



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

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ
ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗΣ
ΤΑΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ
ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ
ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΟΔΟΥ ΤΟΥ ΛΗΝΤΕΡ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΙΩΑΝΝΗ ΡΙΤΟΥ

Επιβλέπων: Ζαχαρίας Δάτσιος

Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

ΚΟΖΑΝΗ/ΜΑΡΤΙΟΣ/2024

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



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

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF THE APPLIED VOLTAGE WAVEFORM ON THE FLASHOVER PREDICTION OF LONG INSULATORS THROUGH SIMULATIONS EMPLOYING A LEADER DEVELOPMENT MODEL

THESIS

IOANNIS RITOS

SUPERVISOR: Zacharias Datsios

Adjunct Lecturer

KOZANI/MARCH/2024

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 "Διερεύνηση της επίδρασης της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης τάσης στη διάσπαση μονωτήρων μεγάλου μήκους μέσω προσομοιώσεων με μοντέλο προόδου του λήντερ" 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) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή & Επιβλέποντα, Έτος, Πόλη

Copyright (C) Ιωάννης Ρίτος, Ζαχαρίας Δάτσιος, 2024, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Ιωάννης Ρίτος

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάλυση της επίδρασης της κυματομορφής της τάσης που καταπονεί μονωτήρες μεγάλου μήκους που χρησιμοποιούνται σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην τάση διάσπασης και τον χρόνο διάσπασης των μονωτήρων αυτών. Η διερεύνηση γίνεται μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ATP-EMTP. Η τάση καταπόνησης αφορά εξωτερικές υπερτάσεις (μικρής διάρκειας μετώπου), όπως αυτές που προκαλούνται από κεραυνικά πλήγματα. Προσομοιώνονται διπλεκθετικές κυματομορφές με διαφορετικές διάρκειες μετώπου και ημίσεως εύρους (ουράς), καθώς και κυματομορφές CIGRE που αναπαριστούν κεραυνικά ρεύματα. Οι διπλεκθετικές χρησιμοποιούνται σε πειράματα με μονώσεις σε εργαστήρια Υψηλών Τάσεων. Οι μονωτήρες που επιλέχθηκαν για να διερευνηθούν είναι αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης (αλυσίδες κεραμικών μονωτήρων) και χρησιμοποιούνται σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με επίπεδα τάσης 66 kV, 150 kV, 400 kV και 735 kV. Έτσι καλύπτονται τα τυπικά μήκη και επίπεδα μόνωσης που χρησιμοποιούνται σε κοινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο πρόβλεψης της διάσπασης που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις είναι το μοντέλο προόδου του λήντερ που προτάθηκε από τη CIGRE. Με αυτό κατασκευάστηκαν καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης ($V-t$), οι οποίες στη συνέχεια κανονικοποιήθηκαν για να συγκριθούν και να εξαχθούν συμπεράσματα.

Λέξεις Κλειδιά

Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Ηλεκτρική διάσπαση

Κεραυνικές υπερτάσεις

Μοντέλα προόδου του λήντερ

Μονωτήρες

Υποσταθμοί

Abstract

This diploma thesis aims to analyze the impact of the overvoltage waveform stressing long insulators for overhead transmission systems on their breakdown voltage and breakdown time. The investigation of this thesis is performed via simulations using ATP-EMTP software. The overvoltage stress refers to lightning overvoltages (fast-front overvoltages). Double-exponential waveforms, as well as CIGRE waveforms are simulated with different waveform parameters to enable comparisons. CIGRE waveforms are used to simulate lightning currents based on recordings; double-exponential waveforms are employed in high-voltage laboratory experiments. The studied insulators are ceramic cap-and-pin insulator strings for overhead lines with voltages 66 kV, 150 kV, 400 kV and 735 kV. These cover typical systems, and thus, insulator lengths and dielectric strength values. The prediction of insulator flashover is performed using the CIGRE leader development model. The obtained voltage-time characteristics are normalized and compared against each other to reach general conclusions.

Keywords

Flashover

Insulators

Leader development models

Lightning overvoltages

Substations

Transmission lines

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες προς όλους όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δάτσιο Ζαχαρία, για την εμπιστοσύνη, την επιστημονική καθοδήγηση, τις υποδείξεις, την επιμονή και τη στήριξή του.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια παρέχοντας μου τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την υπομονή κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος Σχημάτων	13
Κατάλογος Πινάκων	15
Πρόλογος	17
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στις μεθόδους πρόβλεψης της ηλεκτρικής διάσπασης διακένων αέρα μεγάλου μήκους και μονωτήρων	19
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	19
1.2 Γενικά στοιχεία	19
1.3 Σύγκριση της κρουστικής τάσης / υπέρτασης με το βασικό επίπεδο μόνωσης	20
1.4 Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης	21
1.5 Μέθοδος ολοκλήρωσης	22
1.6 Μοντέλα προόδου του λήντερ	23
1.6.1 Έναυση αρχικής κορώνα	24
1.6.2 Ανάπτυξη των νηματίων	24
1.6.2 Ανάπτυξη του λήντερ	24
1.7 Σύνοψη	25
Κεφάλαιο 2: Περιπτώσεις και παράμετροι προσομοίωσης	27
2.1 Κυματομορφές	27
2.1.1 Διπλεκθετική κυματομορφή	27
2.1.2 Κυματομορφή CIGRE	30
2.1.3 Κυματομορφή με δύο κορυφές	31
2.1.4 Πραγματικές κυματομορφές	34
2.2 Πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της εργασίας	35
2.2.1 Επίδραση μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής	36
2.2.2 Επίδραση ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής	37

2.2.3 Επίδραση κυματομορφής CIGRE	37
2.2.4 Επίδραση πραγματικών κυματομορφών	38
2.3 Μονωτήρες	38
Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα διπλεκθετικών κυματομορφών	41
3.1 Επίδραση μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής	43
3.2 Επίδραση ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής	50
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα με την κυματομορφή της CIGRE	59
4.1 Επίδραση της κυματομορφής	60
4.2 Σύγκριση διπλεκθετικών κυματομορφών με τις κυματομορφές CIGRE	67
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα με τις πραγματικές κυματομορφές	71
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	77
Βιβλιογραφία	79

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Εξωτερική κρουστική υψηλή τάση (LI), χαρακτηριστικές παράμετροι [15].	28
Σχήμα 2.2 Εσωτερική κρουστική υψηλή τάση (LI), χαρακτηριστικές παράμετροι [15].	29
Σχήμα 2.3 Παραγωγή κρουστικών υψηλών τάσεων, U_p : τάση κορυφής, T_{cr} : διάρκεια μετώπου, $a_2 \gg a_1$ [15].	29
Σχήμα 2.4 Κατηγορίες κεραυνών ανάλογα με την πολικότητα του φορτίου του νέφους [11].	30
Σχήμα 2.5 Γραφική παράσταση των ρευμάτων πρώτου πλήγματος από τις παραμέτρους των Πινάκων 2.1 και 2.2. (a) Σταθμός Morro do Cachimbo (b) Σταθμός Mount San Salvatore [16].	34
Σχήμα 2.6 Καταγεγραμμένα κύματα ρεύματος οχετού επιστροφής πρώτου πλήγματος κεραυνού (ονομασίες W1-W6) και προσεγγίσεις με κυματομορφές CIGRE (συνεχείς γραμμές) [17].	35
Σχήμα 2.7: Κυματομορφές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης του μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους. 0.5/50 μ s, 1.2/50 μ s, 5/50 μ s, 10/50 μ s. Οι ίδιες κυματομορφές χρησιμοποιήθηκαν και στη διερεύνηση της αναφοράς [18].	36
Σχήμα 2.8: Κυματομορφές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης της ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους. 1.2/5 μ s, 1.2/30 μ s, 1.2/50 μ s, 1.2/70 μ s, 1.2/200 μ s. Οι ίδιες κυματομορφές χρησιμοποιήθηκαν και στη διερεύνηση της αναφοράς [18].	37
Σχήμα 2.9: Κυματομορφές CIGRE που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης της ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους. 2.4/77.5 μ s, 3.67/77.5 μ s, 4.52/77.5 μ s, 6.01/77.5 μ s, 8/77.5 μ s. Οι ίδιες κυματομορφές χρησιμοποιήθηκαν και στη διερεύνηση της αναφοράς [18].	38
Σχήμα 3.1 Προσομοίωση μονωτήρα 735 kV με διάσπαση στο μέτωπο.	41
Σχήμα 3.2 Προσομοίωση μονωτήρα 735 kV με διάσπαση στην ουρά.	41
Σχήμα 3.3 Τυπικές καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης με εφαρμοζόμενη διπλεκθετική κυματομορφή και με τους δύο ορισμούς (μονωτήρας 735 kV, κυματομορφή 1.2/50 μ s). Μπλε καμπύλη: ορισμός μέγιστης τάσης, Κόκκινη καμπύλη: ορισμός στιγμιαίας τάσης	43
Σχήμα 3.4: Επίδραση διάρκειας μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων. Ορισμός μέγιστης τάσης.	45
Σχήμα 3.5: Επίδραση διάρκειας μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων. Ορισμός στιγμιαίας τάσης.	46
Σχήμα 3.6: Επίδραση της διάρκειας μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων (ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης). Ορισμός με τη μέγιστη τάση.	47
Σχήμα 3.7: Επίδραση της διάρκειας μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων (ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση.	48
Σχήμα 3.8: Παρουσίαση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων με	

βάση την κάθε τιμή διάρκειας μετώπου σε κανονικοποιημένη μορφή.	49
Σχήμα 3.9: Επίδραση διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς) στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων. Ορισμός με τη μέγιστη τάση.	52
Σχήμα 3.10: Επίδραση διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς) στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων. Ορισμός με τη στιγμιαία τάση.	53
Σχήμα 3.11: Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς) διπλεκθετικής κυματομορφής στις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων (ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης). Ορισμός με τη μέγιστη τάση.	54
Σχήμα 3.12: Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς) διπλεκθετικής κυματομορφής στις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων (ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση.	55
Σχήμα 3.13: Παρουσίαση των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων με βάση την κάθε τιμή διάρκειας ουράς που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή.	57
Σχήμα 4.1: Προσομοίωση διάσπασης μονωτήρα 400 kV με κυματομορφή CIGRE. Διάσπαση στην ουρά.	59
Σχήμα 4.2: Καμπύλη τάσης χρόνου διάσπασης κυματομορφής CIGRE για τον μονωτήρα των 400 kV και κυματομορφή 4.52/77.5 μ s. Μπλε καμπύλη: ορισμός μέγιστης τάσης, Κόκκινη καμπύλη: ορισμός στιγμιαίας τάσης	60
Σχήμα 4.3: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς για την κυματομορφή CIGRE. Ορισμός μέγιστης τάσης.	62
Σχήμα 4.4: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς με την κυματομορφή CIGRE. Ορισμός στιγμιαίας τάσης.	63
Σχήμα 4.5: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς με την κυματομορφή CIGRE κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Ορισμός μέγιστης τάσης.	64
Σχήμα 4.6: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς με την κυματομορφή CIGRE κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Ορισμός στιγμιαίας τάσης.	65
Σχήμα 4.7: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς με την κυματομορφή CIGRE για κάθε κυματομορφή CIGRE που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή.	67
Σχήμα 4.8: Σύγκριση καμπυλών τάσης χρόνου-διάσπασης με διπλεκθετική 5/50 μ s και κυματομορφή CIGRE 4.52/77.5 μ s. Ορισμός μέγιστης τάσης.	68
Σχήμα 4.9: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης με διπλεκθετική 10/50 μ s και κυματομορφή CIGRE 8/77.5 μ s. Ορισμός μέγιστης τάσης.	69
Σχήμα 5.1: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W1 και της αναπαράστασής της με κυματομορφή CIGRE με τον ορισμό μέγιστης τάσης.	73
Σχήμα 5.2: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W1 και της αναπαράστασής της με κυματομορφή CIGRE με τον ορισμό στιγμιαίας τάσης.	74
Σχήμα 5.3: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W3 και της αναπαράστασής της με κυματομορφή CIGRE με τον ορισμό μέγιστης τάσης.	75
Σχήμα 5.4: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W3 και αναπαράστασής της με CIGRE με τον ορισμό στιγμιαίας τάσης.	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να συνθέσουν τα πρώτα αρνητικά κατερχόμενα ρεύματα που μετρήθηκαν από τον σταθμό Morro do Cachimbo [16].	33
Πίνακας 2.2 Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να συνθέσουν τα πρώτα αρνητικά κατερχόμενα ρεύματα που μετρήθηκαν από τον σταθμό San Salvatore [16].	33
Πίνακας 2.3 Σύγκριση των παραμέτρων από τα πρώτα αρνητικά ρεύματα [16].	33
Πίνακας 2.4 Παράμετροι των κυματομορφών των καταγεγραμμένων κυμάτων ρεύματος που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6 [17].	35
Πίνακας 2.5 Στοιχεία των διπλεκθετικών κυματομορφών και κυματομορφών CIGRE που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της εργασίας.	36
Πίνακας 2.6 Πίνακας με το μήκος του μονωτήρα και το βασικό επίπεδο μόνωσης του ανάλογα με την τάση της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις.	39

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Πρόλογος

Το θέμα της εργασίας αυτής επικεντρώνεται στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και εξετάζει τη μόνωσή τους υπό συνθήκες κεραυνικών υπερτάσεων. Σκοπός είναι η πρόβλεψη ηλεκτρικών διασπάσεων σε μονωτήρες εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας λογισμικά μεταβατικών φαινομένων όπως το διαδεδомένο λογισμικό ATP-EMTP. Η εργασία αυτή αποσκοπεί στην καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της κυματομορφής κεραυνικών υπερτάσεων που καταπονεί μονωτήρες μεγάλου μήκους στην πρόβλεψη της ηλεκτρικής διάσπασής τους. Αυτό θα συμβάλει στον συντονισμό μονώσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ενισχύοντας την αξιοπιστία τους. Μέσω προσομοιώσεων, όπως της εργασίας αυτής μειώνεται το κόστος σχεδίασης των συστημάτων μόνωσης, αφού αντικαθίστανται ακριβές εργαστηριακές δοκιμές, οι οποίες αποτελούν τεχνικά μία πρόκληση.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στις μεθόδους πρόβλεψης της ηλεκτρικής διάσπασης διακένων αέρα μεγάλου μήκους και μονωτήρων

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας. Σε αυτό παρουσιάζονται οι μέθοδοι πρόβλεψης της ηλεκτρικής διάσπασης μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και σχετίζονται με εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις και υπερτάσεις λόγω κεραυνών. Επίσης θα γίνει αναφορά στο αντικείμενο και τους στόχους της εργασίας. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι γενικές πληροφορίες για να συνταχθεί το κεφάλαιο αυτό προέκυψαν από τις αναφορές [1] και [2].

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η πρόβλεψη της ηλεκτρικής διάσπασης μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων μεγάλου μήκους όταν καταπονούνται με εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις ή/και κεραυνικές υπερτάσεις μη κανονικής κυματομορφής είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις μελέτες συντονισμού μονώσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης τάσης στην τάση διάσπασης και στον χρόνο διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους. Η διερεύνηση θα πραγματοποιηθεί μέσω του λογισμικού ATP-EMTP με τη χρήση διαδεδομένου μοντέλου προόδου του λήντερ. Θα προσομοιωθούν μονωτήρες με διαφορετικά χαρακτηριστικά και μήκη και διάφορες κυματομορφές κρουστικών υψηλών τάσεων και υπερτάσεων. Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθούν οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης.

1.2 Γενικά στοιχεία

Η διάσπαση μονωτήρων μεγάλου μήκους και αντίστοιχων διακένων αέρα (άνω περίπου του 1 m) είναι ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι εταιρίες στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η διάσπαση μονωτήρων, μπορεί να προκαλέσει διακοπή ρεύματος, πυρκαγιές ακόμη και πιθανά ατυχήματα σε ανθρώπους και στο περιβάλλον. Επομένως, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς (απόκρισης) μόνωσης εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και υποσταθμών έχει ιδιαίτερη

σημασία για την αξιολόγηση της κεραυνικής συμπεριφοράς και τον συντονισμό μόνωσης των εναέριων γραμμών μεταφοράς και των διασυνδεδεμένων υποσταθμών.

Ο υπολογισμός της τάσης και του χρόνου της διάσπασης των μονωτήρων και των διακένων μπορεί να γίνει με τις παρακάτω μεθόδους ή μοντέλα με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία:

- Σύγκριση της κρουστικής τάσης ή υπέρτασης με το βασικό επίπεδο μόνωσης, BIL (Basic Insulation Level, 10% πιθανότητα διάσπασης), ή με την 50% τάση διάσπασης, CFO (Critical Flashover Voltage), της μόνωσης
- Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης [3-5]
- Μέθοδος ολοκλήρωσης [6-8]
- Μοντέλα προόδου (ή ανάπτυξης) του λήντερ [9-14].

Οι παραπάνω μέθοδοι που εφαρμόζονται σε εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις και σε υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου (κεραυνικές) και είναι χρήσιμες όταν οι κυματομορφές διαφέρουν από τις κανονικές κυματομορφές που χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακές δοκιμές. Χωρίς τις μεθόδους αυτές για κάθε διαφορετική (μη κανονική) κυματομορφή θα έπρεπε να γίνουν πειράματα.

Παρακάτω θα αναπτυχθούν οι μέθοδοι αυτές. Θα δοθεί έμφαση στα μοντέλα προόδου του λήντερ τα οποία αφορούν τη διπλωματική εργασία.

1.3 Σύγκριση της κρουστικής τάσης / υπέρτασης με το βασικό επίπεδο μόνωσης

Η πιο εύκολη μέθοδος για να προβλεφθεί η τάση και ο χρόνος διάσπασης της μόνωσης μεγάλου μήκους, είναι η συσχέτιση της κρουστικής τάσης / υπέρτασης με μία χαρακτηριστική τιμή, όπως για παράδειγμα το βασικό επίπεδο μόνωσης (Basic Insulation Level) ή πιο κοινά την 50% τάση διάσπασης (CFO) της μόνωσης. Οι τιμές αυτές έχουν βρεθεί πειραματικά. Την στιγμή που η υπέρταση ξεπεράσει τη χαρακτηριστική τιμή, τότε θεωρείται ότι έχει προκληθεί διάσπαση στη μόνωση. Παρόλο που η μέθοδος είναι απλή, δεν λαμβάνει υπόψη τη χαρακτηριστική τάσης-χρόνου διάσπασης της μόνωσης, δηλαδή τις μεγάλες τιμές της τάσης διάσπασης της μόνωσης, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από την τάση διάσπασης (CFO), καθώς αντιστοιχούν σε μικρούς χρόνους διάσπασης. Επομένως, σε συνθήκες υπέρτασης οι στιγμιαίες τάσης διάσπασης και ο χρόνος διάσπασης με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι λάθος. Τέλος, το επίπεδο CFO βρίσκεται πειραματικά υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (διπλεκθετική κυματομορφή: 1.2/50 μ s), άρα η μέθοδος δεν είναι

κατάλληλη για να προβλέψει ορθά τη συμπεριφορά της μόνωσης υπό υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου με μη κανονική κυματομορφή.

1.4 Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης

Η καμπύλη V-t είναι μια καμπύλη, η οποία έχει ως ρόλο τη συσχέτιση της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (πριν από την πιθανή διάσπαση) που επιβάλλεται σε ένα εργαστήριο υψηλών τάσεων με τον χρόνο διάσπασης της μόνωσης. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση που διάσπαση γίνεται στην ουρά της κυματομορφής (μετά το μέγιστο), τότε η καμπύλη V-t δεν αναφέρεται στη στιγμιαία τάση διάσπασης αλλά στη μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Κάθε καμπύλη V-t έχει να κάνει αποκλειστικά και μόνο με ένα διάκενο ή μονωτήρα και αναφέρεται στην συγκεκριμένη πολικότητα και κυματομορφή της εφαρμοζόμενης κρουστικής υψηλής τάσης. Επίσης, οι καμπύλες V-t δεν λαμβάνουν υπόψη τη διασπορά των τιμών της τάσης και του χρόνου διάσπασης, διότι αυτές κατασκευάζονται με τις ελάχιστες ή μέσες τιμές που εμφανίζονται, έτσι ώστε να αποτελέσματα να είναι συντηρητικά από την πλευρά του συντονισμού μονώσεων. Επίσης, για τους μονωτήρες εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και υποσταθμών, οι καμπύλες V-t αναφέρονται συνήθως σε κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (1.2/50 μ s) και στη βιβλιογραφία υπάρχει μια ποικιλία καμπυλών V-t οι οποίες αναλογούν σε διάφορους τύπους μονωτήρων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και υποσταθμών και επιπέδων τάσης κανονικής λειτουργίας. Αντίστοιχα υπάρχουν καμπύλες για πολλά διάκενα αέρα.

Με βάση τα παραπάνω για τις καμπύλες μεταξύ της τάσης και του χρόνου διάσπασης, κατά την πρόβλεψη της διάσπασης με τη χρήση των καμπυλών αυτών, η διάσπαση της μόνωσης συμβαίνει όταν η τάση που την καταπονεί γίνει μεγαλύτερη ή ίση με μία συγκεκριμένη τιμή, που ονομάζεται τάση διάσπασης (U_{FO}). Η τιμή αυτή, μπορεί να υπολογιστεί μέσω της πειραματικής καμπύλης V-t, δηλαδή από την τομή της τάσης καταπόνησης με την καμπύλη V-t. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει η πειραματική καμπύλη V-t για να βρεθεί η U_{FO} , μπορεί να υιοθετηθεί την καμπύλη ενός παρόμοιου μονωτήρα ή μια γενικευμένη σχέση από τη βιβλιογραφία. Η σχέση που χρησιμοποιείται συνήθως ονομάζεται καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης της CIGRE και προέκυψε από πειράματα σε μονωτήρες διαφορετικού μήκους. Η σχέση αυτή φαίνεται παρακάτω και χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η τάση διάσπασης U_{FO} με βάση το μήκος του μονωτήρα D και τον χρόνο διάσπασης. Τέλος, η σχέση αυτή ισχύει για χρόνους διάσπασης μικρότερους από 1 μ s μετά την παρεκβολή των πειραματικών δεδομένων.

$$U_{FO} = (400 + \frac{710}{t_b^{0.75}})D$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι καμπύλες V-t αναφέρονται στη μέγιστη τιμή της τάσης που αναπτύσσεται κατά μήκος της μόνωσης από τη

διάσπαση, η οποία μπορεί να διαφέρει από την στιγμιαία τάση διάσπασης. Πιο αναλυτικά, όταν η διάσπαση πραγματοποιείται στο μέτωπο της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης, τότε η τιμή της τάσης που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της καμπύλης $V-t$ είναι αυτή που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή της διάσπασης. Όμως, για της διασπάσεις στην ουρά της κυματομορφής, οι οποίες αντιστοιχούν σε χαμηλότερες πιθανότητες διάσπασης, τότε η καμπύλη $V-t$ συσχετίζει το εύρος της τάσης με τον χρόνο διάσπασης. Αυτό έχει ως συμπέρασμα ότι συσχετίζονται οι τιμές τάσης και χρόνου που δεν αντιστοιχούν στην ίδια χρονική στιγμή, κάτι που οδηγεί σε εσφαλμένη εκτίμηση της τάσης και του χρόνου διάσπασης.

1.5 Μέθοδος ολοκλήρωσης

Οι Witzke και Bliss [6, 7], πρότειναν μια εμπειρική μέθοδο με την ονομασία «μέθοδος ολοκλήρωσης» ή «δείκτης δριμύτητας» για την εκτίμηση της επίδρασης κεραυνικών υπερτάσεων μη κανονικής κυματομορφής σε μετασχηματιστές ισχύος. Στην συνέχεια, αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε σε πειραματικά αποτελέσματα διασπάσεων κυρίως διακένων αέρα ακίδας-ακίδας. Γενικότερα, η μέθοδος ολοκλήρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς αερίων, υγρών και στερεών μονώσεων κάτω από καταπόνηση υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου μη κανονικής κυματομορφής, βασιζόμενη σε πειραματικά αποτελέσματα υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Σύμφωνα με την μέθοδο ολοκλήρωσης, η διαδικασία της ηλεκτρικής διάσπασης της μόνωσης εκκινεί μόλις η στιγμιαία τιμή της τάσης καταπόνησης ξεπεράσει ένα κατώφλι τάσης, U_{th} , που εξαρτάται από τις τιμές της τάσης και από το χρονικό διάστημα στο οποίο η τάση είναι μεγαλύτερη από την U_{th} . Η γενική σχέση της μεθόδου ολοκλήρωσης είναι:

$$DE = \int_{t_0}^t (U - U_{th})^k dt$$

Όπου DE ($kV^k \cdot \mu s$) η καταπόνηση που προκαλεί η στιγμιαία τιμή της τάσης U στη μόνωση, t_0 (μs) η χρονική στιγμή στην οποία η U υπερβαίνει το κατώφλι τάσης U_{th} (kV), t (μs) ο χρόνος από τη στιγμή εφαρμογής της τάσης και k (p.u.) ένας συντελεστής που λαμβάνει υπ' όψιν τον διαφορετικό βαθμό επίδρασης των τιμών της τάσης και της διάρκειάς της στη DE .

Σύμφωνα με τη μέθοδο της ολοκλήρωσης, η διάσπαση συμβαίνει όταν το ολοκλήρωμα της στιγμιαίας τιμής της DE υπερβεί την κρίσιμη τιμή της καταπόνησης DE^* . Για μια μόνωση οι τιμές των παραμέτρων DE^* , U_{th} και k , μπορούν να προσδιοριστούν μέσω της βέλτιστης προσέγγισης των πειραματικών καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις.

