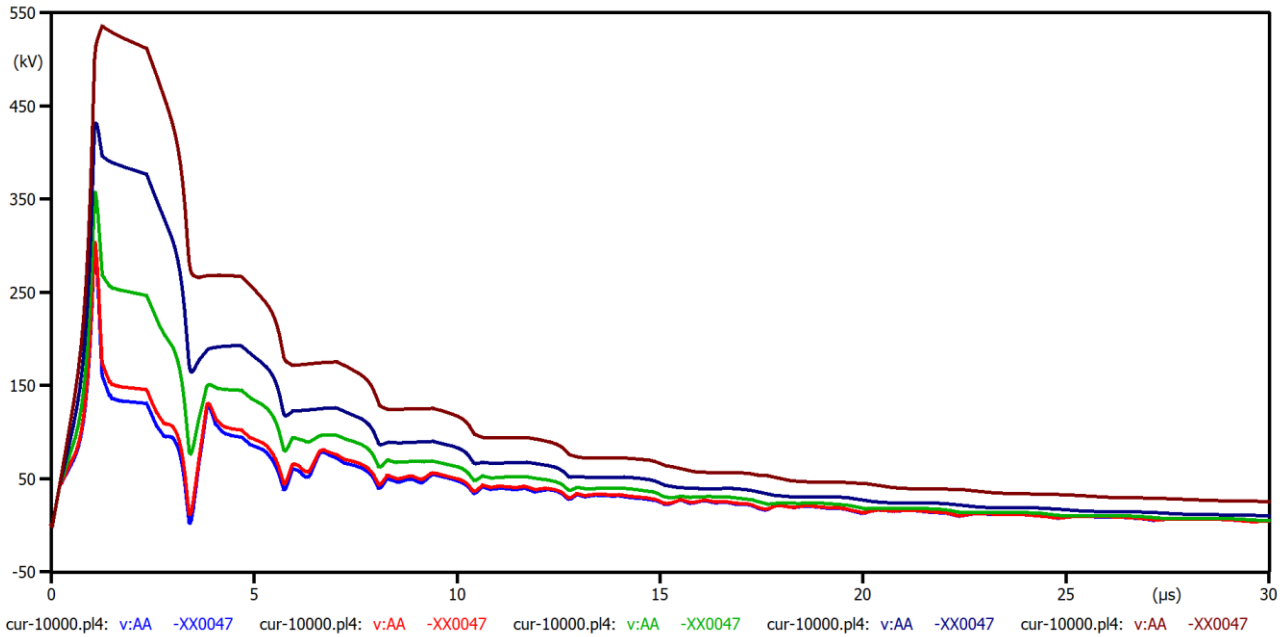


Σχήμα 5.17: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (14, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 275 kV διπλού κυκλώματος (DC).

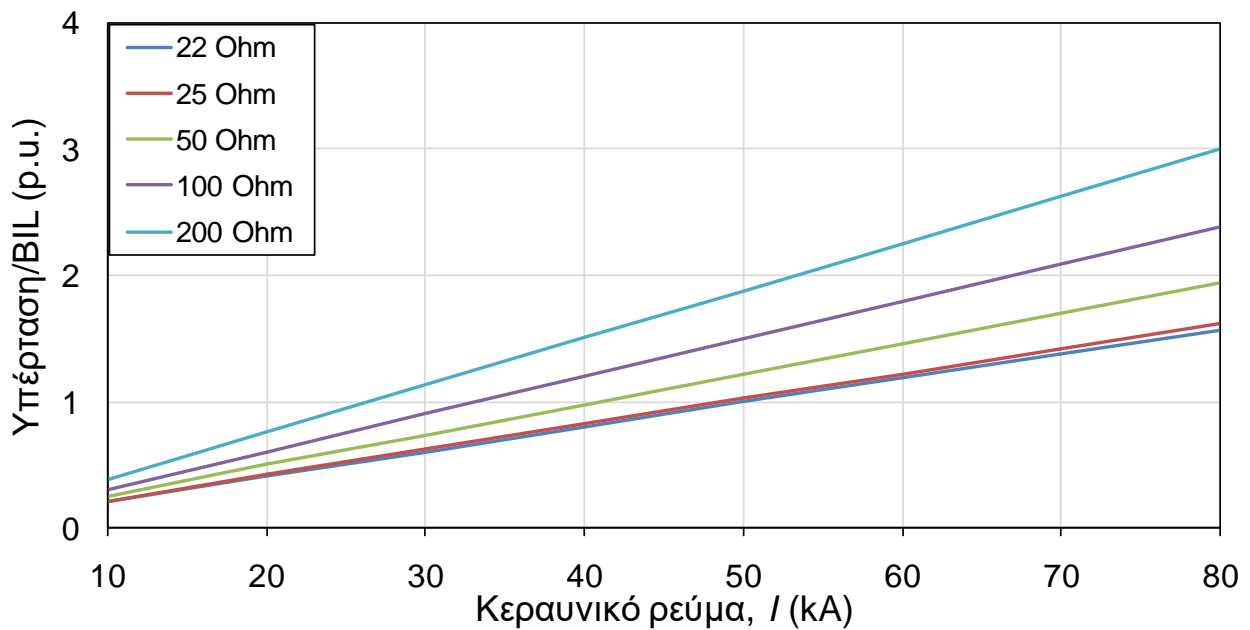


Σχήμα 5.18: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 275 kV διπλού κυκλώματος (DC).

➤ ΓΜ 400 kV, εξωτερική φάση Α (μονού κυκλώματος), BIL: 1425 kV

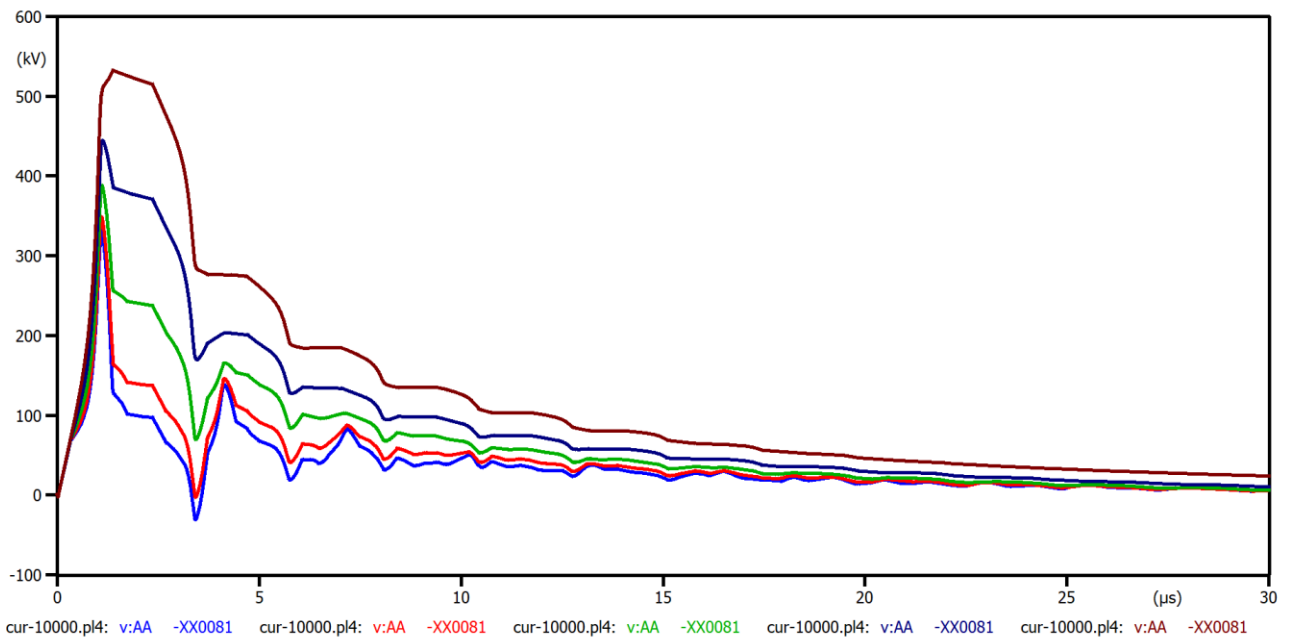


Σχήμα 5.19: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (22, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC).

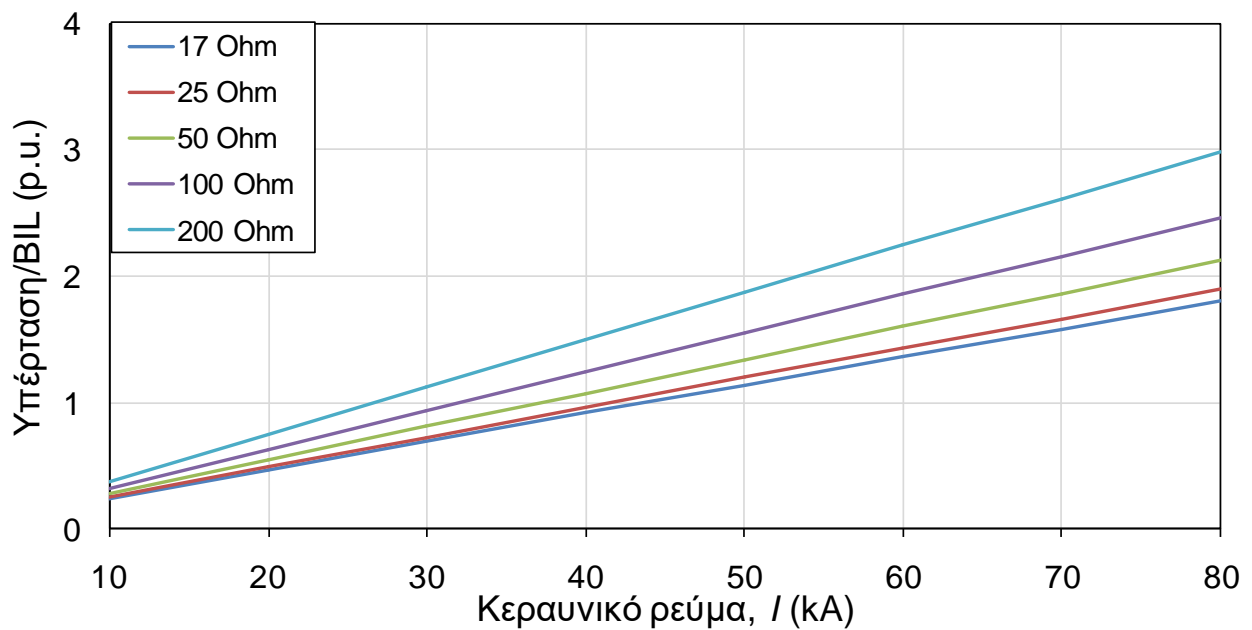


Σχήμα 5.20: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC).

➤ ΓΜ 400 kV, επάνω φάση Α (διπλού κυκλώματος), ΒΙΛ: 1425 kV

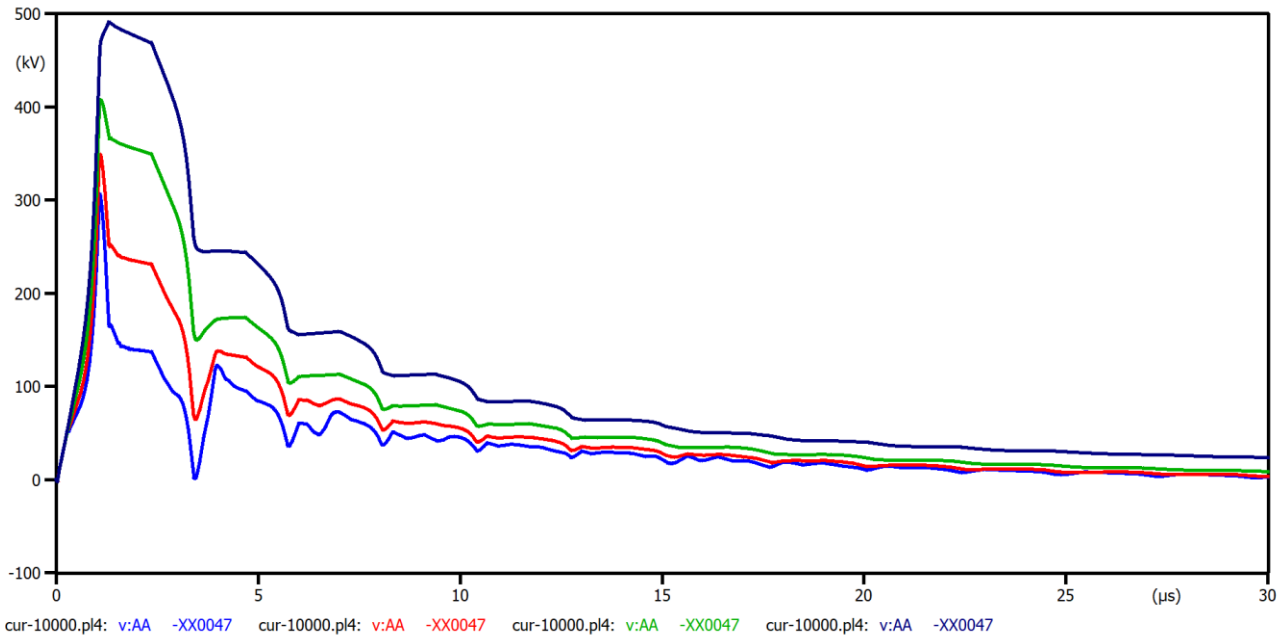


Σχήμα 5.21: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (17, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 400 kV διπλού κυκλώματος (DC).

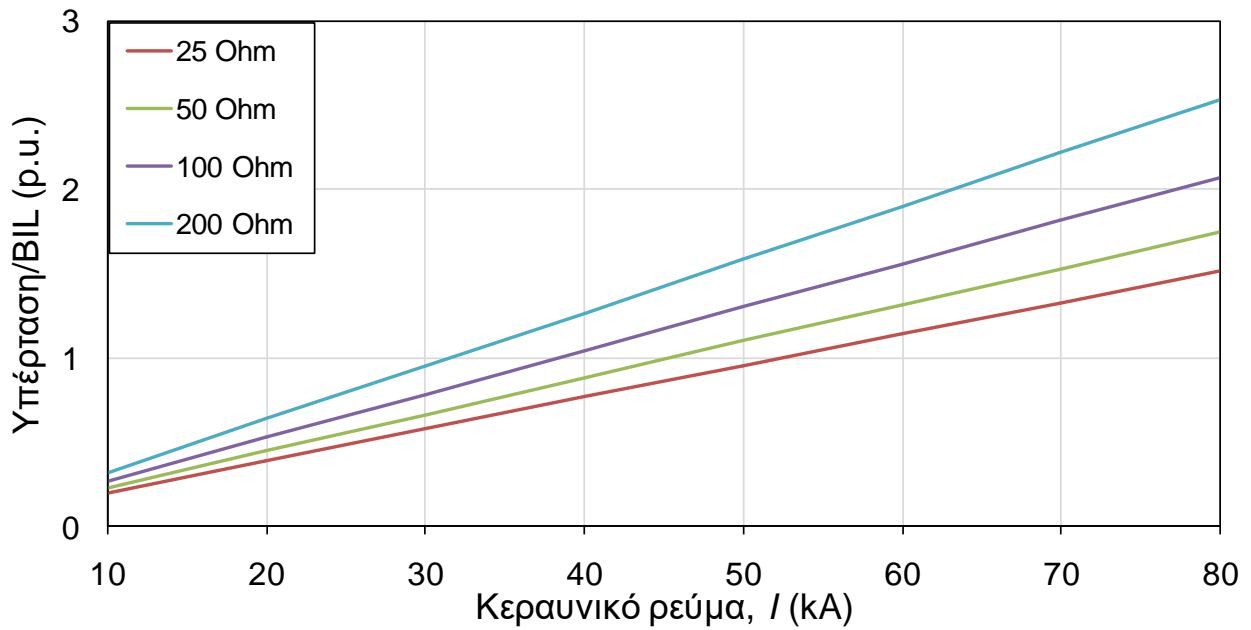


Σχήμα 5.22: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 400 kV διπλού κυκλώματος (DC).

➤ ΓΜ 500 kV, εξωτερική φάση Α (μονού κυκλώματος), BIL: 1550 kV

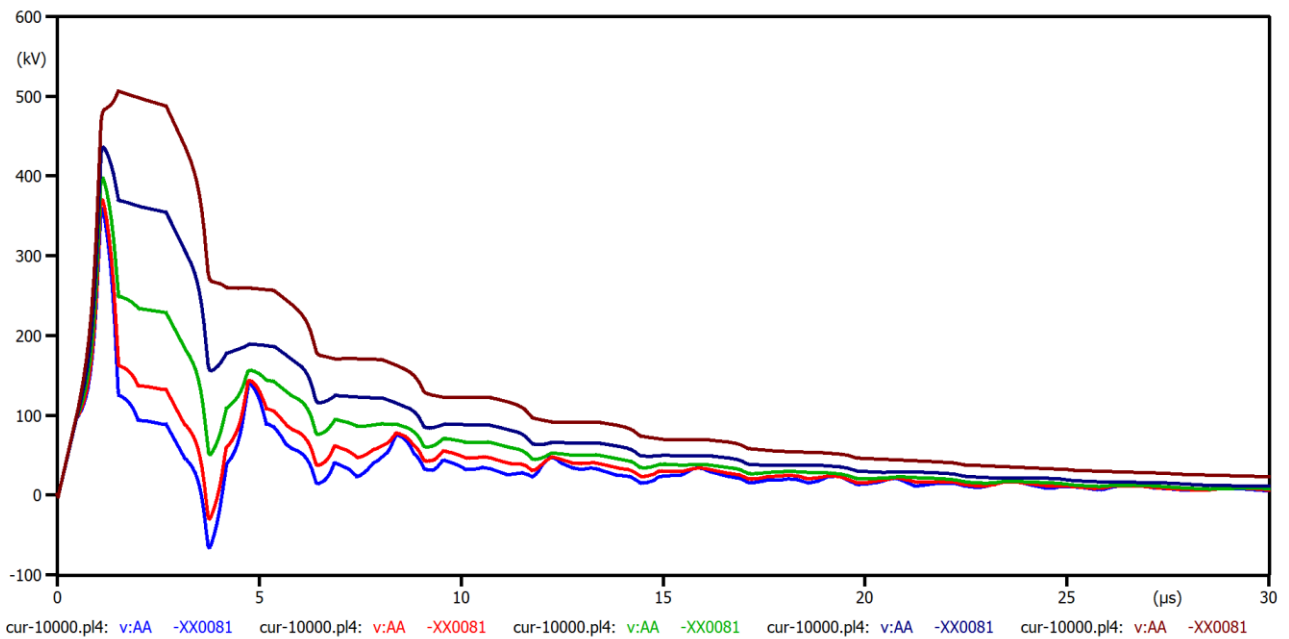


Σχήμα 5.23: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 500 kV μονού κυκλώματος (SC).

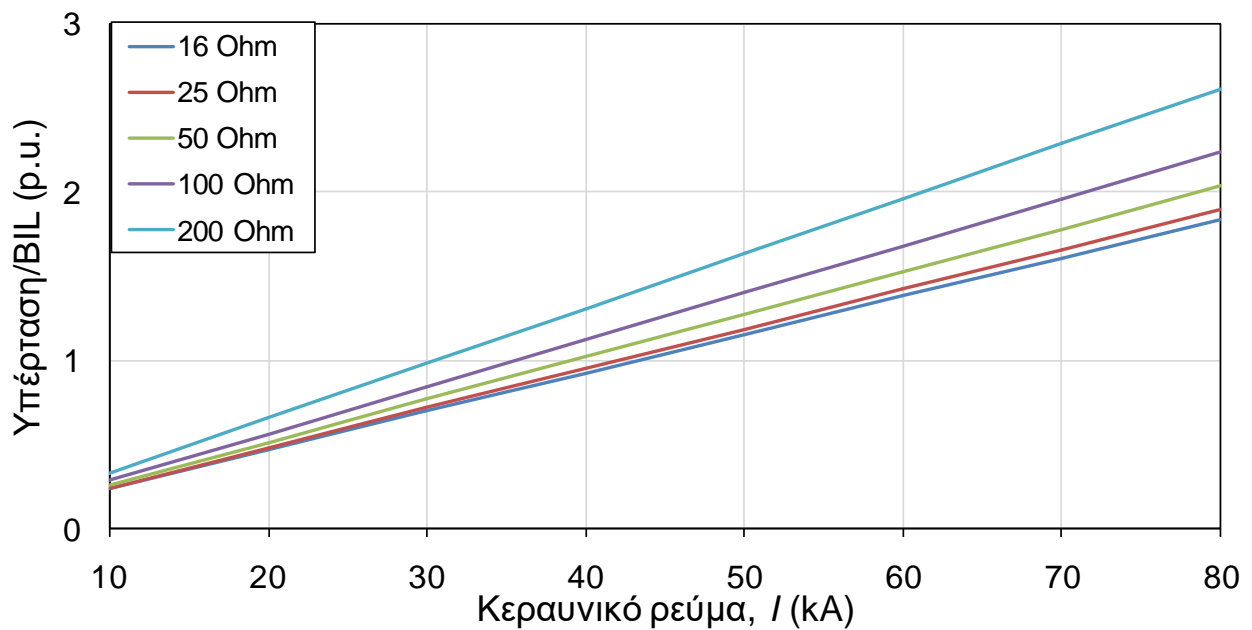


Σχήμα 5.24: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 500 kV μονού κυκλώματος (SC).

