



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 ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΟΥΛΑΡΤΖΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Επιβλέπων: ΔΑΤΣΙΟΣ ΖΑΧΑΡΙΑΣ

Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

ΚΟΖΑΝΗ/ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ/2023

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 THE INTEGRATION METHOD

THESIS

MOULARTZIS GEORGIOS

SUPERVISOR: Zacharias Datsios

Adjunct Lecturer

KOZANI/OCTOBER/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



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

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο " Διερεύνηση της επίδρασης της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης τάσης στη διάσπαση μονωτήρων μεγάλου μήκους μέσω προσομοιώσεων με τη μέθοδο ολοκλήρωσης" 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) Γεώργιος Μουλαρτζής, Ζαχαρίας Δάτσιος, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Γεώργιος Μουλαρτζής

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

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 που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι κυματομορφές οι οποίες θα προσομοιωθούν είναι οι διπλεκθετικές με διαφορετικές τιμές διάρκειας μετώπου και ημίσεος εύρους (ουράς), αλλά και οι κυματομορφές CIGRE. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακές δοκιμές ενώ οι δεύτερες προσομοιώνουν κυματομορφές κεραυνικών ρευμάτων. Η πρόβλεψη της διάσπασης μέσω προσομοίωσης θα επαναληφθεί για τέσσερις διαφορετικούς τυπικούς αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης των 66 kV, 150 kV, 400 kV και 735 kV, οι οποίοι αποτελούνται από αλυσίδες κεραμικών μονωτήρων συνδεδεμένων μεταξύ τους. Η επιλογή τους έγινε ώστε οι μονωτήρες να είναι διαφορετικού μήκους και βασικού επιπέδου μόνωσης. Οι προσομοιώσεις αυτές θα οδηγήσουν στον σχηματισμό καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης ώστε να προκύψουν γενικά συμπεράσματα. Η παραπάνω διερεύνηση θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP και τη χρήση της μεθόδου ολοκλήρωσης, μιας από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται σε μελέτες συντονισμού μονώσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Λέξεις Κλειδιά

Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Επιφανειακή διάσπαση

Κεραυνικές υπερτάσεις

Μέθοδος ολοκλήρωσης

Μονωτήρες

Abstract

The prediction of electrical breakdown of large air gaps and long insulators when subjected to high impulse voltages or/and lightning overvoltages of non-standard waveforms is particularly important for studies on the insulation coordination of power systems. The aim of this thesis is to investigate the effect of the waveform of the applied voltage on the breakdown voltage and breakdown time of long insulators used in the transmission system. More specifically, the waveforms to be simulated include double exponential waveforms with different wavefront and wavetail times, as well as CIGRE waveforms. The former are employed in laboratory tests and the latter simulate lightning current waveforms. The simulation of breakdown prediction will be repeated for four different insulator strings rated at 66 kV, 150 kV, 400 kV, and 735 kV; these are composed of a cascade connection of ceramic insulators. These insulators were selected to have different lengths and basic insulation level. These simulations will result in the formation of voltage-time breakdown curves to draw general conclusions. The above investigation will be carried out with the assistance of the ATP-EMTP software and the use of the integration method. The latter is one of the most widespread methods employed for the prediction of insulation breakdown in insulation coordination studies for power systems.

Keywords

Flashover

Insulators

Integration method

Lightning overvoltages

Transmission lines

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δάτσιο Ζαχαρία, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή του και τη συνεχή του υποστήριξη.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία στήριξε τις σπουδές μου και έδειξε συμπαράσταση και υπομονή καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησής της.