Η μέθοδος ολοκλήρωσης έχει ως βασικό μειονέκτημα τη δυσκολία στον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, οι οποίες ενδέχεται να απαιτήσουν δοκιμές σε εργαστήριο. Γι' αυτόν τον λόγο, έχουν προταθεί απλοποιημένες προσεγγίσεις όπου η U_{th} θεωρείται ίση με 0 ή ο εκθέτης k ίσος με 1.

Επιπλέον, η μέθοδος ολοκλήρωσης είναι εμπειρική και δεν σχετίζεται άμεσα με τον μηχανισμό της ηλεκτρικής διάσπασης. Παρόλο που οι Darveniza και Vlastos [8] παρουσίασαν θεωρητικό υπόβαθρο για τη μέθοδο πολλά χρόνια μετά τις δημοσιεύσεις των Witzke και Bliss, οι παράμετροι της μεθόδου δεν έχουν κάποια φυσική σημασία.

Η χρήση μεταβλητής αντί για σταθερή τιμή του κατωφλίου τάσης U_{th} και εκθέτη k κατά τη διάσπαση φαίνεται πιο κατάλληλη από φυσικής άποψης. Επίσης, κατά τη διάσπαση ομοιογενών ή σχεδόν ομοιογενών διακένων αέρα, μπορεί να εφαρμοστεί το λεγόμενο κριτήριο Kind (κριτήριο περιοχών ίσου εμβαδού), το οποίο έχει φυσική βάση. Αυτό το κριτήριο χρησιμοποιεί τη σχέση χωρίς τον εκθέτη k , θεωρώντας ότι το κατώφλι U_{th} είναι ίσο με την τάση διάσπασης του διακένου υπό συνεχή υψηλή τάση.

Παρά τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η μέθοδος ολοκλήρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της κρουστικής συμπεριφοράς μονώσεων υπό μη κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις και υπερτάσεις, αν και απαιτούνται κατάλληλες παράμετροι που πρέπει να βρεθούν με πειραματικά δεδομένα. Σε αντίθετη περίπτωση, ενδέχεται να υπάρξουν σημαντικά σφάλματα. Επιπλέον, οι παράμετροι της μεθόδου εξαρτώνται από την κυματομορφή της κρουστικής υψηλής τάσης, καθώς τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι ευαίσθητα σε αυτήν. Επομένως, είναι αναγκαίο να διερευνηθεί προσεκτικά η ακρίβεια της μεθόδου για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μονώσεων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υπό μη κανονικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι η μέθοδος ολοκλήρωσης είναι πιο ακριβής από τις προηγούμενες δύο μεθόδους.

1.6 Μοντέλα προόδου του λήντερ

Τα μοντέλα προόδου του λήντερ αναπτύχθηκαν βάσει εργαστηριακών ερευνών σχετικά με τον μηχανισμό διάσπασης μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων, υπό επίδραση εξωτερικών κρουστικών υψηλών τάσεων. Το πρώτο μοντέλο προόδου του λήντερ προτάθηκε το 1954 από τους Akopian et al. μέσω πειραμάτων σε μεγάλα διάκενα αέρα ακίδας-πλάκας υπό θετική πολικότητα τάσης. Από τότε έχουν προταθεί πολλά μοντέλα προόδου του λήντερ για διάκενα αέρα ακίδας-πλάκας, ακίδας-ακίδας αλλά και για μονωτήρες υπό κανονικές και μη κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις θετικής και αρνητικής πολικότητας. Όλα τα μοντέλα προόδου του λήντερ θεωρούν τρεις φάσεις του φαινομένου της ηλεκτρικής διάσπασης μεγάλων διακένων

αέρα και μονωτήρων: την έναυση της αρχικής κορώνας, την ανάπτυξη των νηματίων και την ανάπτυξη του λήντερ.

Επομένως, ο χρόνος διάσπασης, t_b (μs), δίνεται από τη σχέση:

$$t_b = t_i + t_s + t_l$$

όπου t_s (μs) και t_l (μs) είναι αντίστοιχα το χρονικό διάστημα προόδου των νηματίων και του λήντερ στο διάκενο και t_i (μs) ο χρόνος έναυσης της αρχικής εκκένωσης κορώνας.

1.6.1 Έναυση αρχικής κορώνας

Στα μοντέλα του προόδου του λήντερ, συνήθως εν τέλει αγνοείται ο χρόνος που απαιτείται για την έναυση της αρχικής κορώνας, διότι αυτή εμφανίζεται σχετικά νωρίς κατά τη διάρκεια του μετώπου της υπέρτασης και η τάση έναυσής της είναι συνήθως χαμηλή σε σχέση με την τάση διάσπασης του διακένου. Ωστόσο, ο χρόνος έναυσης της αρχικής κορώνας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον χρόνο ανάπτυξης των νηματίων, καθώς συμβάλλει στη συνολική διάρκεια ανάπτυξης. Έτσι θεωρείται ότι ο χρόνος t_i εμπεριέχεται στον χρόνο t_s και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν ξεχωριστά.

1.6.2 Ανάπτυξη των νηματίων

Σύμφωνα με τα μοντέλα προόδου του λήντερ, η ανάπτυξη των νηματίων ολοκληρώνεται, όταν τα νημάτια ενώσουν τα δύο ηλεκτρόδια του διακένου. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνει όταν η μέση πεδιακή ένταση του διακένου γίνει ίση με μία κρίσιμη τιμή E_0 , η οποία είναι εξαρτώμενη από τη γεωμετρία του διακένου ή το είδος του μονωτήρα και την πολικότητα της τάσης που εφαρμόζεται.

Αυτή η απλοποιημένη προσέγγιση είναι δεκτή, αν και είναι σημαντικό ότι στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν και άλλα κριτήρια ή εξισώσεις για να βρεθεί ο χρόνος ανάπτυξης των νηματίων.

1.6.3 Ανάπτυξη του λήντερ

Στα μοντέλα προόδου του λήντερ, μετά την ολοκλήρωση της φάσης ανάπτυξης των νηματίων, ακολουθεί η φάση ανάπτυξης του λήντερ. Η φάση αυτή είναι και η σημαντικότερη εκ των τριών για την πρόβλεψη της τάσης και του χρόνου διάσπασης. Ανάλογα με τη γεωμετρία του διακένου, το είδος του μονωτήρα και την πολικότητα της τάσης, ο λήντερ μπορεί να αναπτυχθεί από το ένα ή και από τα δύο

ηλεκτρόδια. Η διάσπαση θεωρείται ότι συμβαίνει τη στιγμή που ο λήντερ γεφυρώνει το διάκενο ή όταν οι δύο λήντερ συναντηθούν στο κέντρο του διακένου. Η ανάπτυξη του λήντερ περιγράφεται μέσω συναρτήσεων που προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα και συσχετίζουν την ταχύτητα του λήντερ με τη στιγμιαία τάση που καταπονεί το διάκενο και το μήκος του ακόμα μη γεφυρωμένου τμήματος του διακένου. Επίσης, αν κατά την ανάπτυξη του λήντερ η μέση πεδιακή ένταση στο αγεφύρωτο τμήμα του διακένου γίνει μικρότερη από την τιμή E_0 , τότε το λήντερ παύει να αναπτύσσεται και δεν επέρχεται διάσπαση.

1.7 Σύνοψη

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, γίνεται αντιληπτό ότι οι πρώτες δύο μέθοδοι (σύγκριση της αναπτυσσόμενης υπέρτασής με το βασικό επίπεδο μόνωσης και καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης) είναι πιο απλές όσον αφορά την υλοποίησή τους αλλά είναι πιθανό να εισάγουν σημαντικά σφάλματα κατά την ανάλυση της τάσης και του χρόνου διάσπασης της μόνωσης. Η βαρύτητα των σφαλμάτων αυτών εξαρτάται από την κυματομορφή και το εύρος (τιμή κορυφής) της υπέρτασης που καταπονεί τη μόνωση. Επίσης, η μέθοδος ολοκλήρωσης βασίζεται στην εμπειρία και οι παράμετροί της πρέπει να προσαρμόζονται για κάθε περίπτωση ξεχωριστά μέσω πειραματικών δεδομένων που αφορούν μία συγκεκριμένη κυματομορφή κρουστικής υψηλής τάσης. Γι' αυτό το λόγο, είναι σημαντικό να εφαρμόζεται με προσοχή.

Αντίθετα, τα μοντέλα προόδου του λήντερ βασίζονται σε φυσικούς μηχανισμούς, όπως η διάσπαση μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων, που επιτρέπουν μια απλούστευση της προσομοίωσης των διαφορετικών φάσεων του φαινομένου της διάσπασης, το οποίο είναι πολύ περίπλοκο. Αυτό οδηγεί σε μια πιο ακριβή εκτίμηση της επίδρασης της υπέρτασης στην κρουστική συμπεριφορά του διακένου ή μονωτήρα. Αν και υπάρχουν παραδοχές που έχουν γίνει λόγω της περίπλοκης διαδικασίας διάσπασης ενός μεγάλου διακένου αέρα, οι προβλέψεις των μοντέλων προόδου του λήντερ είναι αρκετά ακριβείς στις περισσότερες περιπτώσεις. Τέλος, είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι οι προβλέψεις για την τάση και το χρόνο διάσπασης διαφέρουν μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων προόδου του λήντερ.

Στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του λήντερ της CIGRE [11], το οποίο είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο και βάσει της ανάλυσης στην αναφορά [1] προτείνεται για γενική χρήση σε προσομοιώσεις, καθώς λαμβάνει υπ' όψιν πιο σωστά την εξάρτηση της ταχύτητας του λήντερ από την υπέρταση σε σχέση με άλλα μοντέλα.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 2: Περιπτώσεις και παράμετροι προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι περιπτώσεις και οι παράμετροι προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθούν στη διερεύνηση της επίδρασης της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης τάσης στη διάσπαση μονωτήρων μεγάλου μήκους μέσω προσομοιώσεων με μοντέλο προόδου του λήντερ. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν οι υπό διερεύνηση κυματομορφές και οι αντίστοιχοι μονωτήρες.

2.1 Κυματομορφές

2.1.1 Διπλεκθετική κυματομορφή

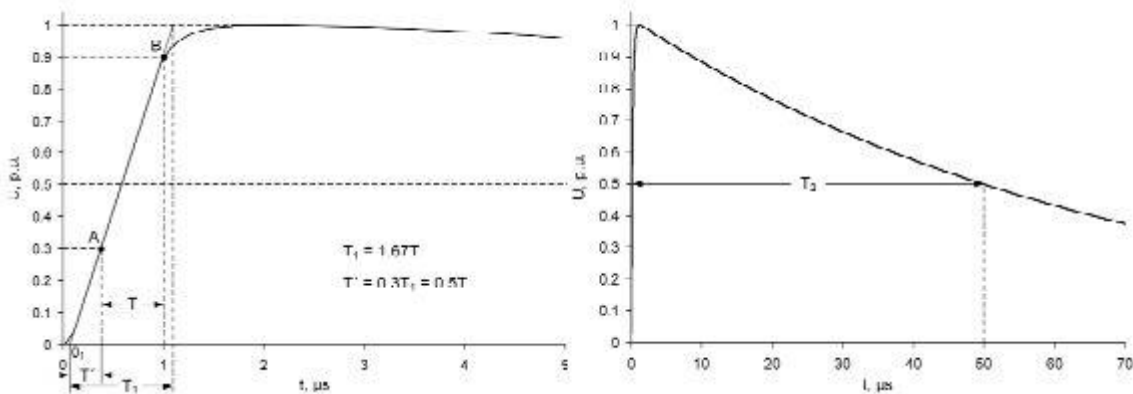
Η κρούση (impulse) αναφέρεται σε οποιονδήποτε εκούσιο μη περιοδικό μεταβατικό παλμό τάσης ή ρεύματος, ο οποίος συνήθως αυξάνει ταχύτητα προς ένα ακρότατο επίπεδο και στη συνέχεια μειώνεται με πιο αργό ρυθμό προς το μηδέν. Οι κρουστικές υψηλές τάσεις που παράγονται σε εργαστήρια υψηλών τάσεων (impulse voltages) χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη χρονική διάρκειά τους και την προέλευσή τους. Οι εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (lightning impulse voltages, LI) έχουν μικρότερη διάρκεια μετώπου, λιγότερη από 20 μs , και προσομοιώνουν τις υψηλές τάσεις που προκαλούνται από εξωτερικές πηγές, όπως είναι οι κεραυνοί. Αντίστοιχα, οι εσωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (switching impulse voltages, SI) έχουν μεγαλύτερη διάρκεια μετώπου, πάνω από 20 μs , και συνήθως αναπαριστούν πηγές υψηλών τάσεων εντός των συστημάτων διανομής ή μεταφοράς ενέργειας. Τέτοιες πηγές ενδέχεται να είναι χειρισμοί στο σύστημα (άνοιγμα ή κλείσιμο διακοπών ισχύος).

Οι εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις χαρακτηρίζονται από το εύρος ή την τάση κορυφής U_p , τη διάρκεια μετώπου T_1 και τη διάρκεια ημίσεως εύρους T_2 . Συχνά, είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια η τιμή της τάσης κορυφής και η διάρκεια του μετώπου μιας εξωτερικής κρουστικής τάσης που παράγεται εργαστηριακά. Οι αντιδράσεις των παράσιτων αυτεπαγωγών και χωρητικότητων στα στοιχεία της διάταξης παραγωγής της τάσης ή ακόμη στα στοιχεία του συστήματος μέτρησης της τάσης γίνονται σημαντικές λόγω του μεγάλου ρυθμού μεταβολής της τάσης κατά τη διάρκεια μετώπου και επομένως επηρεάζουν την κυματομορφή της τάσης διότι εμπεριέχει υψηλές συχνότητες. Αυτό αφορά και την παραγωγή και τη μέτρηση των τάσεων. Οπότε, η διάρκεια μετώπου μιας εξωτερικής κρουστικής τάσης είναι

μια συμβατική παράμετρος, η οποία ορίζεται ως $T_1 = 1.67T$, όπου T το διάστημα μεταξύ των χρονικών στιγμών που αντιστοιχούν στο 30% και στο 90% της τάσης κορυφής.

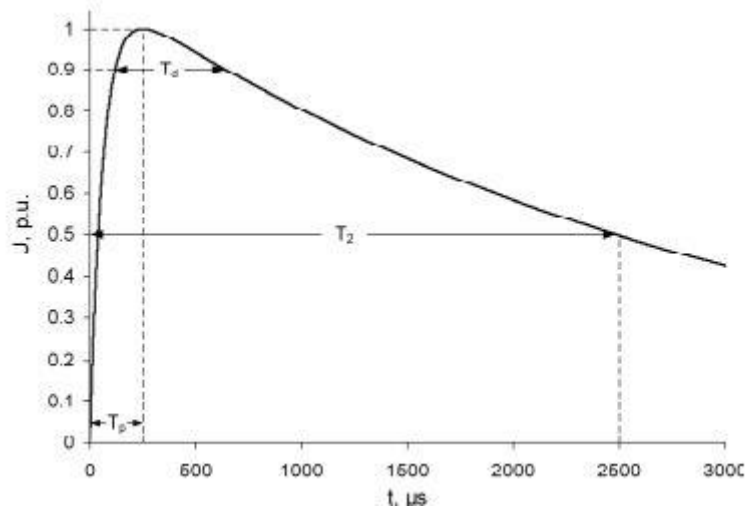
Για τους ίδιους λόγους, ως συμβατική αρχή των χρόνων θεωρείται η χρονική στιγμή που προηγείται κατά $0.3T$ αυτής που αντιστοιχεί στο 30% της τιμής της τάσης κορυφής. Αντίστοιχα, η διάρκεια ημίσεως εύρους μιας LI είναι μία συμβατική παράμετρος, η οποία ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από την συμβατική αρχή των χρόνων μέχρι τη χρονική στιγμή που η τάση έχει μειωθεί στο 50% της τιμής της τάσης κορυφής (μετά το μέγιστο). Οι παραπάνω ορισμοί φαίνονται στο Σχήμα 2.1.

Για εργαστηριακές δοκιμές που αναπαράγουν την έκθεση εξοπλισμού σε καταπονήσεις από εξωτερικές υπερτάσεις, πρέπει να χρησιμοποιείται η «κανονική εξωτερική κρουστική τάση» (Standard LI) με κυματομορφή 1.2/50 μs . Μια εξωτερική κρουστική τάση καταπόνησης θεωρείται «κανονική», δηλαδή αντιπροσωπευτική των εξωτερικών υπερτάσεων, αν οι καταγεγραμμένες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων της δεν διαφέρουν από τις τυπικές τιμές περισσότερο από $\pm 30\%$ για τη διάρκεια μετώπου, $\pm 20\%$ για τη διάρκεια ημίσεως εύρους και $\pm 3\%$ για την τάση κορυφής (εφόσον είναι συγκεκριμένη).



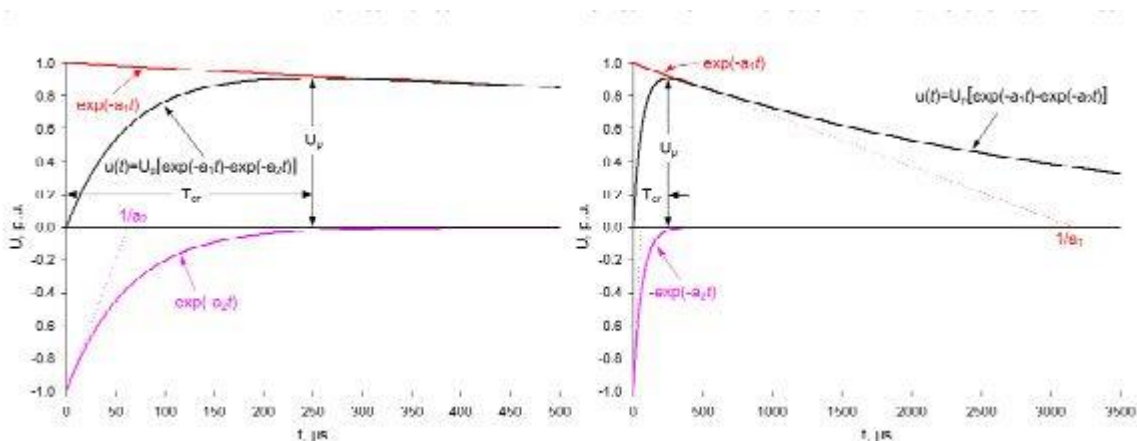
Σχήμα 2.1 Εξωτερική κρουστική υψηλή τάση (LI), χαρακτηριστικές παράμετροι [15].

Οι εσωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις χαρακτηρίζονται από το εύρος ή την τάση κορυφής U_p , τη διάρκεια μετώπου T_p και τη διάρκεια ημίσεως εύρους T_2 (Σχήμα 2.2). Η διάρκεια μετώπου ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από την αρχή της κυματομορφής μέχρι το σημείο με τη μέγιστη τιμή της τάσης, ενώ η διάρκεια ημίσεως εύρους ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από την αρχή του παλμού μέχρι τη στιγμή που η τάση έχει μειωθεί στο 50% της τιμής της τάσης κορυφής. Μια ακόμη χαρακτηριστική παράμετρος αποτελεί ο χρόνος «υπέρ του 90%» T_d , ο οποίος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η κρουστική τάση υπερβαίνει το 90% της τιμής της τάσης κορυφής.



Σχήμα 2.2 Εσωτερική κρουστική υψηλή τάση (LI), χαρακτηριστικές παράμετροι [15].

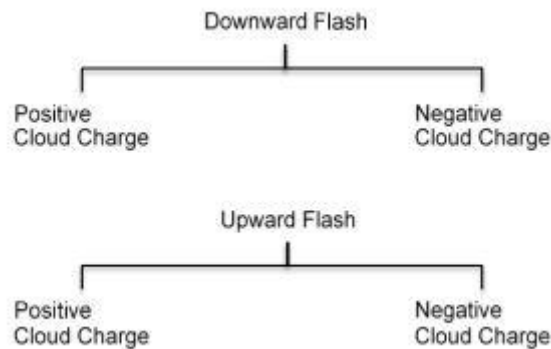
Η χαρακτηριστική κυματομορφή των κρουστικών υψηλών τάσεων, με τη ταχύτατη αύξηση προς ένα μέγιστο και την έπειτα βραδύτερη μείωση προς το μηδέν, μπορεί εύκολα να δημιουργηθεί μέσω της διαφοράς δύο φθίνουσων εκθετικών συναρτήσεων (Σχήμα 2.3). Επομένως, αυτού του είδους οι υψηλές κρουστικές τάσεις μπορούν να παραχθούν μέσω κυκλωμάτων που εκφορτίζουν πυκνωτές μέσω αντιστάσεων, οι κατάλληλοι συνδυασμοί στοιχείων δημιουργούν την επιθυμητή μορφή τάσης. Τέτοια κυκλώματα αποτελούν οι μονοβάθμιες ή πολυβάθμιες γεννήτριες κρουστικών υψηλών τάσεων. Οι κρουστικές υψηλές τάσεις παράγονται με τη χρήση κυκλωμάτων φόρτισης και εκφόρτισης πυκνωτών μέσω αντιστάσεων.



Σχήμα 2.3 Παραγωγή κρουστικών υψηλών τάσεων, U_p : τάση κορυφής, T_{cr} : διάρκεια μετώπου, $a_2 \gg a_1$ [15].

2.1.2 Κυματομορφή CIGRE

Οι κεραυνοί κατηγοριοποιούνται (Σχήμα 2.4) ανάλογα με την πολικότητα του φορτίου του σύννεφου και την κατεύθυνση διάδοσης των εκκενώσεων. Έτσι, υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες κεραυνού προς τη γη, όπου ο αναπτυσσόμενος λήντερ ακολουθείται από ένα κρουστικό ρεύμα επιστροφής: Κεραυνός με κατεύθυνση προς τα κάτω (θετική φόρτιση νέφους, αρνητική φόρτιση νέφους) και κεραυνός με κατεύθυνση προς τα πάνω (θετική φόρτιση νέφους, αρνητική φόρτιση νέφους).



Σχήμα 2.4 Κατηγορίες κεραυνών ανάλογα με την πολικότητα του φορτίου του νέφους [11].

Συνήθως, τουλάχιστον το 90% των κατερχόμενων κεραυνών έχουν αρνητική πολικότητα, με περίπου 45-55% να αποτελούνται μόνο από ένα πλήγμα. Οι κεραυνοί με πολλαπλά πλήγματα σπανίως ξεπερνούν τα 10 (λιγότερο από 5%), και κατά μέσο όρο έχουν τρία πλήγματα ανά κεραυνό, συνήθως σε διαστήματα μικρότερα των 50 ms μεταξύ των πληγμάτων. Οι κεραυνοί με κατεύθυνση προς τα πάνω (ανερχόμενοι) προκύπτουν κυρίως από πολύ ψηλές κατασκευές ή εγκαταστάσεις σε κορυφές βουνών. Η πλειονότητα των γραμμών μεταφοράς ενέργειας, οι μονώσεις των οποίων θα μελετηθούν σε αυτή την εργασία) είναι μέτριου ύψους (συνήθως λιγότερο από 60-100 μέτρα) και δεν εκτίθενται σε ανερχόμενους κεραυνούς. Οι θετικοί κεραυνοί εμφανίζονται σε διάφορες περιοχές ανάλογα με τις κλιματικές και εποχιακές συνθήκες, αλλά συνήθως αναφέρονται σε ποσοστό μικρότερο από το 10% των συνολικών κεραυνών. Γι' αυτό συνήθως οι αρνητικοί κατερχόμενοι κεραυνοί είναι αυτοί που μελετώνται συνήθως.

Στις ακριβείς υπολογιστικές αναλύσεις της κεραυνικής συμπεριφοράς εξοπλισμού συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αναγκαίο να προσομοιωθεί σωστά το μέτωπο στην αναπαράσταση του ρεύματος του κεραυνού. Η θεμελιώδης απαίτηση σε μια τέτοια προσομοίωση είναι να παρέχει:

- τη σωστή μέγιστη τιμή του ρεύματος
- την υψηλότερη κλίση κοντά στην κορυφαία τιμή του ρεύματος

- για τα πρώτα πλήγματα, τη σωστή μέση κλίση, η οποία μπορεί να εκφραστεί μέσω του χρόνου μετώπου που αντιστοιχεί στις τιμές 30% και 90% του μέγιστου ρεύματος.

Αυτός ο χρόνος μετώπου πρέπει να είναι μεγαλύτερος από την τιμή κορυφής του ρεύματος διαιρεμένη με τη μέγιστη κλίση, έχοντας ως αποτέλεσμα το κοίλο σχήμα στο μέτωπο. Για τα επόμενα πλήγματα, που ακολουθούν το πρώτο, αυτή η παράμετρος μπορεί να αγνοηθεί. Πολλές μαθηματικές εκφράσεις είναι κατάλληλες για να εκπληρώσουν αυτές τις απαιτήσεις. Αυτή που δίνεται από το CIGRE WG 33.01 [11] θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Η ατέλειά της είναι ότι το μέτωπο του ρεύματος και η ουρά του ρεύματος δεν περιγράφονται από μια μόνο έκφραση, αλλά διαχωρίζονται σε δύο μέρη, ένα που περιγράφει το μέτωπο έως το 90% του ρεύματος και το άλλο, το εύρος (κορυφή) του ρεύματος και την ουρά.

Η βασική υπόθεση είναι ότι η μορφή του ρεύματος φτάνει την στιγμή της μέγιστης κλίσης (90% του ρεύματος) σε έναν χρόνο T_n που εξαρτάται από έναν εκθέτη n .

Οι απαιτήσεις για την ουρά του ρεύματος είναι:

- να έχει τη μέγιστη κλίση στην αρχή της, παρέχοντας έτσι μία σταθερή μετάβαση από το ένα μέρος στο άλλο (τα δύο μέρη που περιγράφονται από διαφορετικές εξισώσεις)
- να φτάσει την σωστή μέγιστη τιμή του ρεύματος
- να περιγράψει την ουρά του ρεύματος.