➤ ΓΜ 500 kV, επάνω φάση Α (διπλού κυκλώματος), ΒΙΛ: 1550 kV

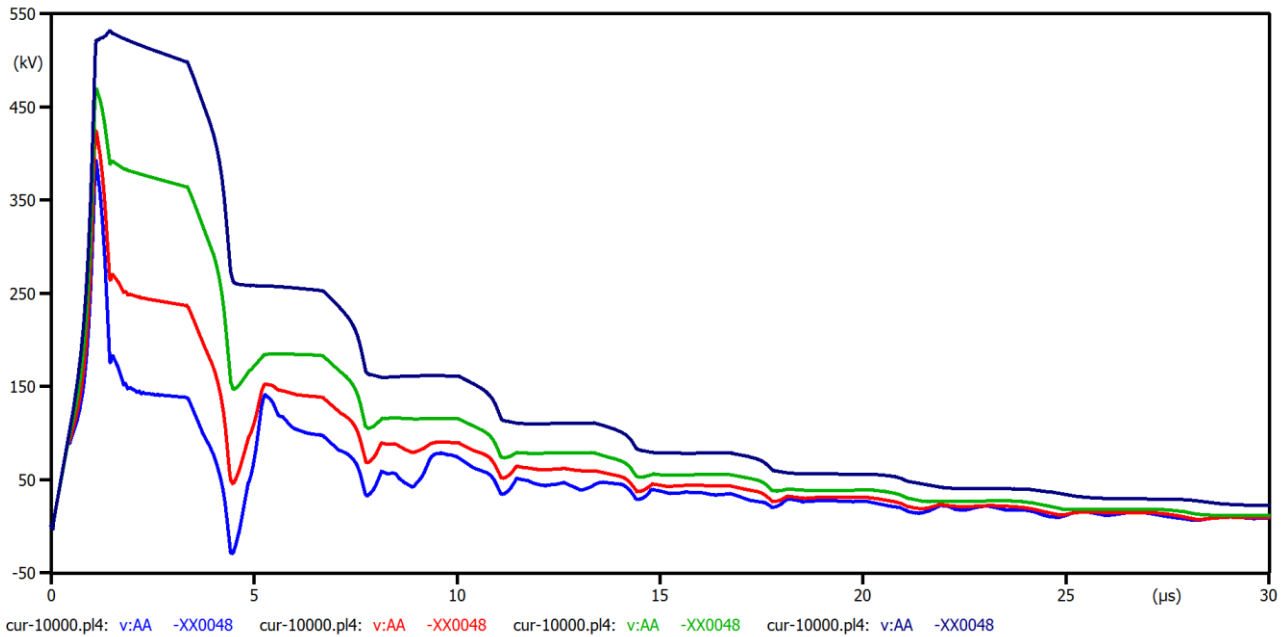


Σχήμα 5.25: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (16, 25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 500 kV διπλού κυκλώματος (DC).

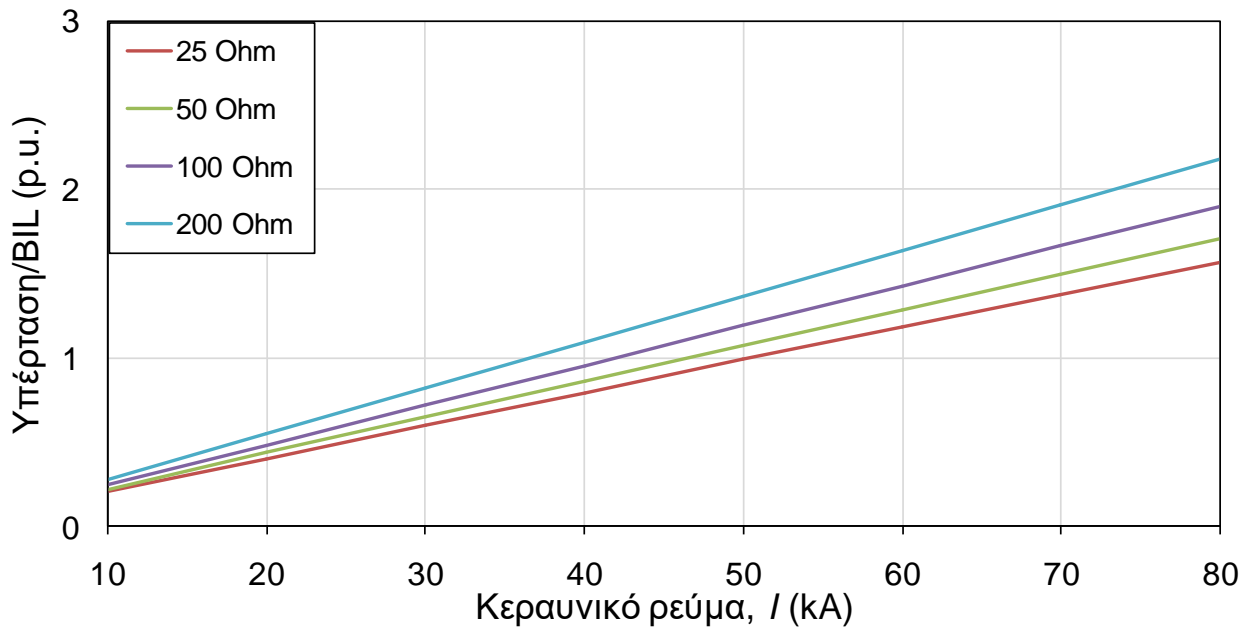


Σχήμα 5.26: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 500 kV διπλού κυκλώματος (DC).

➤ ΓΜ 735 kV, εξωτερική φάση Α (μονού κυκλώματος), BIL: 1950 kV

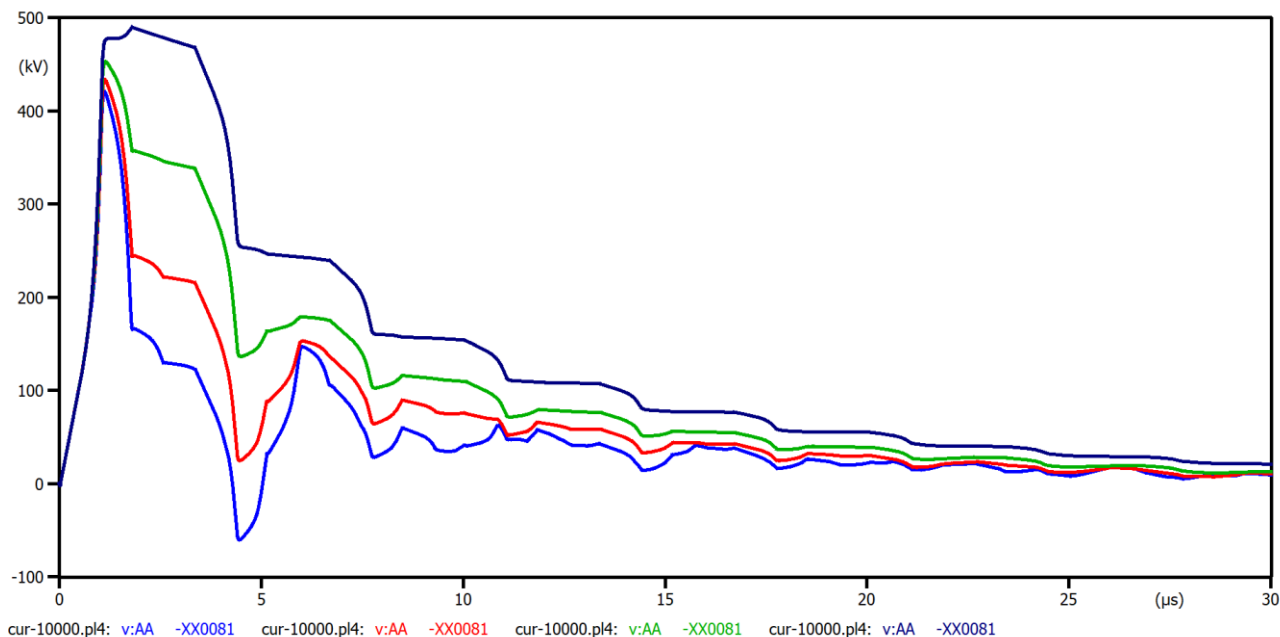


Σχήμα 5.27: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC).

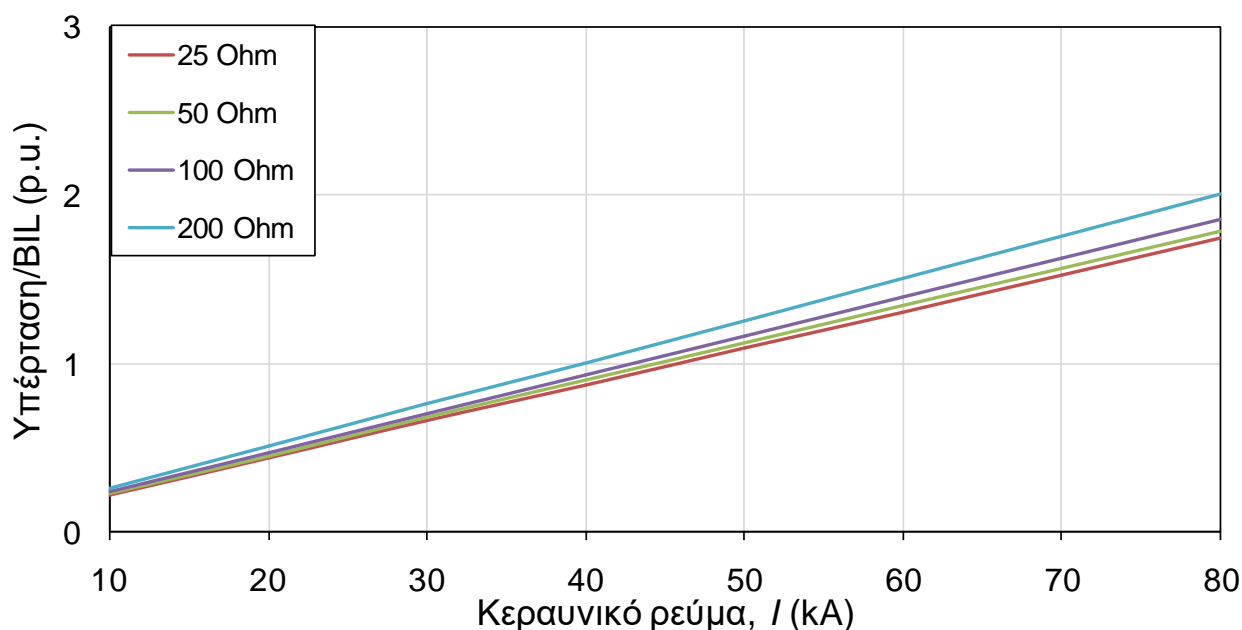


Σχήμα 5.28: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC).

➤ ΓΜ 765 kV, επάνω φάση Α, ΒΙΛ: 1950 kV, διπλού κυκλώματος



Σχήμα 5.29: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA με παράμετρο την αντίσταση γείωσης (25, 50, 100, 200 Ω), ΓΜ 765 kV διπλού κυκλώματος (DC).



Σχήμα 5.30: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, ΓΜ 765 kV διπλού κυκλώματος (DC).

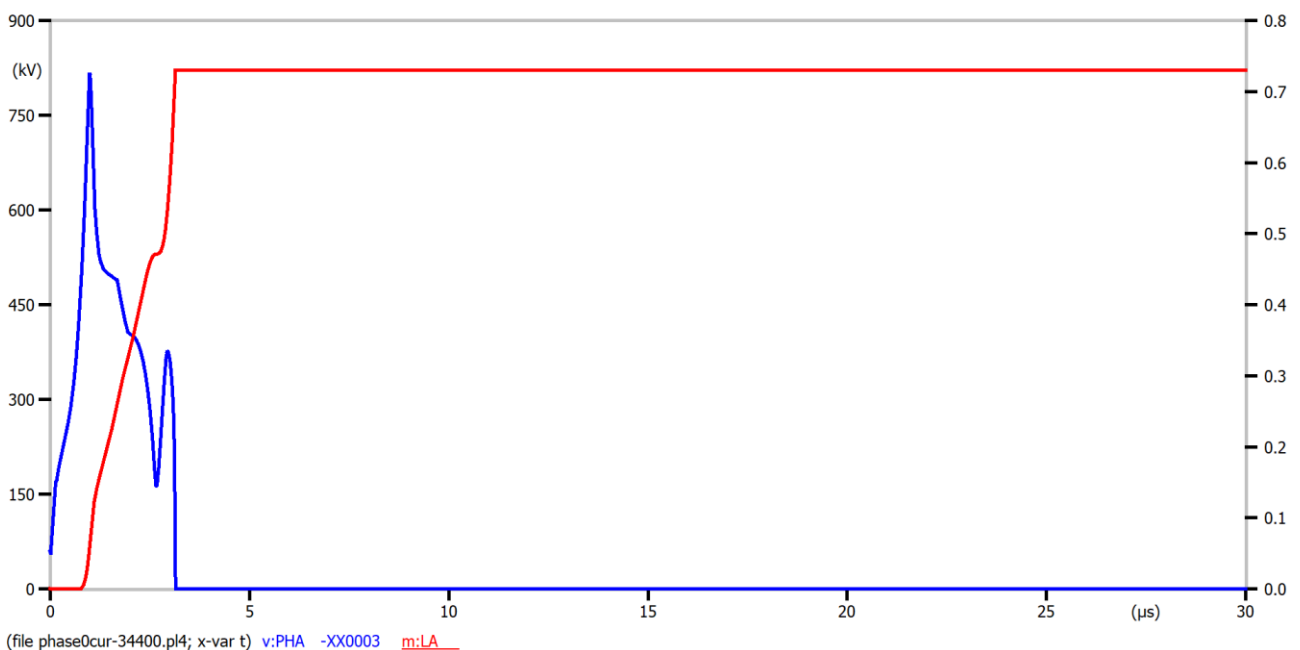
Τα παραπάνω γραφήματα προέκυψαν χωρίς να ληφθεί υπόψη το ενδεχόμενο διάσπασης της μόνωσης των γραμμών. Αυτό λαμβάνεται υπόψη στην επόμενη ενότητα που αφορά τον προσδιορισμό των κρίσιμων (ελάχιστων) κεραυνικών ρευμάτων επακόλουθων πληγμάτων που οδηγούν σε διάσπαση της μόνωσης των ΓΜ. Τα κρίσιμα ρεύματα είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της κεραυνικής συμπεριφοράς των ΓΜ.

5.1.2 Κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα (Backflashover)

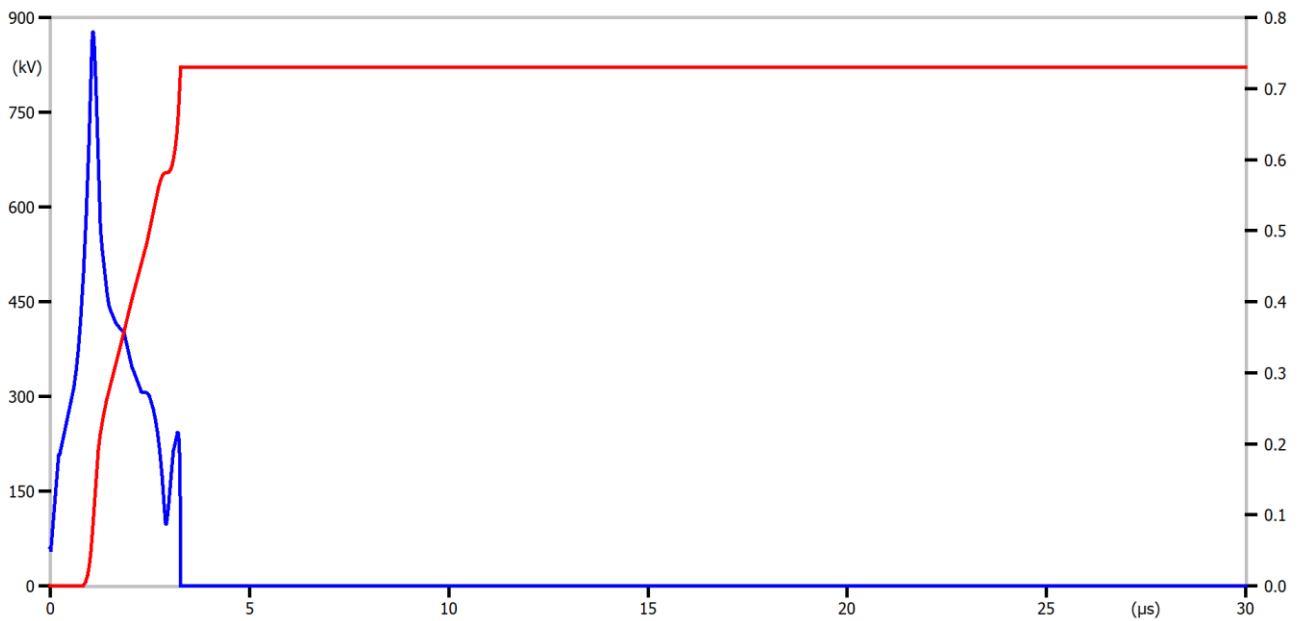
Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων για πλήγμα στον πυλώνα. Σε αυτά περιλαμβάνονται ενδεικτικές κυματομορφές με διάσπαση (Σχήμα 5.31 έως 5.38), το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα συναρτήσεως της γωνίας φάσης (Σχήμα 5.40 έως Σχήμα 5.47) και ραβδογράμματα (Σχήμα 5.48 έως Σχήμα 5.51) με το ελάχιστο κεραυνικό ρεύμα με παράμετρο την αντίσταση γείωσης.

Οι κυματομορφές (Σχήμα 5.31 έως Σχήμα 5.38) είναι ενδεικτικές και η μορφή τους είναι παρόμοια για όλες τις αντιστάσεις γείωσης όσον αφορά τη διάσπαση (κατάρρευση της τάσης στο 0), οπότε παρουσιάζονται μόνο για αντίσταση γείωσης στα 25 Ω, ώστε να αποφευχθεί ο πλεονασμός. Δίνονται για την επάνω φάση A (διπλό κύκλωμα), εξωτερική φάση A (μονό κύκλωμα) η οποία βρίσκεται σε γωνία 0°. Όπως είναι φυσικό παρατηρούμε ότι κατά τη χρονική στιγμή της διάσπασης η τάση καταρρέει στο 0 και το μήκος του λήντερ γίνεται ίσο με το μήκος της μόνωσης της γραμμής.

- ΓΜ 66 kV, επάνω φάση A (διπλού κυκλώματος), εξωτερική φάση A (μονού κυκλώματος) BIL: 325 kV, αντίσταση γείωσης 25 Ω, γωνία φάσης 0°

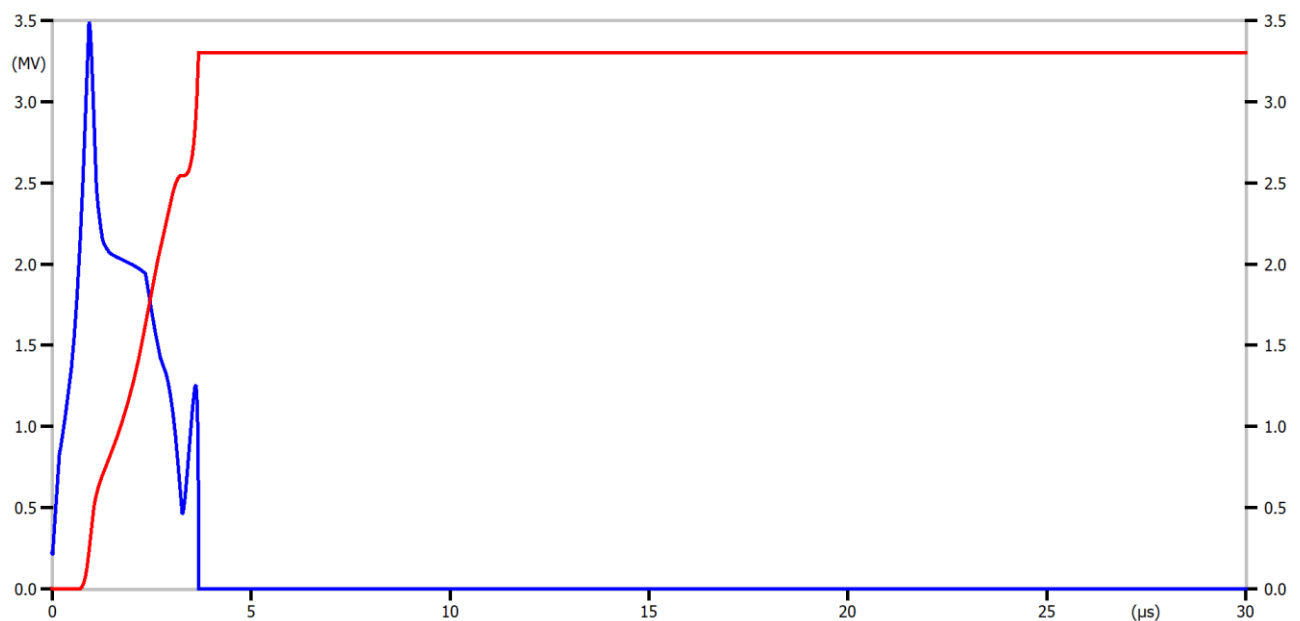


Σχήμα 5.31: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 66 kV, μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 34.4 kA.



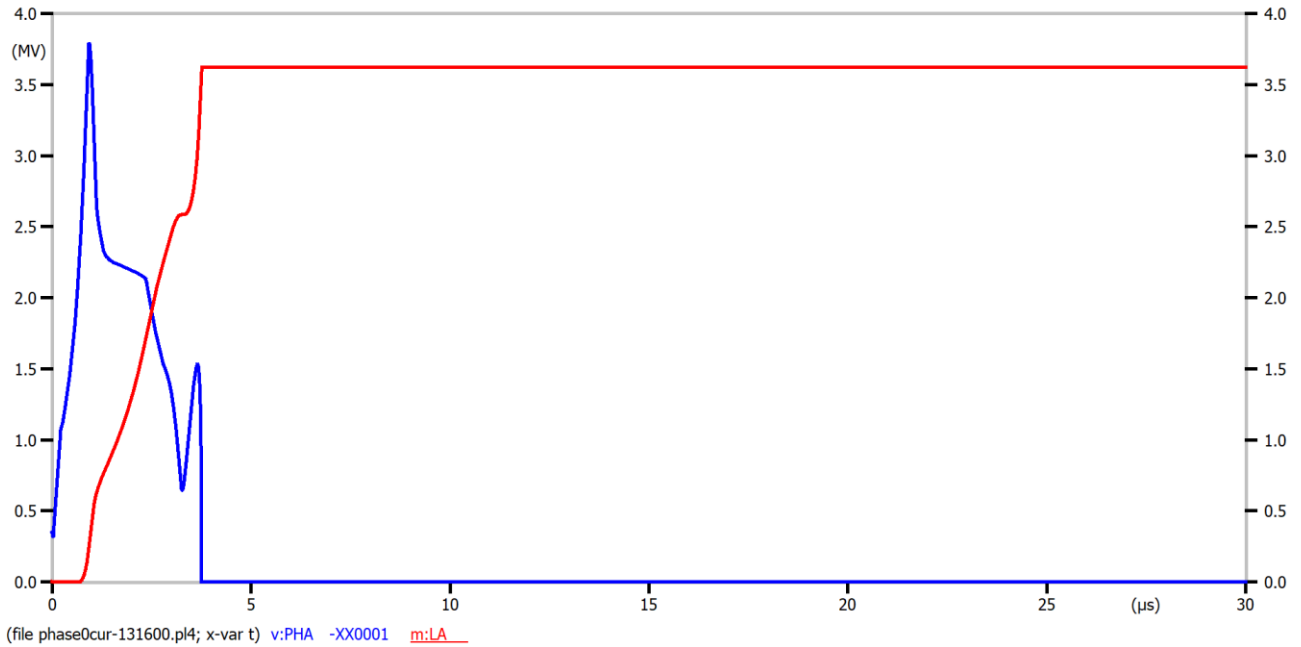
Σχήμα 5.32: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 66 kV, διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 22.8 kA.