ΚΟΖΑΝΗ/ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ/2023

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	19
1.1 Γενικά στοιχεία	19
1.2 Μέθοδοι/Μοντέλα εκτίμησης της κρουστικής συμπεριφοράς μονώσεων εναέριων γραμμών μεταφοράς	21
1.2.1 Μέθοδος ολοκλήρωσης	21
1.2.2 Σύγκριση με κάποια χαρακτηριστική τιμή	22
1.2.3 Καμπύλες τάσης χρόνου διάσπασης	22
1.2.4 Μοντέλα προόδου του Λήντερ	24
1.3 Στόχος της διπλωματικής εργασίας	25
Κεφάλαιο 2: Περιπτώσεις και παράμετροι προσομοίωσης	27
2.1 Κυματομορφές	27
2.1.1 Διπλεκθετική κυματομορφή	27
2.1.2 Κυματομορφή CIGRE	28
2.1.3 Κυματομορφές με δύο κορυφές	29
2.1.4 Πραγματικές κυματομορφές κεραυνικών υπερτάσεων	30
2.2 Κυματομορφές που προσομοιώθηκαν	31
2.3 Μονωτήρες γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	34

Κεφάλαιο 3: Διπλεκθετική κυματομορφή	37
3.1 Επίδραση του μετώπου	39
3.2 Επίδραση της ουράς	46
Κεφάλαιο 4: Κυματομορφή CIGRE	53
4.1 Επίδραση της κυματομορφής	54
4.2 Σύγκριση διπλεκθετικών κυματομορφών με κυματομορφές CIGRE	60
Κεφάλαιο 5: Πραγματικές κυματομορφές	63
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	69
Βιβλιογραφία	71

Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα 1.1: Ο ορισμός των καμπυλών τάσης χρόνου τόσο για εργαστηριακές δοκιμές όσο και για προσομοιώσεις [4]. 20
- Σχήμα 1.2: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης αλυσοειδών μονωτήρων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (1.2/50 μ s) σύμφωνα με τις σχέσεις (1.1) και (1.2). Τα αποτελέσματα είναι κανονικοποιημένα ανά μονάδα μήκους του μονωτήρα (CFO/D=430 kV/m) [1]. 24
- Σχήμα 2.1: Παραγωγή κρουστικών υψηλών τάσεων, U_p (τάση κορυφής), T_{cr} (διάρκεια μετώπου), $a_2 \gg a_1$ [5]. 27
- Σχήμα 2.2: Γενική σχέση διπλεκθετικής συνάρτησης $U(t)=U_1(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t})$, $\alpha < \beta$ [6]. 28
- Σχήμα 2.3: Τυπικές κυματομορφές για αρνητικούς κατερχόμενους κεραυνούς με την χρήση της κυματομορφής CIGRE [7]. 29
- Σχήμα 2.4: Παράδειγμα σύγκρισης δύο κυματομορφών με μία και δύο κορυφές [8]. 29
- Σχήμα 2.5: Πραγματικές κυματομορφές κεραυνικών ρευμάτων και προσεγγίσεις CIGRE [9]. 30
- Σχήμα 2.6: Γραφική αναπαράσταση των διπλεκθετικών κυματομορφών 0.5/50 μ s (σκούρο μπλε), 1.2/50 μ s (κόκκινο), 5/50 μ s (πράσινο), 10/50 μ s (μπλε ανοιχτό) με κοινή τιμή κορυφής. (Διερεύνηση επίδρασης μετώπου.) 32
- Σχήμα 2.7: Γραφική αναπαράσταση των διπλεκθετικών κυματομορφών 1.2/5 μ s (καφέ), 1.2/30 μ s (σκούρο μπλε), 1.2/50 μ s (πράσινο), 1.2/70 μ s (κόκκινο), 1.2/200 μ s (μπλε ανοιχτό). (Διερεύνηση επίδρασης ουράς.) 33
- Σχήμα 2.8: Γραφική αναπαράσταση των κυματομορφών CIGRE 2.4/77.5 μ s (κόκκινο), 3.67/77.5 μ s (σκούρο μπλε), 4.52/77.5 μ s (πράσινο), 6.01/77.5 μ s (καφέ), 8/77.5 μ s (μπλε ανοιχτό). 33
- Σχήμα 2.9: Αλυσοειδής μονωτήρας ανάρτησης με N κεραμικούς δισκοειδής μονωτήρες και αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα [6]. 34
- Σχήμα 3.1: Προσομοίωση διάσπασής μονωτήρα 150 kV με διάσπαση στο μέτωπο. 37
- Σχήμα 3.2: Προσομοίωση διάσπασής μονωτήρα 150 kV με διάσπαση στην ουρά. 37
- Σχήμα 3.3: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης διπλεκθετικής κυματομορφής και με τους δύο ορισμούς. Τυπικά αποτελέσματα για μονωτήρα 150 kV. 38
- Σχήμα 3.4: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση. Επίδραση διάρκειας μετώπου. 40
- Σχήμα 3.5: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση. Επίδραση διάρκειας μετώπου. 41
- Σχήμα 3.6: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Επίδραση της διάρκειας μετώπου. 42
- Σχήμα 3.7: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Επίδραση διάρκειας μετώπου. 43