Η κυματομορφή της CIGRE [11] όπως λέγεται θα χρησιμοποιηθεί στη διερεύνηση της εργασίας αυτής παρά το γεγονός ότι είναι πηγή ρεύματος, ενώ η διερεύνηση απαιτεί κυματομορφή τάσης. Αυτό γιατί αν πλήξει ένας κεραυνός έναν αγωγό φάσης μίας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας η μορφή της εμφανιζόμενης τάσης που καταπονεί τις μονώσεις είναι ίδια με τη μορφή του ρεύματος του κεραυνού. Δεν συμβαίνει το ίδιο σε πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα ή τον αγωγό προστασίας γιατί συμβαίνουν ανακλάσεις σε σημεία ασυνέχειας των κρουστικών αντιστάσεων (παράδειγμα το σύστημα γείωσης των πυλώνων).

2.1.3 Κυματομορφή με δύο κορυφές

Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην αναφορά [16] για τη σύνθεση τυπικών κυμάτων ρεύματος κεραυνών περιλαμβάνει το άθροισμα m συναρτήσεων τύπου Heidler χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.1) και (2.2), όπου το I_{0k} ελέγχει το πλάτος, το τ_{1k} είναι η σταθερά χρόνου μετώπου, το τ_{2k} είναι η σταθερά χρόνου απόσβεσης, το η_k είναι ο παράγοντας διόρθωσης πλάτους και το n_k είναι ο εκθέτης που ελέγχει την κλίση κάθε κύματος ρεύματος k που εφαρμόζεται για να δημιουργήσει το $i(t)$.

$$i(t) = \sum_{k=1}^m (I_{0k}/\eta_k) \exp(-t/\tau_{2k}) \{(t/\tau_{1k})^{n_k} / [1 + (t/\tau_{1k})^{n_k}]\} \quad (2.1)$$

$$\eta_k = \exp[-(\tau_{1k}/\tau_{2k})(n_k t_{2k}/\tau_{1k})^{1/n_k}]. \quad (2.2)$$

Για να παραχθούν τα κύματα ρεύματος που προτείνονται εδώ, τα οποία αναφέρονται αποκλειστικά σε κατερχόμενες αρνητικές εκκενώσεις, η προσαρμογή κάθε παραμέτρου που αναφέρθηκε παραπάνω πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας ως αναφορά τα μέσα χαρακτηριστικά των ρεύματος του οχετού επιστροφής του κερανού όπως μετρήθηκε στον σταθμό Morro do Cachimbo και στο Mount San Salvatore.

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις παραμέτρους που επιτρέπουν τη σύνθεση διαφορετικών κυμάτων, λαμβάνοντας ως αναφορά τα μέσα χαρακτηριστικά των ρευμάτων του πρώτου πλήγματος που μετρήθηκαν στον σταθμό Morro do Cachimbo. Αυτά τα κύματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5(a) μαζί με τις παραγωγούς τους ως προς τον χρόνο.

Αντίστοιχα, ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει ένα σύνολο παραμέτρων που επιτρέπουν τη σύνθεση των κυμάτων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5(b). Αυτά τα κύματα αναπαράγουν τα μέσα χαρακτηριστικά των ρευμάτων πρώτου πλήγματος που μετρήθηκαν στο Mount San Salvatore.

Οι Πίνακες 2.1 και 2.2, καθώς και το Σχήμα 2.5, τα συνθετικά κύματα ονομάστηκαν με βάση τους σταθμούς όπου μετρήθηκαν. Οι συντομογραφίες MCS και MSS αναφέρονται στους σταθμούς Morro do Cachimbo και Mount San Salvatore αντίστοιχα. Το FST είναι το αρνητικό ρεύμα πρώτου πλήγματος, οι αριθμοί 1 και 3 αναφέρονται στα ρεύματα με μοναδική κορυφή, προσαρμοσμένα σύμφωνα με το I_{p2} και το I_{p1} αντίστοιχα, και το 2 αναφέρεται στα κύματα με διπλές κορυφές.

Η ποιότητα των συνθετικών καμπυλών μπορεί να εκτιμηθεί στον Πίνακα 2.3, που συγκρίνει τις παραμέτρους που εξήχθησαν από τα ρεύματα MCS FST#2 και MSS FST#2 με τις μέσες τιμές που προέκυψαν από τη λογαριθμική διανομή του αρνητικού ρεύματος πρώτου πλήγματος. Το Σχήμα 2.5 παρουσιάζει τα ρεύματα πρώτου πλήγματος σύμφωνα με τις παραμέτρους των Πινάκων 2.1 και 2.2.

Πίνακας 2.1 Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να συνθέσουν τα πρώτα αρνητικά κατερχόμενα ρεύματα που μετρήθηκαν από τον σταθμό Morro do Cachimbo [16].

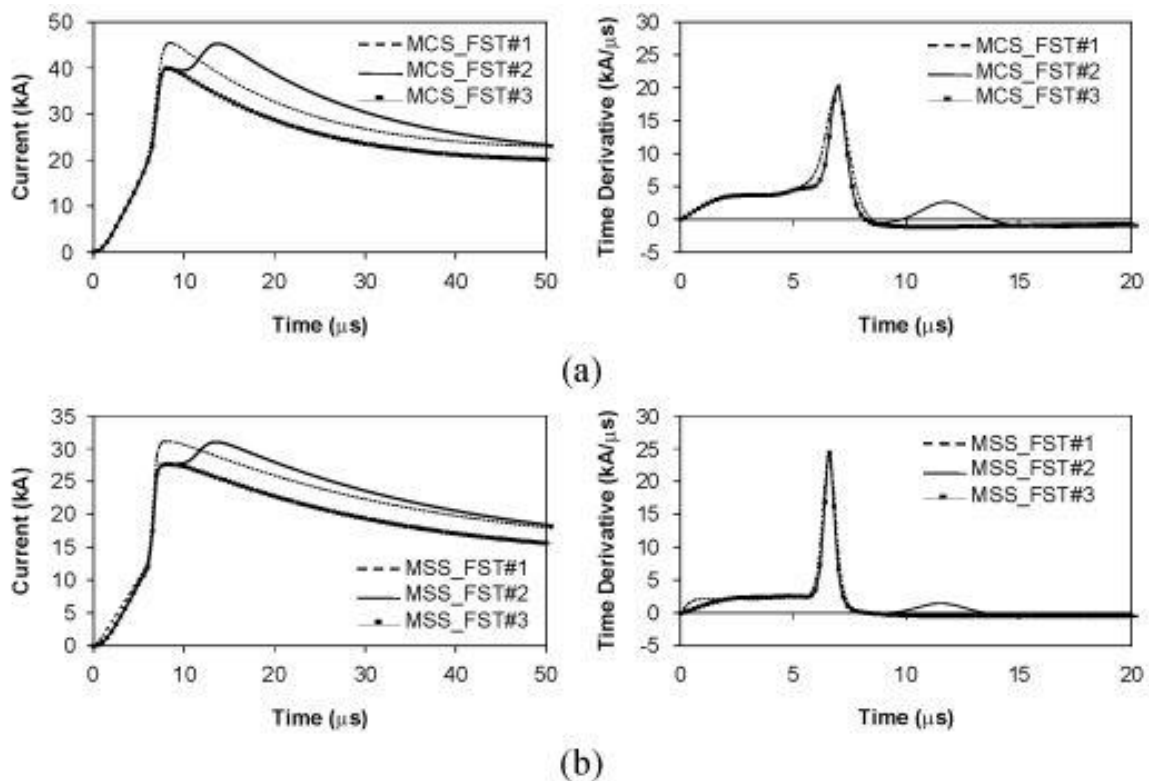
k	MCS FST#1				MCS FST#2			
	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	6	2	3	76	6	2	3	76
2	5	3	3.5	10	5	3	3.5	10
3	5	5	4.8	30	5	5	4.8	30
4	8	9	6	26	8	9	6	26
5	22	21	7	23.2	16.5	30	7	23.2
6	20	2	70	200	17	2	70	200
7	-	-	-	-	12	14	12	26

Πίνακας 2.2 Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να συνθέσουν τα πρώτα αρνητικά κατερχόμενα ρεύματα που μετρήθηκαν από τον σταθμό San Salvatore [16].

k	MSS FST#1				MSS FST#2			
	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	2.8	2	1.2	100	3	2	3	76
2	4.8	3	3	100	4.5	3	3.5	25
3	2.9	5	4.8	25	3	5	5.2	20
4	4.1	7	6	60	3.8	7	6	60
5	16.7	36	6.6	44	13.6	44	6.6	60
6	11	2	100	600	11	2	10	600
7	-	-	-	-	5.7	15	11.7	48.5

Πίνακας 2.3 Σύγκριση των παραμέτρων από τα πρώτα αρνητικά ρεύματα [16].

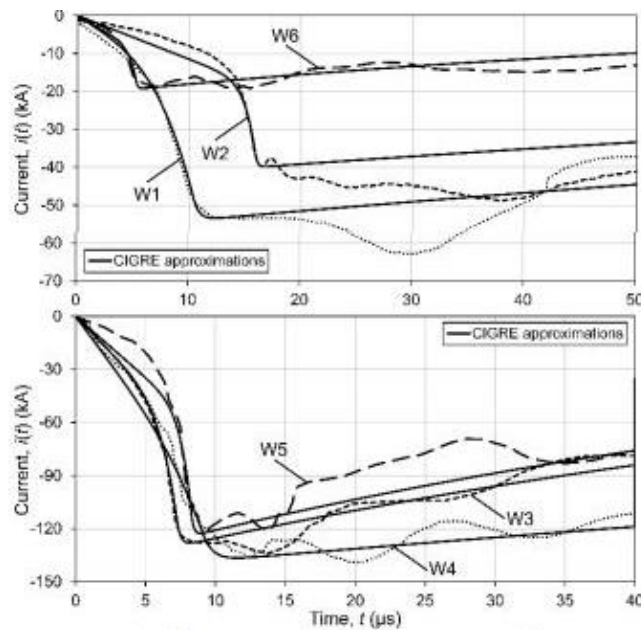
Station	Data	I_{p1} (kA)	I_{p2} (kA)	T10 (μ s)	T30 (μ s)	T50 (μ s)	S10 (kA/ μ s)	S30 (kA/ μ s)	di/dt_{max} (kA/ μ s)
Morro do Cachimbo	<i>Median Parameters [6]</i>	40.4	45.3	5.6	2.9	53.5	5.8	8.4	19.4
	<i>Curve MCS FST#2</i>	40.1	45.3	5.2	3.0	53.8	6.2	8.0	20.2
Mount San Salvatore	<i>Median Parameters [7]</i>	27.7	31.1	4.5	2.3	75.0	5.0	7.2	24.3
	<i>Curve MSS FST#2</i>	27.8	31.0	4.6	2.3	75.0	4.8	7.2	24.4



Σχήμα 2.5 Γραφική παράσταση των ρευμάτων πρώτου πλήγματος από τις παραμέτρους των Πινάκων 2.1 και 2.2. (a) Σταθμός Morro do Cachimbo (b) Σταθμός Mount San Salvatore [16].

2.1.4 Πραγματικές κυματομορφές

Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί αρκετά αρνητικά κύματα ρεύματος οχετού επιστροφής πρώτου κεραυνικού πλήγματος, τα οποία καταγράφηκαν μέσω άμεσων μετρήσεων του ρεύματος του κεραυνού σε εξοπλισμένους πύργους. Ένας μεγάλος αριθμός καταγεγραμμένων κυμάτων έχουν συλλεχθεί και ψηφιοποιηθεί στην αναφορά [17]. Έξι από αυτά επιλέχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους τους, ώστε να χρησιμοποιηθούν σε συστηματικές προσομοιώσεις των κυματικών παρεμβολών σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [17]. Αυτά θα χρησιμοποιηθούν και στην παρούσα εργασία. Τα επιλεγμένα καταγεγραμμένα κύματα ρεύματος απεικονίζονται στο Σχήμα 2.6 και οι παράμετροί τους δίνονται στον Πίνακα 2.4. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται επίσης και οι προσεγγίσεις των πραγματικών κυματομορφών με κυματομορφές της CIGRE, οι οποίες χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε προσομοιώσεις.



Σχήμα 2.6 Καταγεγραμμένα κύματα ρεύματος οχέτου επιστροφής πρώτου πλήγματος κεραυνού (ονομασίες W1-W6) και προσεγγίσεις με κυματομορφές CIGRE (συνεχείς γραμμές) [17].

Πίνακας 2.4 Παράμετροι των κυματομορφών των καταγεγραμμένων κυμάτων ρεύματος που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6 [17].

Waveform	Source	I_l (kA)	I_F (kA)	t_{d30} (μ s)	S_w (kA/ μ s)	t_h (μ s)
W1	Berger no. 6235, (1)	53.4	63.0	7.1	18.5	151.0
W2	Fig. 15 of [42] no. 6236, (2)	39.8	48.9	5.5	25.5	139.4
W3	(1)	128.2	134.2	5.3	55.0	52.5
W4	Narita et al. Fig. 5 of [43] (2)	136.5	139.0	9.1	21.8	120.6
W5	(3)	122.6	3.7	78.1	46.0	
W6	Takami & Okabe Fig. 5(a) of [44]	18.8	19.2	3.4	14.5	62.2

2.2. Πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της εργασίας

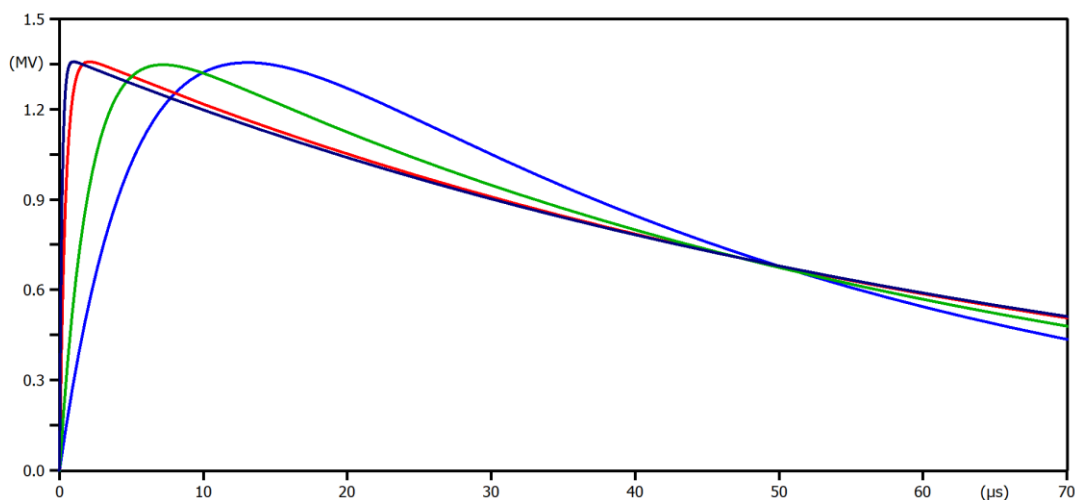
Για να επιτευχθούν οι στόχοι της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν διάφορες πηγές τάσης από τις παραπάνω κατηγορίες σε προσομοιώσεις κεραυνικής συμπεριφοράς μονωτήρων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (οι μονωτήρες αναφέρονται στην επόμενη ενότητα). Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα στοιχεία των διπλεκθετικών κυματομορφών και των κυματομορφών CIGRE.

Πίνακας 2.5 Στοιχεία των διπλεκθετικών κυματομορφών και κυματομορφών CIGRE που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της εργασίας.

Επίδραση μετώπου (Διπλεκθετική)	Επίδραση ουράς (Διπλεκθετική)	CIGRE
0.5/50 μs	1.2/5 μs	2.4/77.5 μs
1.2/50 μs	1.2/30 μs	3.67/77.5 μs
5/50 μs	1.2/50 μs	4.52/77.5 μs
10/50 μs	1.2/70 μs	6.01/77.5 μs
-	1.2/200 μs	8/77.5 μs

2.2.1 Επίδραση μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής

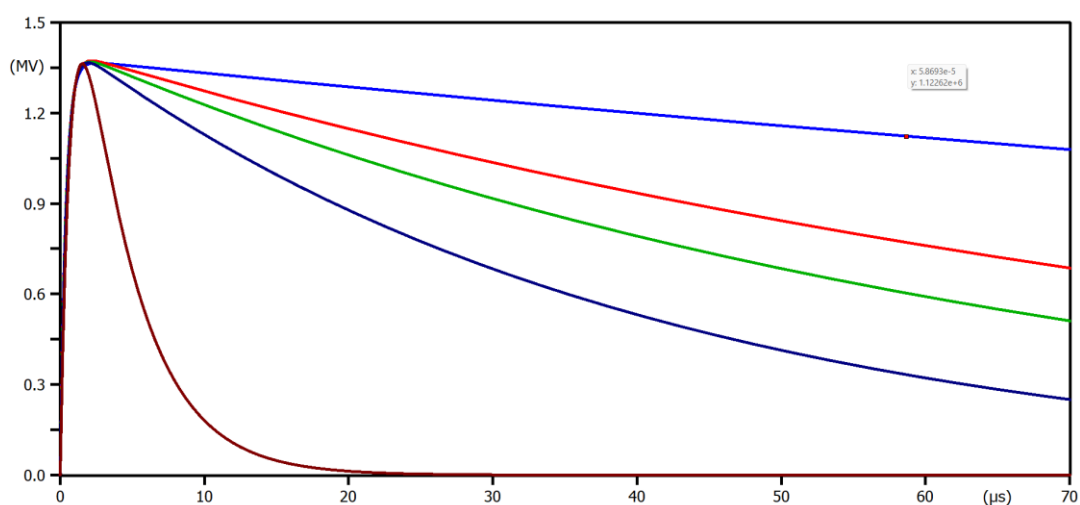
Το Σχήμα 2.7 απεικονίζει όλες τις κυματομορφές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης του μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους με το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE. Αντίστοιχη διερεύνηση με τη μέθοδο ολοκλήρωσης έχει γίνει στην αναφορά [18]. Φαίνεται ότι με τις κυματομορφές που επιλέχθηκαν η διάρκεια μετώπου μεταβάλλεται έντονα. Αυτό έχει επίδραση και στην ουρά και στην κλίση της με τις γρηγορότερες κυματομορφές (σε μέτωπο) να έχουν μικρότερη κλίση στην ουρά.



Σχήμα 2.7: Κυματομορφές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης του μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους. **0.5/50 μs** , **1.2/50 μs** , **5/50 μs** , **10/50 μs** . Οι ίδιες κυματομορφές χρησιμοποιήθηκαν και στη διερεύνηση της αναφοράς [18].

2.2.2 Επίδραση ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής

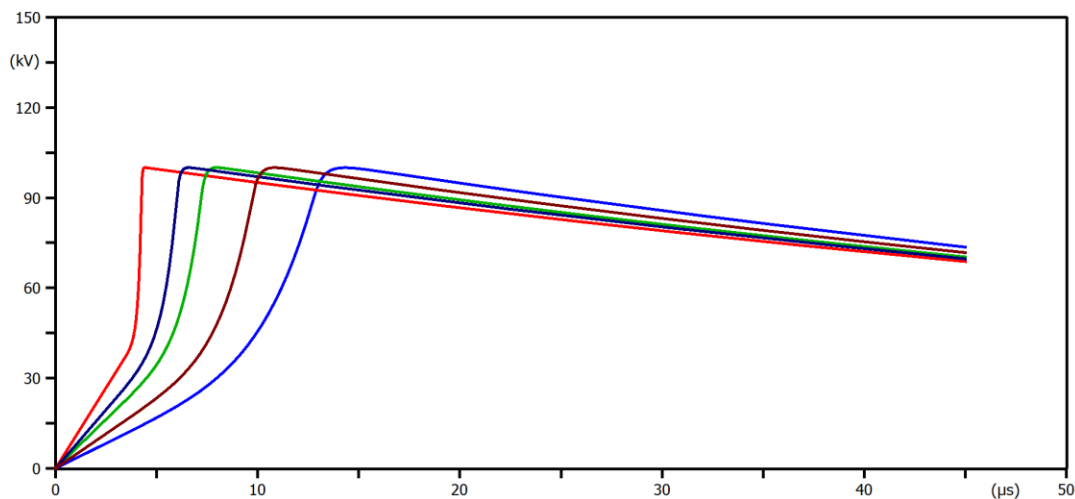
Το Σχήμα 2.8 απεικονίζει όλες τις κυματομορφές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης της ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους με το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE. Αντίστοιχη διερεύνηση με τη μέθοδο ολοκλήρωσης έχει γίνει στην αναφορά [18]. Φαίνεται ότι με τις κυματομορφές που επιλέχθηκαν η διάρκεια ημίσεως εύρους παρουσιάζει σημαντική μεταβολή. Το μέτωπο, όμως, παραμένει σταθερό σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό αναμένεται να έχει επίπτωση στα αποτελέσματα της εργασίας.



Σχήμα 2.8: Κυματομορφές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης της ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους. **1.2/5 μs**, **1.2/30 μs**, **1.2/50 μs**, **1.2/70 μs**, **1.2/200 μs**. Οι ίδιες κυματομορφές χρησιμοποιήθηκαν και στη διερεύνηση της αναφοράς [18].

2.2.3 Επίδραση κυματομορφής CIGRE

Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζονται οι κυματομορφές CIGRE που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της εργασίας αυτής. Αυτές αντιστοιχούν στις μέσες τιμές χρονικών παραμέτρων κεραυνικών ρευμάτων 5 kA, 30 kA, 50 kA, 100 kA και 200 kA σύμφωνα με τη CIGRE [11]. Οι ουρές των κυματομορφών μειώνονται σχεδόν παράλληλα η μία με την άλλη. Η μεταβολές στο μέτωπο και τη μέγιστη κλίση είναι έντονες.



Σχήμα 2.9: Κυματομορφές CIGRE που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης της ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους. **2.4/77.5 μs, 3.67/77.5 μs, 4.52/77.5 μs, 6.01/77.5 μs, 8/77.5 μs.** Οι ίδιες κυματομορφές χρησιμοποιήθηκαν και στη διερεύνηση της αναφοράς [18].

2.2.4 Επίδραση πραγματικών κυματομορφών

Εκτός των κυματομορφών που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον και οι πραγματικές κυματομορφές της Ενότητας 2.1.4 μαζί με τις προσεγγίσεις CIGRE που τους αντιστοιχούν. Αυτές φαίνονται στο Σχήμα 2.6.

2.3 Μονωτήρες

Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από υπαίθριες εγκαταστάσεις υψηλής και μέσης τάσης, όπου η βασική μόνωση των εγκαταστάσεων αυτών είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας λόγω διαθεσιμότητας και κόστους. Όμως, εκτός από τον ατμοσφαιρικό αέρα απαιτείται και η χρήση των μονωτήρων για να στηριχθούν ή αναρτηθούν τα στοιχεία υπό τάση. Δηλαδή, οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτρισμένων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα ή και μεταξύ τους. Οι μονωτήρες σε μια γραμμή μεταφοράς επιλέγονται με βάση την ηλεκτρική τους καταπόνηση, από το μηχανικό φορτίο που φέρουν και άλλα στοιχεία, όπως περιβαλλοντικές και θερμικές καταπονήσεις, συνθήκες ρύπανσης κτλ. Το μήκος των μονωτήρων αυξάνεται με την αύξηση της τάσης λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας οι μονωτήρες είναι συνήθως μεγαλύτεροι περίπου του 1 m και ονομάζονται μονωτήρες μεγάλου μήκους. Τέτοιοι μονωτήρες μπορούν να προσομοιωθούν με μοντέλα προόδου του λήντερ για να προβλεφθεί η κρουστική συμπεριφορά τους.

Στις περιπτώσεις της εργασίας αυτής, οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τέσσερις (Πίνακας 2.6). Στην πρώτη περίπτωση προσομοιώσεων μελετήθηκε μονωτήρας με μήκος 0.73 m, ο οποίος χρησιμοποιείται για εναέριες γραμμές μεταφοράς των 66 kV. Στη δεύτερη περίπτωση μετρήσεων μονωτήρας με μήκος 1.86 μέτρα, ο οποίος χρησιμοποιείται για εναέριες γραμμές μεταφοράς των 150 kV. Στην τρίτη περίπτωση προσομοιώσεων μονωτήρας, με μήκος 3.62 μέτρα, που χρησιμοποιείται για εναέριες γραμμές μεταφοράς των 400 kV. Στην τέταρτη και τελευταία περίπτωση μονωτήρας με μήκος 4.8 μέτρα, ο οποίος χρησιμοποιείται για τις γραμμές μεταφοράς των 735 kV. Τα βασικά επίπεδα μόνωσης των γραμμών μεταφοράς αυτών και επομένως των μονωτήρων τους είναι 325 kV, 750 kV, 1425 kV και 1950 kV αντίστοιχα για τις γραμμές μεταφοράς 66 kV, 150 kV, 400 kV και 735 kV.

Οι μονωτήρες που μελετώνται στη εργασία αυτή είναι κεραμικοί αλυσοειδείς μονωτήρες. Επομένως οι παράμετροι του μοντέλου προόδου του λήντερ της CIGRE που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν σε αλυσίδες κεραμικών μονωτήρων. Η πολικότητα που αντιστοιχεί στις παραμέτρους είναι αρνητική.

Πίνακας 2.6 Πίνακας με το μήκος του μονωτήρα και το βασικό επίπεδο μόνωσης του ανάλογα με την τάση της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις.