- ΓΜ 275 kV, εξωτερική φάση A (μονού κυκλώματος), BIL: 1300 kV, αντίσταση γείωσης 25 Ω, γωνία φάσης 0°

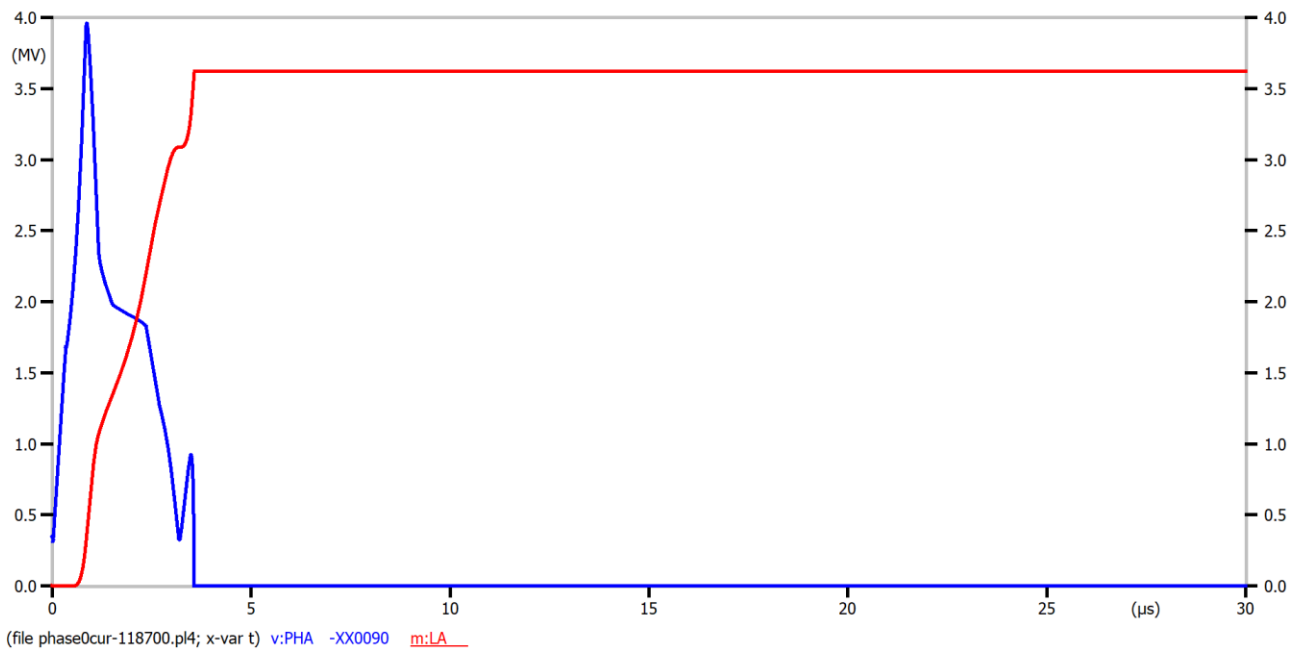


Σχήμα 5.33: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 275 kV, μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 109.4 kA.

- ΓΜ 400 kV, επάνω φάση Α (διπλού κυκλώματος), εξωτερική φάση Α (μονού κυκλώματος) BIL: 1425 kV, αντίσταση γείωσης 25 Ω, γωνία φάσης 0°

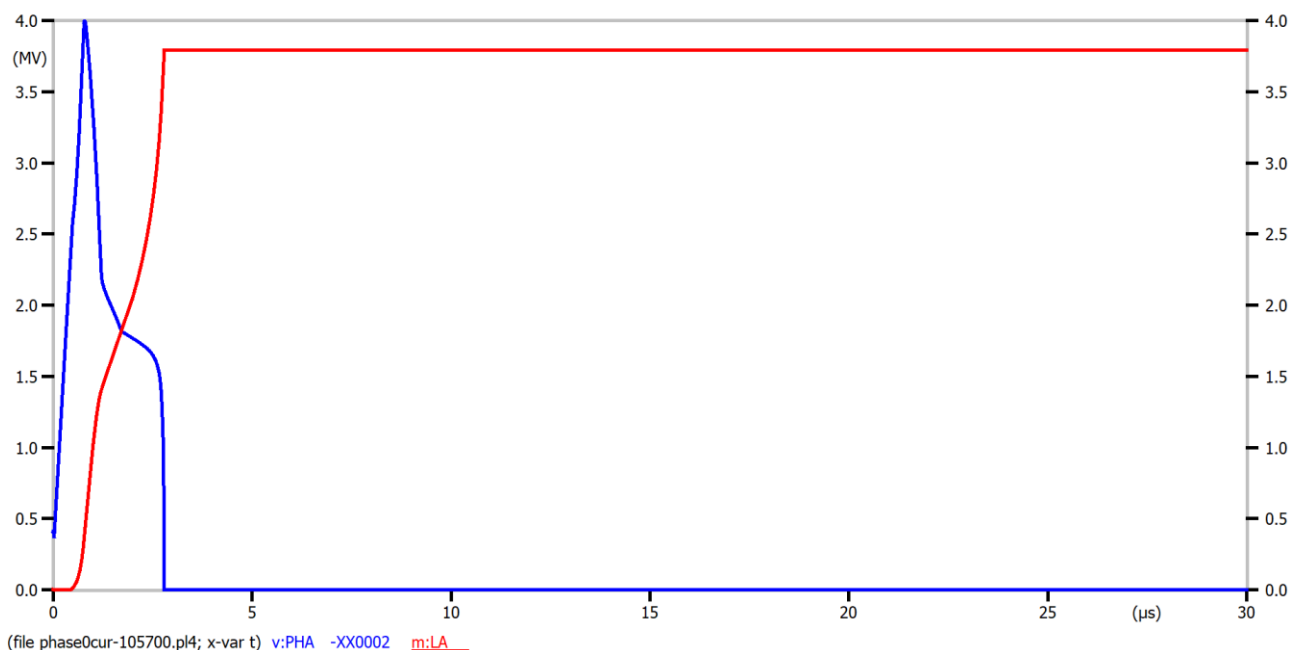


Σχήμα 5.34: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 400 kV, μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 131.6 kA.



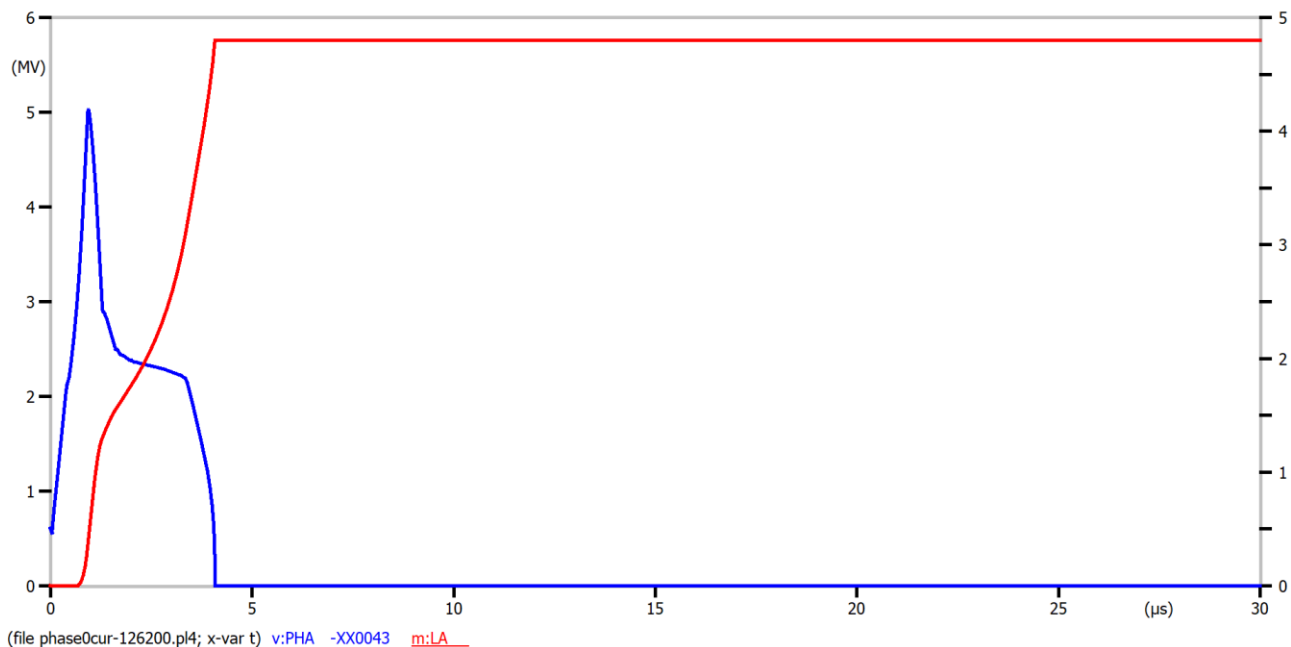
Σχήμα 5.35: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 400 kV, διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 118.7 kA.

- ΓΜ 500 kV, επάνω φάση A (διπλού κυκλώματος), BIL: 1550 kV, αντίσταση γείωσης 25 Ω, γωνία φάσης 0°



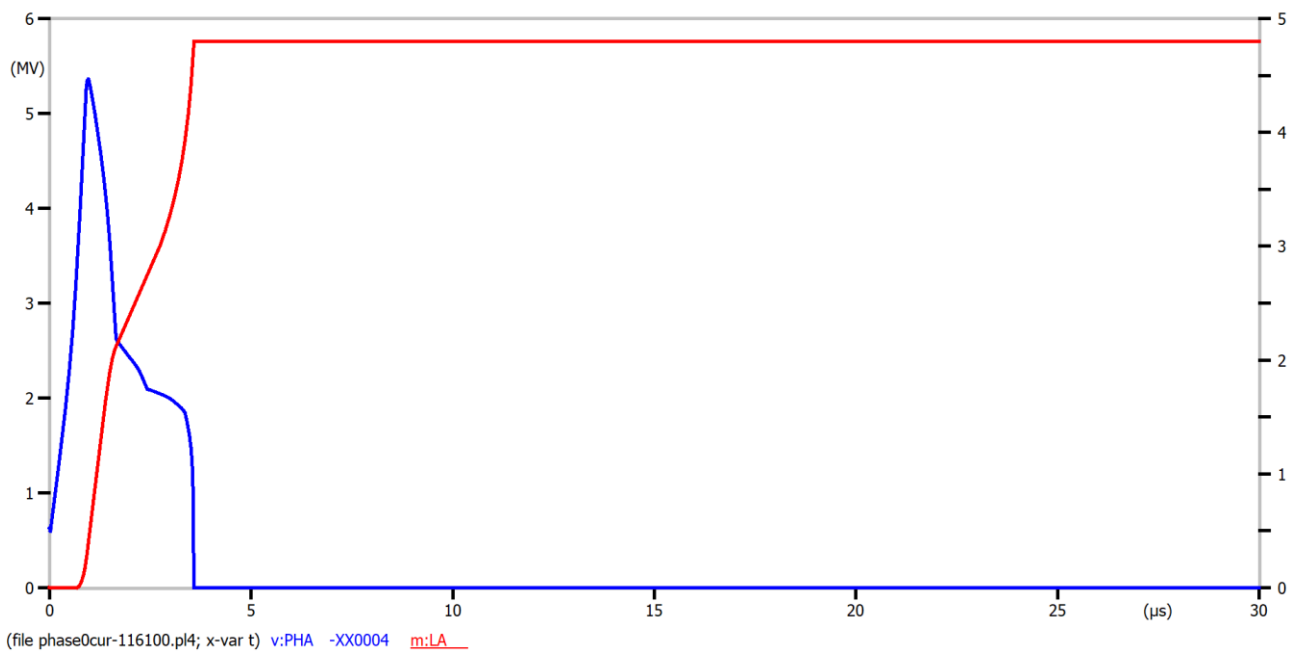
Σχήμα 5.36: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 500 kV, διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 105.7 kA.

- ΓΜ 735 kV, εξωτερική φάση A (μονού κυκλώματος), BIL: 1950 kV, αντίσταση γείωσης 25 Ω, γωνία φάσης 0°



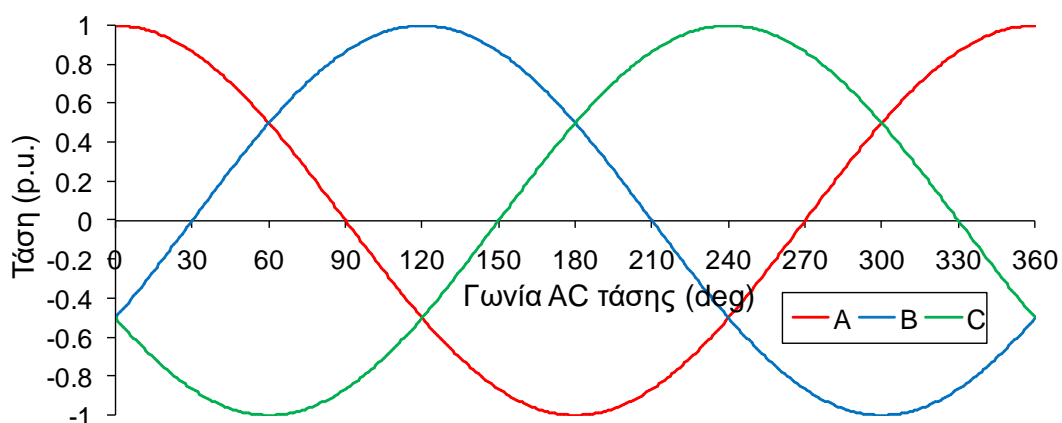
Σχήμα 5.37: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 735 kV, μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 126.2 kA.

- ΓΜ 765 kV, επάνω φάση A (διπλού κυκλώματος), BIL: 1950 kV, αντίσταση γείωσης 25 Ω, γωνία φάσης 0°



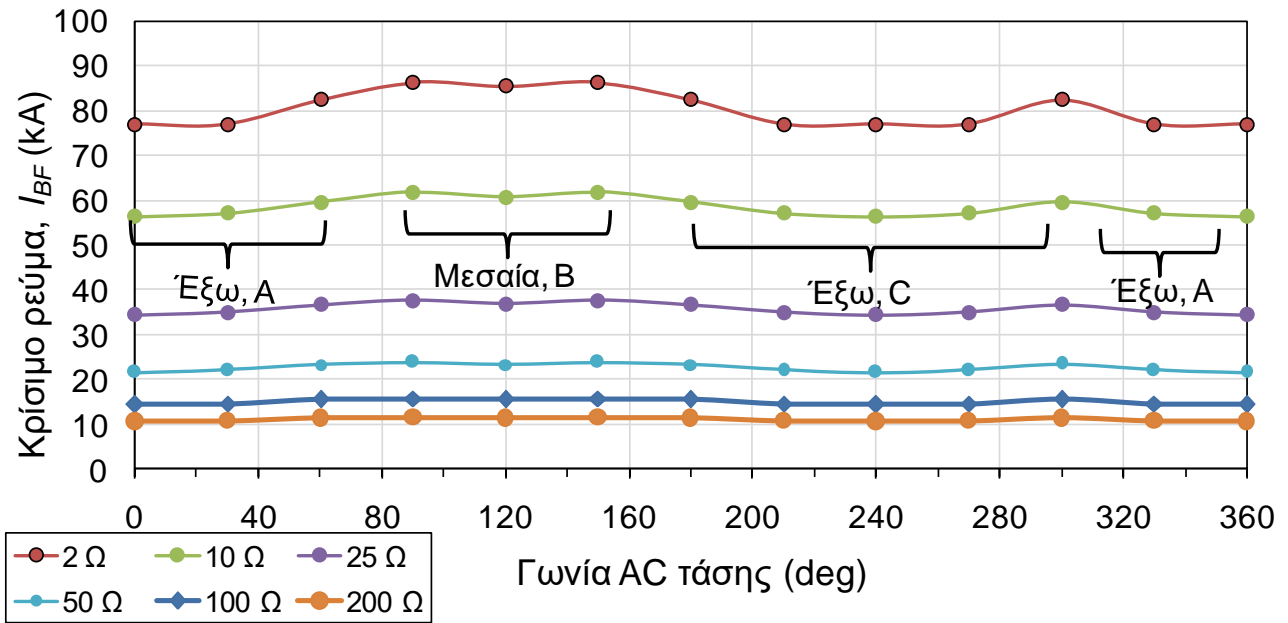
Σχήμα 5.38: Ενδεικτική κυματομορφή ανάστροφης διάσπασης, ΓΜ 765 kV, διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 116.1 kA.

Προτού προχωρήσουμε παρακάτω, είναι σημαντικό να επισημανθεί ο ρόλος της εναλλασσόμενης τάσης των ΓΜ μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η μεταβολή της θεωρείται αργή ως προς το φαινόμενο των κεραυνικών πληγμάτων με αποτέλεσμα αυτή να υπερτίθεται σε αυτά και να υφίστανται σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά της ΓΜ, επηρεάζοντας τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα και τις κεραυνικές υπερτάσεις. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.39 γραφική απεικόνιση της μεταβολής της AC (Alternative Current-Εναλλασσόμενο Ρεύμα) τάσης, των τριών φάσεων (A, B, C). Έπειτα, παρατίθενται σχήματα στα οποία απεικονίζεται η μεταβολή του κρίσιμου ρεύματος ως προς τη γωνία φάσης της AC τάσης.

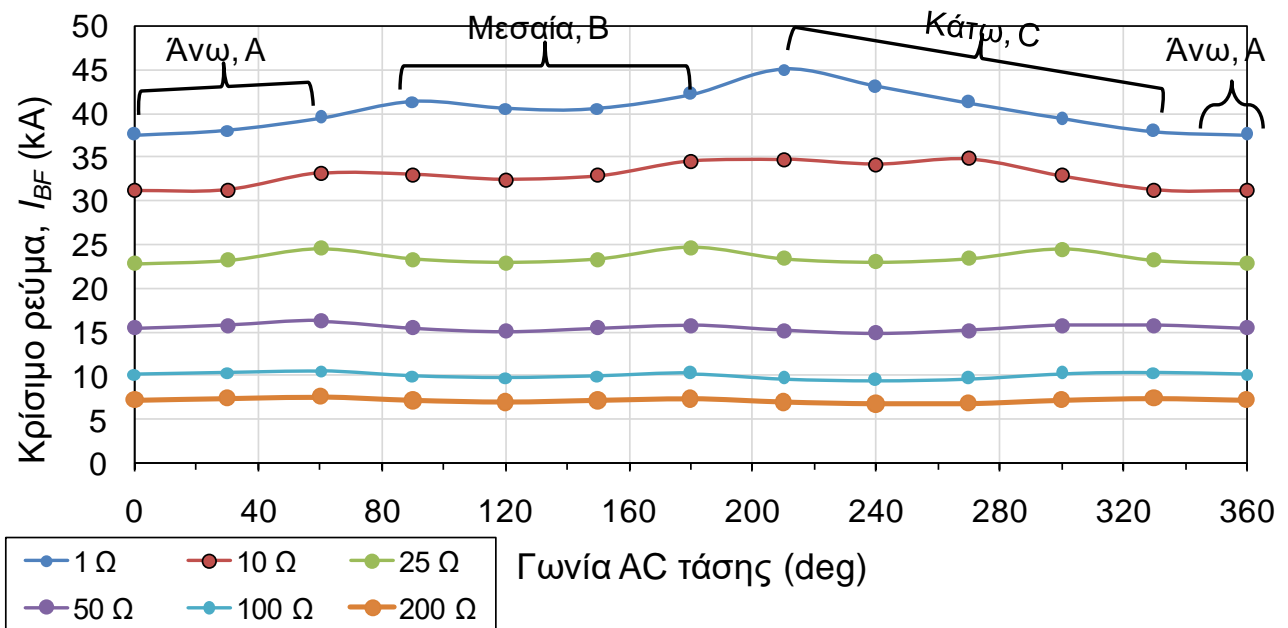


Σχήμα 5.39: Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της AC τάσης των φάσεων A, B, C της ΓΜ ως προς τη γωνία φάσης.

➤ ΓΜ 66 kV, BIL: 325 kV, παράμετρος: αντίσταση γείωσης

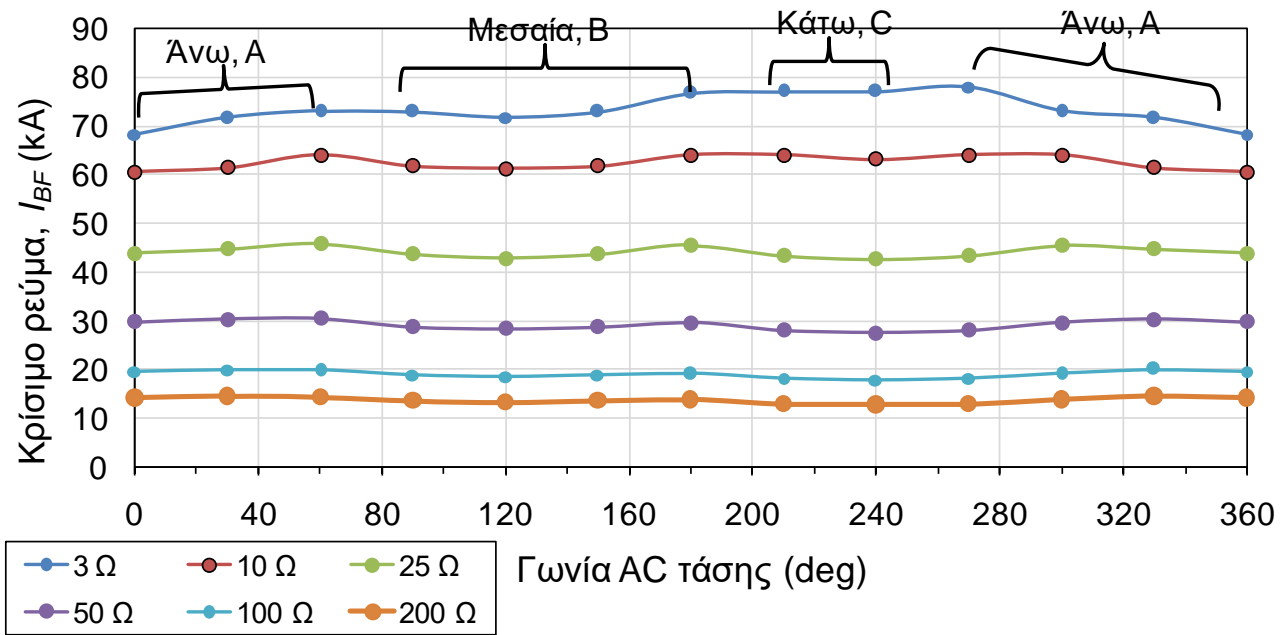


Σχήμα 5.40: Κρίσιμα κεραμικά ρεύματα συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC).



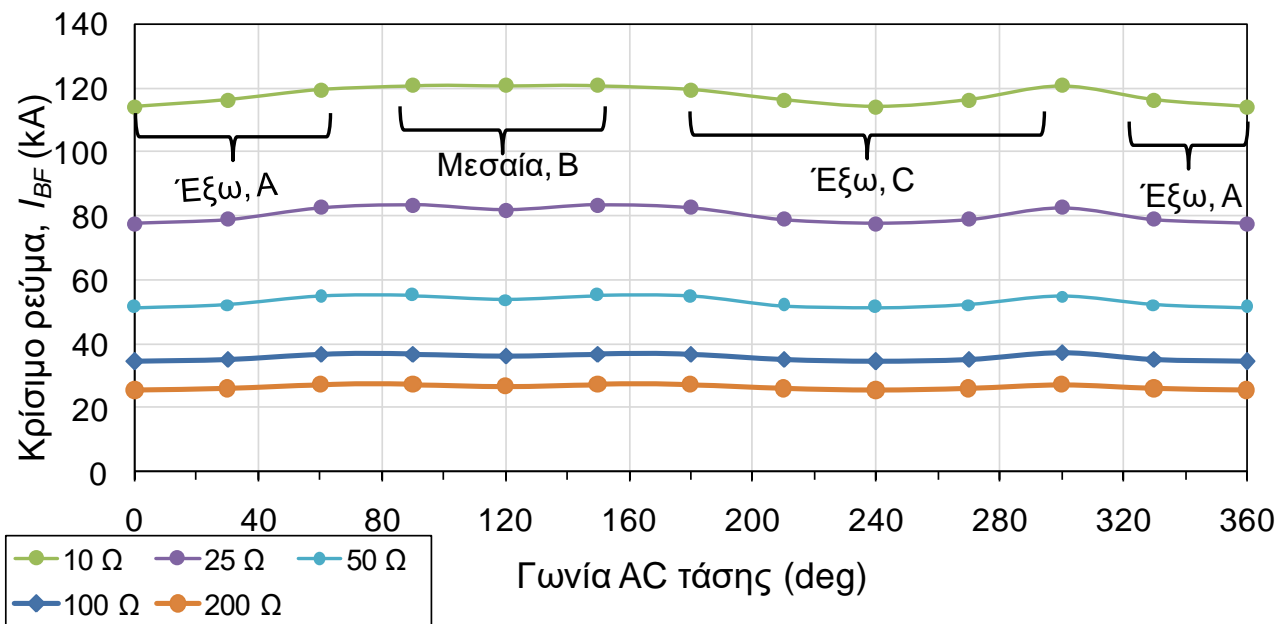
Σχήμα 5.41: Κρίσιμα κεραμικά ρεύματα συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 66 kV διπλού κυκλώματος (DC).

➤ ΓΜ 110 kV, BIL: 550 kV, παράμετρος: αντίσταση γείωσης

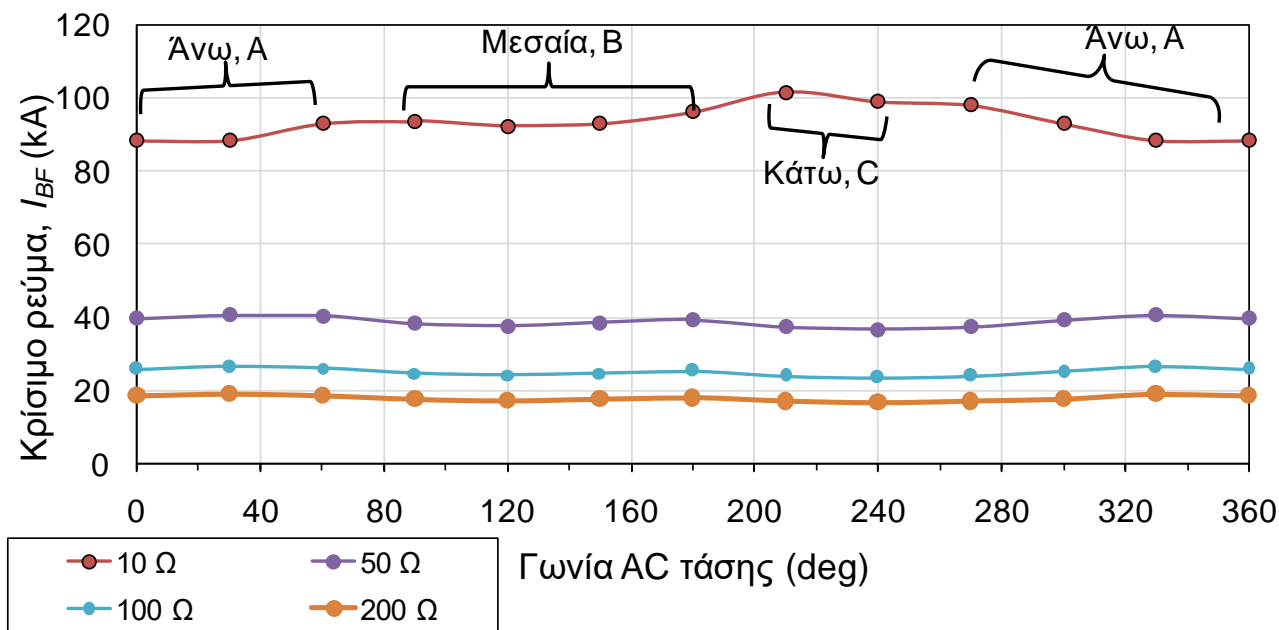


Σχήμα 5.42: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη.

➤ ΓΜ 150 kV, BIL: 750 kV, παράμετρος: αντίσταση γείωσης

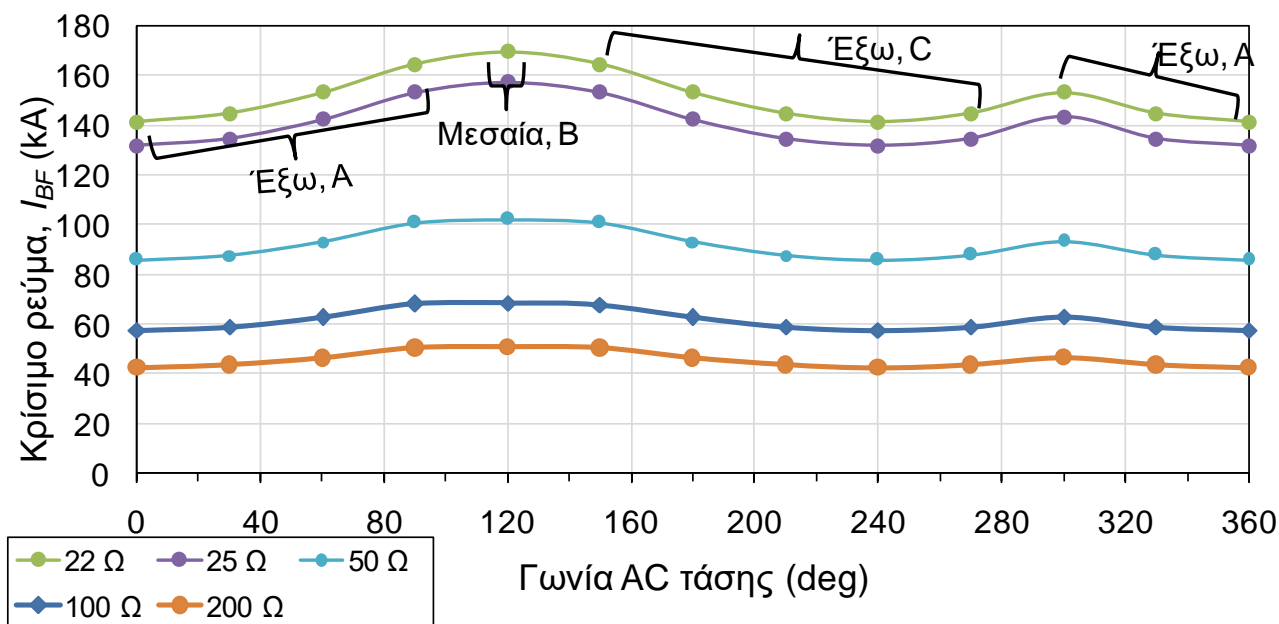


Σχήμα 5.43: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 150 kV μονού κυκλώματος (SC).

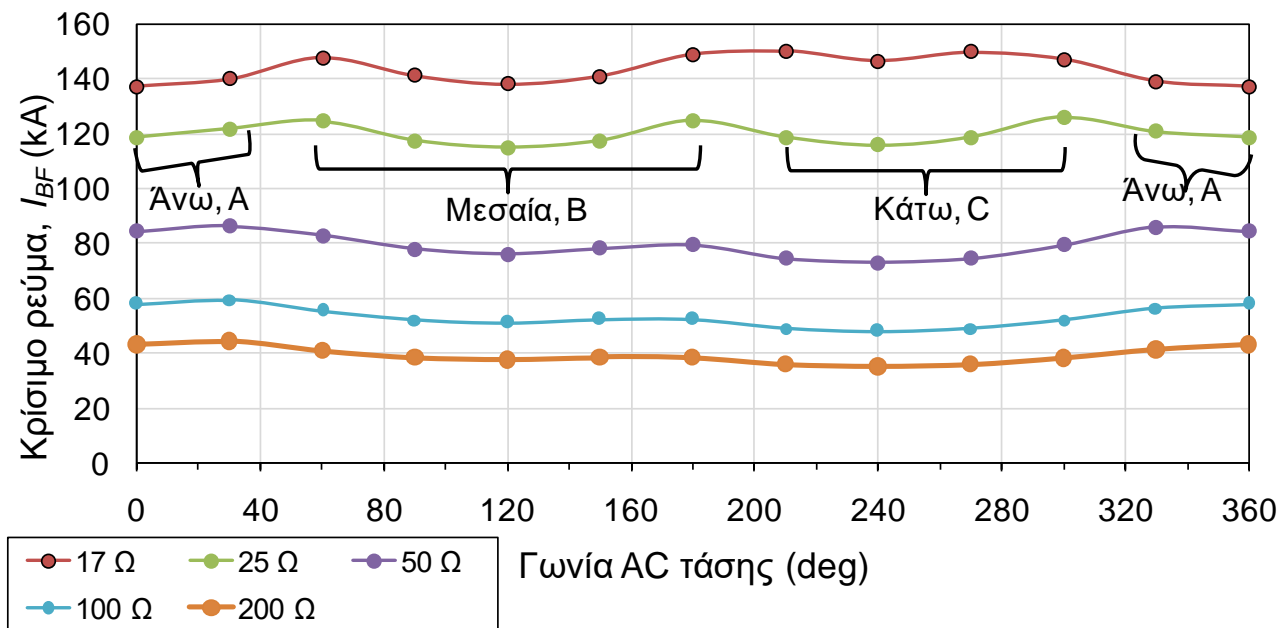


Σχήμα 5.44: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 150 kV διπλού κυκλώματος (DC).

➤ ΓΜ 400 kV, BIL: 1425 kV, παράμετρος: αντίσταση γείωσης

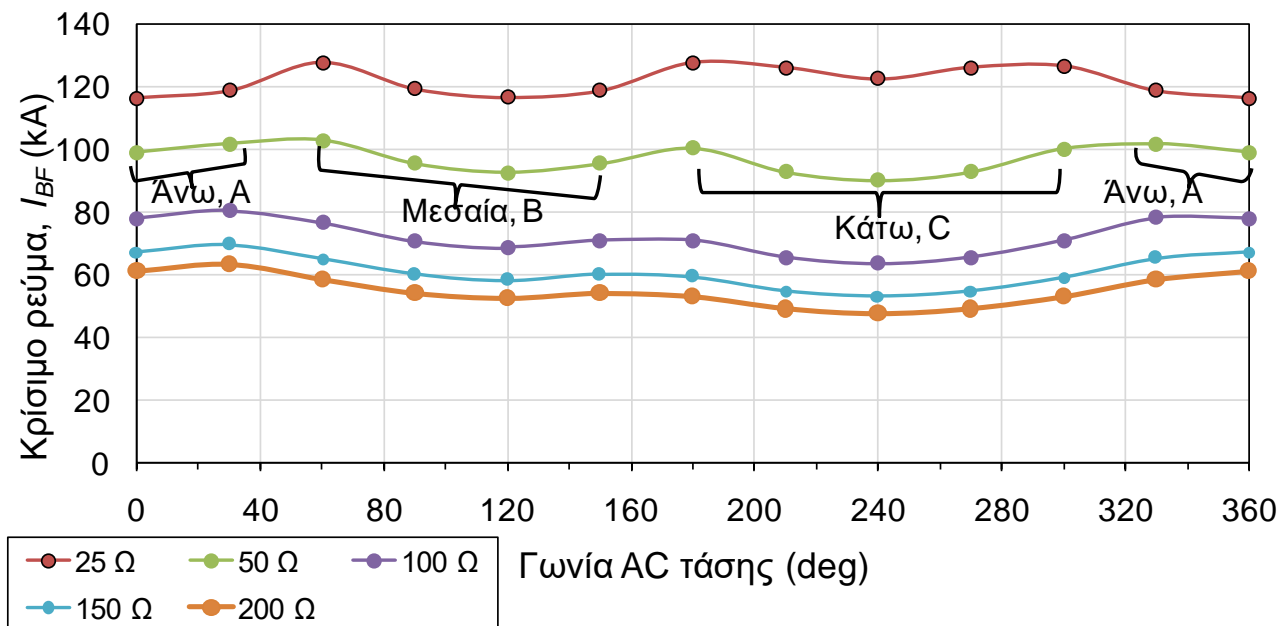


Σχήμα 5.45: Κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC).



Σχήμα 5.46: Κρίσιμα κεραμικά ρεύματα συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 400 kV διπλού κυκλώματος (DC).

➤ ΓΜ 765 kV, BIL: 1950 kV, παράμετρος: αντίσταση γείωσης



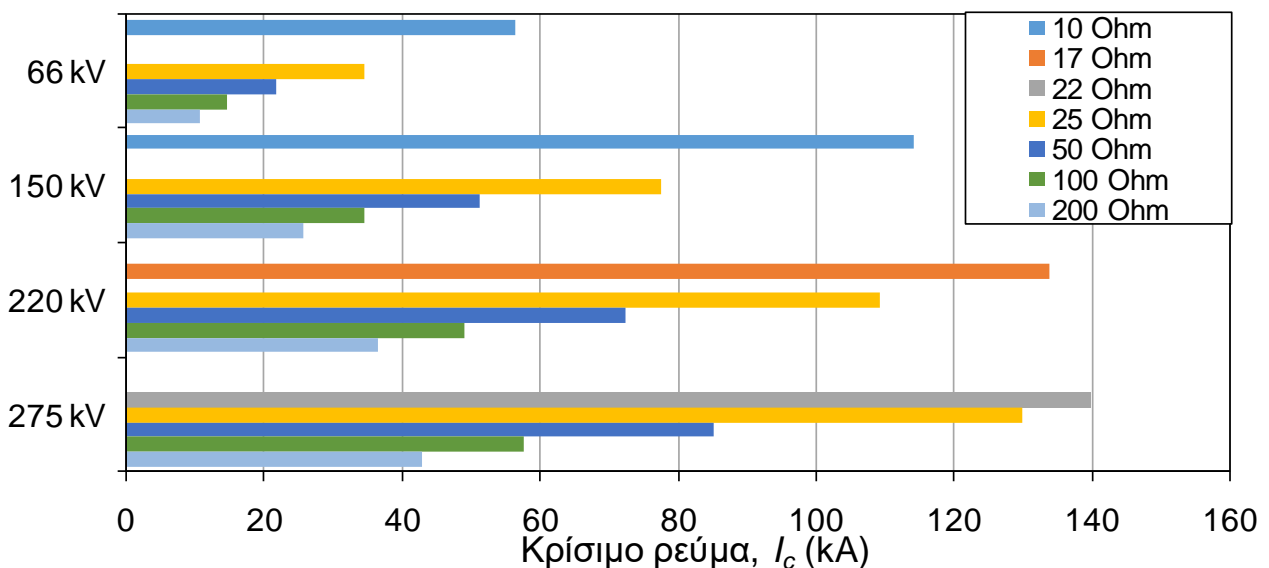
Σχήμα 5.47: Κρίσιμα κεραμικά ρεύματα συναρτήσει της γωνίας φάσης της AC τάσης, ΓΜ 765 kV διπλού κυκλώματος (DC).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι για μικρότερες αντιστάσεις γείωσης βρέθηκαν μεγαλύτερα κρίσιμα κεραμικά ρεύματα (σε συμφωνία με τις υπερτάσεις της προηγούμενης ενότητας), ενώ όσο μεγαλύτερες είναι οι αντιστάσεις γείωσης, τόσο μικρότερο γίνεται

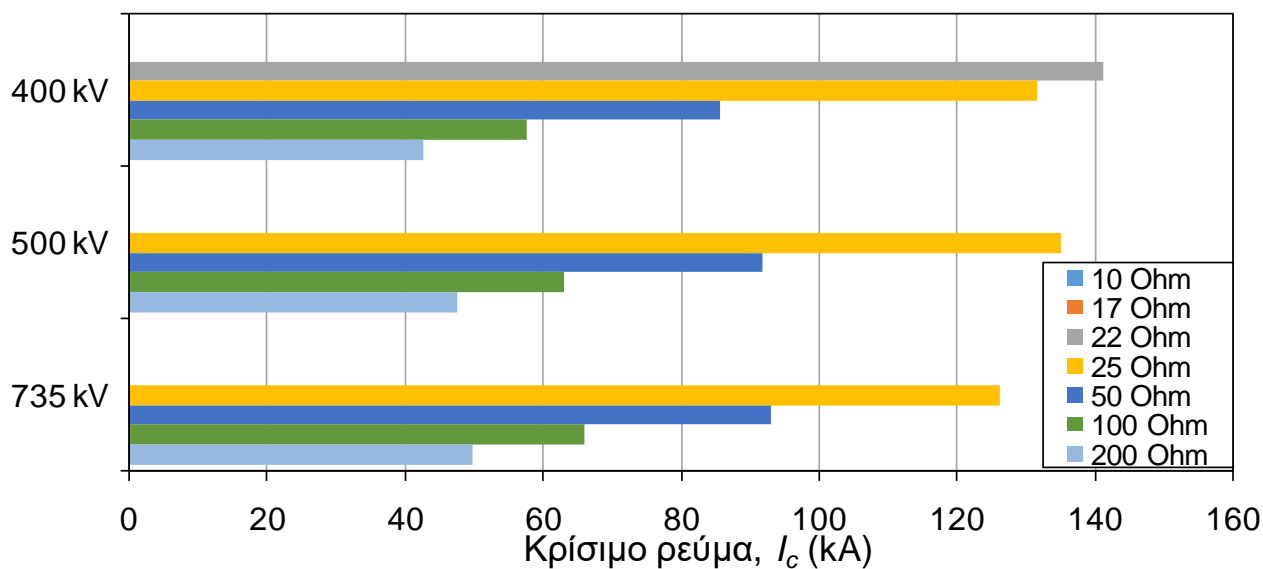
το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα για το οποίο παρατηρείται διάσπαση. Τα παραπάνω είναι απολύτως αναμενόμενα, καθώς από τα αποτελέσματα της υποενότητας 5.1.1 απορρέει ότι για μικρότερες αντιστάσεις γείωσης αναπτύσσονται μικρότερες υπερτάσεις, επομένως μικρότερες καταπονήσεις στη μόνωση της ΓΜ. Αντίστοιχα για τις μεγαλύτερες αντιστάσεις γείωσης βρέθηκαν σημαντικά μεγαλύτερες υπερτάσεις, οπότε το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα που απαιτείται για τη διάσπαση της μόνωσης μειώνεται σημαντικά. Επιπρόσθετα, όπως είναι φυσικό οι ΓΜ υψηλότερης τάσης λειτουργίας, λόγω του ότι έχουν υψηλότερο βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL), παρουσιάζουν χαμηλότερες αναπτυσσόμενες υπερτάσεις ανηγμένες στο BIL, οπότε τα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα για τη διάσπαση της μόνωσης είναι υψηλότερα σε σχέση με αυτά των ΓΜ χαμηλότερης τάσης λειτουργίας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα παρατηρούνται συστηματικά για γωνία φάσης ίση με 0 ή 240 μοίρες, ανάλογα με την αντίσταση γείωσης και το είδος της ΓΜ. Δηλαδή, όταν η κάτω φάση στις ΓΜ διπλού κυκλώματος και η εξωτερικές φάσεις στις ΓΜ μονού κυκλώματος έχουν μέγιστη θετική AC τάση λειτουργίας. Αυτό έχει να κάνει με τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του πυλώνα και του αγωγού φάσης τη στιγμή του αρνητικού κεραυνικού πλήγματος.

Παρακάτω δίνονται τα ραβδογράμματα με τα ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα της κάθε ΓΜ (0° ή 240°), με παράμετρο την αντίσταση γείωσης. Παρατηρείται ότι για την ίδια τάση λειτουργίας και την ίδια αντίσταση γείωσης, τα ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα είναι μικρότερα στις ΓΜ διπλού κυκλώματος, σε σχέση με τις ΓΜ μονού κυκλώματος. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι για την ίδια τάση λειτουργίας, όσο αυξάνεται η αντίσταση γείωσης, τόσο μειώνεται το ελάχιστο κεραυνικό ρεύμα που καταλήγει σε διάσπαση της μόνωσης, γεγονός το οποίο συνάδει με τα αποτελέσματα που έχουν ήδη παρατεθεί και την ανάλυσή τους παραπάνω.