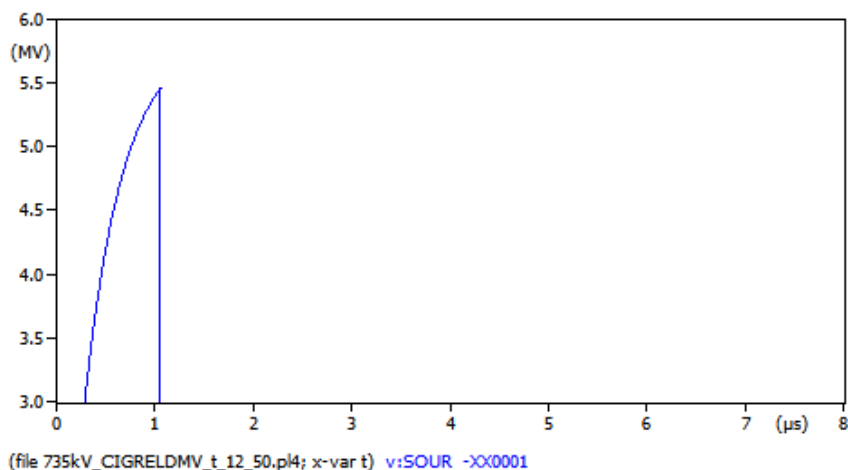
Τάση γραμμής	66 kV	150 kV	400 kV	735 kV
Μήκος	0.73 m	1.86 m	3.62 m	4.8 m
BIL	325 kV	750 kV	1425 kV	1950 kV

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι στα επόμενα κεφάλαια, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με αντίστοιχο τρόπο με την αναφορά [18], η οποία αφορά αντίστοιχη διερεύνηση με την παρούσα διπλωματική εργασία αλλά χρησιμοποιεί τη μέθοδο ολοκλήρωσης για την πρόβλεψη της ηλεκτρικής διάσπασης των μονωτήρων.

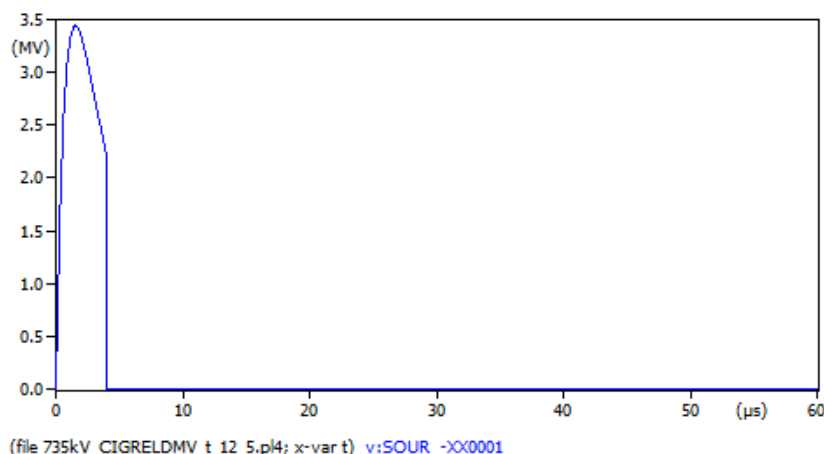
ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα διπλεκθετικών κυματομορφών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής διάσπασης των μονωτήρων που αναφέρονται στην Ενότητα 2.3 με το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τις διπλεκθετικές κυματομορφές που αναφέρονται στον Πίνακα 2.5. Γενικά, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.1 και 3.2, οι μορφές που έχουν οι κυματομορφές είναι δύο όταν γίνεται διάσπαση του μονωτήρα. Η πρώτη μορφή είναι η διάσπαση που γίνεται στο μέτωπο, δηλαδή πριν την μέγιστη τιμή της τάσης, ενώ στη δεύτερη μορφή η διάσπαση γίνεται στην ουρά, δηλαδή μετά την μέγιστη τιμή της τάσης.



Σχήμα 3.1 Προσομοίωση μονωτήρα 735 kV με διάσπαση που συμβαίνει στο μέτωπο.



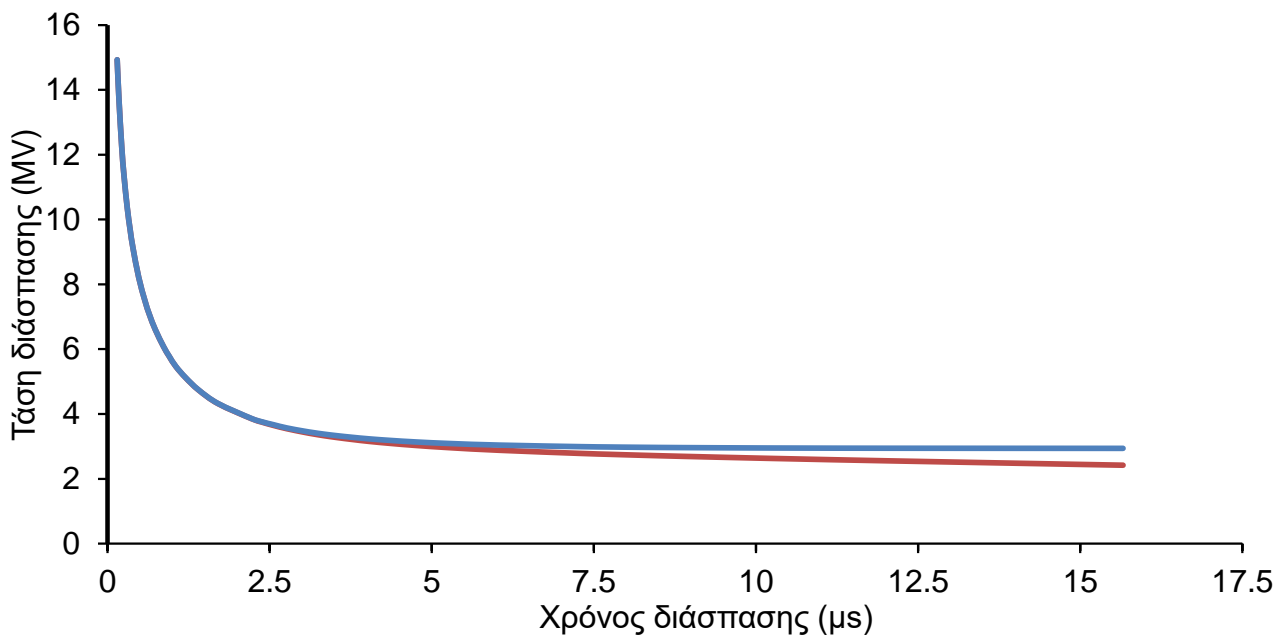
Σχήμα 3.2 Προσομοίωση μονωτήρα 735 kV με διάσπαση που συμβαίνει στην ουρά.

Από τις κυματομορφές διάσπασης που αναφέρονται παραπάνω, διακρίνονται τα εξής στοιχεία: η στιγμιαία τάση διάσπασης (τη στιγμή της κατάρρευσης στο μηδέν), η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στο διάκενο πριν τη διάσπαση και ο χρόνος διάσπασης, ο οποίος αντιστοιχεί στη στιγμιαία τάση διάσπασης. Επομένως, με βάση τα στοιχεία αυτά που προσδιορίζονται από τις προσομοιώσεις μπορεί να δημιουργηθεί μια καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης για τον κάθε ορισμό (με τη μέγιστη τάση διάσπασης και με τη στιγμιαία τάση διάσπασης). Συνεπώς, προκύπτουν ως αποτέλεσμα τα εξής γραφήματα: το πρώτο γράφημα είναι η καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης με μέγιστη τιμή τάσης και το δεύτερο γράφημα είναι η καμπύλη τάσης-χρόνου με στιγμιαία τιμή τάσης. Από το Σχήμα 3.3 όπου απεικονίζονται και οι δύο καμπύλες είναι φανερό ότι είναι όμοιες στους αρχικούς χρόνους διάσπασης (αριστερό τμήμα της καμπύλης), διότι προφανώς η στιγμιαία τάση είναι ίση με τη μέγιστη όταν η διάσπαση συμβαίνει πριν το μέγιστο (Σχήμα 3.1). Όμως, στις διασπάσεις στην ουρά δεν συμβαίνει το ίδιο διότι η μέγιστη τάση είναι πάντα μεγαλύτερη από τη στιγμιαία (Σχήμα 3.2). Σημειώνεται ότι όταν οι καμπύλες χρησιμοποιούνται για τον συντονισμό μονώσεων, η καμπύλη του εξοπλισμού πρέπει να είναι αρκετά πάνω από την καμπύλη του διακένου που τον προστατεύει, δηλαδή στον ίδιο χρόνο ο εξοπλισμός να έχει μεγαλύτερη τάση διάσπασης ώστε να προκαλείται πάντα πρώτα η διάσπαση του διακένου λαμβάνοντας υπόψη και πιθανούς παράγοντες αβεβαιότητας όπως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Κάθε καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης αυτής της εργασίας αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό σημείων, τα οποία δεν εμφανίζονται σκόπιμα στα αντίστοιχα διαγράμματα. Αντί για αυτά απεικονίζεται μόνο η γραμμή που τα προσεγγίζει. Κάθε σημείο από αυτά αποτελεί το αποτέλεσμα μιας προσομοίωσης. Άρα, για την κατασκευή κάθε καμπύλης τάσης-χρόνου διάσπασης, απαιτείται η εκτέλεση ενός μεγάλου αριθμού επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων με αυξανόμενη ή μειούμενη μέγιστη τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο μοντέλο προόδου του λήντερ. Το κριτήριο για την επιλογή της ελάχιστης τιμής της τάσης είναι επιπλέον μείωσή της να μην προκαλεί διάσπαση της μόνωσης (αντοχή μονωτήρα) και για τη μέγιστη τιμή της τάσης είναι να είναι κατ'ελάχιστον τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την ελάχιστη, διότι στις προσομοιώσεις, σε αντίθεση με ένα πραγματικό εργαστήριο υψηλών τάσεων δεν υπάρχει άνω όριο της τάσης που μπορεί να εφαρμοστεί. Στο πραγματικό εργαστήριο το άνω όριο τίθεται από τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας κρουστικών υψηλών τάσεων που χρησιμοποιείται.

Για να γίνει αξιόπιστη σύγκριση και να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των διαφορετικών κυματομορφών και μονωτήρων που μελετήθηκαν και περιγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, εφαρμόστηκε η κανονικοποίηση των καμπυλών που προέκυψαν. Οι τιμές της τάσης διάσπασης διαιρέθηκαν με την ελάχιστη τάση διάσπασης (στα δεξιά της καμπύλης, αντιστοιχεί σε πιθανότητα 50% της τάσης διάσπασης, CFO, για τον ορισμό με τη μέγιστη τάση

διάσπασης). Συνεπώς, όλες οι καμπύλες τώρα καταλήγουν σε μια τιμή ίση με 1 και έτσι μπορούν να συγκριθούν άμεσα.



Σχήμα 3.3 Τυπικές καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης με εφαρμοζόμενη διπλεκθετική κυματομορφή και με τους δύο ορισμούς (μονωτήρας 735 kV, κυματομορφή 1.2/50 μs). **Μπλε καμπύλη:** ορισμός μέγιστης τάσης, **Κόκκινη καμπύλη:** ορισμός στιγμιαίας τάσης

3.1 Επίδραση μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής

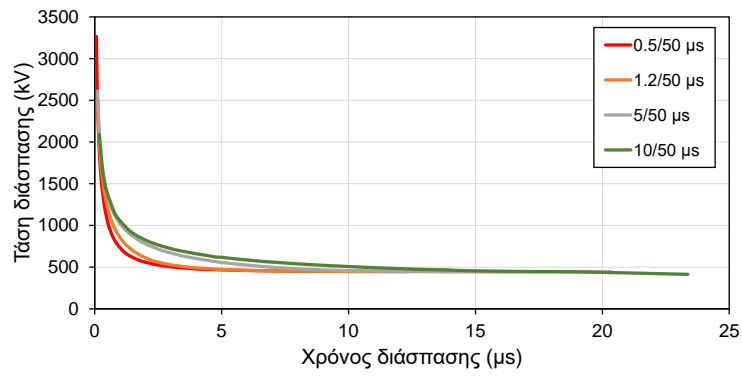
Με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP προσομοιώθηκαν 4 διαφορετικές κυματομορφές με διαφορετικούς χρόνους της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2.5). Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη τάση για όλους τους εξεταζόμενους μονωτήρες (66 kV, 150 kV, 400 kV, 735 kV). Όσο αυξάνεται η εφαρμοζόμενη τάση στον μονωτήρα, τόσο αυξάνεται και η τάση διάσπασης σε όλες τις περιπτώσεις. Όσον αφορά τον χρόνο διάσπασης, στα 66 kV, στα 400 kV και στα 735 kV η κυματομορφή 10/50 μs έχει τον μεγαλύτερο χρόνο διάσπασης, ενώ στα 150kV η κυματομορφή 1.2/50 μs έχει τον μεγαλύτερο χρόνο διάσπασης, στα δεξιά των καμπυλών. Βέβαια αυτό σχετίζεται και με την επιλογή των ελάχιστων τιμών τάσης που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση στις προσομοιώσεις, καθώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι ίδια αποτελέσματα για κάθε επανάληψη της προσομοίωσης με την ίδια τάση, καθώς τα μοντέλα προόδου του λήντερ δεν λαμβάνουν υπόψη τη στοχαστικότητα (στατιστική διακύμανση) του φαινομένου της ηλεκτρικής διάσπασης. Στις προσομοιώσεις μικρή μεταβολή στην

ελάχιστη τάση που εφαρμόζεται έχει σημαντικές επιδράσεις στον μέγιστο χρόνο διάσπασης που καταγράφεται (δεξί τμήμα καμπύλης).

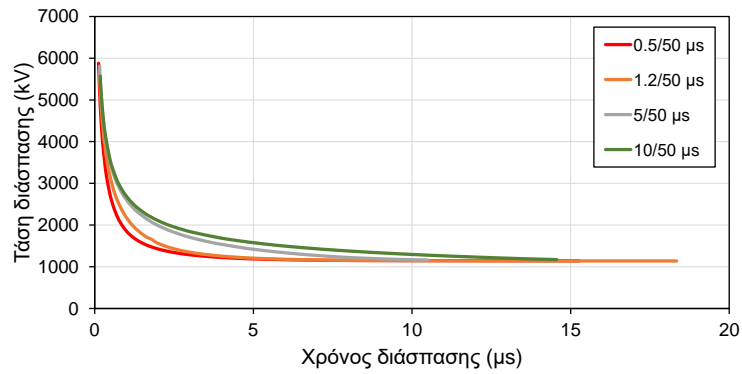
Από το Σχήμα 3.4 φαίνεται ότι οι μικρότερες τιμές του χρόνου μετώπου παρουσιάζουν έντονη κυρτότητα στην καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης, εκδηλώνοντας πιο απότομη άνοδο προς τους μικρότερους χρόνους και μεγαλύτερες τάσεις διάσπασης. Επιπλέον, οι καμπύλες σύγκλιναν προς τις πολύ μικρές τιμές του χρόνου διάσπασης, δηλαδή προς τις υψηλές τάσεις (συνθήκες υπερτάσης), αλλά και προς το άλλο άκρο, δηλαδή προς τις χαμηλές τιμές της τάσης διάσπασης που αντιστοιχούν σε μεγάλους χρόνους και σε χαμηλές πιθανότητες διάσπασης. Η επίδραση της διάρκειας του μετώπου της διπλεκεθτικής κυματομορφής είναι εμφανής στους ενδιάμεσους χρόνους. Οι πιο αργές κυματομορφές (μεγαλύτερα μέτωπα), απαιτούν υψηλότερη τάση για να διασπαστούν την ίδια στιγμή.

Αναλύοντας τα γραφήματα για τη στιγμιαία τάση διάσπασης (Σχήμα 3.5), εξάγονται συγκρίσιμα συμπεράσματα με το Σχήμα 3.4. Ωστόσο, μια βασική διαφοροποίηση είναι ότι οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης δεν συγκλίνουν στα δεξιά των καμπυλών (μεγάλοι χρόνοι διάσπασης). Συγκεκριμένα, οι πιο αργές κυματομορφές, δηλαδή τα μεγαλύτερα μέτωπα, συσχετίζονται με υψηλότερες τιμές της τάσης διάσπασης. Αυτό ερμηνεύεται από το Σχήμα 2.7, όπου παρατηρούνται για χρόνους έως τα 50 μ s μεγαλύτερες στιγμιαίες τιμές τάσης για τις πιο αργές κυματομορφές.

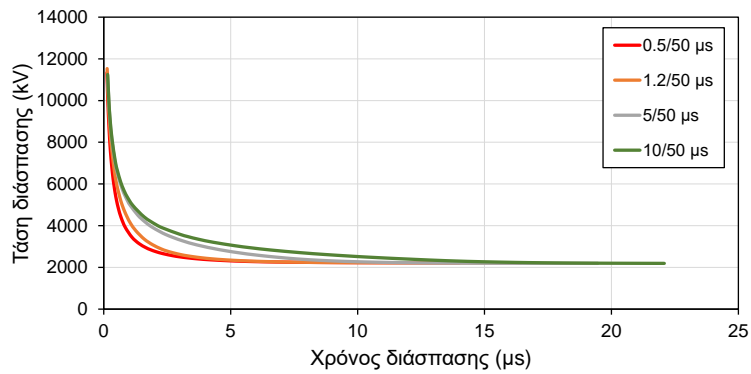
Με τη βοήθεια των κανονικοποιημένων καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης των Σχημάτων 3.6 και 3.7, τα οποία αφορούν και τους δύο ορισμούς και όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, επιβεβαιώνονται εύκολα τα προηγούμενα συμπεράσματα. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης ανά κυματομορφή, επιτρέποντας τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για διαφορετικούς μονωτήρες. Παρατηρείται ότι η γενική μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό υποδηλώνει ότι, με τη μέθοδο προόδου του λήντερ, η μεταβολή της τάσης διάσπασης (κανονικοποιημένη) είναι ποιοτικά παρόμοια για όλα τα μήκη των μονωτήρων, όταν η καταπόνηση είναι συγκεκριμένη (ίδια κυματομορφή εφαρμοζόμενης τάσης). Οι διαφορές που παρατηρούνται πιθανόν οφείλονται στην επιλογή της ελάχιστης τάσης διάσπασης (όπου τερματίστηκαν οι προσομοιώσεις).



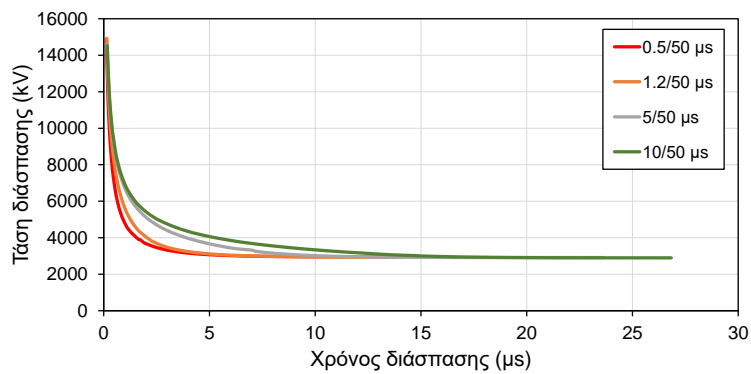
Α) 66 kV



Β) 150 kV

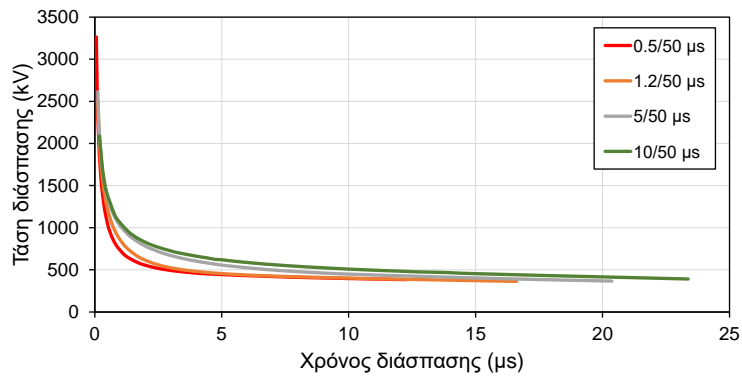


Γ) 400 kV

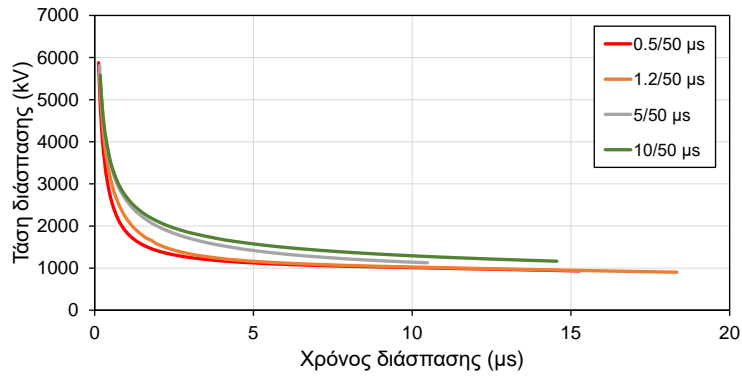


Δ) 735 kV

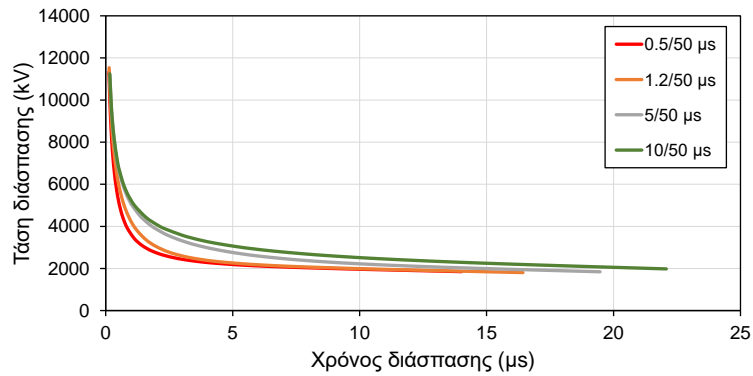
Σχήμα 3.4: Επίδραση της διάρκειας μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων. Ορισμός με τη μέγιστη τάση.



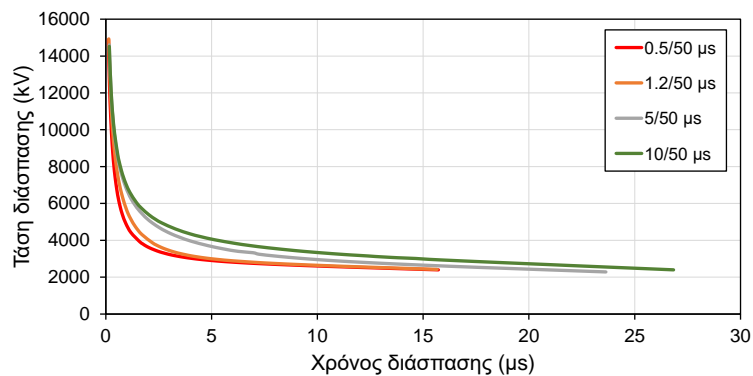
A) 66 kV



B) 150 kV



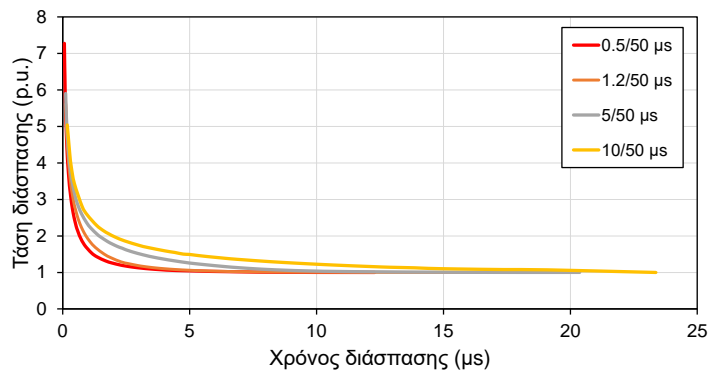
Γ) 400 kV



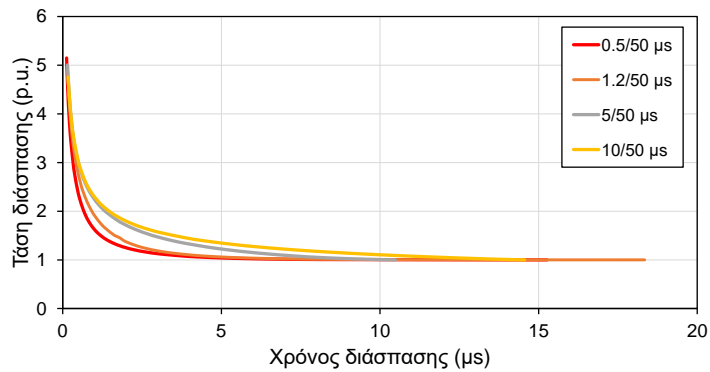
Δ) 735 kV

Σχήμα 3.5: Επίδραση της διάρκειας μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων. Ορισμός με τη στιγμιαία τάση.