➤ ΓΜ μονού κυκλώματος (SC)

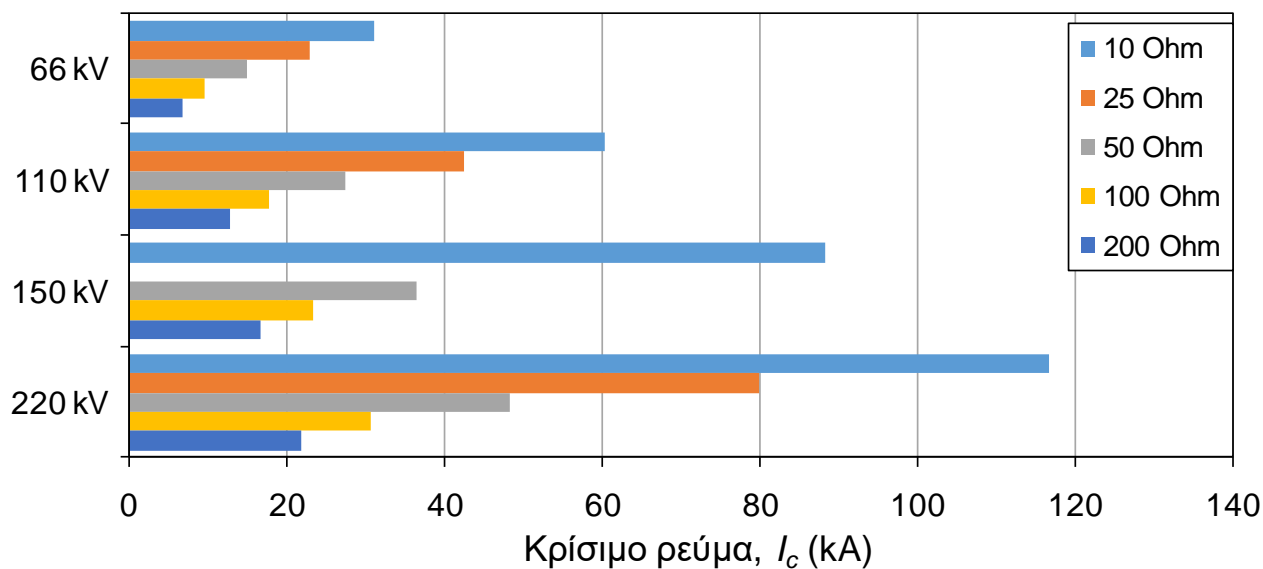


Σχήμα 5.48α: Ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα ανά ΓΜ (66, 150, 220, 275 kV) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, μονού κυκλώματος (SC).

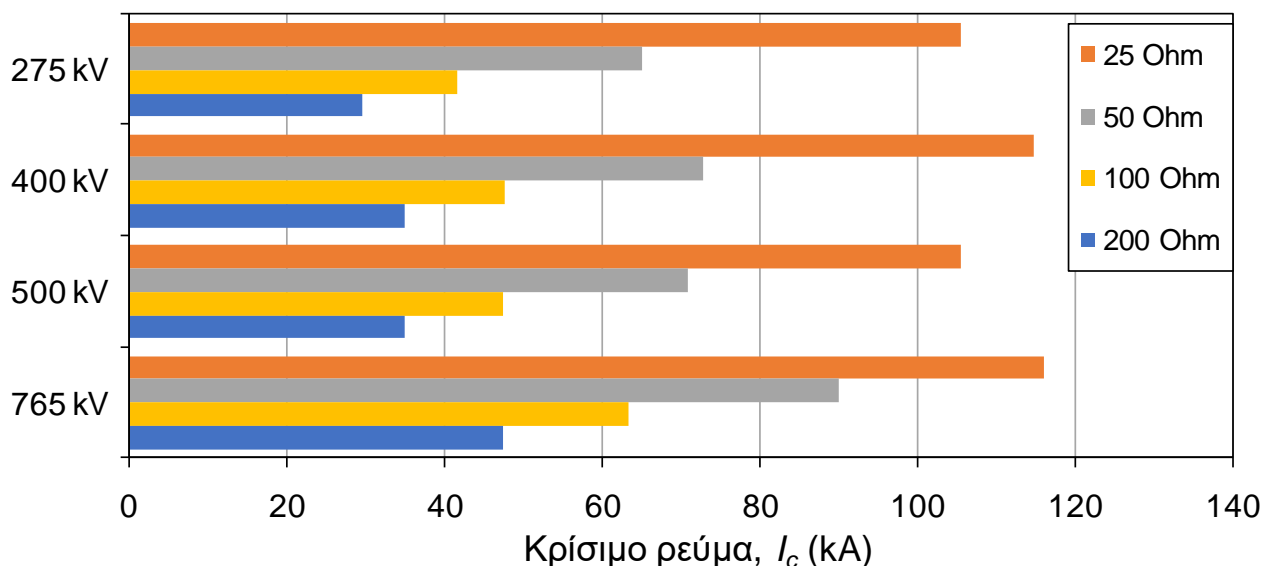


Σχήμα 5.48β: Ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα ανά ΓΜ (400, 500, 735 kV) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, μονού κυκλώματος (SC).

➤ ΓΜ διπλού κυκλώματος (DC)



Σχήμα 5.49α: Ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα ανά ΓΜ (66, 110, 150, 220 kV) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, διπλού κυκλώματος (DC).



Σχήμα 5.49β: Ελάχιστα κεραυνικά ρεύματα ανά ΓΜ (275, 400, 500, 765 kV) με παράμετρο την αντίσταση γείωσης, διπλού κυκλώματος (DC).

Σημειώνεται εκ νέου ότι στην πράξη δεν έχουν καταγραφεί επακόλουθα πλήγματα με μέγιστη τιμή άνω των 80 kA. Οπότε στους συνδυασμούς ΓΜ και αντιστάσεων στους οποίους το κρίσιμο ρεύμα είναι άνω των 80 kA είναι απίθανο να συμβεί διάσπαση της μόνωσης λόγω επακόλουθου κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα.

Επιπλέον, συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις τιμές των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων πρώτων πληγμάτων που προκαλούν ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης [4], διαπιστώνεται ότι η ανάστροφη διάσπαση είναι πολύ ευκολότερη με τα επακόλουθα πλήγματα (μικρότερα κρίσιμα ρεύματα). Αυτό οφείλεται στον μικρότερο χρόνο μετώπου και στη μεγαλύτερη μέγιστη κλίση που οδηγεί σε μεγαλύτερες υπερτάσεις. Ωστόσο, η σημασία των επακόλουθων πληγμάτων στην συμπεριφορά της ΓΜ λόγω ανάστροφης διάσπασης αναμένεται να μην είναι έντονη λόγω της μικρότερης μέσης τιμής της τιμής κορυφής των επακόλουθων κεραυνικών ρευμάτων (σε σχέση με τα πρώτα πλήγματα) και του γεγονότος ότι δεν θα πρέπει να έχει γίνει διάσπαση κατά το πρώτο πλήγμα ώστε ο έλεγχος πιθανής διάσπαση λόγω του επακόλουθου να έχει νόημα.

5.2 Επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης)

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν από το Σχήμα 5.50 έως Σχήμα 5.65 γραφήματα με τα αποτελέσματα των υπερτάσεων ως προς το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL), των κυματομορφών των υπερτάσεων και των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων, στην περίπτωση επακόλουθου κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης (shielding failure).

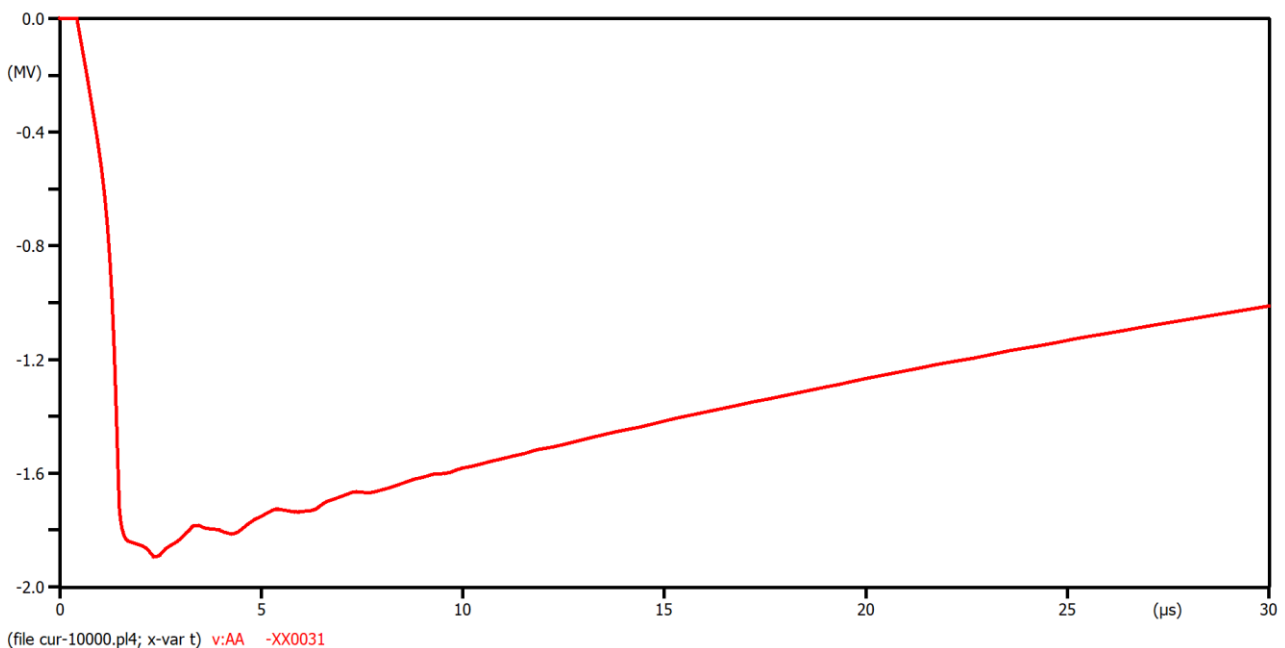
Οι κυματομορφές των υπερτάσεων δίνονται για κεραυνικό ρεύμα στα 10 kA, και οι υπερτάσεις ως προς το BIL δίνονται για εύρος από τα

10 έως τα 80 kA. Παρατηρείται πως στις ΓΜ χαμηλότερων τάσεων λειτουργίας έχουμε μεγαλύτερη καταπόνηση, καθώς το BIL είναι μικρότερο σε σχέση με τις ΓΜ υψηλότερων τάσεων λειτουργίας.

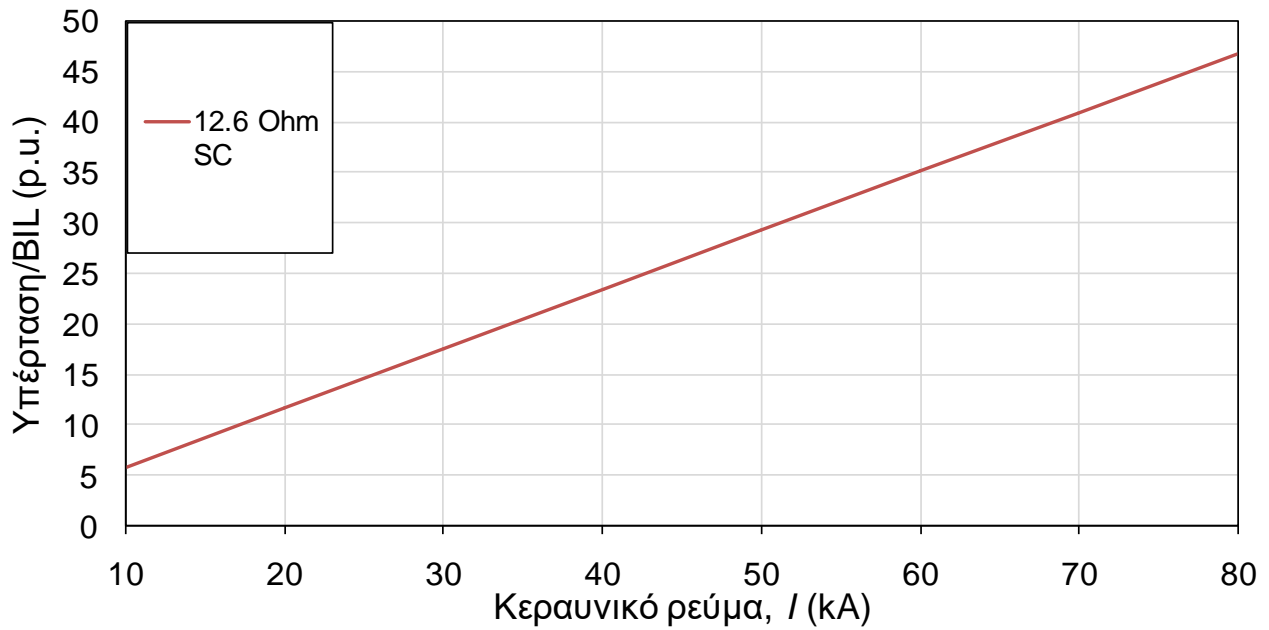
Περαιτέρω, παρατηρείται ότι οι συγκεκριμένες κυματομορφές διαφέρουν σημαντικά από αυτές των πληγμάτων στον αγωγό προστασίας (ή στον πυλώνα), καθώς δεν έχουμε επιδράσεις από ανακλάσεις στη γείωση του πυλώνα και στους γειτονικούς πυλώνες. Εδώ η μορφή της υπέρτασης καθορίζεται από τη μορφή του κεραυνικού ρεύματος. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί και η γραμμικότητα που παρουσιάζεται στις υπερτάσεις (στη μέγιστη τιμή) ως προς το BIL. Τέλος, επισημαίνεται ότι οι προσομοιώσεις έγιναν για πλήγμα στο μέσον της ΓΜ του αγωγού φάσης μεταξύ των δύο πυλώνων και το χρονικό διάστημα όπου παρατηρείται στις κυματομορφές με μηδενική τιμή υπέρτασης οφείλεται στον χρόνο όδευσης των κυμάτων από το μέσο του αγωγού έως ότου φτάσει στους μονωτήρες. Σημειώνεται ότι η επίδραση του σημείου πλήγματος βρέθηκε αμελητέα.

5.2.1 Υπερτάσεις (Σφάλμα Θωράκισης)

- ΓΜ 66 kV, εξωτερική φάση A, BIL: 325 kV, αντίσταση γείωσης 12.6 Ω SC (μονού κυκλώματος)

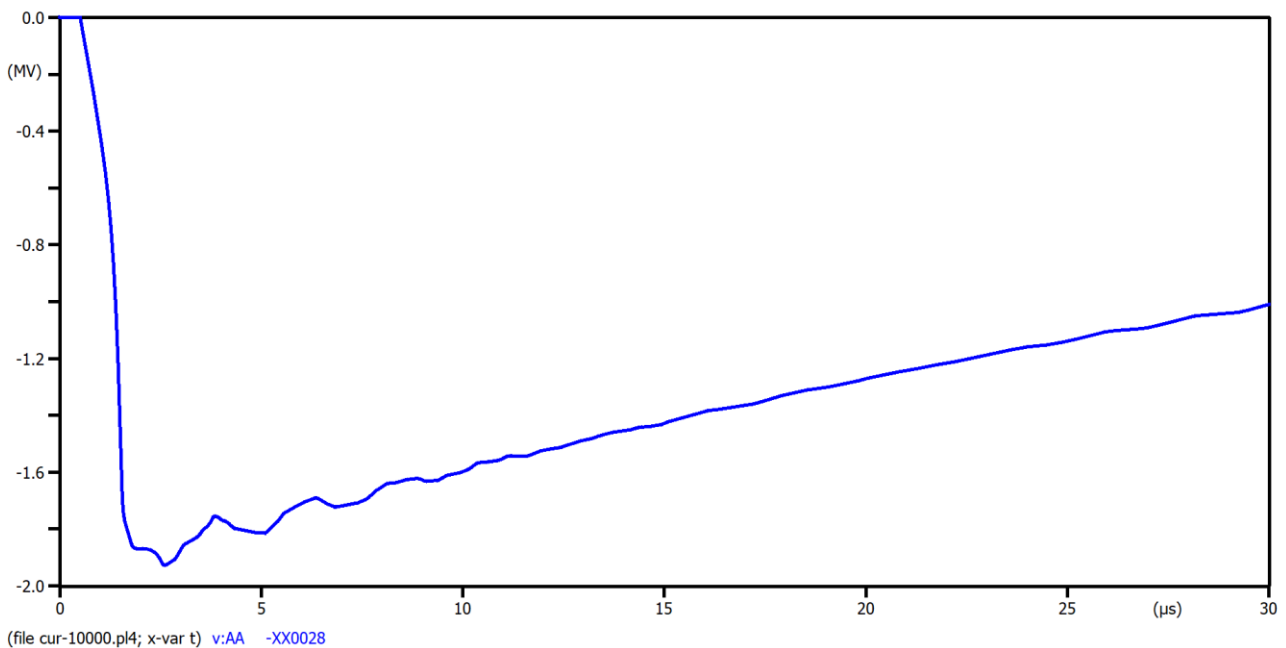


Σχήμα 5.50: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC).

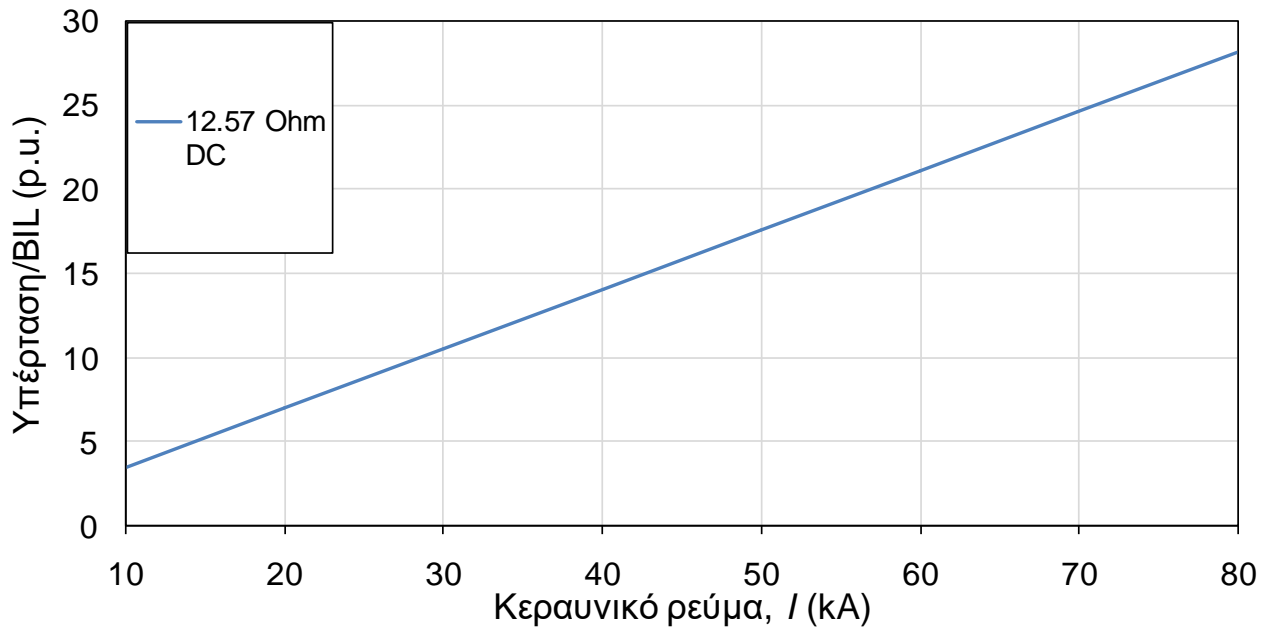


Σχήμα 5.51: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC).

- ΓΜ 110 kV, επάνω φάση Α, BIL: 550 kV, αντίσταση γείωσης 12.57 Ω μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη

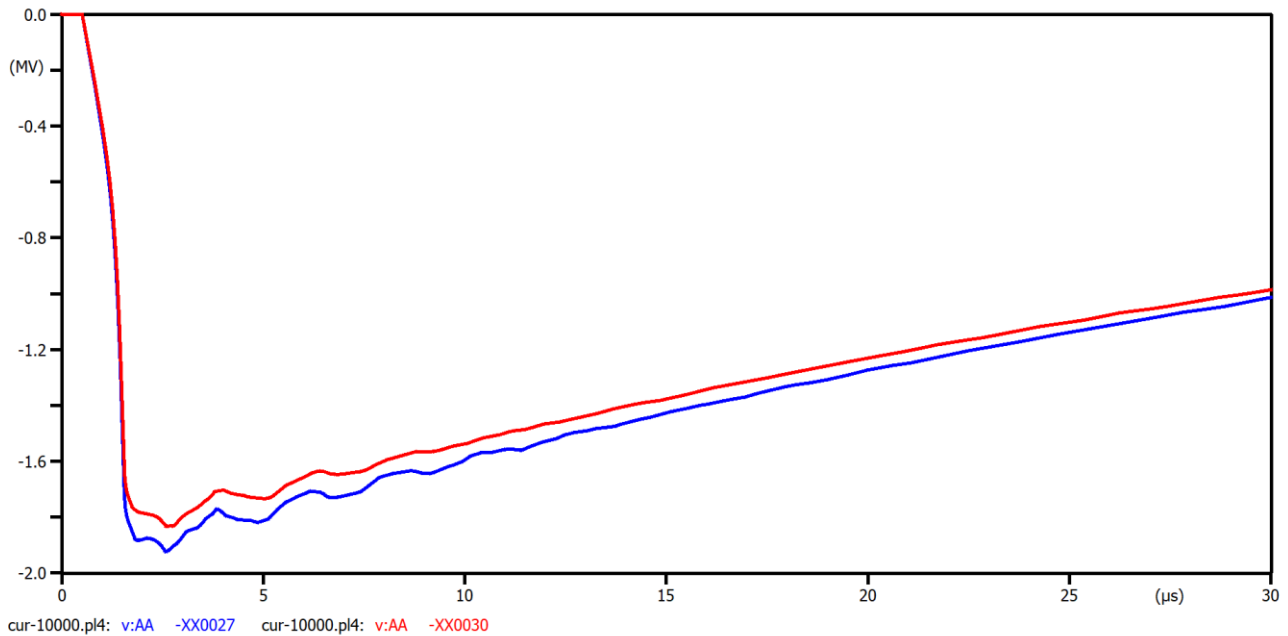


Σχήμα 5.52: Κυματομορφή υπερτάσης στα 10 kA, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη.