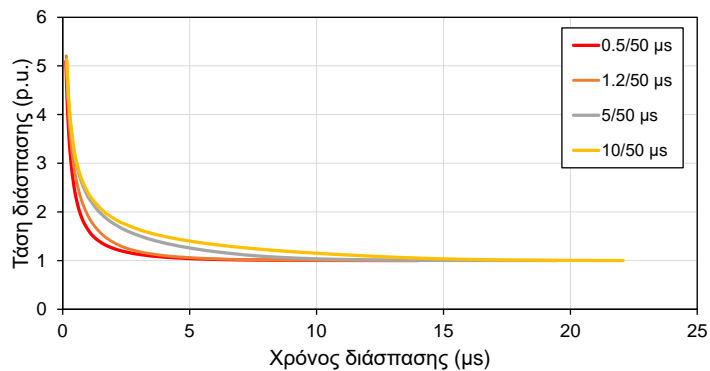
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΟΔΟΥ ΤΟΥ ΛΗΝΤΕΡ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ



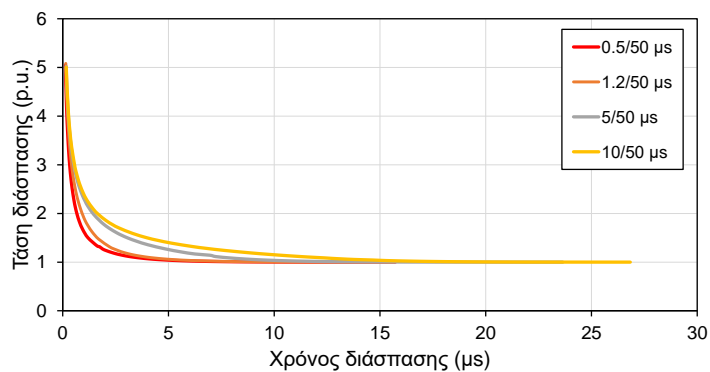
A) 66 kV



B) 150 kV

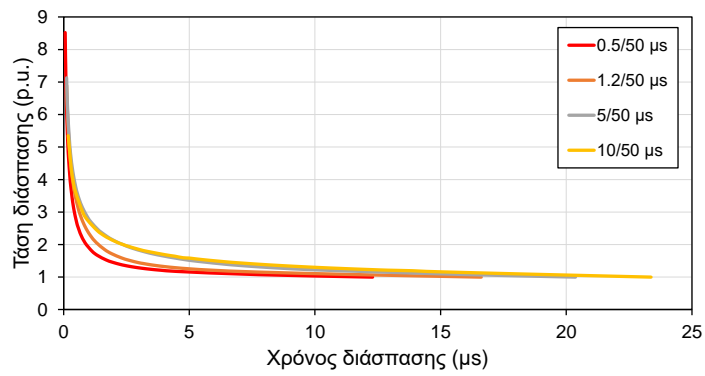


Γ) 400 kV

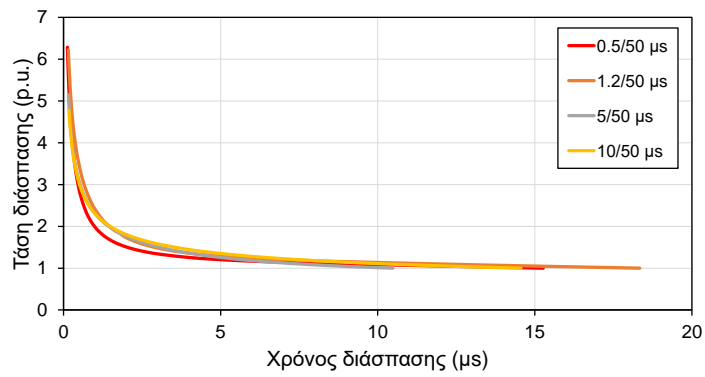


Δ) 735 kV

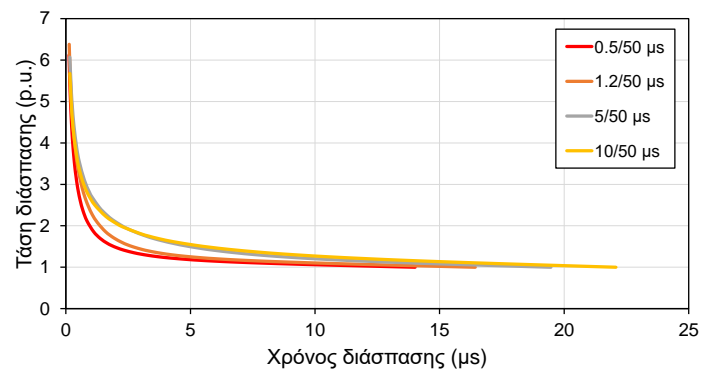
Σχήμα 3.6: Επίδραση της διάρκειας μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων (ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης). Ορισμός με τη μέγιστη τάση.



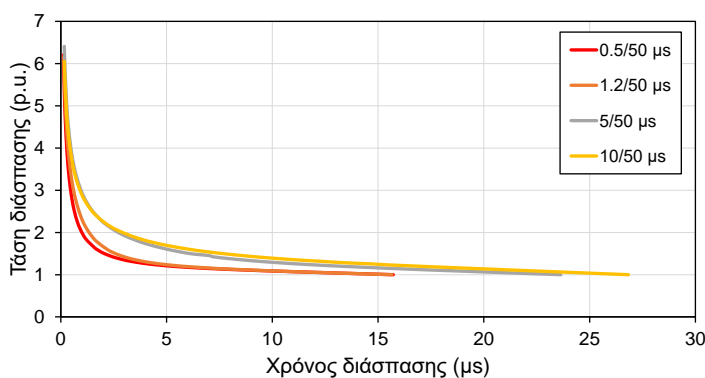
A) 66 kV



B) 150 kV

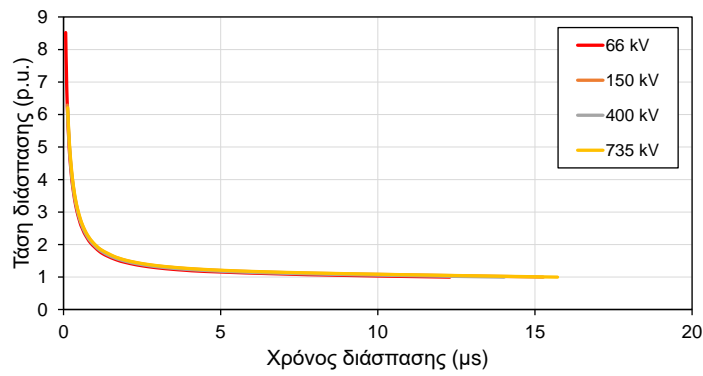


Γ) 400 kV

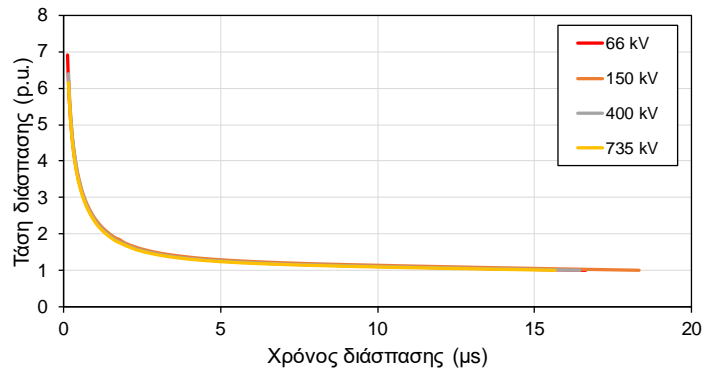


Δ) 735 kV

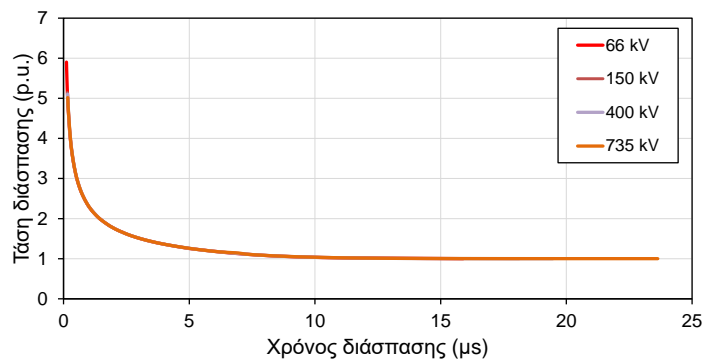
Σχήμα 3.7: Επίδραση της διάρκειας μετώπου διπλεκθετικής κυματομορφής στις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων (ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση.



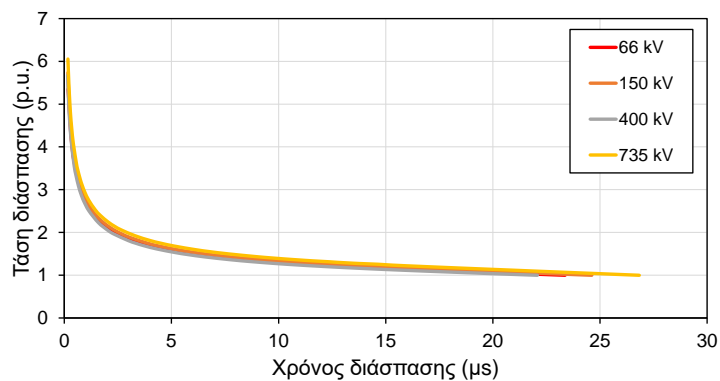
A) 0.5/50 μ s



B) 1.2/50 μ s



Γ) 5/50 μ s



Δ) 10/50 μ s

Σχήμα 3.8: Παρουσίαση των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων με βάση την κάθε τιμή διάρκειας μετώπου που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή.

3.2 Επίδραση ουράς διπλεκθετικής κυματομορφής

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης με τη μέγιστη τάση για όλους τους μονωτήρες που προσομοιώθηκαν (66 kV, 150 kV, 400 kV, 735 kV), λαμβάνοντας υπόψη 5 διαφορετικές κυματομορφές με διαφορετικό χρόνο επίδρασης της ουράς (Πίνακας 2.5). Για μονωτήρες μεγαλύτερης τάσης, παρουσιάζεται και μεγαλύτερη τάση διάσπασης. Επίσης, παρατηρείται ότι μεγαλύτερης διάρκειας ουρές οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο διάσπασης, εκτός από τον μονωτήρα 735 kV, όπου ο χρόνος διάσπασης της κυματομορφής 1.2/30 μ s υπερβαίνει αυτόν της 1.2/200 μ s.

Όπως και στην επίδραση του μετώπου, και εδώ η καμπύλη γίνεται επίπεδη στο τέλος της και παράλληλη στον άξονα των x, υποδεικνύοντας ότι μικρή μεταβολή στην ελάχιστη τάση που εφαρμόζεται οδηγεί σε μεγάλες μεταβολές του μέγιστου χρόνου διάσπασης. Γενικά, οι καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια κυρτότητα, αναδεικνύοντας παρόμοια δυσκολία διάσπασης. Διαφέρουν κυρίως ως προς τους μέγιστους χρόνους διάσπασης, που επηρεάζονται και από την επιλογή των ελάχιστων τιμών τάσης που εφαρμόστηκαν σε κάθε περίπτωση, καθώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι ντετερμινιστικά (όχι στοχαστικά).

Από το Σχήμα 3.9 παρατηρείται ότι, στους μικρούς χρόνους διάσπασης (συνθήκες υπέρτασης), όλες οι καμπύλες είναι ιδιαίτερα κοντά μεταξύ τους. Αυτό εξηγείται εύκολα βλέποντας το Σχήμα 2.8, όπου παρουσιάζονται οι εφαρμοζόμενες κυματομορφές σε συγκριτικό διάγραμμα. Όλες αυτές έχουν διάρκεια μετώπου 1.2 μ s, με αποτέλεσμα να ταυτίζονται έως την κορυφή τους. Επομένως είναι προφανές ότι, για διασπάσεις στο μέτωπο, οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης θα είναι παρόμοιες. Οι εξαιρετικά μικροί χρόνοι διάσπασης της κυματομορφής 1.2/5 μ s οφείλονται στην πολύ γρήγορη μείωσή της προς το μηδέν κατά την ουρά της (Σχήμα 2.8).

Με βάση τα παραπάνω, η επίδραση της ουράς είναι σημαντική στο δεξί τμήμα των καμπυλών, δηλαδή κατά τη διάσπαση στην ουρά της κυματομορφής. Αυτό είναι σε αντίθεση με την επίδραση του μετώπου που μελετήθηκε στην προηγούμενη ενότητα και οφείλεται στη γενική μορφή των διπλεκθετικών κυματομορφών, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους τόσο στο μέτωπο όσο και στην ουρά όταν η διάρκεια μετώπου μεταβάλλεται σημαντικά, όπως προκύπτει από τη σύγκριση των Σχημάτων 2.7 και 2.8). Οι διπλεκθετικές κυματομορφές διαφέρουν μόνο στην ουρά όταν το μέτωπο είναι ίδιο.

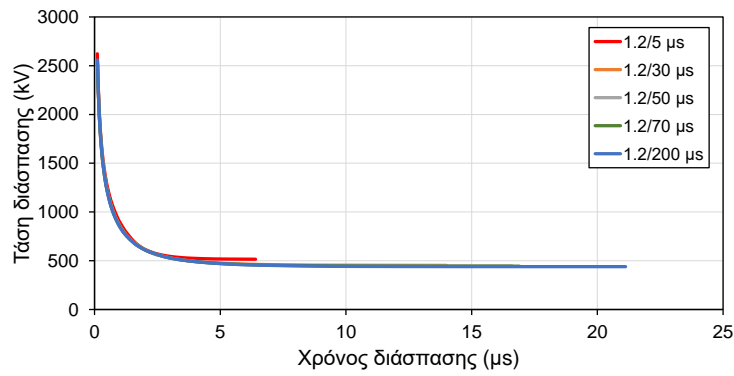
Από το Σχήμα 3.9 προκύπτει ότι οι κυματομορφές με τη μικρότερη ουρά απαιτούν λίγο μεγαλύτερη τάση για να προκαλέσουν διάσπαση στον ίδιο χρόνο. Αυτό συμβαίνει επειδή, όσο η ουρά αυξάνεται, διατηρούνται μεγαλύτερες στιγμιαίες τιμές τάσης καταπόνησης του

μονωτήρα, με συνέπεια την πιο εύκολη διάσπασή του. Ωστόσο, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.10, η στιγμιαία τάση διάσπασης είναι μικρότερη για τις κυματομορφές με τις μικρότερες ουρές. Αυτό συμβαίνει διότι μειώνονται πιο γρήγορα προς το μηδέν και έτσι ενώ απαιτείται μεγαλύτερη μέγιστη τάση για τη διάσπαση, η στιγμιαία τάση διάσπασης είναι πιο μικρή. Από αυτό το συμπέρασμα προκύπτει η σημασία της επιλογής του ορισμού της τάσης διάσπασης στον συντονισμό μονώσεων. Η επιλογή μεταξύ του μέγιστου και της στιγμιαίας τάσης διάσπασης επηρεάζει την εκτίμηση της διάσπασης του μονωτήρα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο ορισμός με τη στιγμιαία τάση μπορεί να υποεκτιμηθεί η απαιτούμενη τάση, ενώ ο ορισμός με το μέγιστο αναφέρεται στη μέγιστη καταπόνηση στο διάκενο ή τον μονωτήρα πριν τη διάσπαση με συνέπεια να είναι πιο αντιπροσωπευτικός.

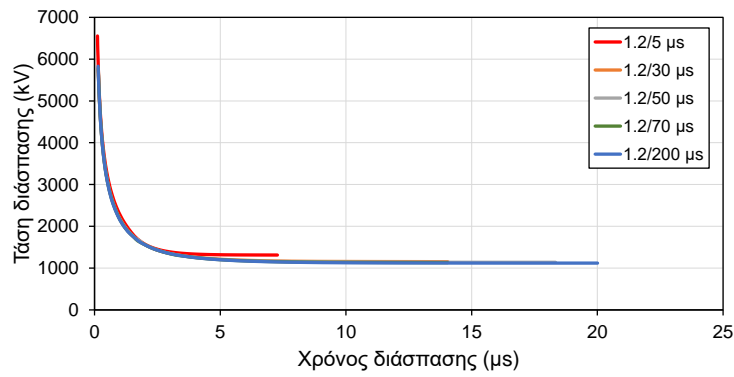
Από τα Σχήματα 3.11 και 3.12 μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής. Οι ουρές μικρότερης χρονικής διάρκειας οδηγούν σε πιο απότομη μείωση της τάσης διάσπασης σε όλους τους μονωτήρες. Επομένως, σε μεγαλύτερες ουρές απαιτείται μεγαλύτερη τάση ως προς το CFO (50% τάση διάσπασης) για να διασπαστεί ο μονωτήρας. Ωστόσο, σε απόλυτες τιμές, η τάση διάσπασης των μικρότερων ουρών είναι πιο μεγάλη.

Από το Σχήμα 3.13, παρατηρούμε ότι η γενική μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από την κυματομορφή 1.2/5 μs . Αυτό υποδηλώνει ότι η μεταβολή της τάσης διάσπασης (κανονικοποιημένη) είναι ποιοτικά ίδια για όλα τα μήκη των μονωτήρων, όταν η καταπόνηση είναι συγκεκριμένη (ίδια εφαρμοζόμενη κυματομορφή τάσης). Οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται μπορεί να οφείλονται στην επιλογή της ελάχιστης τάσης στις προσομοιώσεις ή στην πολύ σύντομη ουρά της κυματομορφής 1.2/5 μs , η οποία προκαλεί διαφορετικές επιδράσεις για διαφορετικά μήκη μονωτήρων.

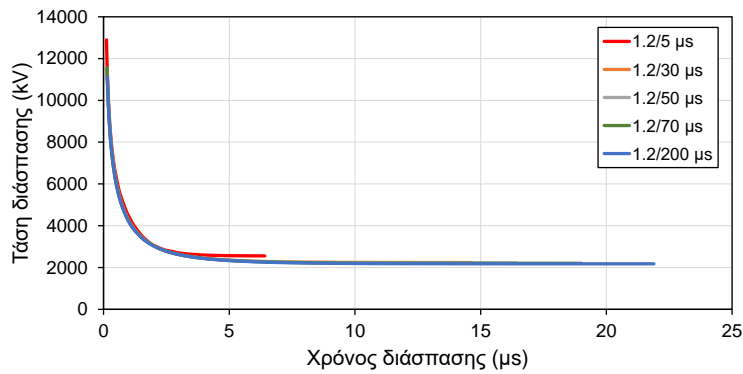
Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση αυτή είναι ότι η διάρκεια του μετώπου επηρεάζει κυρίως τους ενδιάμεσους χρόνους διάσπασης, ενώ η επίδραση της διάρκειας της ημίσεως εύρους (διάρκεια της ουράς) αφορά τους μεγαλύτερους χρόνους διάσπασης.



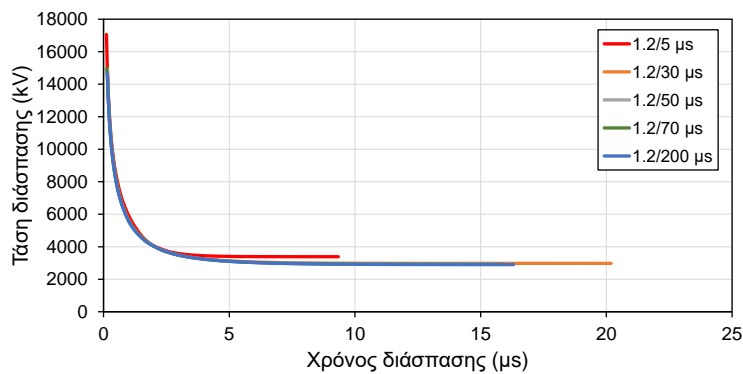
Α) 66 kV



Β) 150 kV

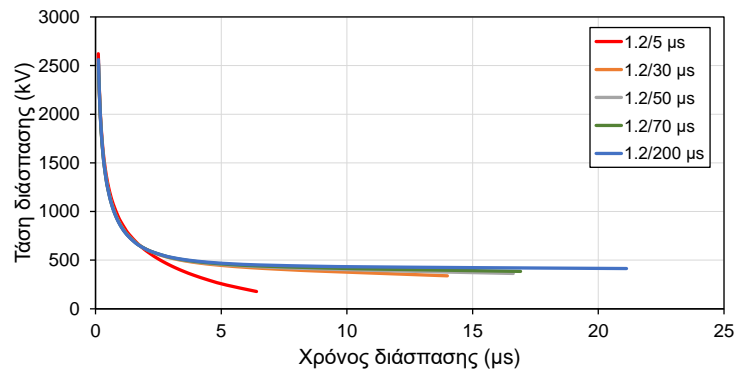


Γ) 400 kV

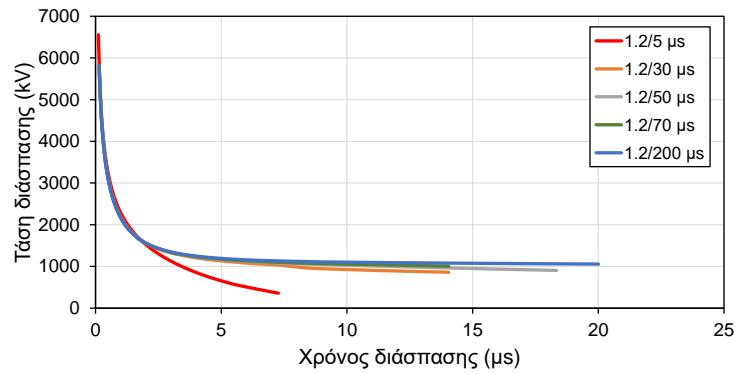


Δ) 735 kV

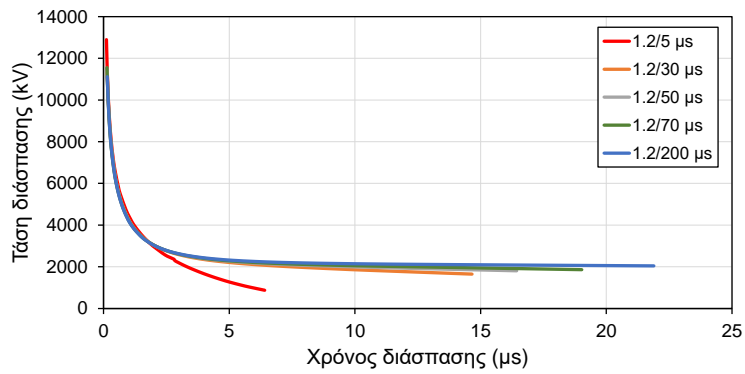
Σχήμα 3.9: Επίδραση της διάρκειας ημίσεως εύρους (ουράς) στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων. Ορισμός με τη μέγιστη τάση.



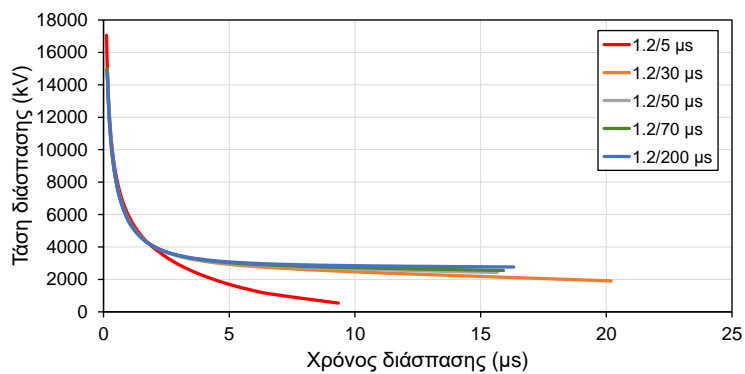
A) 66 kV



B) 150 kV

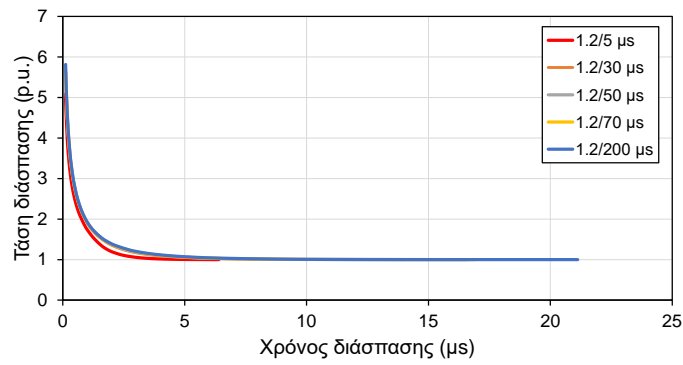


Γ) 400 kV

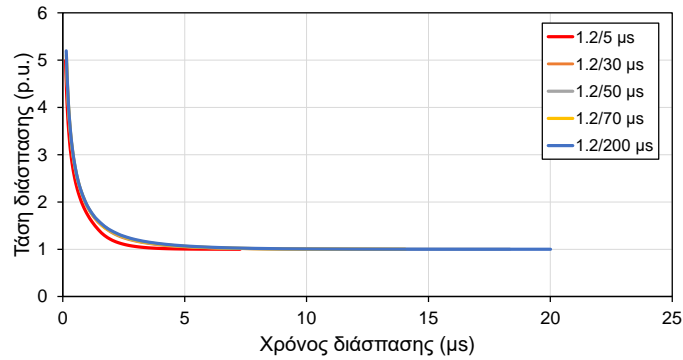


Δ) 735 kV

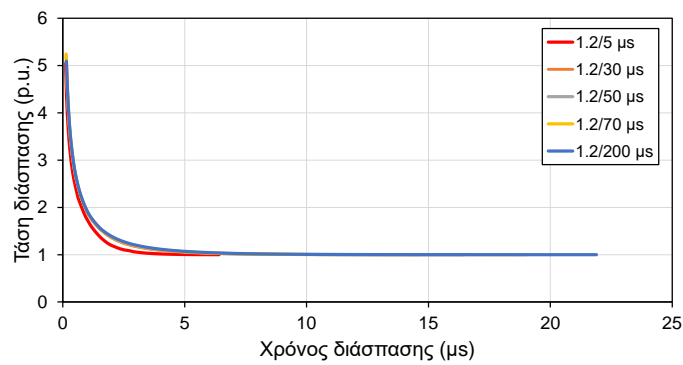
Σχήμα 3.10: Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς) στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων. Ορισμός με τη στιγμιαία τάση.



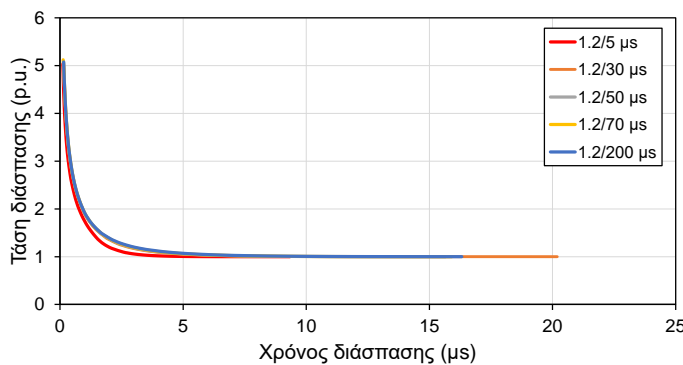
A) 66 kV



B) 150 kV

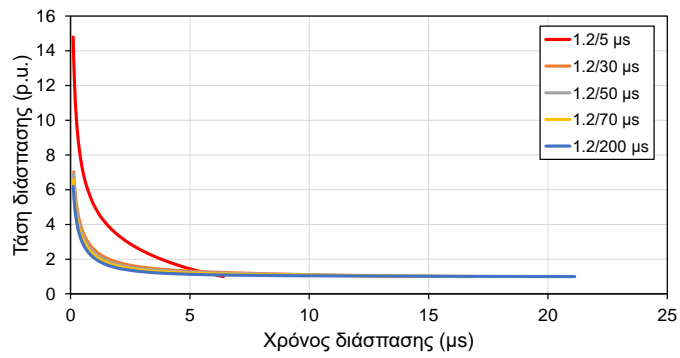


Γ) 400 kV

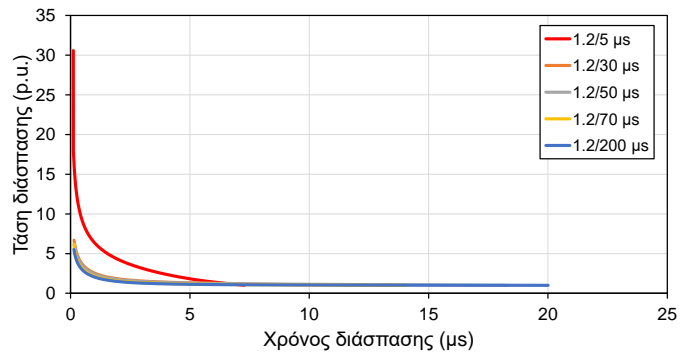


Δ) 735 kV

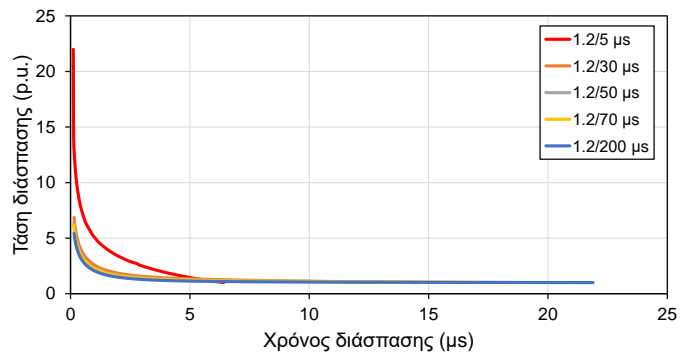
Σχήμα 3.11: Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς) διπλεκθετικής κυματομορφής στις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων (ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης). Ορισμός με τη μέγιστη τάση.



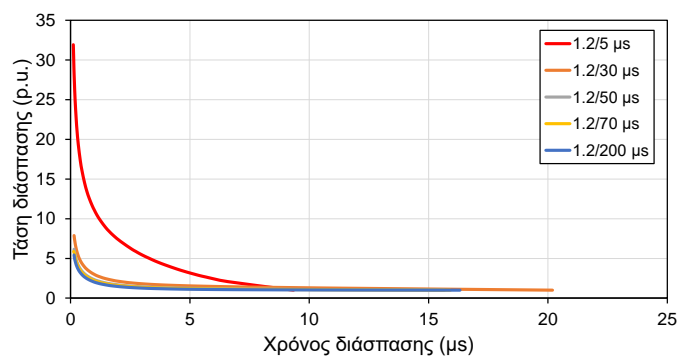
A) 66 kV



B) 150 kV

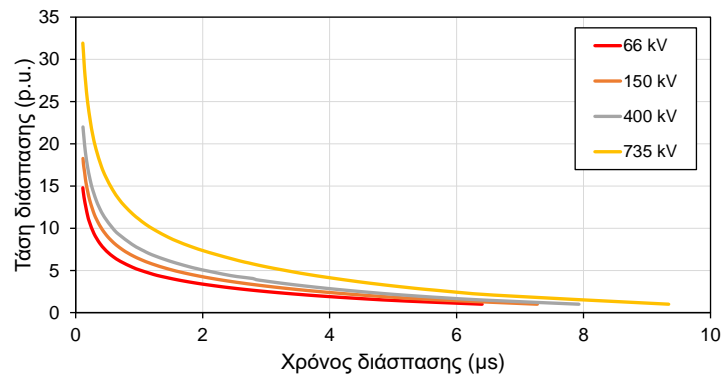


Γ) 400 kV

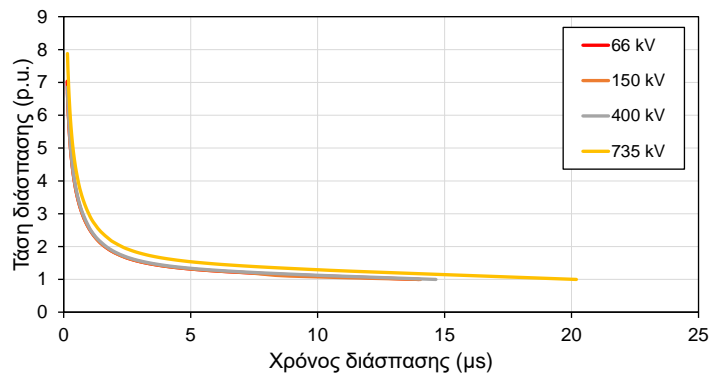


Δ) 735 kV

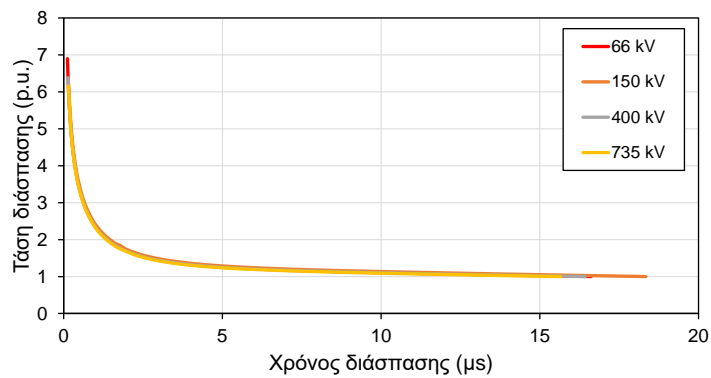
Σχήμα 3.12: Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς) διπλεκθετικής κυματομορφής στις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων (ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση.



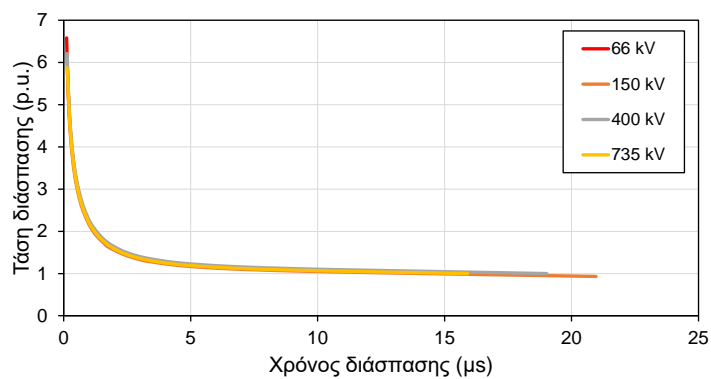
A) 1.2/5 μs



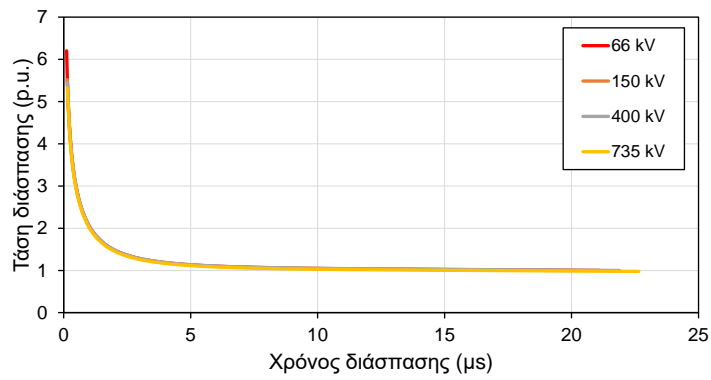
B) 1.2/30 μs



Γ) 1.2/50 μs



Δ) 1.2/70 μs



Ε) 1.2/200 μs

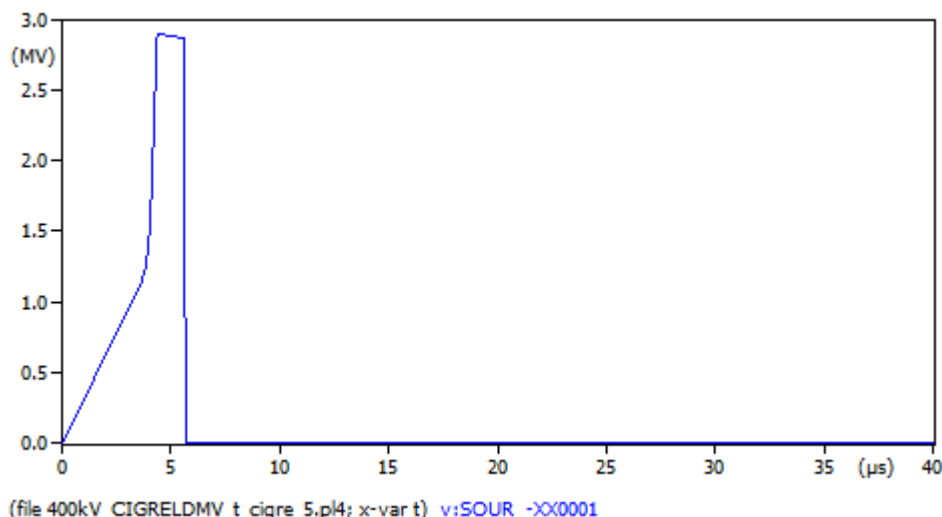
Σχήμα 3.13: Παρουσίαση των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων με βάση την κάθε τιμή διάρκειας ουράς που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

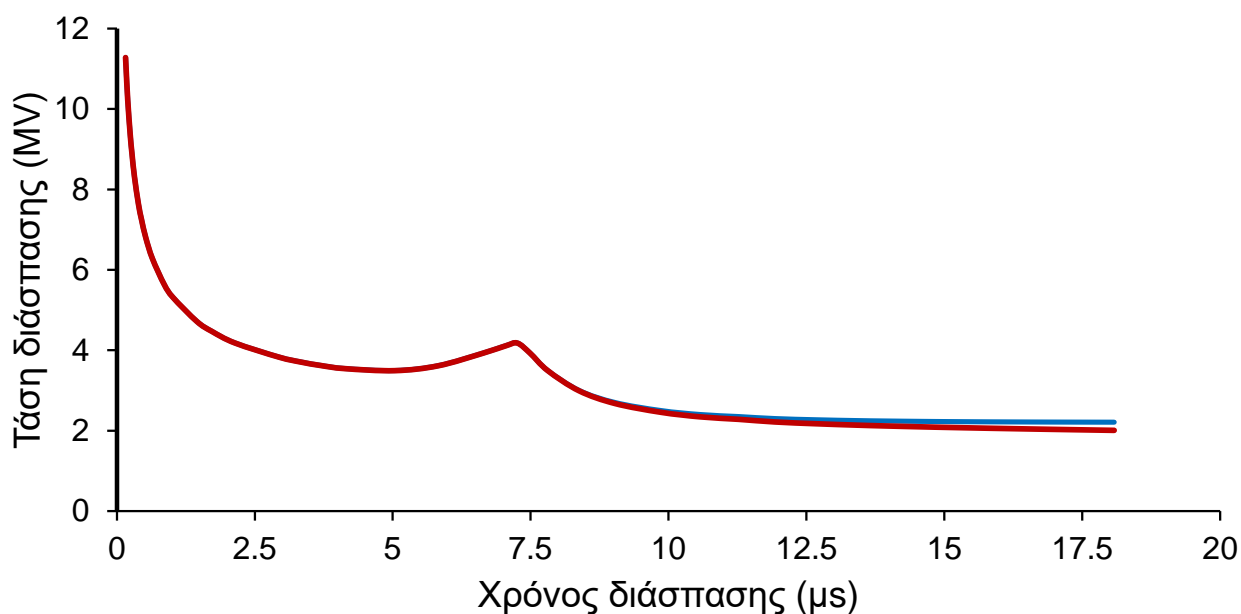
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα με την κυματομορφή της CIGRE

Εδώ, θα μελετηθεί η κυματομορφή CIGRE (βλ. Ενότητα 2.1.1). Στις εν λόγω κυματομορφές, η τάση ξεκινά να αυξάνεται ομαλά έως ένα σημείο (γόνυτο καμπύλης όπου αλλάζουν τα κοίλα), κατόπιν αυξάνεται απότομα έως τη μέγιστη τιμή. Η εξίσωση που περιγράφει την κυματομορφή της CIGRE αλλάζει στο 90% του μεγίστου. Μετά από το μέγιστο η καμπύλη μειώνεται με πιο αργό ρυθμό (βλ. Σχήμα 2.9). Κυματομορφές υπερτάσεων με τη μορφή της CIGRE αναμένεται να καταπονήσουν μονωτήρες γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όταν ο κεραυνός καταλήγει σε αγωγό φάσης. Άρα η διερεύνηση είναι σημαντική από τη σκοπιά αυτή.

Αντίστοιχα με την διπλεκθετική κυματομορφή, η CIGRE προκαλεί διάσπαση όταν ξεπερνά τη διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης, όπως αυτή προβλέπεται από το μοντέλο προόδου του λήντερ. Η διάσπαση οδηγεί και πάλι σε κατάρρευση της τάσης στο μηδέν (βλ. Σχήμα 4.1), με αποτέλεσμα και εδώ να μπορεί να πραγματοποιηθεί σχηματισμός της καμπύλης τάσης-χρόνου διάσπασης μετά από πολλές προσομοιώσεις που οδηγούν σε διάσπαση. Μια χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2, η οποία αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό σημείων (δεν απεικονίζονται στο σχήμα, παρά μόνο η καμπύλη που τα προσεγγίζει). Η μορφή αυτής της καμπύλης τάσης-χρόνου διάσπασης παρουσιάζει μια χαρακτηριστική αύξηση κατά τη μετάβαση από τους μεγάλους χρόνους διάσπασης προς τους μικρούς, η οποία δημιουργεί μια κορυφή. Μετά μειώνεται και καθώς φτάνει σε ένα ελάχιστο αρχίζει να αυξάνεται ξανά. Αυτή η κορυφή (τοπικό μέγιστο) οφείλεται στην αλλαγή κλίσης στο μέτωπο της κυματομορφής (βλ. Σχήμα 2.9 και 4.1).



Σχήμα 4.1: Προσομοίωση διάσπασης μονωτήρα 400 kV με κυματομορφή CIGRE. Διάσπαση στην ουρά.



Σχήμα 4.2: Καμπύλη τάσης χρόνου διάσπασης κυματομορφής CIGRE για τον μονωτήρα των 400 kV και κυματομορφή 4.52/77.5 μs. **Μπλε καμπύλη:** ορισμός μέγιστης τάσης, **Κόκκινη καμπύλη:** ορισμός στιγμιαίας τάσης

4.1 Επίδραση της κυματομορφής

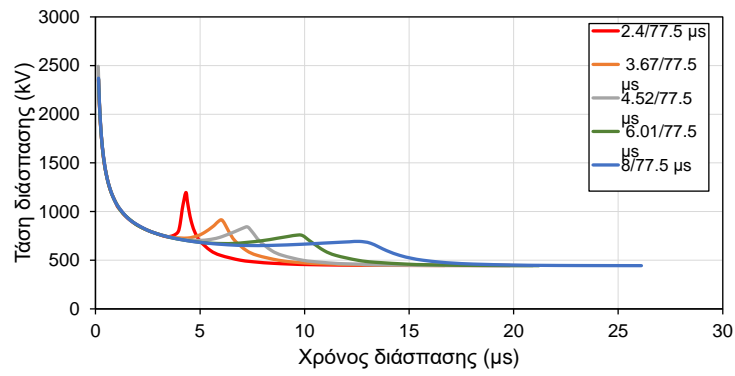
Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης, χρησιμοποιώντας τον ορισμό της μέγιστης τάσης, για όλους τους μονωτήρες που διερευνήθηκαν με την κυματομορφή CIGRE. Παρατηρείται ότι όσο πιο μικρή είναι η διάρκεια του μετώπου, τόσο μεγαλύτερη είναι η κορυφή, δηλαδή το τοπικό μέγιστο, στο διάγραμμα, που αντιπροσωπεύει την αυξομείωση της τάσης διάσπασης λόγω της αλλαγής κλίσης στο μέτωπο. Επιπλέον, για μικρότερη διάρκεια μετώπου της κυματομορφής CIGRE, παρατηρείται σχηματισμός της κορυφής πιο πρόωρα, με απότομη κλίση και μικρότερο χρόνο διάσπασης. Αυτό συμβαίνει επειδή η αλλαγή κλίσης στο μέτωπο της κυματομορφής CIGRE συμβαίνει νωρίτερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι οι καμπύλες ταυτίζονται στην αρχή τους για όλες τις κυματομορφές που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις. Στο τέλος (μεγάλοι χρόνοι διάσπασης) συγκλίνουν και πάλι με τη διαφορά όμως ότι οι κυματομορφές με το μεγαλύτερο μέτωπο οδηγούν σε μεγαλύτερους πιθανούς χρόνους διάσπασης. Στους ενδιάμεσους χρόνους διάσπασης παρατηρούνται διαφορές, όπως συμβαίνει και στην επίδραση του μετώπου των διπλεκθετικών κυματομορφών (βλ. Κεφάλαιο 3.1, Σχήμα 3.4). Οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης των μικρότερων μετώπων παρουσιάζουν ευκολότερη διάσπαση με εξαίρεση τους χρόνους γύρω από την κορυφή.

Ο ορισμός της στιγμιαίας τάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4. Όπως φαίνεται, μπορούν να γίνουν παρόμοιες παρατηρήσεις με το Σχήμα 4.3. Επιπλέον, μπορεί να ειπωθεί ότι οι κυματομορφές CIGRE με μεγαλύτερο μέτωπο προκαλούν ελαφρώς υψηλότερες στιγμιαίες τάσεις διάσπασης στο δεξί τμήμα τους, καθώς εμφανίζουν υψηλότερες στιγμιαίες τάσεις στην ουρά (Σχήμα 2.9).

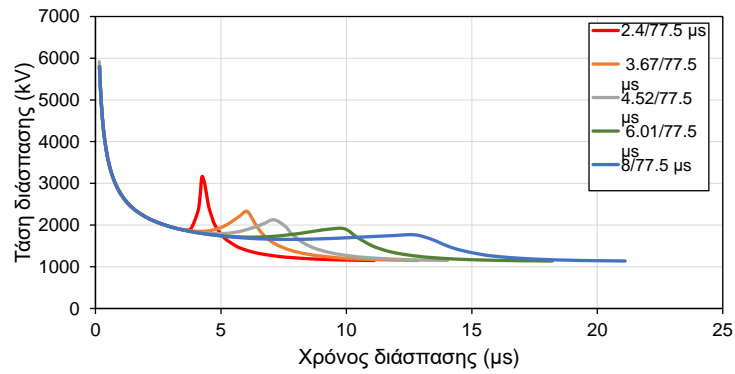
Η κανονικοποίηση των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα μέσω ευκολότερης σύγκρισης. Έτσι είναι εφικτό να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων του κεφαλαίου αυτού, όπως έγινε και στο Κεφάλαιο 3. Τα Σχήματα 4.5 και 4.6 παρουσιάζουν τις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, δηλαδή για όλους τους μονωτήρες και όλες τις κυματομορφές, χρησιμοποιώντας και τους δύο ορισμούς των καμπυλών. Τα προηγούμενα συμπεράσματα επιβεβαιώνονται εύκολα, με τον τρόπο αυτό, ενώ παρατηρείται ότι οι μορφές είναι παρόμοιες μεταξύ των διαφορετικών μονωτήρων όταν συγκρίνονται οι ίδιες κυματομορφές. Ωστόσο, αυτό ισχύει για τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης. Οι μη κανονικοποιημένες τιμές της τάσης διάσπασης είναι πιο υψηλές για μονωτήρες μεγαλύτερης τάσης. Αυτό είναι αυτονόητο γιατί οι μονωτήρες αυτοί έχουν μεγαλύτερο μήκος με συνέπεια να έχουν και μεγαλύτερη αντοχή και επίπεδο μόνωσης.

Το Σχήμα 4.7 συγκρίνει τις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης, αυτή τη φορά ανά κυματομορφή με τα αποτελέσματα όλων των μονωτήρων στο ίδιο γράφημα. Όπως και στις διπλεκθετικές κυματομορφές του προηγούμενου κεφαλαίου, η γενική μορφή των καμπυλών παραμένει ίδια για όλους τους μονωτήρες όταν εξετάζεται μία κυματομορφή CIGRE. Αυτό υποδηλώνει ότι τα οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης κανονικοποιούνται με το CFO (50% τάση διάσπασης) και το μήκος των μονωτήρων. Συνεπώς, εάν γνωρίζουμε την τιμή του CFO και τη γενική μορφή της κανονικοποιημένης καμπύλης $V-t$, μπορούμε να κατασκευαστεί η καμπύλη που θα έδινε το μοντέλο προόδου του λήντερ χωρίς να γίνουν προσομοιώσεις.

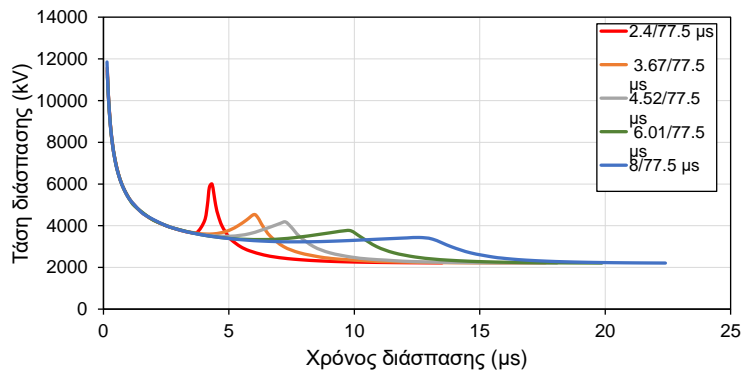
Αν τα αποτελέσματα αυτού του κεφαλαίου συγκριθούν με αυτά της προηγούμενης διπλωματικής εργασίας με τη μέθοδο ολοκλήρωσης, μπορεί να φανεί ότι προκύπτουν ανάλογα συμπεράσματα σε διαφορετική όμως έκταση (ποσοτικές διαφορές). Αυτές οι διαφορές αφορούν τις τιμές της τάσης διάσπασης, ενώ ως προς τους χρόνους τα αποτελέσματα συνάδουν (χρόνος εμφάνισης τοπικού μεγίστου).



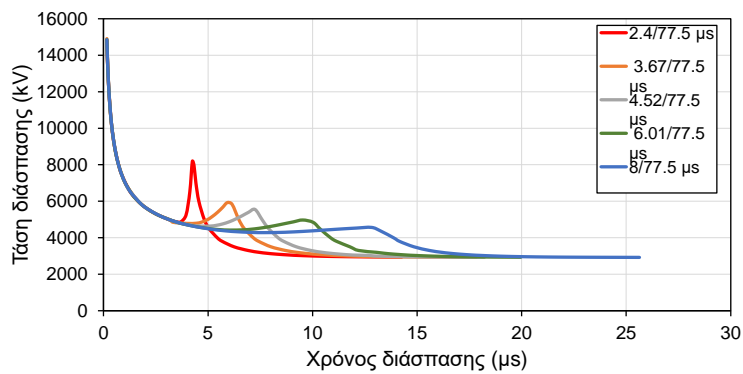
Α) 66 kV



Β) 150 kV

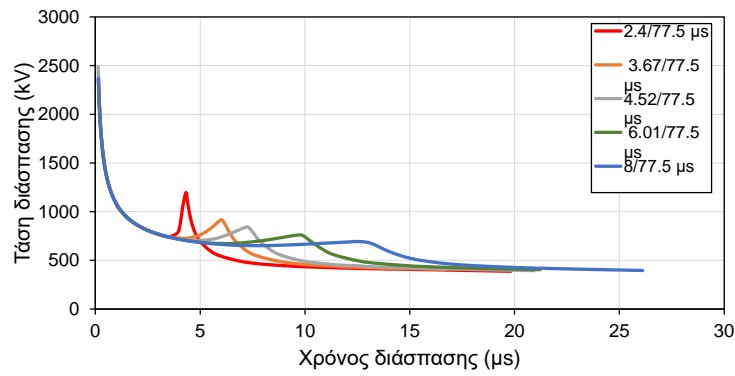


Γ) 400 kV

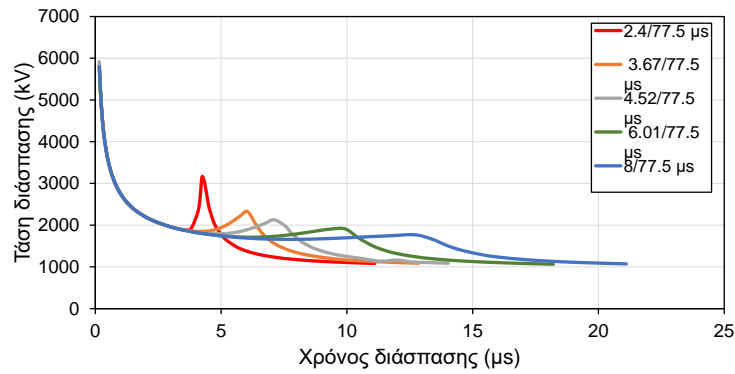


Δ) 735 kV

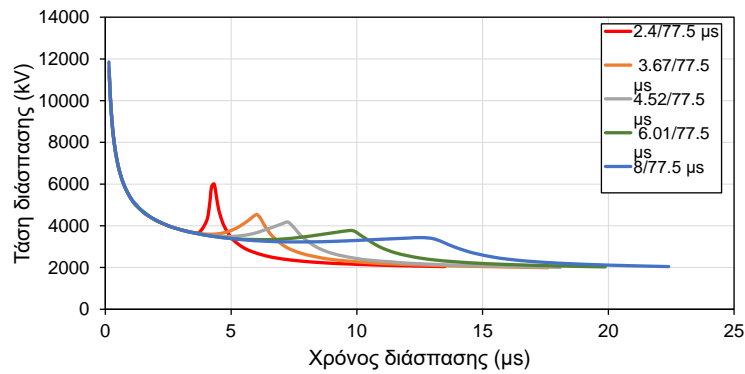
Σχήμα 4.3: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς για την κυματομορφή CIGRE. Ορισμός μέγιστης τάσης.