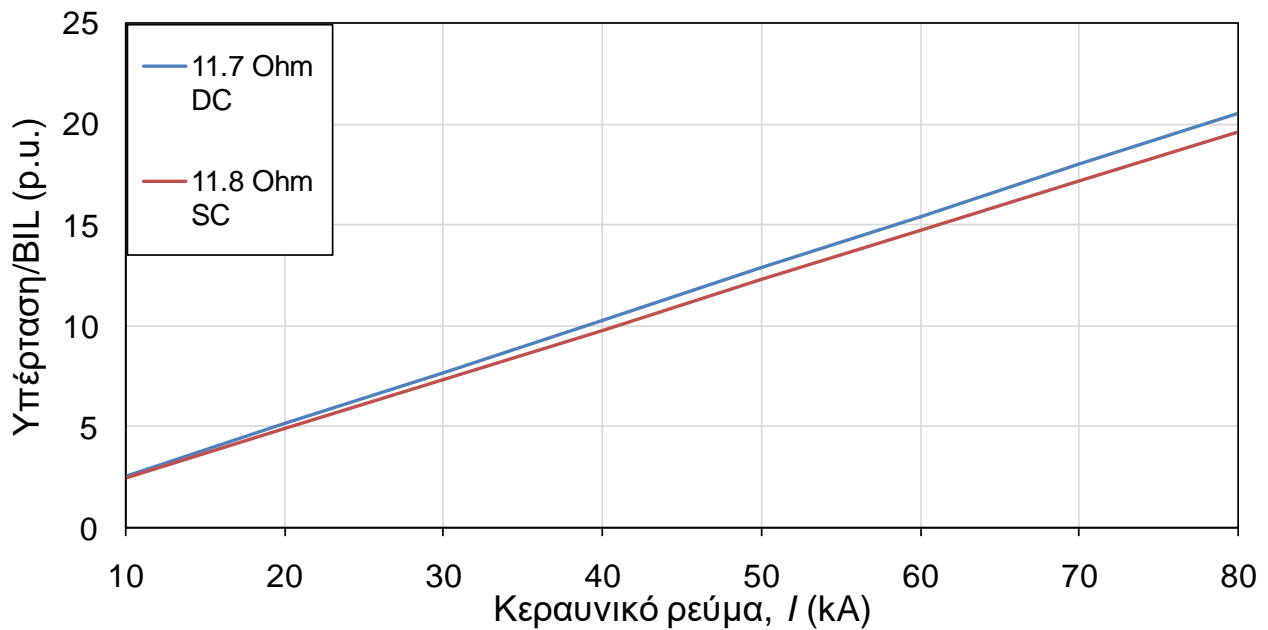


Σχήμα 5.53: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη.

- ΓΜ 150 kV, επάνω φάση A DC, εξωτερική φάση A SC, BIL: 750 kV, αντίσταση γείωσης 11.7 Ω DC (διπλού κυκλώματος), 11.8 Ω SC (μονού κυκλώματος)

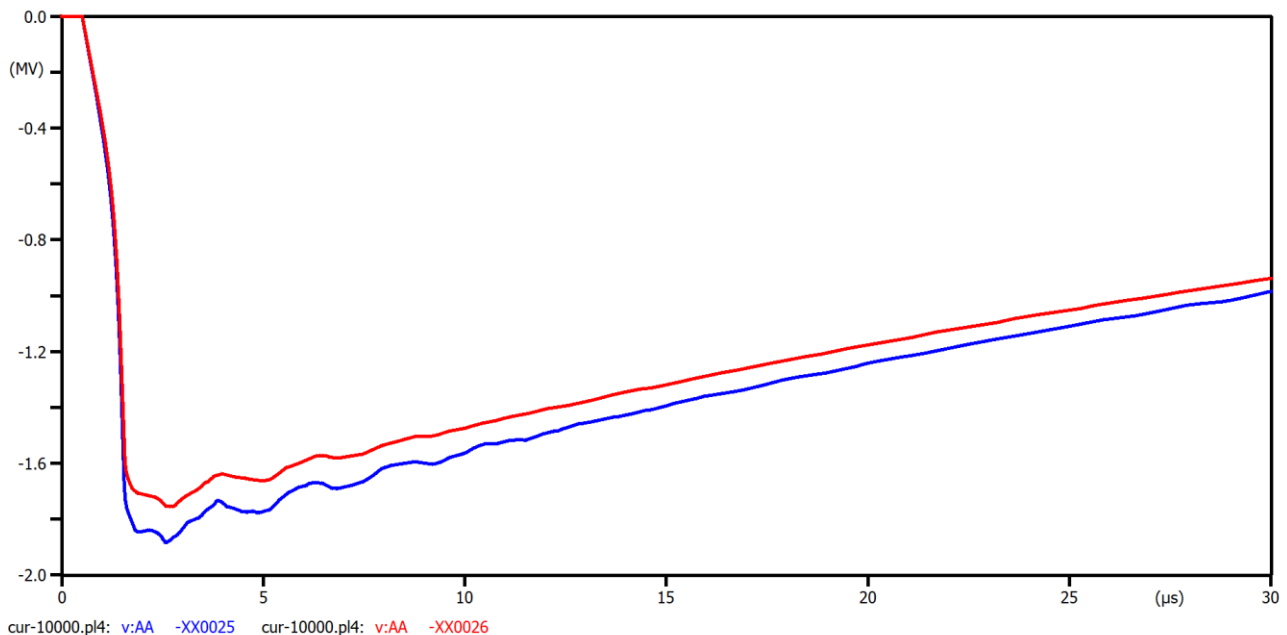


Σχήμα 5.54: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA, ΓΜ 150 kV διπλού και μονού κυκλώματος.

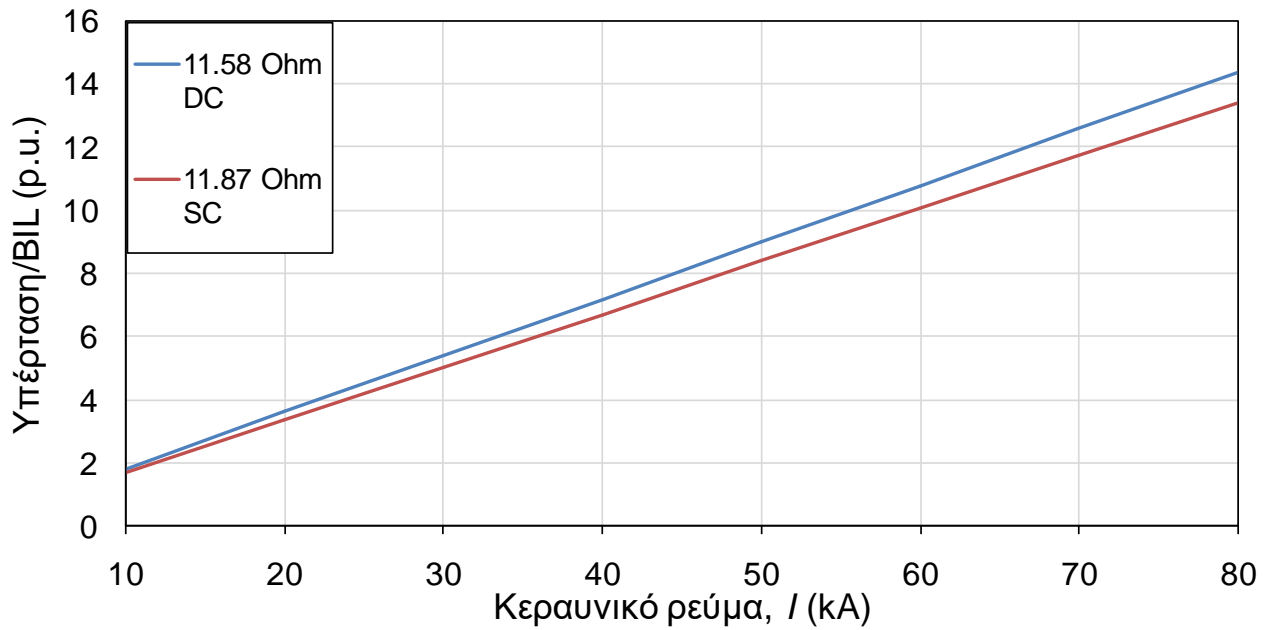


Σχήμα 5.55: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, ΓΜ 150 kV διπλού και μονού κυκλώματος.

- ΓΜ 220 kV, επάνω φάση A DC, εξωτερική φάση A SC, BIL: 1050 kV, αντίσταση γείωσης 11.58 Ω DC (διπλού κυκλώματος), 11.87 Ω SC (μονού κυκλώματος)

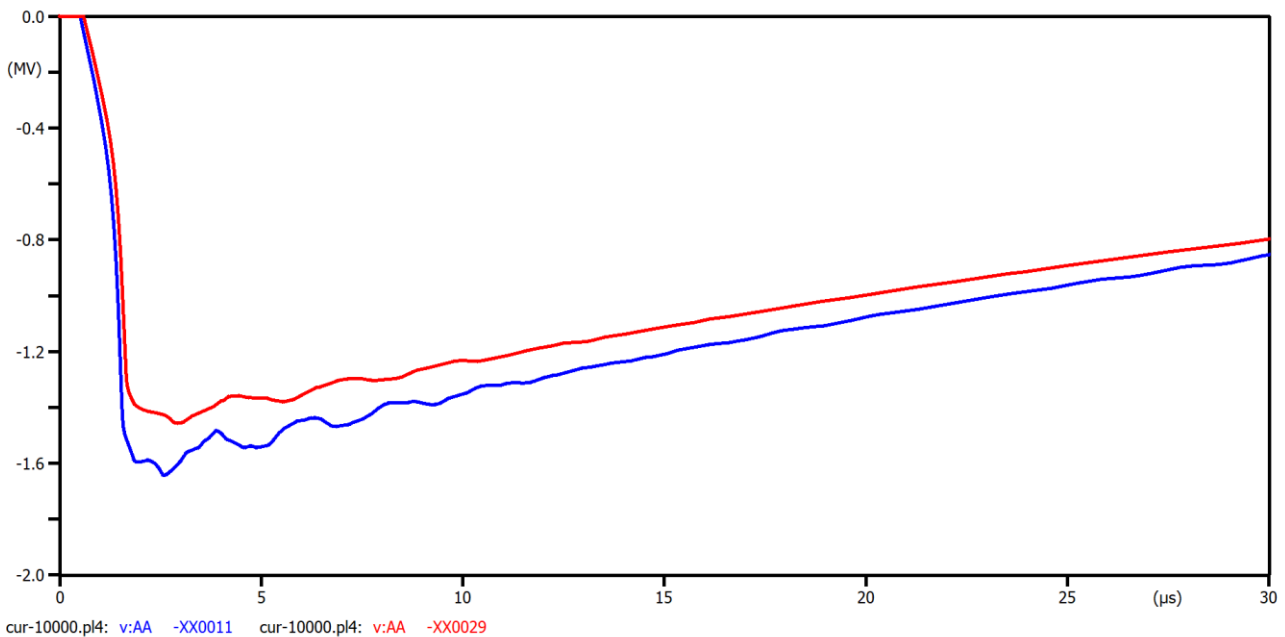


Σχήμα 5.56: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA, ΓΜ 220 kV διπλού και μονού κυκλώματος.

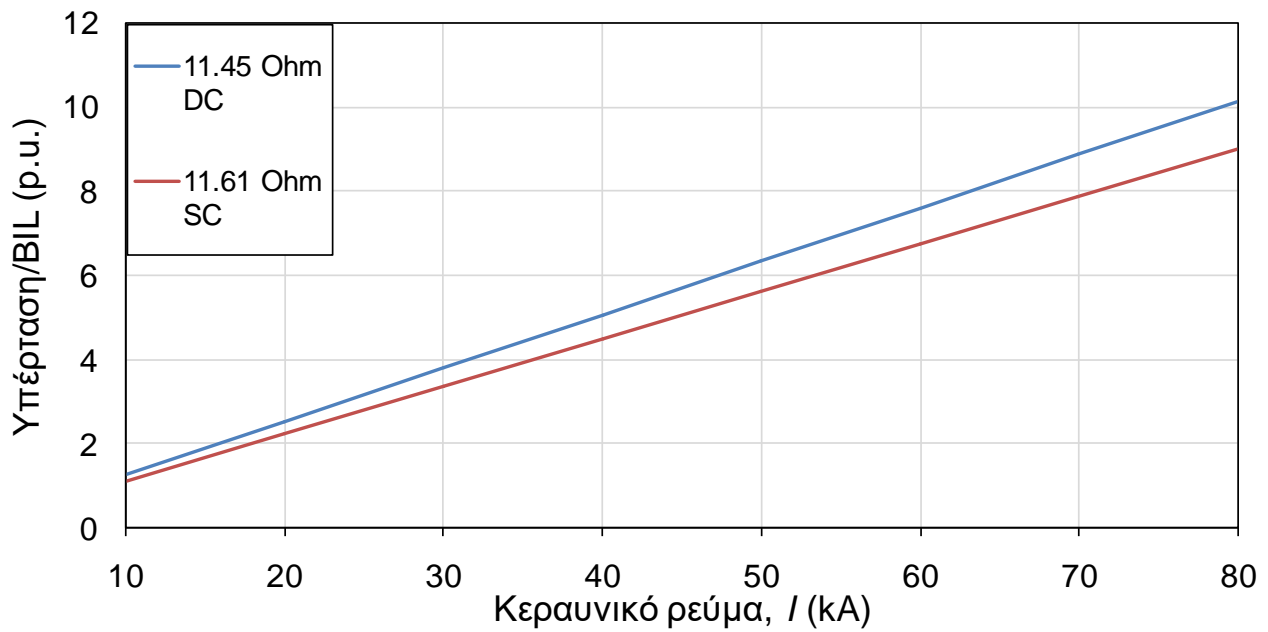


Σχήμα 5.57: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, ΓΜ 220 kV διπλού και μονού κυκλώματος.

- ΓΜ 275 kV, επάνω φάση A DC, εξωτερική φάση A SC, BIL: 1300 kV, αντίσταση γείωσης 11.45 Ω DC (διπλού κυκλώματος), 11.61 Ω SC (μονού κυκλώματος)

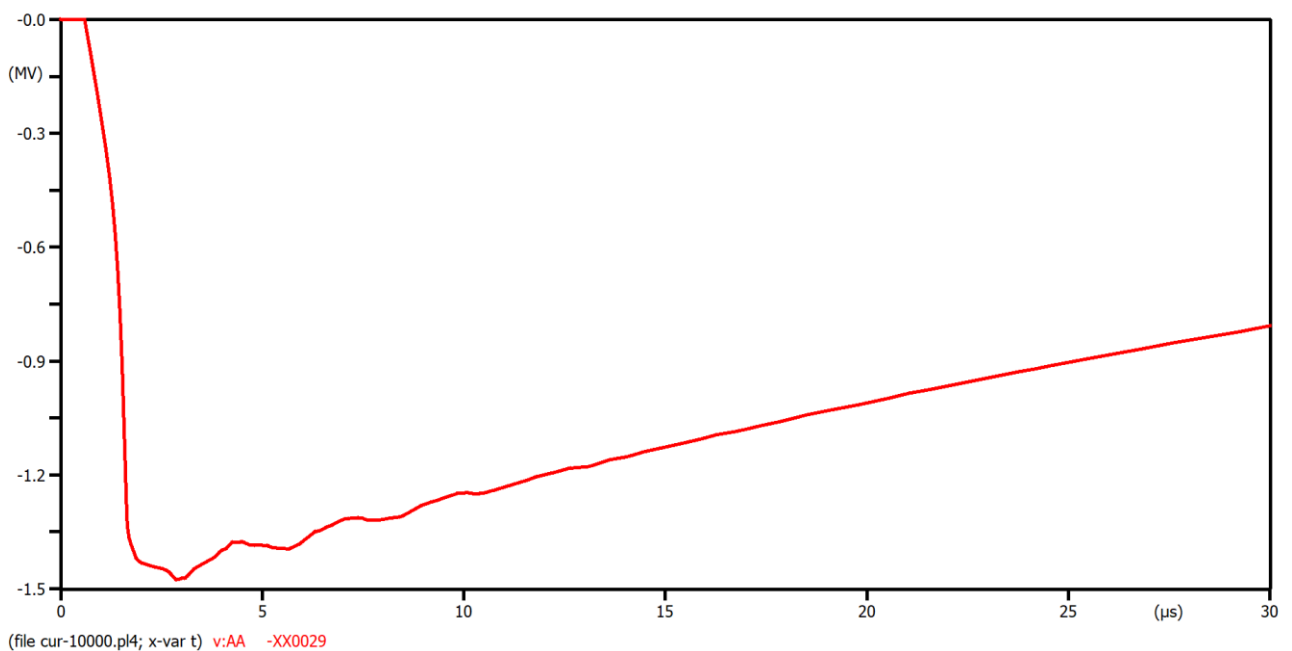


Σχήμα 5.58: Κυματομορφές υπερτάσεων στα 10 kA, ΓΜ 220 kV διπλού και μονού κυκλώματος.

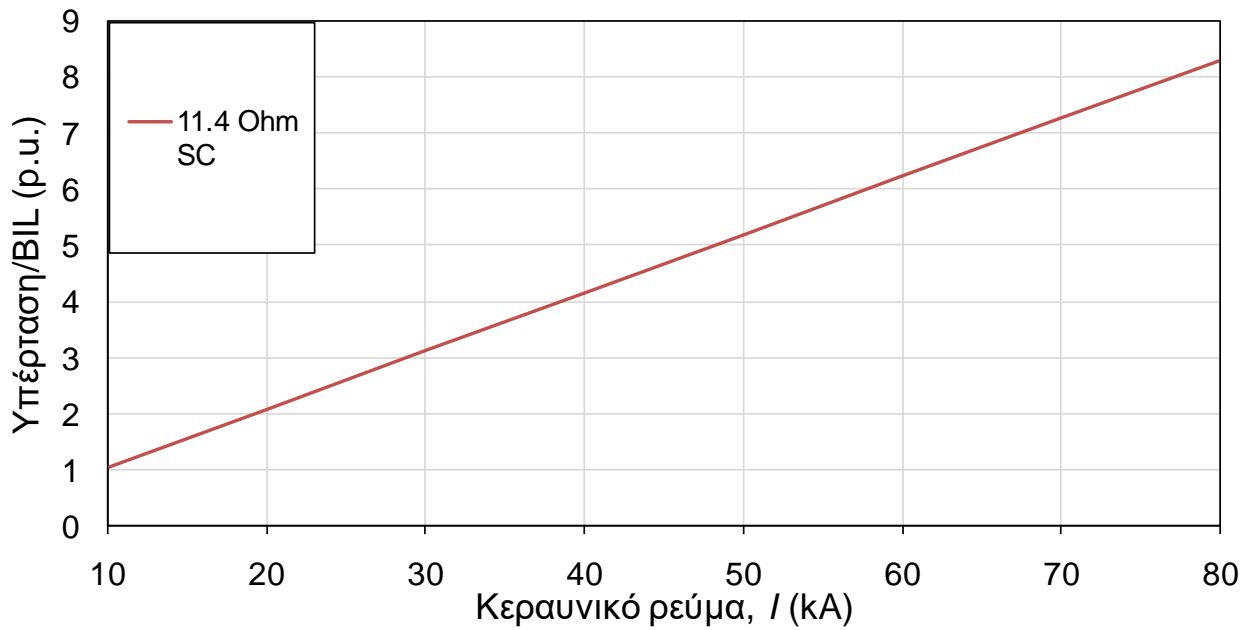


Σχήμα 5.59: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, ΓΜ 275 kV διπλού και μονού κυκλώματος.

- ΓΜ 400 kV, εξωτερική φάση A, BIL: 1425 kV, αντίσταση γείωσης 11.4 Ω SC (μονού κυκλώματος)

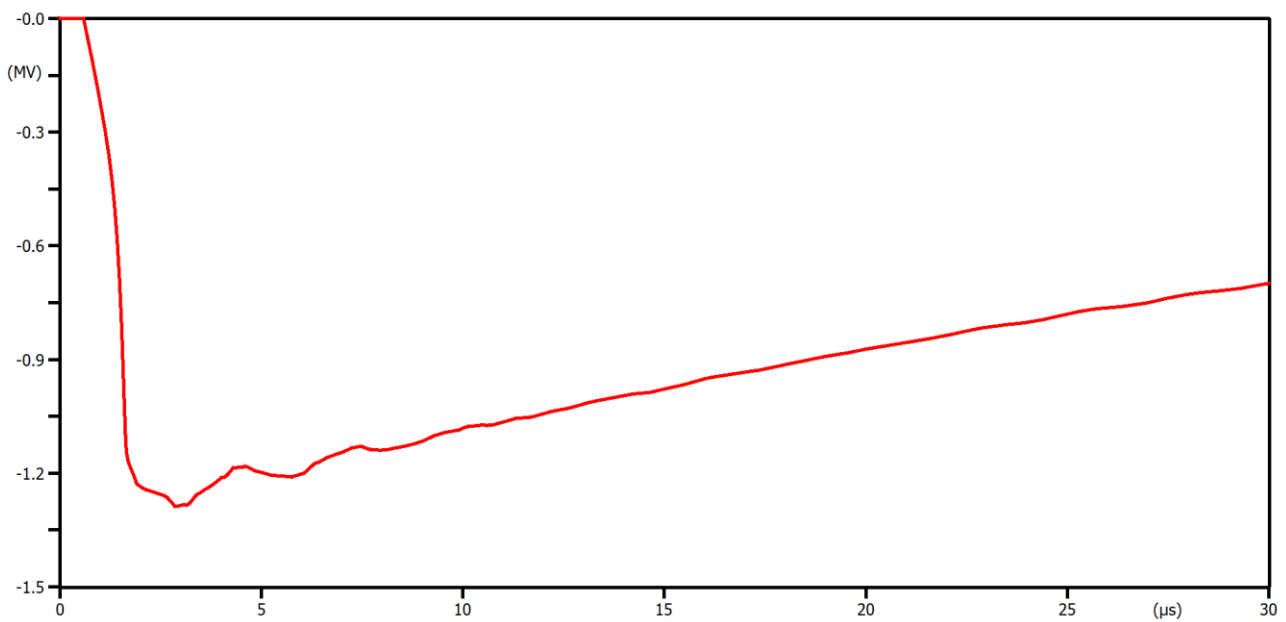


Σχήμα 5.60: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC).