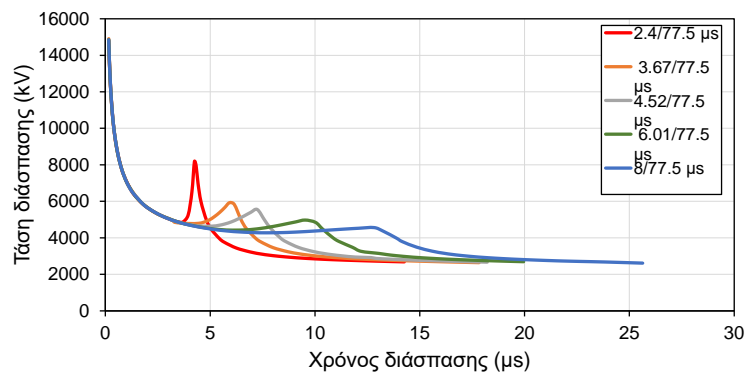
A) 66 kV



B) 150 kV

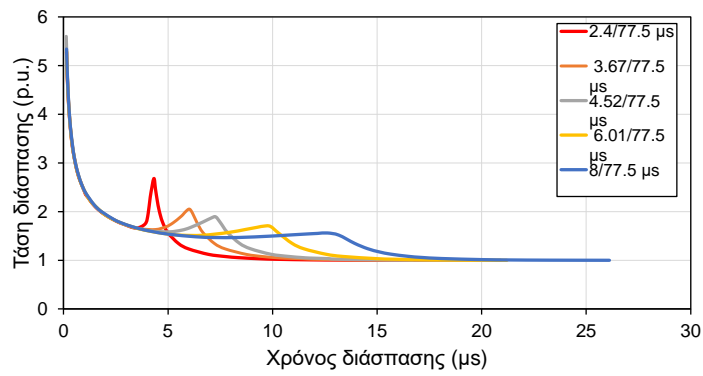


Γ) 400 kV

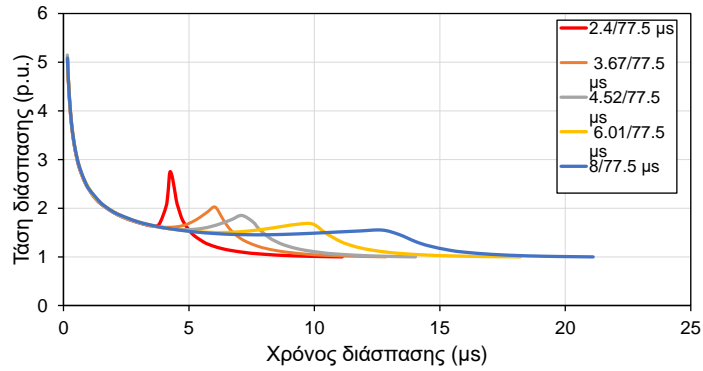


Δ) 735 kV

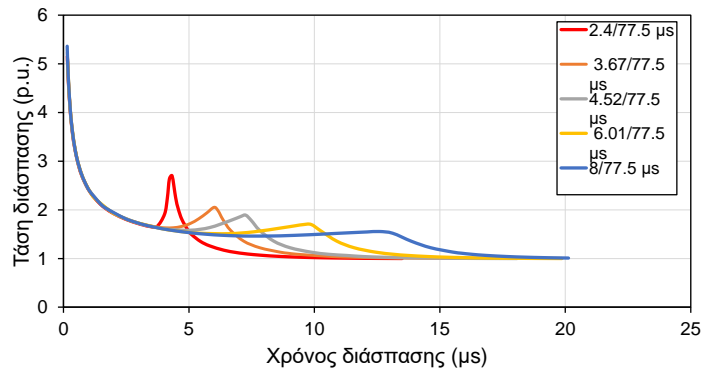
Σχήμα 4.4: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς με την κυματομορφή CIGRE. Ορισμός στιγμιαίας τάσης.



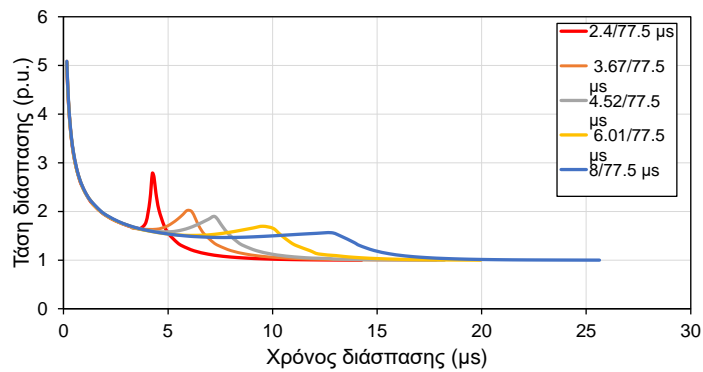
A) 66 kV



B) 150 kV

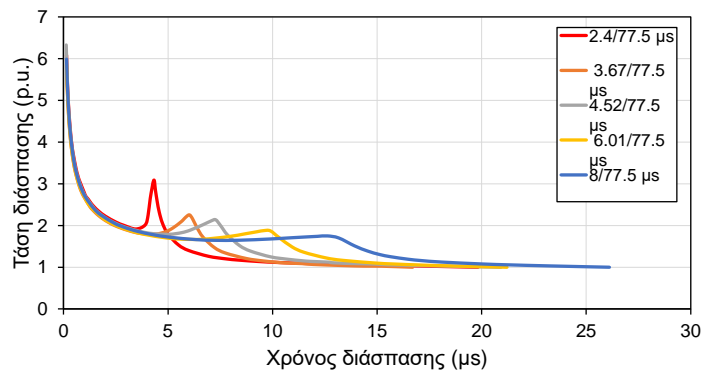


Γ) 400 kV

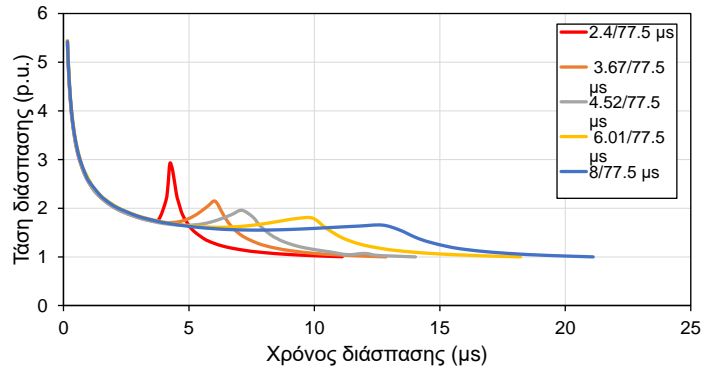


Δ) 735 kV

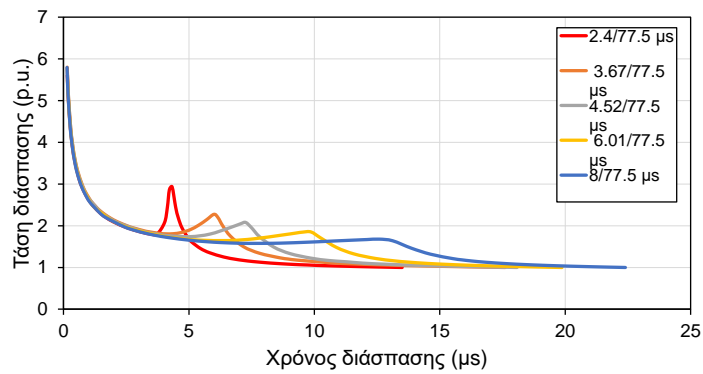
Σχήμα 4.5: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς με την κυματομορφή CIGRE κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Ορισμός μέγιστης τάσης.



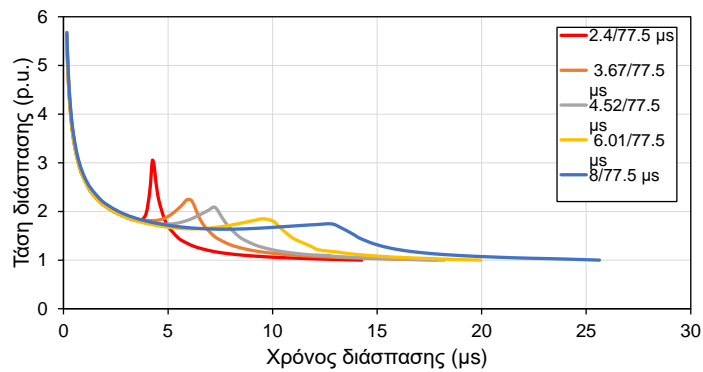
Α) 66 kV



Β) 150 kV

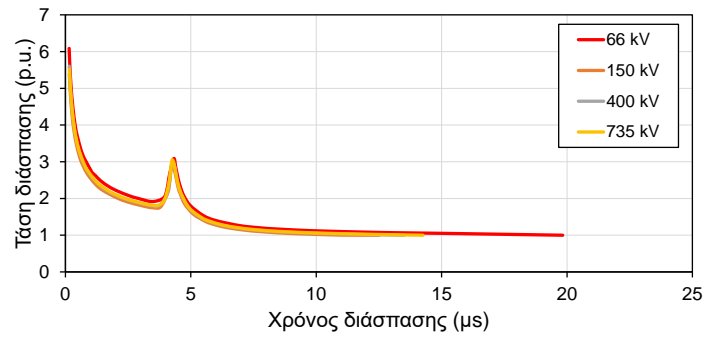


Γ) 400 kV

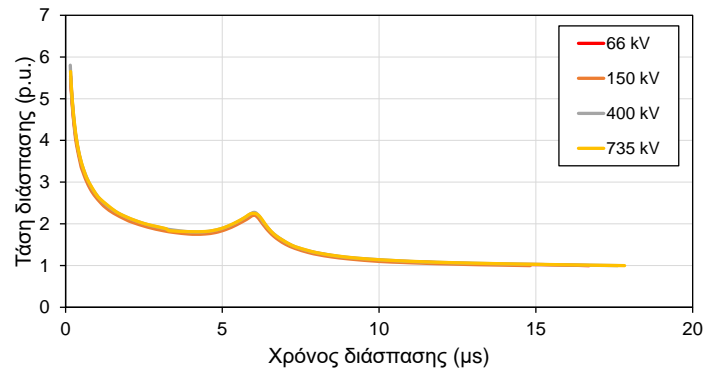


Δ) 735 kV

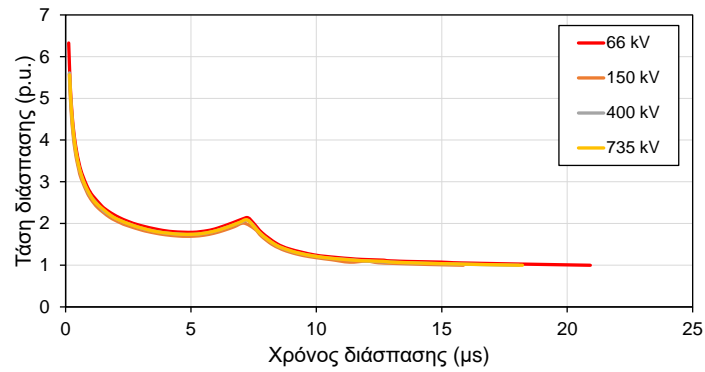
Σχήμα 4.6: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς με την κυματομορφή CIGRE κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Ορισμός στιγμιαίας τάσης.



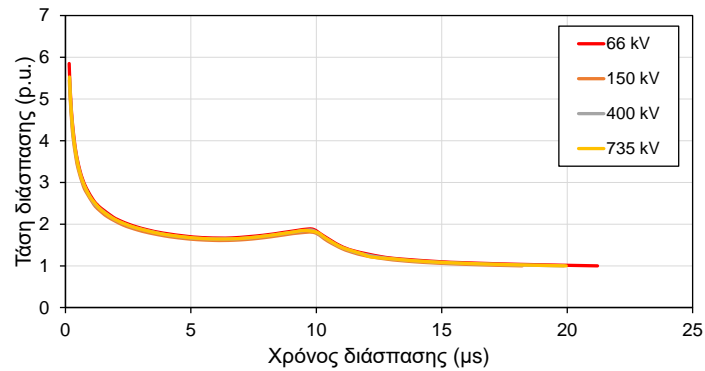
A) 2.4/77.5 μ s



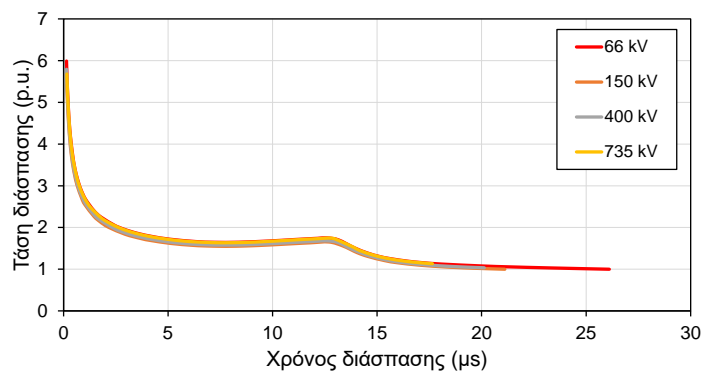
B) 3.67/77.5 μ s



Γ) 4.52/77.5 μ s



Δ) 6.01/77.5 μ s

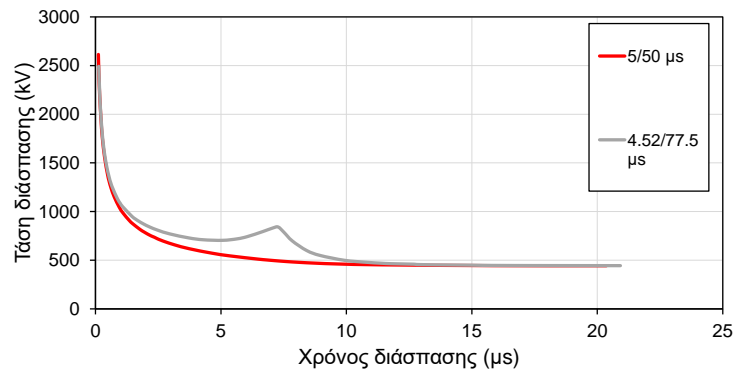


Ε) 8/77.5 μ s

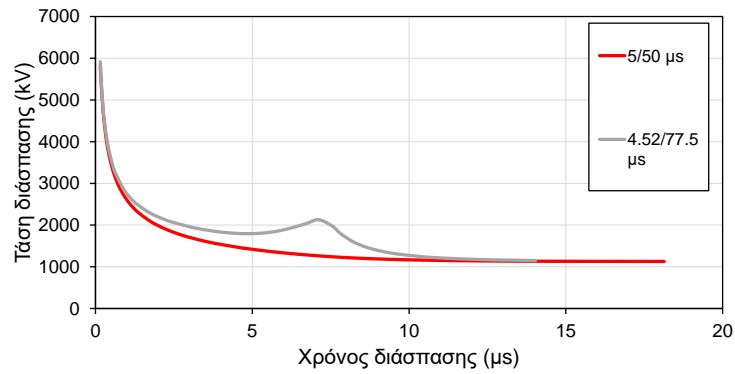
Σχήμα 4.7: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων γραμμών μεταφοράς με την κυματομορφή CIGRE για κάθε κυματομορφή CIGRE που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή.

4.2 Σύγκριση διπλεκθετικών κυματομορφών με τις κυματομορφές CIGRE

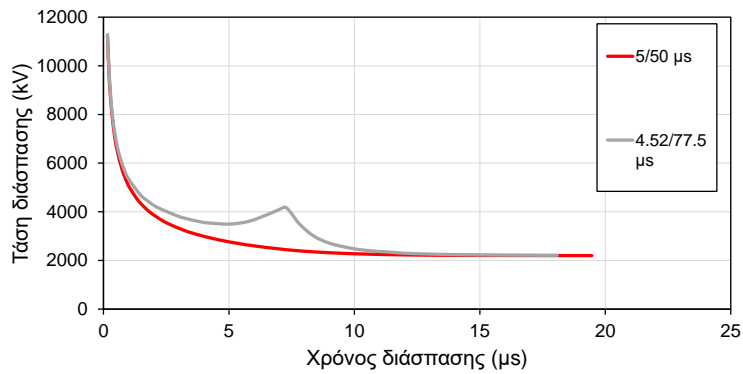
Με τη βοήθεια των Σχημάτων 4.8 και 4.9, που ακολουθούν, θα γίνει μία απόπειρα σύγκρισης καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης κυματομορφών CIGRE με αυτές που προκύπτουν από διπλεκθετικές κυματομορφές (Κεφάλαιο 3). Τα σχήματα αυτά παρουσιάζουν αποτελέσματα για διάρκειες μετώπου με μικρές διαφορές. Αφορούν τον ορισμό μέγιστης τάσης. Όπως είναι φανερό, η διαφορετική μορφή του μετώπου της κυματομορφής CIGRE οδηγεί σε μεγαλύτερες τάσεις διάσπασης, δηλαδή σε πιο δύσκολη διάσπαση όταν φυσικά εξετάζεται ο ίδιος χρόνος. Όμως, οι τάσεις διάσπασης στο δεξί αλλά και στο αριστερό άκρο των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης είναι σχεδόν ίδιες, υπονοώντας παρόμοιες τιμές CFO για τις κυματομορφές που συγκρίνονται, αλλά και παρόμοιες τιμές τάσης διάσπασης σε συνθήκες υπέρτασης (overstress, πιθανότητες διάσπασης άνω του 100%).



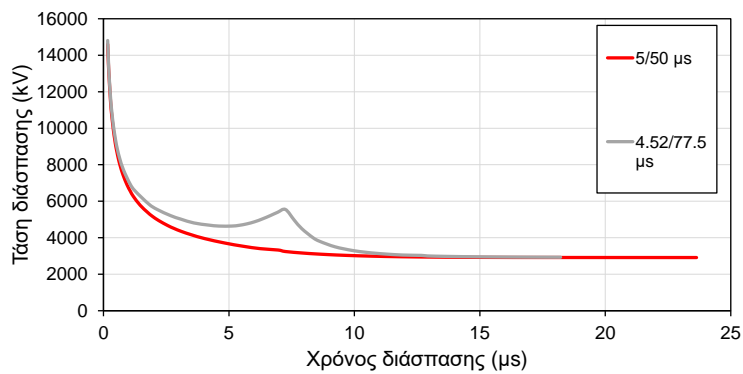
Α) 66 kV



Β) 150 kV

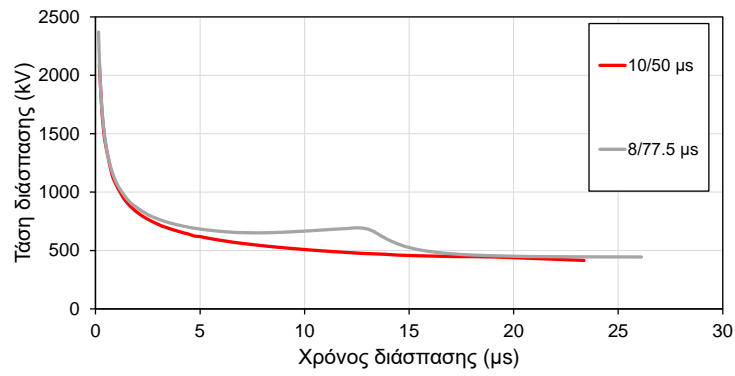


Γ) 400 kV

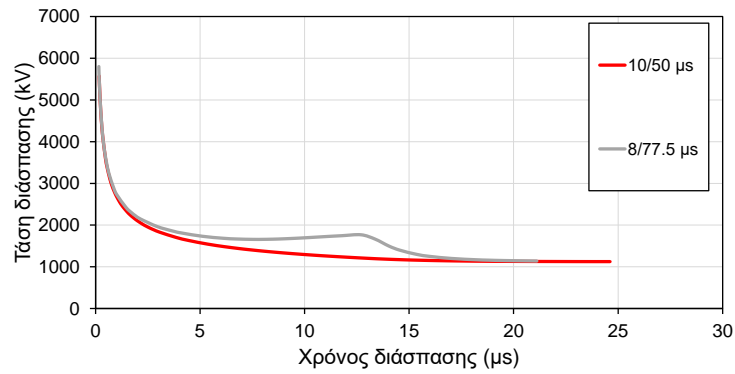


Δ) 735 kV

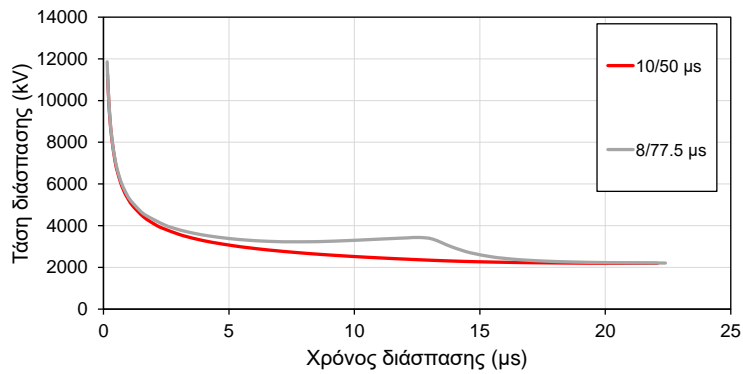
Σχήμα 4.8: Σύγκριση καμπυλών τάσης χρόνου-διάσπασης με διπλεκθετική κυματομορφή 5/50 μs και κυματομορφή CIGRE 4.52/77.5 μs . Ορισμός μέγιστης τάσης.



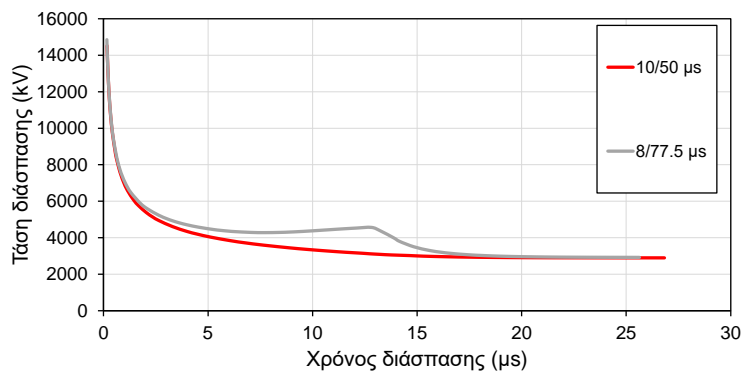
Α) 66 kV



Β) 150 kV



Γ) 400 kV



Δ) 735 kV

Σχήμα 4.9: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης με διπλεκθετική 10/50 μs και κυματομορφή CIGRE 8/77.5 μs . Ορισμός μέγιστης τάσης.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα με τις πραγματικές κυματομορφές

Στο παρόν κεφάλαιο και τελευταίο κεφάλαιο που αφορά αποτελέσματα προσομοιώσεων, θα παρουσιαστούν οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης για τις πραγματικές κυματομορφές του κεραυνού και φυσικά (για λόγους σύγκρισης) για τις κυματομορφές της CIGRE που προσεγγίζουν αυτές του κεραυνού (Σχήμα 2.6).

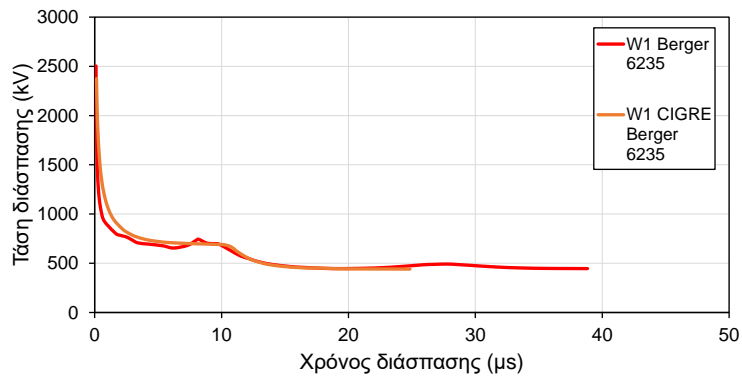
Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες βάσει του ορισμού με τη μέγιστη τάση για την πραγματική κυματομορφή W1 Berger 6235 και την αντίστοιχη αναπαράστασή της σε CIGRE για όλους τους μονωτήρες που διερευνήθηκαν. Οι καμπύλες $V-t$ είναι παρόμοιες σε γενικές γραμμές. Στο αριστερό άκρο, η καμπύλη της CIGRE βρίσκεται ψηλότερα. Διαφορές είναι εμφανείς και κοντά στο τοπικό μέγιστο. Γενικά, η καμπύλη που αντιστοιχεί στην πραγματική κυματομορφή είναι λιγότερο ομαλή σε σχέση με αυτήν της CIGRE. Αυτό έχει να κάνει με τη μορφή της πραγματικής κυματομορφής (Σχήμα 2.6), η οποία οφείλεται στη στοχαστικότητα του φαινομένου του κεραυνού και πιθανόν σε αδυναμίες του συστήματος καταγραφής, όπως η επίδραση ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Ακόμη, με προσεκτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων του Σχήματος 5.1 φαίνεται ότι υπάρχει ένα μικρότερο τοπικό μέγιστο πιο κοντά στο δεξί άκρο των καμπυλών των πραγματικών κυματομορφών (κοντά στο CFO).

Αυτό το δεύτερο τοπικό μέγιστο φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 5.2 στο οποίο χρησιμοποιείται ο ορισμός της στιγμιαίας τάσης διάσπασης για την κατασκευή των καμπυλών $V-t$. Τα υπόλοιπα συμπεράσματα παραμένουν τα ίδια με το Σχήμα 5.1.