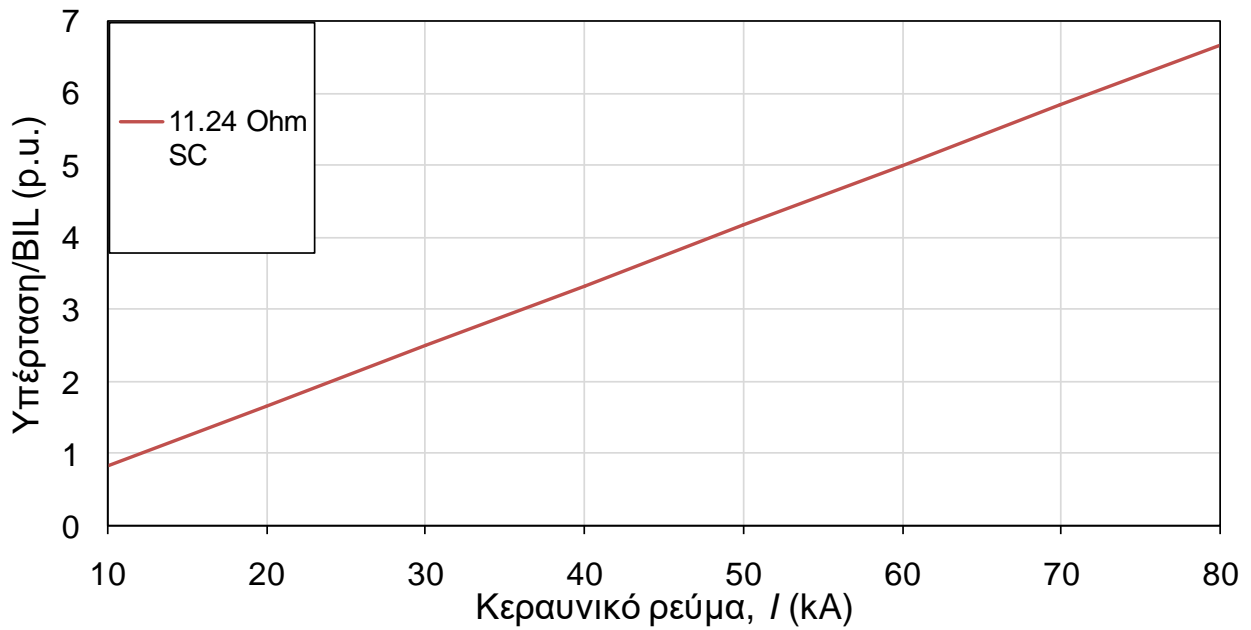
Σχήμα 5.61: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC).

- ΓΜ 500 kV, εξωτερική φάση Α, BIL: 1550 kV, αντίσταση γείωσης 11.24 Ω SC (μονού κυκλώματος)



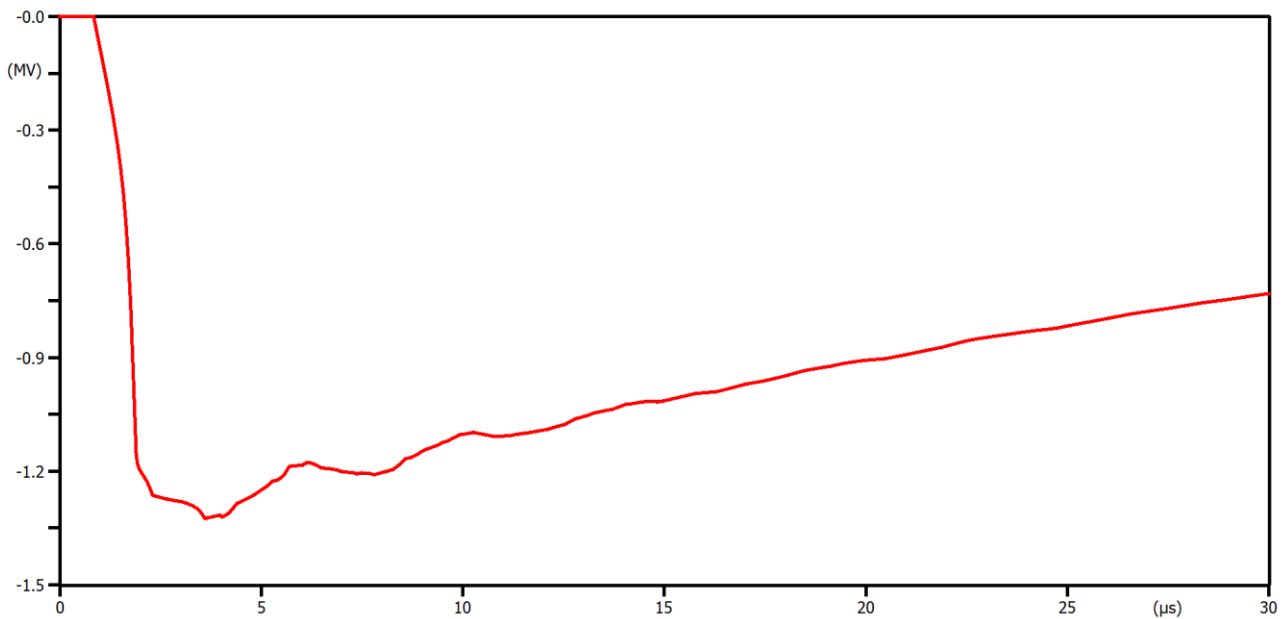
(file cur-10000.pl4; x-var t) v:AA -XX0029

Σχήμα 5.62: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 500 kV μονού κυκλώματος (SC).



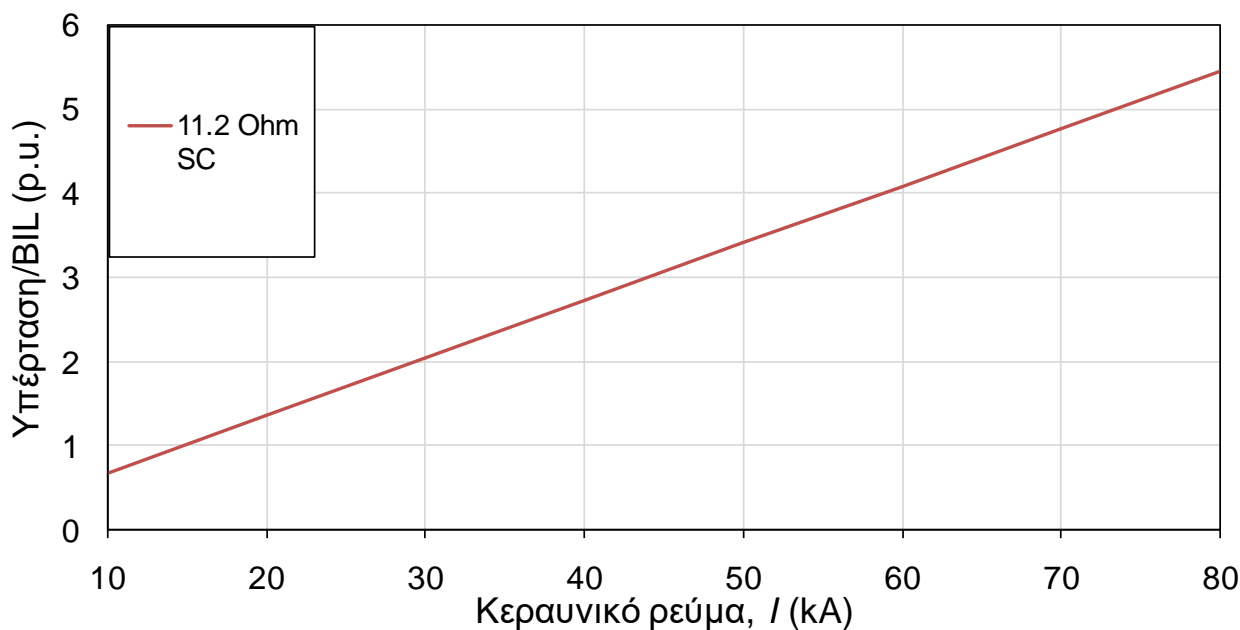
Σχήμα 5.63: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, ΓΜ 500 kV μονού κυκλώματος (SC).

- ΓΜ 735 kV, εξωτερική φάση Α, BIL: 1950 kV, αντίσταση γείωσης 11.2 Ω SC (μονού κυκλώματος)



(file cur-10000.pl4; x-var t) v:AA -XX0029

Σχήμα 5.64: Κυματομορφή υπέρτασης στα 10 kA, ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC).



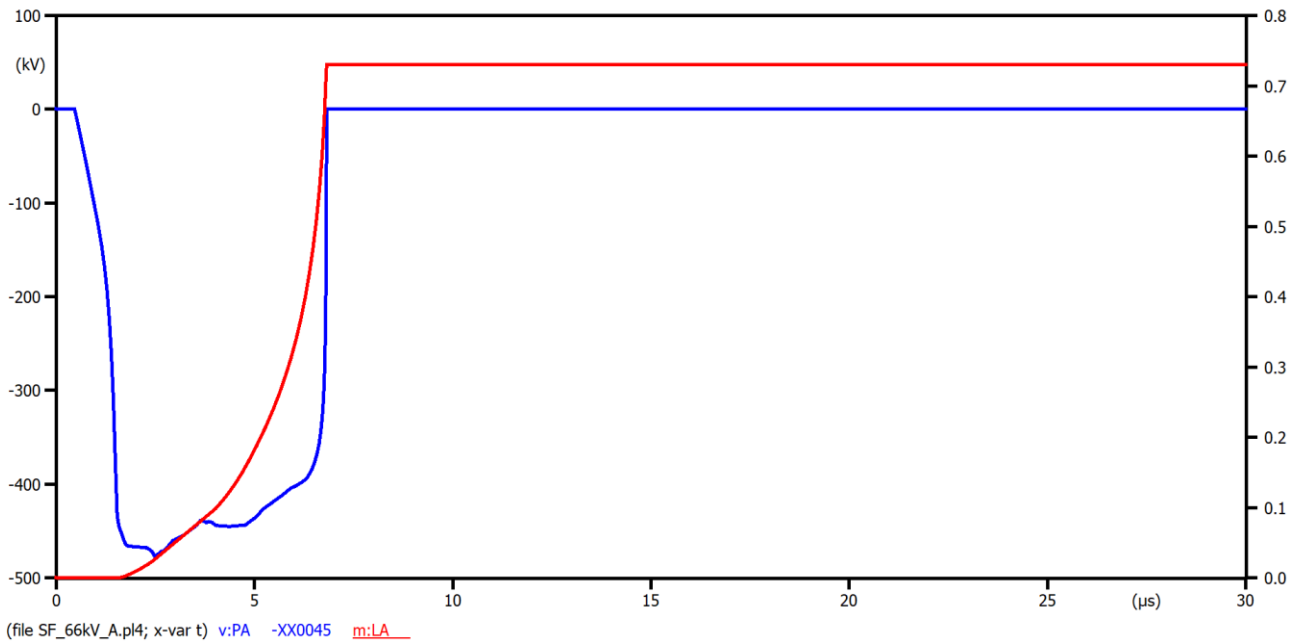
Σχήμα 5.65: Μέγιστες υπερτάσεις συναρτήσει του ρεύματος, ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC).

5.2.2 Κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα (Σφάλμα Θωράκισης)

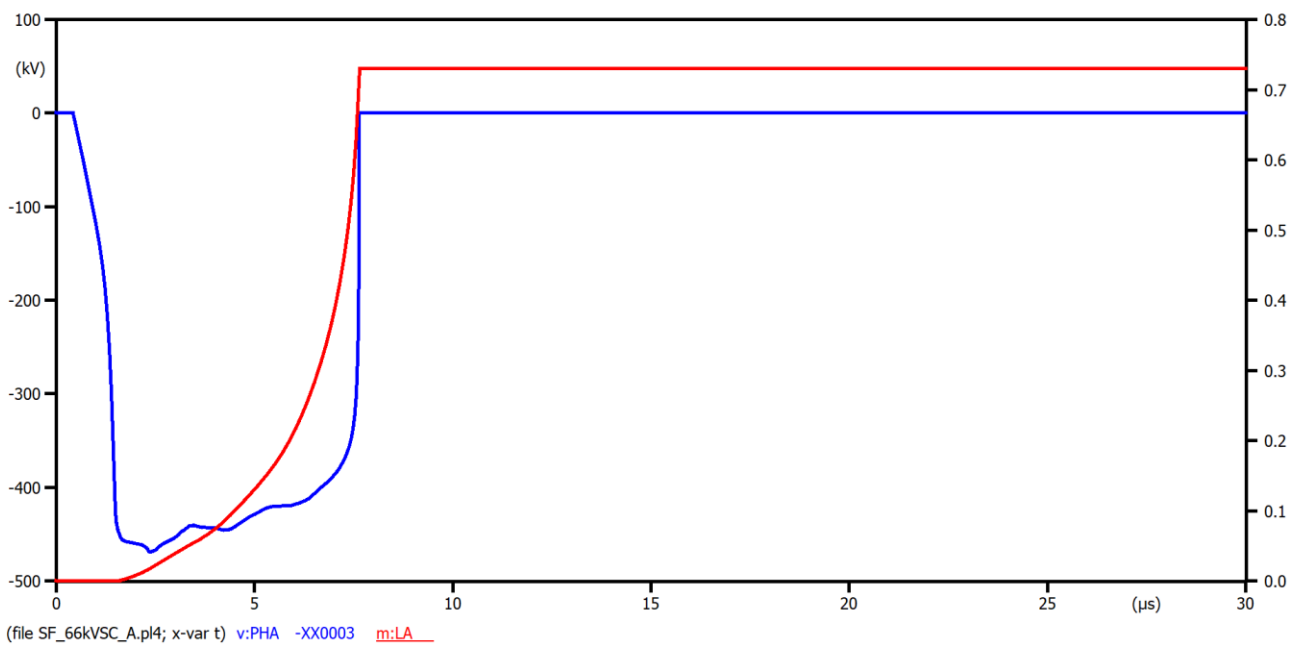
Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται αρχικά κάποιες ενδεικτικές κυματομορφές (Σχήμα 5.66 έως Σχήμα 5.74) επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων στον αγωγό φάσης κατά τις οποίες συμβαίνει ηλεκτρική διάσπαση (shielding failure flashover), καθώς επίσης και ένα ραβδόγραμμα (Σχήμα 5.75) με το ελάχιστο κεραυνικό ρεύμα των ΓΜ, τόσο διπλού όσο και μονού κυκλώματος.

Επισημαίνεται ότι για τη διερεύνηση των κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων διπλού και μονού κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε μόνο το λογισμικό ATP-EMTP χωρίς να γίνει χρήση του κώδικα Matlab. Πιο συγκεκριμένα, οι αλλαγές στο κεραυνικό ρεύμα και στη μέγιστη κλίση πραγματοποιούνταν εκ νέου για την κάθε προσομοίωση, χειροκίνητα, κατόπιν υπολογισμών, με τη διάρκεια μετώπου και τη διάρκεια ημίσεως εύρους σταθερές και ίσες με 0.67 μ s και 30.2 μ s, αντίστοιχα. Μετά από κάθε εκτέλεση εξετάστηκε η κυματομορφή με τη βοήθεια του προγράμματος PlotXY εάν προέκυπτε διάσπαση. Το κεραυνικό ρεύμα για κάθε περίπτωση έχει βρεθεί με ακρίβεια 100 A (όπως και στην περίπτωση της ανάστροφης διάσπασης).

➤ ΓΜ 66 kV, επάνω φάση A (DC), εξωτερική φάση A (SC)

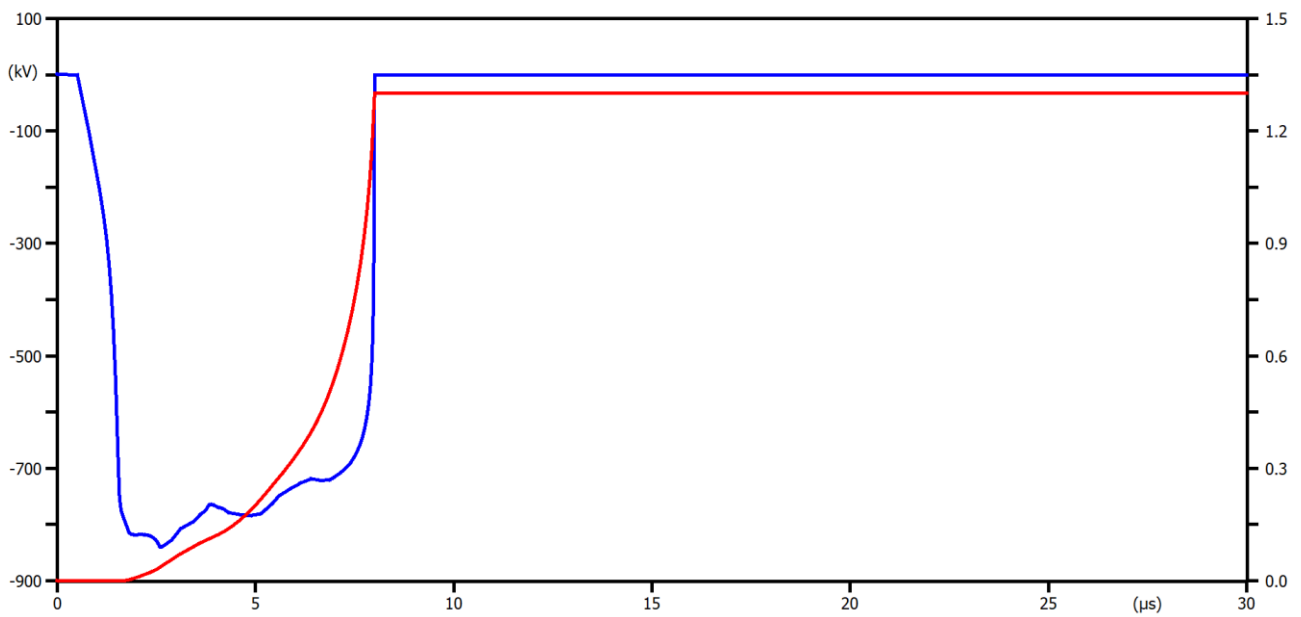


Σχήμα 5.66: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 66 kV διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 2.5 kA.



Σχήμα 5.67: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 66 kV μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 2.5 kA.

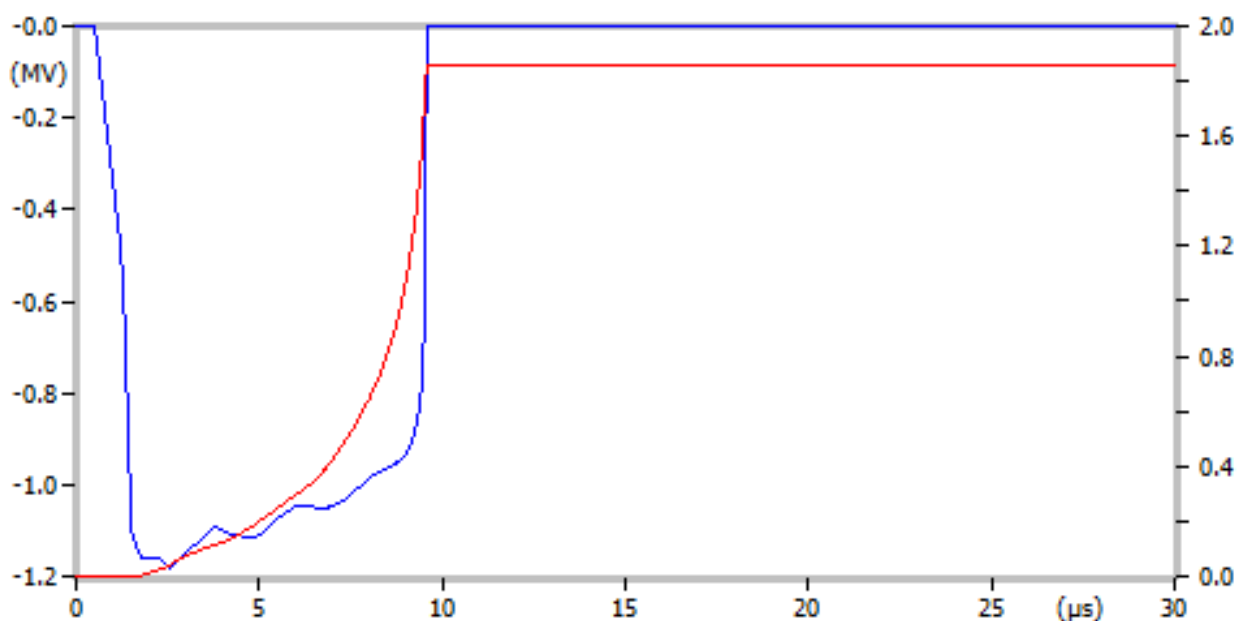
- ΓΜ 110 kV, επάνω φάση A (μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη)



(file SF_110kV_A.pl4; x-var t) v:PHA -XX0045 m:LA

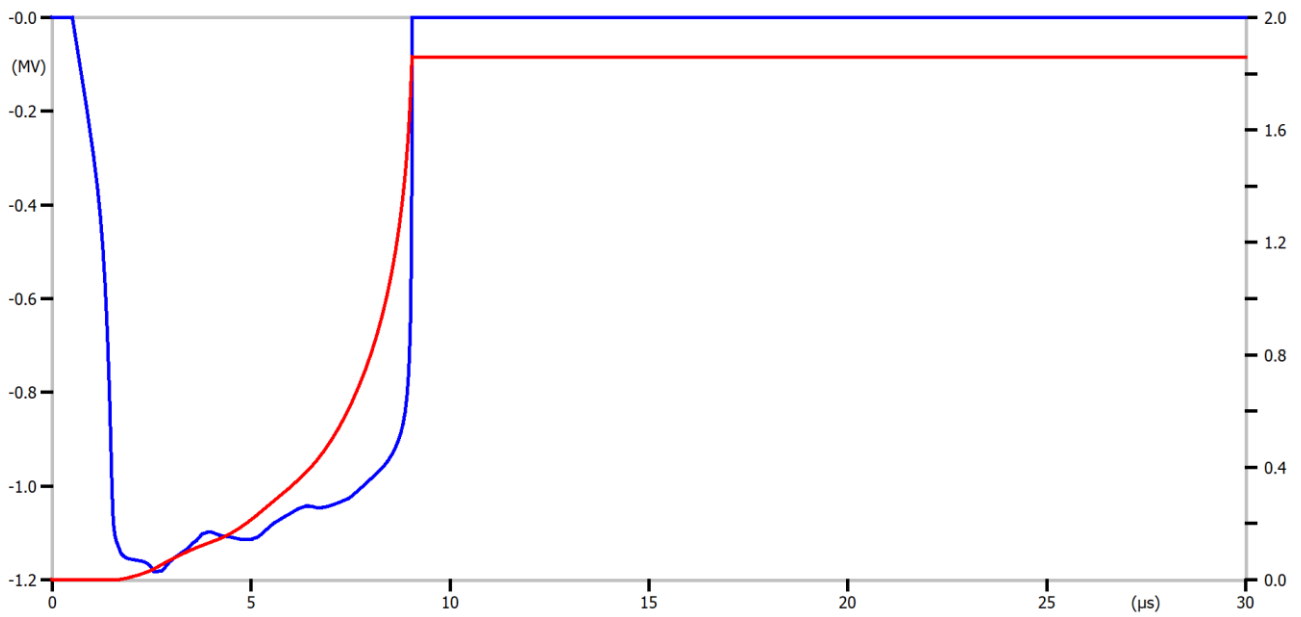
Σχήμα 5.68: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 110 kV μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη, κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 4.4 kA.