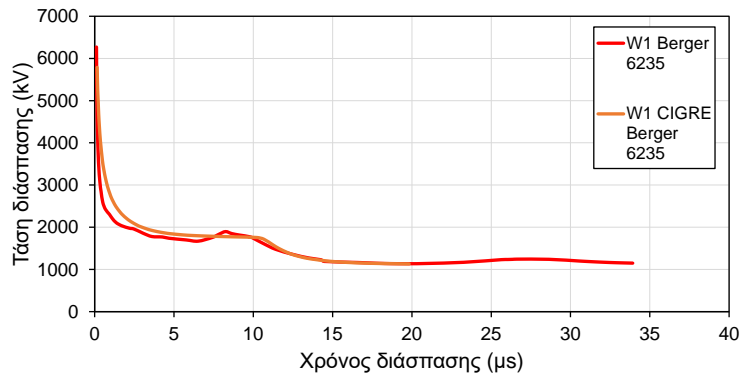
Στα Σχήματα 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα και για τους δύο ορισμούς των καμπυλών για την πραγματική κυματομορφή W3 Narita 1 και την αντίστοιχη αναπαράστασή της σε CIGRE για όλους τους μονωτήρες που διερευνήθηκαν. Εδώ είναι εμφανής μία εξαιρετική ομοιότητα με πολύ μικρές διαφορές.

Συνολικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η αναπαράσταση πραγματικών κυματομορφών με τη χρήση κυματομορφών CIGRE φαίνεται να είναι ικανοποιητική αν συγκριθούν αποκλειστικά οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης. Πιθανόν αυτό να διαφέρει αν μελετηθούν ολόκληρα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω προσομοιώσεων και όχι οι μόνοι οι μονωτήρες όπως εδώ. Οι διαφορές που παρατηρούνται στις καμπύλες τάσης χρόνου διάσπασης εξαρτώνται από το συγκεκριμένο ζεύγος πραγματικής κυματομορφής/ προσέγγισης CIGRE και το πόσο καλή είναι η προσέγγιση καθώς και τις απότομες μεταβολές των πραγματικών κυματομορφών. Αυτό παρατηρήθηκε στα αποτελέσματα καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης που προέκυψαν για

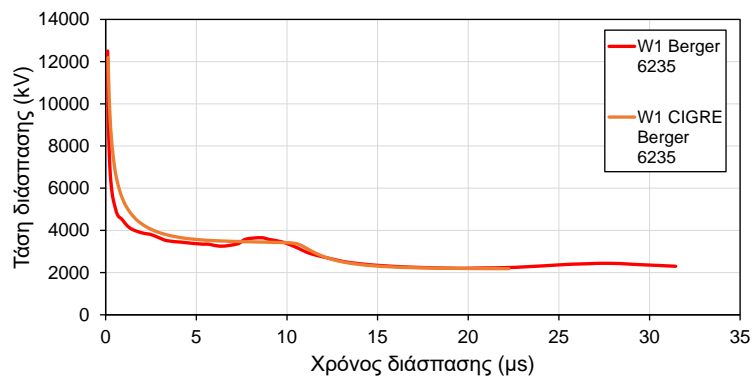
τους μονωτήρες που διερευνήθηκαν και τις υπόλοιπες κυματομορφές του Σχήματος 2.6, οι οποίες δεν παρουσιάστηκαν εδώ.



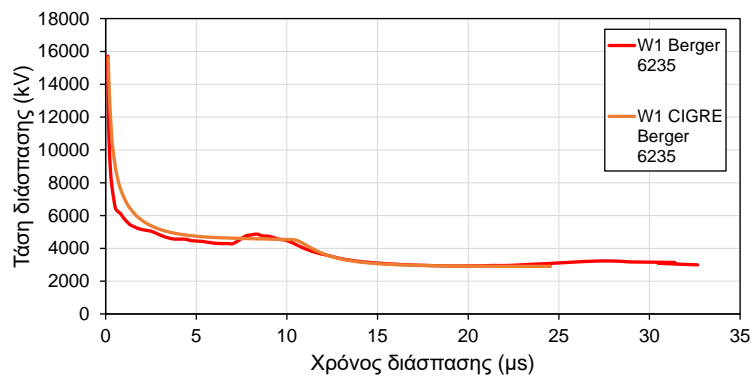
A) 66 kV



B) 150 kV

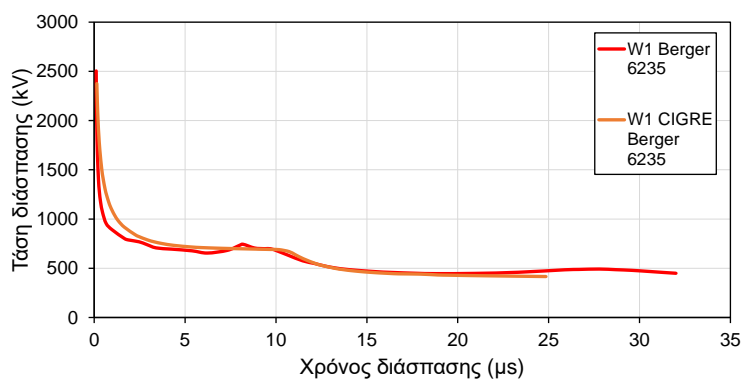


Γ) 400 kV

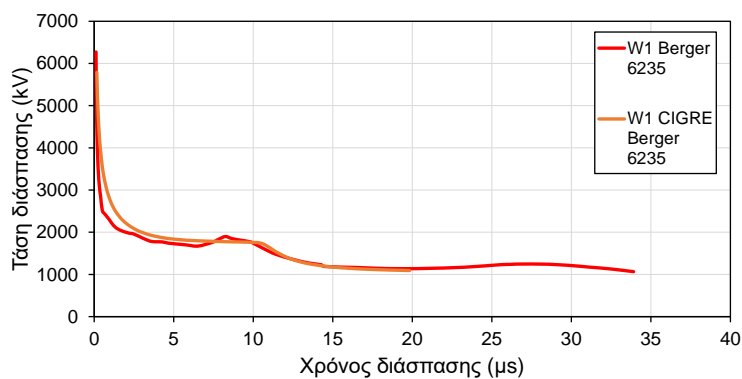


Δ) 735 kV

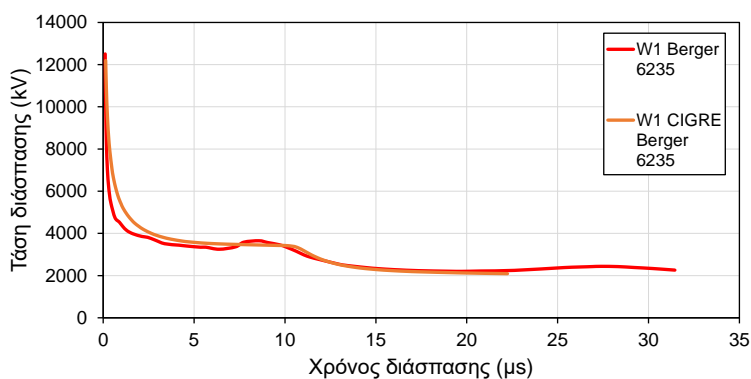
Σχήμα 5.1: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W1 και της αναπαράστασής της με κυματομορφή CIGRE με τον ορισμό μέγιστης τάσης.



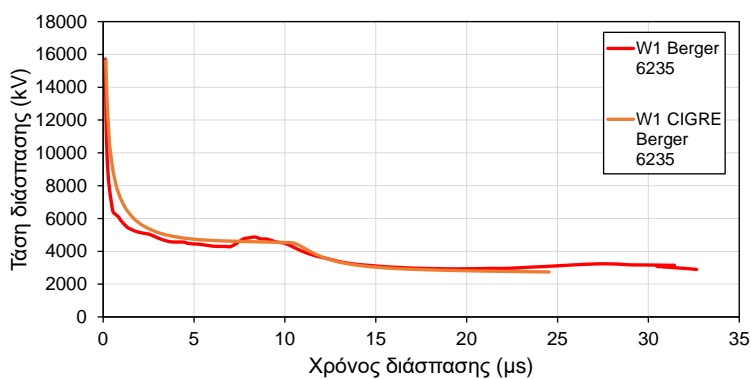
A) 66 kV



B) 150 kV



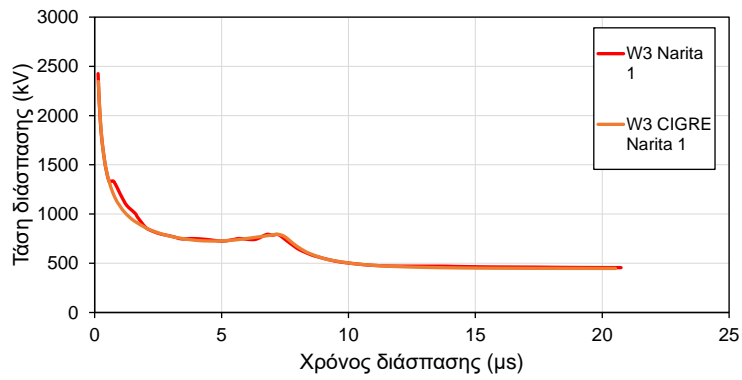
Γ) 400 kV



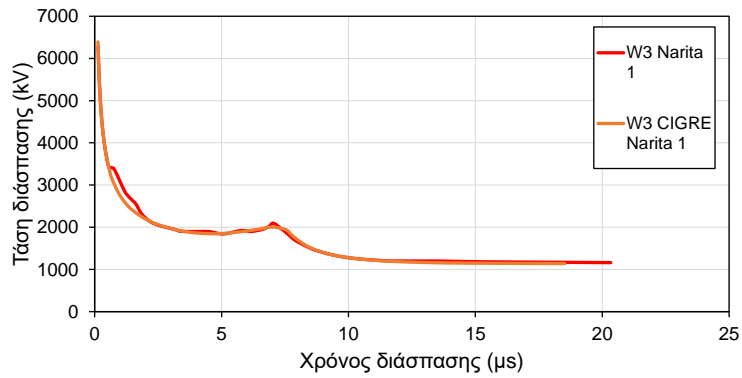
Δ) 735 kV

Σχήμα 5.2: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W1 και της αναπαράστασής της με κυματομορφή CIGRE με τον ορισμό στιγμιαίας τάσης.

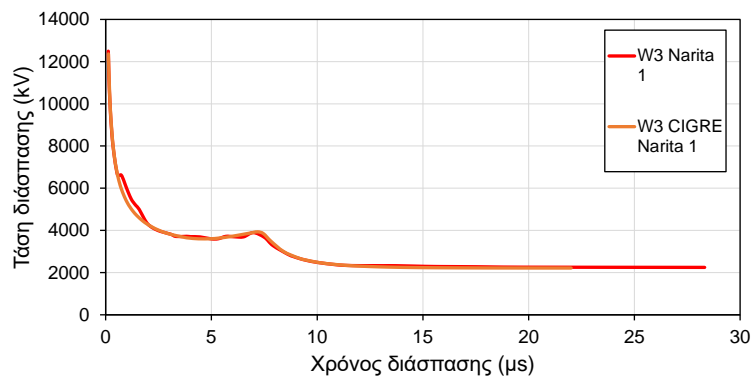
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΟΔΟΥ ΤΟΥ ΛΗΝΤΕΡ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ



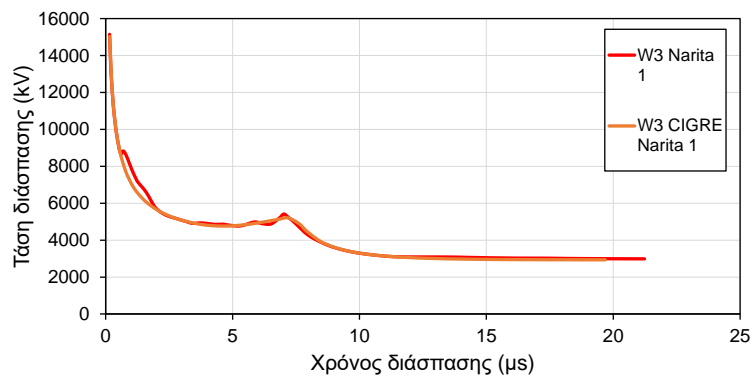
A) 66 kV



B) 150 kV

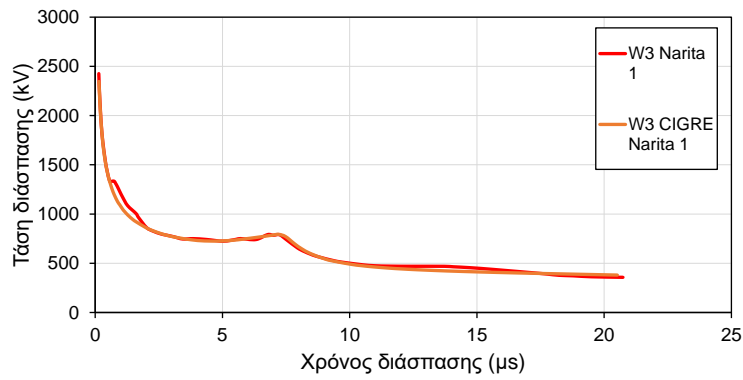


Γ) 400 kV

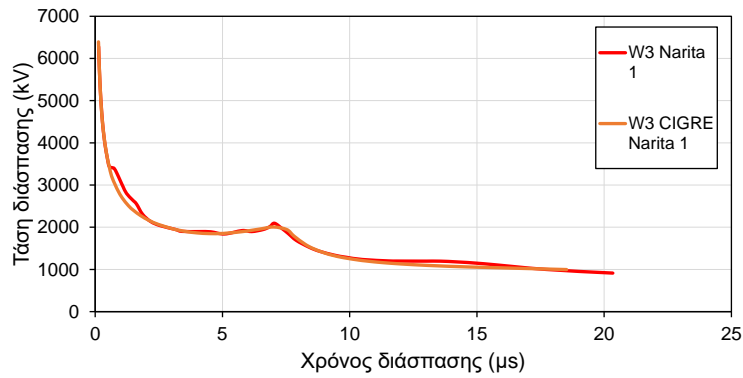


Δ) 735 kV

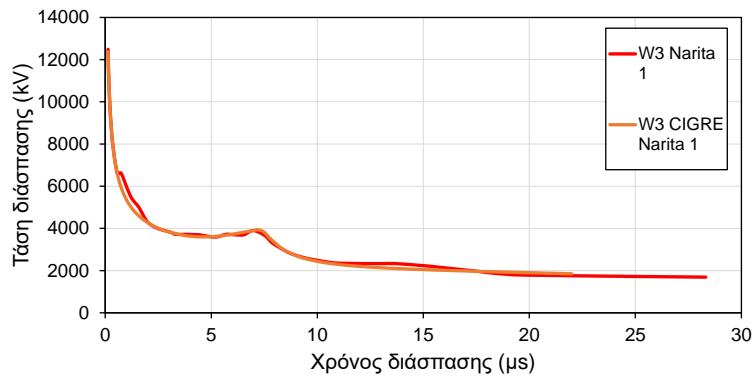
Σχήμα 5.3: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W3 και της αναπαράστασής της με κυματομορφή CIGRE με τον ορισμό μέγιστης τάσης.



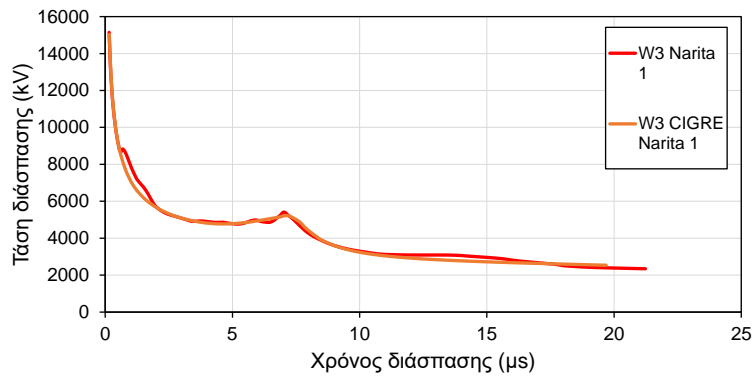
A) 66 kV



B) 150 kV



Γ) 400 kV



Δ) 735 kV

Σχήμα 5.4: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W3 και της αναπαράστασής της με κυματομορφή CIGRE με τον ορισμό στιγμιαίας τάσης.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της επίδρασης της κυματομορφής εξωτερικών κρουστικών υψηλών τάσεων, που χρησιμοποιούνται σε εργαστήρια υψηλών τάσεων, και της κυματομορφής κεραυνικών υπερτάσεων που εμφανίζονται σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στην πρόβλεψη της ηλεκτρικής διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους. Μελετήθηκαν μη κανονικές κυματομορφές, που δεν είναι εύκολο να παραχθούν εργαστηριακά. Η διερεύνηση έγινε μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό ATP-EMTP με το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE. Καταγράφηκε η τάση και ο χρόνος διάσπασης και κατασκευάστηκαν καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης για την αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι κυματομορφές που προσομοιώθηκαν είναι διπλεκθετικές με διάφορες διάρκειες μετώπου και ημίσεως εύρους, κυματομορφές πραγματικών κεραυνών και κυματομορφές CIGRE. Εφαρμόστηκαν σε τέσσερις τυπικούς αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 66 kV, 150 kV, 400 kV και 735 kV. Οι μονωτήρες διαφέρουν σε μήκος και επίπεδο μόνωσης καλύπτοντας το εύρος των τυπικών τιμών που υπάρχει στην πράξη.

Οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης, ή αλλιώς καμπύλες $V-t$, αντιστοιχούν είτε στη μέγιστη τάση πριν τη διάσπαση της μόνωσης είτε στη στιγμιαία τάση διάσπασης σε σχέση πάντα με τον χρόνο διάσπασης της μόνωσης. Ο ορισμός με τη μέγιστη τάση είναι ο πιο κοινός.

Για κυματομορφές τάσης καταπόνησης που διατηρούν σταθερή μορφή και δεν έχουν απότομες αυξομειώσεις στο μέτωπο και στην ουρά, οι καμπύλες $V-t$ μειώνονται αρχικά απότομα σε σχέση με την τάση διάσπασης (συνθήκες υπέρτασης, πιθανότητα διάσπασης μεγαλύτερη του 100%) και, στη συνέχεια, με πιο αργό ρυθμό σε μεγαλύτερους χρόνους διάσπασης μέχρι να καταλήξουν στο CFO (50% τάση διάσπασης). Σε αυτή την κατηγορία κυματομορφών ανήκουν οι διπλεκθετικές. Αντίθετα όταν οι κυματομορφές τάσης καταπόνησης έχουν έντονες αυξομειώσεις στο μέτωπο ή στην ουρά τότε παρατηρούνται στις καμπύλες $V-t$ τοπικά ακρότατα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι κυματομορφές CIGRE και οι πραγματικές κυματομορφές. Στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης των κυματομορφών CIGRE παρατηρείται ένα σχετικά έντονο τοπικό μέγιστο στις καμπύλες. Η κορυφή αυτή γίνεται πιο μεγάλη στις γρηγορότερες κυματομορφές.

Οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης που κατασκευάστηκαν με διπλεκθετικές κυματομορφές με διαφορετικές διάρκειες μετώπου, συγκλίνουν στους μικρούς και μεγάλους χρόνους διάσπασης, δηλαδή όταν υφίστανται συνθήκες υπέρτασης και κοντά στο CFO. Στο ενδιάμεσο τμήμα μεγαλύτεροι χρόνοι μετώπου αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τάσεις διάσπασης (για τον ίδιο χρόνο διάσπασης). Επομένως η διάσπαση είναι πιο δύσκολη για μεγαλύτερους χρόνους μετώπου.

Όσον αφορά την επίδραση της ουράς στις διπλεκθετικές κυματομορφές, οι καμπύλες συμπίπτουν στους μικρούς χρόνους διάσπασης (υπέρταση), διότι τα μέτωπά τους είναι ίδια. Στο δεξί άκρο, δηλαδή κοντά στο CFO, οι καμπύλες $V-t$ που αντιστοιχούν σε γρηγορότερες ουρές τελειώνουν νωρίτερα. Συνεπώς δεν συμβαίνει διάσπαση σε μεγάλους χρόνους ενώ απαιτούν μεγαλύτερη μέγιστη τάση διάσπασης, αλλά αντιστοιχούν σε μικρότερη στιγμιαία τάση διάσπασης λόγω της πιο απότομης μείωσης της τάσης καταπόνησης στην ουρά.

Οι κυματομορφές CIGRE παρουσιάζουν αλλαγή κλίσης στο μέτωπο (στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω). Έτσι, εμφανίζεται ένα τοπικό μέγιστο (αιχμή) στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης. Αυτό είναι πιο έντονο και εμφανίζεται νωρίτερα για μικρά μέτωπα. Και πάλι οι καμπύλες $V-t$ συγκλίνουν στους μικρούς και μεγάλους χρόνους διάσπασης, όπως και στις διπλεκθετικές κυματομορφές. Άλλωστε η ουρά τους περιγράφεται από μία διπλεκθετική εξίσωση. Στους ενδιάμεσους χρόνους πιο αργά μέτωπα κυματομορφών CIGRE έχουν ως αποτέλεσμα δυσκολότερη διάσπαση, όπως και στις διπλεκθετικές κυματομορφές και πάλι.

Γενικά οι κυματομορφές CIGRE οδηγούν σε υψηλότερες τάσεις διάσπασης σε μεσαίους χρόνους σε σύγκριση με τις διπλεκθετικές κυματομορφές με παρόμοιες διάρκειες. Παρόλα αυτά, οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης συγκλίνουν σε μικρούς (συνθήκες υπέρτασης) και μεγάλους χρόνους (κοντά στο CFO).

Η χρήση της αναπαράστασης των πραγματικών κυματομορφών με κυματομορφές CIGRE, πρακτική που εφαρμόζεται διεθνώς στις προσομοιώσεις, φαίνεται να δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα σε γενικές γραμμές. Οι καμπύλες $V-t$ των πραγματικών κυματομορφών εμφανίζουν αυξομειώσεις και πάνω από ένα τοπικά ακρότατα λόγω των έντονων μεταβολών των εφαρμοζόμενων τάσεων.

Επιπλέον, είναι πολύ σημαντικό να επισημανθεί ότι για μία κυματομορφή, βρέθηκε ότι οι κανονικοποιημένες καμπύλες $V-t$ των μονωτήρων διαφορετικού μήκους έχουν την ίδια μορφή. Συνεπώς, η επίδραση της κυματομορφής παραμένει σταθερή σε όλους τους μονωτήρες, ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά μήκους και επιπέδου μόνωσης.

Τέλος, είναι σημαντικό ότι παρόμοια ποιοτικά συμπεράσματα προέκυψαν και από προηγούμενη διπλωματική εργασία [18], η οποία αφορά προσομοιώσεις για τους ίδιους μονωτήρες αυτή τη φορά με τη μέθοδο ολοκλήρωσης. Ωστόσο, ποσοτικά (τιμές τάσης και χρόνου διάσπασης) τα αποτελέσματα διαφέρουν. Αυτό έχει να κάνει με τις διαφορές των μεθόδων και των παραμέτρων που επιλέχθηκαν.

Βιβλιογραφία

- [1] Ζ. Δάτσιος, Διερεύνηση του φαινομένου ιονισμού του εδάφους γύρω από συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης: Επίδραση στην κεραυνική συμπεριφορά γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2017.
- [2] Z. Datsios, P. Mikropoulos, T. Tsovilis, "Estimation of the minimum shielding failure flashover current for first and subsequent lightning strokes to overhead transmission lines," Electric Power Systems Research, 113, 141-150, 2014.
- [3] M. Darveniza, F. Popolansky, E. Whitehead, "Lightning protection of UHV lines," Electra, vol. 41, pp. 39-69, 1975.
- [4] IEEE WG on Lightning Performance of Transmission Lines, "A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932, 1985.
- [5] IEEE WG on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, "Estimating lightning performance of transmission lines II-Updates to analytical models," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267, 1993.
- [6] R. Witzke, T. Bliss, "Surge protection of cable-connected equipment," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 69, no. 1, pp. 527-542, 1950.
- [7] R. Witzke, T. Bliss, "Co-ordination of lightning arrester location with transformer insulation level," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 69, no. 2, pp. 964-975, 1950.
- [8] M. Darveniza, A. Vlastos, "The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard wave shapes-A theoretical basis," IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 23, no. 3, pp. 373-381, 1988.
- [9] C. Wagner, A. Hileman, "Mechanism of breakdown of laboratory gaps," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers-Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 80, no. 3, pp. 604-618, 1961.
- [10] T. Shindo, T. Suzuki, "A new calculation method of breakdown voltage-time characteristics of long air gaps," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 6, pp. 1556-1563, 1985.

- [11] CIGRE WG 33.01, Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission lines, Technical Brochure 63, 1991.
- [12] A. Pignini, G. Rizzi, E. Garbagnati, A. Porrino, G. Baldo, G. Pesavento, "Performance of large air gaps under lightning overvoltages: Experimental study and analysis of accuracy of predetermination methods," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1379-1392, 1989.
- [13] H. Motoyama, "Experimental study and analysis of breakdown characteristics of long air gaps with short tail lightning impulse," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, pp. 972-979, 1996.
- [14] X. Wang, Z. Yu, J. He, "Breakdown process experiments of 110- to 500-kV insulator strings under short tail lightning impulse," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 5, pp. 2394-2401, 2014.
- [15] Π. Μικρόπουλος, *Εργαστηριακές ασκήσεις στην τεχνολογία των υψηλών τάσεων*, Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2008.
- [16] A. De Conti, S. Visacro, "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 49, no. 2, pp. 448-451, 2007.
- [17] Z. Datsios, D. Patsalis, P. Mikropoulos, T. Tsovilis, "Effects of approximating recorded lightning currents with CIGRE waveforms on computed fast-front overvoltages and critical lightning currents causing flashover to overhead transmission lines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 5, pp. 3084-3094, 2023.
- [18] Γ. Μουλαριτζής, *Διερεύνηση της επίδρασης της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης τάσης στη διάσπαση μονωτήρων μεγάλου μήκους μέσω προσομοιώσεων με τη μέθοδο ολοκλήρωσης*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2023.