- ΓΜ 150 kV, επάνω φάση A (DC), εξωτερική φάση A (SC)



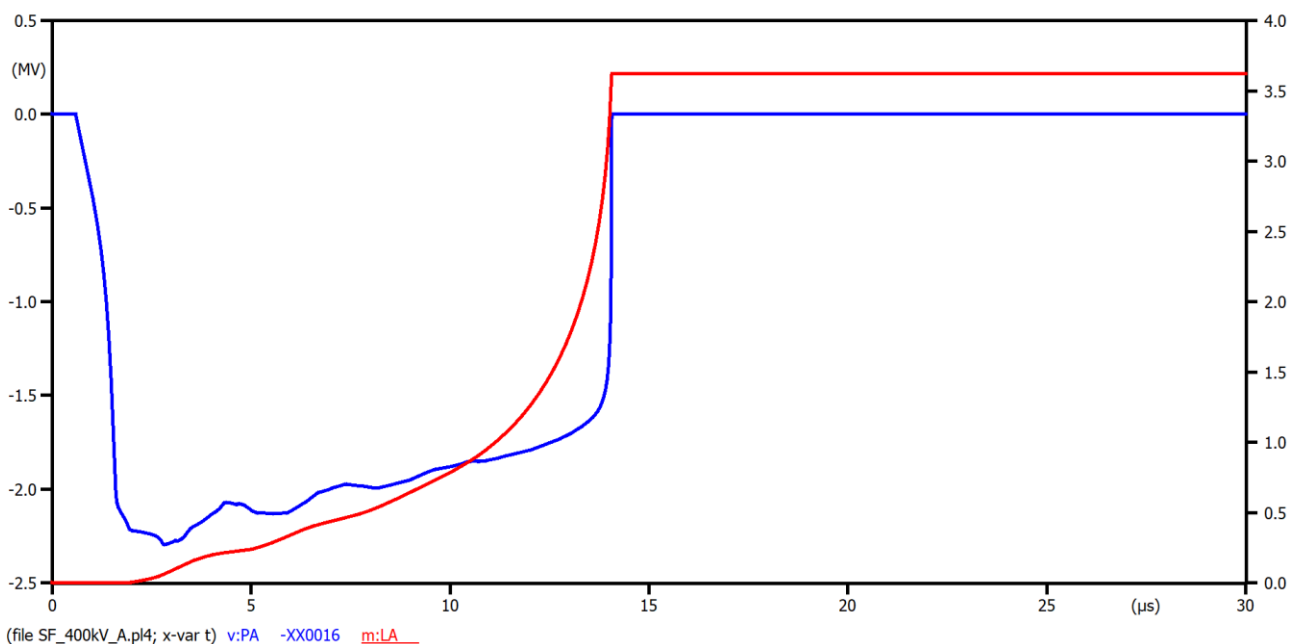
(file SF_150kV_A.pl4; x-var t) v:PA -XX0042 m:LA

Σχήμα 5.69: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 150 kV διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 6.2 kA.

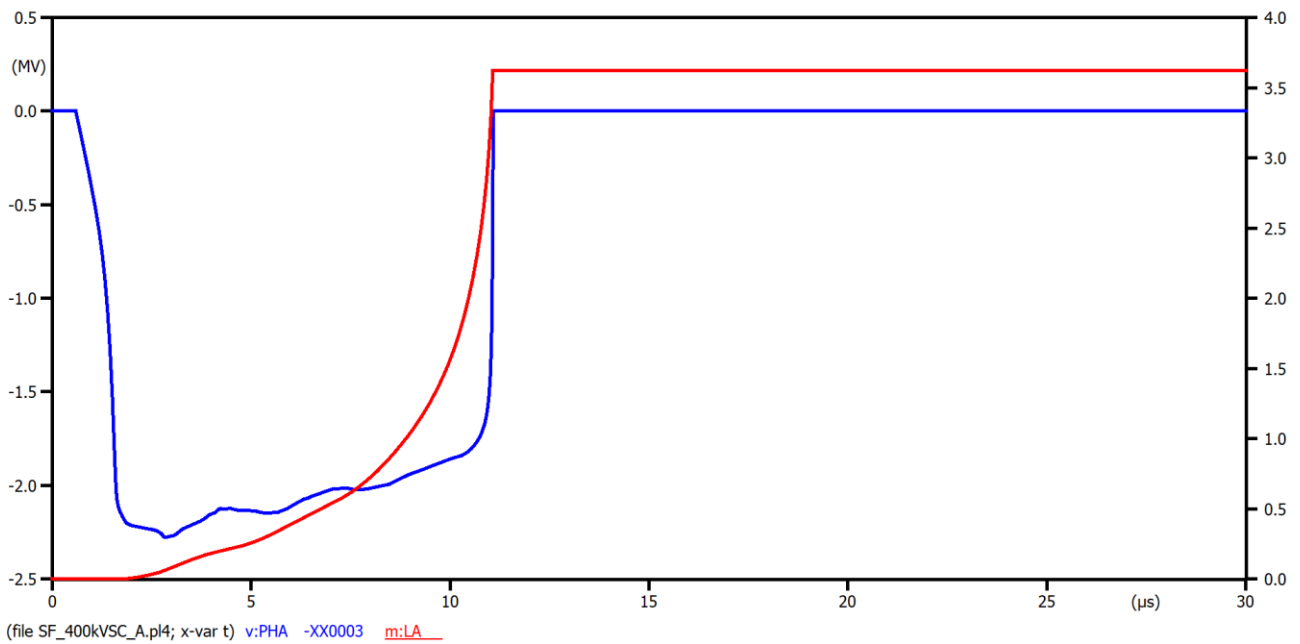


Σχήμα 5.70: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 150 kV μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 6.5 kA.

➤ ΓΜ 400 kV, επάνω φάση A (DC), εξωτερική φάση A (SC)

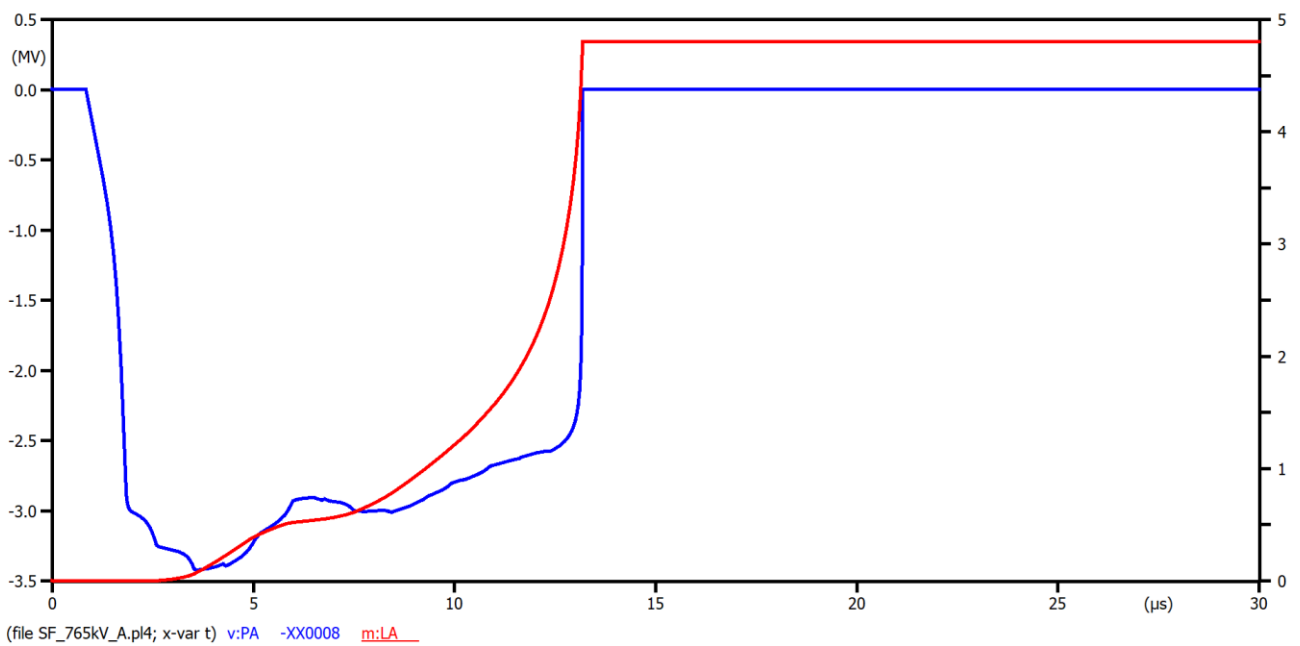


Σχήμα 5.71: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 400 kV διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 14.6 kA.

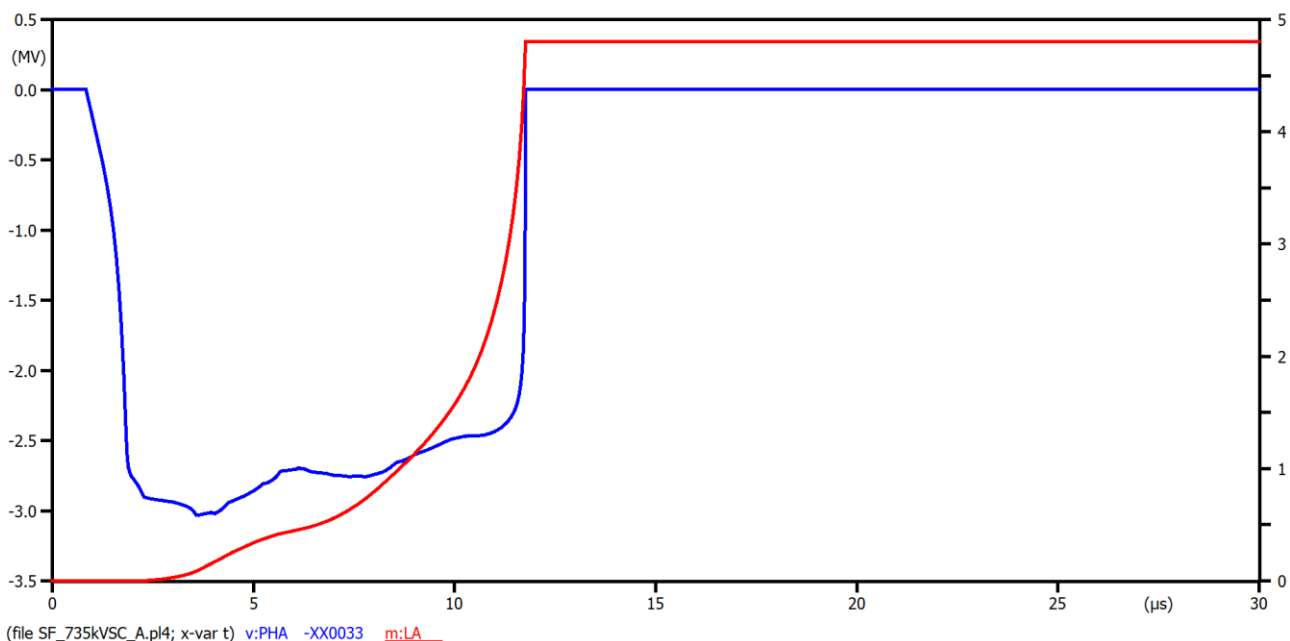


Σχήμα 5.72: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 400 kV μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 15.5 kA.

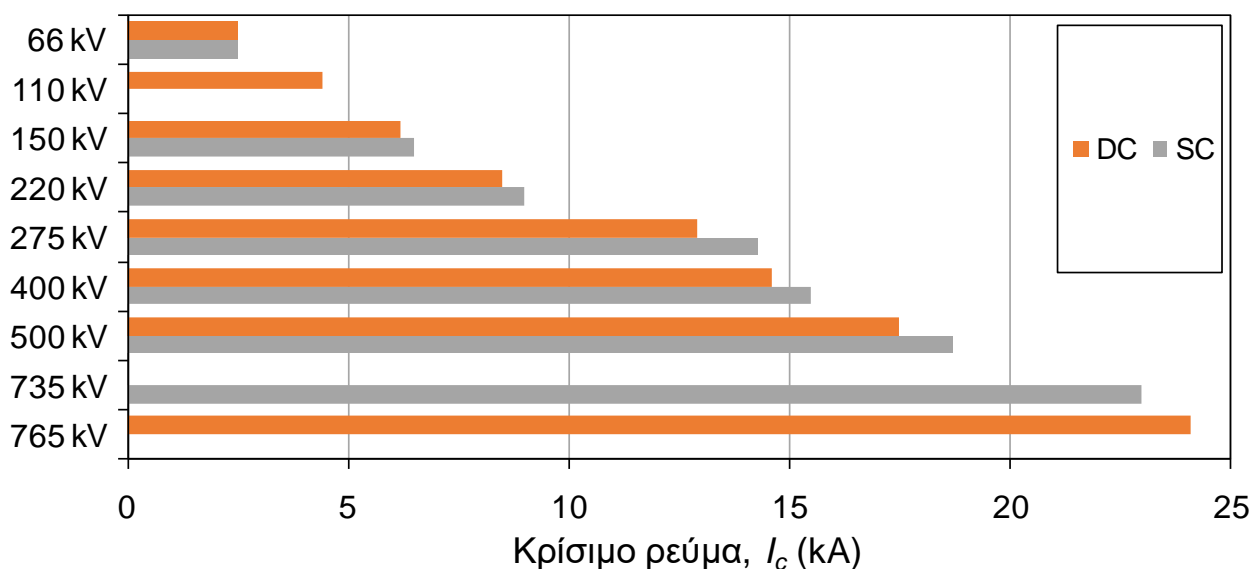
➤ ΓΜ 765 kV, επάνω φάση A (DC) / ΓΜ 735 kV, εξωτερική φάση A (SC)



Σχήμα 5.73: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 765 kV διπλού κυκλώματος (DC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 24.1 kA.



Σχήμα 5.74: Ενδεικτική κυματομορφή διάσπασης, ΓΜ 735 kV μονού κυκλώματος (SC), κρίσιμο ρεύμα διάσπασης 23 kA.



Σχήμα 5.75: Ραβδόγραμμα ελάχιστων κεραυνικών ρευμάτων διπλού και μονού κυκλώματος για όλες τις ΓΜ σε περίπτωση επακόλουθου κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό φάσης.

Από το Σχήμα 5.75 φαίνεται ότι το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα αυξάνεται με την αύξηση του επιπέδου τάσης λειτουργίας της ΓΜ λόγω του μεγαλύτερου BIL. Επίσης στις ΓΜ απλού κυκλώματος είναι μεγαλύτερο στις περισσότερες περιπτώσεις. Αυτό έχει να κάνει με τις μικρότερες υπερτάσεις που παρατηρούνται (π.χ. Σχήμα 5.54) σε σύγκριση με τις ΓΜ διπλού κυκλώματος, η οποία μπορεί να αποδοθεί στο χαμηλότερο ύψος των αγωγών φάσης που οδηγεί σε μικρότερη κυματική αντίσταση. Είναι εμφανές ότι στην περίπτωση του σφάλματος θωράκισης οι τιμές του κρίσιμου ρεύματος είναι μικρές και επομένως αναμένεται να έχει μεγαλύτερη σημασία στη συνολική συμπεριφορά της ΓΜ σε σχέση με την περίπτωση της ανάστροφης διάσπασης.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των εναέριων γραμμών μεταφοράς (ΓΜ) ηλεκτρικής ενέργειας, σε περίπτωση επακόλουθων κεραυνικών πλήγμάτων στον αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης), στον αγωγό προστασίας ή στον πυλώνα (ανάστροφη διάσπαση), καθώς για πρώτη φορά πραγματοποιείται διερεύνηση αποκλειστικά για τα επακόλουθα πλήγματα σε πολλές διαφορετικές ΓΜ. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν τυπικές ΓΜ με AC τάση από 66 kV έως 765 kV, μονού και διπλού κυκλώματος. Οι προσομοιώσεις έγιναν με το λογισμικό ATP-EMTP. Προσδιορίστηκαν τα κρίσιμα (ελάχιστα) κεραυνικά ρεύματα που προκαλούν ηλεκτρική διάσπαση της μόνωσης των ΓΜ και οι αντίστοιχες κεραυνικές υπερτάσεις λόγω επακόλουθων κεραυνικών πλήγμάτων.

Όσον αφορά τα πλήγματα στον πυλώνα όπου ενδέχεται να προκληθεί ανάστροφη διάσπαση, βρέθηκε ότι βασικό ρόλο παίζει η αντίσταση γείωσης, το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL) της ΓΜ αλλά και η γωνία φάσης της AC τάσης της γραμμής κατά τη χρονική στιγμή του πλήγματος. Οι ίδιοι παράγοντες επηρεάζουν και τα αποτελέσματα των πρώτων κεραυνικών πλήγμάτων, όπως έχει βρεθεί στη βιβλιογραφία. Αναλυτικότερα, όσο μικρότερη αντίσταση γείωσης έχουμε τόσο πιο εύκολο είναι για το κεραυνικό ρεύμα να οδηγηθεί με ασφάλεια στο έδαφος, με αποτέλεσμα οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις να έχουν σχετικά χαμηλές τιμές, ενώ όσο αυξάνεται η αντίσταση γείωσης παρατηρούνται σημαντικά μεγαλύτερες υπερτάσεις οι οποίες καταπονούν περισσότερο τη μόνωση των γραμμών με αποτέλεσμα το κρίσιμο κεραυνικό ρεύμα που απαιτείται ώστε να διασπαστεί η μόνωση, να μειώνεται. Περαιτέρω, μπορεί να παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερο BIL έχει μία ΓΜ, τόσο καλύτερα προστατεύεται από τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε σχέση με γραμμές μικρότερων επιπέδων τάσης λειτουργίας, οι οποίες έχουν μικρότερο BIL. Έτσι, οι ΓΜ μεγαλύτερων AC τάσεων παρουσιάζουν μικρότερες υπερτάσεις ανηγμένες στο BIL και απαιτούνται μεγαλύτερα κρίσιμα κεραυνικά ρεύματα, τα οποία οδηγούν σε διάσπαση. Αντίστοιχα, συμπεραίνεται ότι οι ΓΜ χαμηλού επιπέδου τάσης λειτουργίας είναι πιο ευάλωτες λόγω του χαμηλότερου BIL τους. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι για την ίδια τάση λειτουργίας και το ίδιο κεραυνικό ρεύμα παρατηρείται ανάπτυξη μεγαλύτερων υπερτάσεων στις ΓΜ διπλού κυκλώματος (DC), οπότε και μεγαλύτερη καταπόνηση στη μόνωση των ΓΜ, με αποτέλεσμα να συμβαίνει σε διάσπαση για μικρότερο κεραυνικό ρεύμα. Επιπρόσθετα, πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω της πολύ μικρής διάρκειας του φαινομένου του επακόλουθου κεραυνικού πλήγματος, παίζει ρόλο η γωνία φάσης της AC τάσης της γραμμής, καθώς σε αυτή υπερτίθεται η κεραυνική υπέρταση με αποτέλεσμα είτε την μεγαλύτερη είτε τη μικρότερη καταπόνηση της μόνωσης. Σε σύγκριση με τα πρώτα πλήγματα, τα κρίσιμα ρεύματα είναι μικρότερα λόγω της μικρότερης διάρκειας μετώπου και της μεγαλύτερης κλίσης των επακόλουθων πλήγμάτων.

Όσον αφορά τα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα στον αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης), η ειδική αντίσταση του εδάφους (και επομένως η αντίσταση γείωσης) δεν παίζει σημαντικό ρόλο στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις, οπότε οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ΓΜ είναι το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL) και εάν φέρει διπλό ή μονό κύκλωμα, λόγω αλλαγής του ύψους των αγωγών από το έδαφος. Έτσι λοιπόν, εξάγεται στο συμπέρασμα ότι όπως και στην προηγούμενη περίπτωση για υψηλότερα επίπεδα τάσης λειτουργίας αναπτύσσονται μικρότερες υπερτάσεις ανηγμένες στο BIL, λόγω του υψηλότερου BIL, οπότε παρατηρείται αύξηση του κρίσιμου κεραυνικού ρεύματος που απαιτείται ώστε να οδηγηθούμε σε διάσπαση της μόνωσης. Ως εκ τούτου, είναι ασφαλές να ειπωθεί ότι οι ΓΜ χαμηλότερων επιπέδων τάσης λειτουργίας είναι πιο ευάλωτες σε διασπάσεις από τις ΓΜ υψηλότερων επιπέδων τάσης λειτουργίας. Εδώ πρέπει να προστεθεί ότι για τις ΓΜ που φέρουν διπλό κύκλωμα βρέθηκε ότι παρουσιάζουν υψηλότερες υπερτάσεις σε σχέση με τις ΓΜ μονού κυκλώματος, γεγονός το οποίο σηματοδοτεί τη μεγαλύτερη καταπόνηση της μόνωσης τους με αποτέλεσμα να προκύπτει κρίσιμη διάσπαση για μικρότερα κεραυνικά ρεύματα από τις ΓΜ μονού κυκλώματος. Αυτό αποδίδεται στο ύψος των αγωγών από το έδαφος και στη μικρότερη κυματική αντίσταση στις γραμμές μονού κυκλώματος λόγω του ύψους αυτού.

Για μελλοντική διερεύνηση θα μπορούσε να εξεταστεί ο ρυθμός σφαλμάτων στις ΓΜ λόγω σφαλμάτων θωράκισης και ανάστροφων δασπάσεων και να εξακριβωθεί ο μέσος αριθμός σφαλμάτων των γραμμών που παρατηρούνται ανά χρόνο, καθώς και η συνεισφορά των επακόλουθων πληγμάτων στον ρυθμό αυτό.

Βιβλιογραφία

[1] CIGRE Technical Brochure063, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, 2021.

[2] Ζ. Γ. 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, Θεσσαλονίκη, 2017.

[3] Δ. Καραμουσλής και Α. Αντώναρος, 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, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2022.

[4] Α. Γκουγκουγιάννης, Παραμετρική διερεύνηση κεραυνικών υπερτάσεων και κρίσιμων κεραυνικών ρευμάτων που προκαλούν διάσπαση της μόνωσης γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κατακόρυφης διάταξης φάσεων, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2023.