Σχήμα 3.8: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για κάθε τιμή διάρκειας μετώπου που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή.	45
Σχήμα 3.9: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση. Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς).	47
Σχήμα 3.10: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση. Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς).	48
Σχήμα 3.11: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς).	50
Σχήμα 3.12: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς).	51
Σχήμα 3.13: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης των μονωτήρων για κάθε τιμή διάρκειας ουράς που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή	52
Σχήμα 4.1: Προσομοίωση διάσπασης μονωτήρα 400 kV με κυματομορφή CIGRE.	53
Σχήμα 4.2: Παράδειγμα καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης κυματομορφής CIGRE.	53
Σχήμα 4.3: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση. Κυματομορφή CIGRE.	55
Σχήμα 4.4: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρα για τη στιγμιαία τάση. Κυματομορφή CIGRE.	56
Σχήμα 4.5: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Κυματομορφή CIGRE.	57
Σχήμα 4.6: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Κυματομορφή CIGRE.	58
Σχήμα 4.7: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης των μονωτήρων για κάθε τιμή διάρκειας ουράς που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή. Κυματομορφή CIGRE.	59
Σχήμα 4.8: Σύγκριση γραφημάτων διπλεκθετικής 5/50 μs και CIGRE 4.52/77.5 μs με ορισμό μέγιστης τάσης.	61
Σχήμα 4.9: Σύγκριση γραφημάτων διπλεκθετικής 10/50 μs και CIGRE 8/77.5 μs με ορισμό μέγιστης τάσης.	62
Σχήμα 5.1: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W1 με την αναπαράστασή της σε CIGRE με ορισμό μέγιστης τάσης.	64
Σχήμα 5.2: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W1 με την αναπαράστασή της σε CIGRE με ορισμό στιγμιαίας τάσης.	65
Σχήμα 5.3: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W3 με την αναπαράστασή της σε CIGRE με ορισμό μέγιστης τάσης.	66
Σχήμα 5.4: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W3 με την αναπαράστασή της σε CIGRE με ορισμό στιγμιαίας τάσης.	67

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τα στοιχεία των κυματομορφών που χρησιμοποιήθηκαν στη διερεύνηση. 32

Πίνακας 2.2: Πίνακας με το βασικό επίπεδο μόνωσης και το μήκος του μονωτήρα ανάλογα την τάση της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τους μονωτήρες που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή. 35

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Πρόλογος

Το θέμα το οποίο διερευνά η συγκεκριμένη διπλωματική έχει να κάνει με τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα με τη μόνωσή τους. Στόχος της εργασίας είναι η πρόβλεψη των ηλεκτρικών διασπάσεων μονωτήρων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω λογισμικών όπως το ATP-EMTP που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την μελέτη. Η διπλωματική αναμένεται να συμβάλει στον συντονισμό μονώσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνοντας την αξιοπιστία τους ώστε να μπορεί το ηλεκτρικό ρεύμα να φτάνει αδιάλειπτα σε κάθε νοικοκυριό και βιομηχανία στα οποία έχει γίνει απαραίτητο. Η πρόβλεψη της ηλεκτρικής διάσπασης μονώσεων μέσω προσομοιώσεων μειώνει επίσης το κόστος σχεδίασης συστημάτων μόνωσης καθώς απαιτούνται λιγότερες εργαστηριακές δοκιμές.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

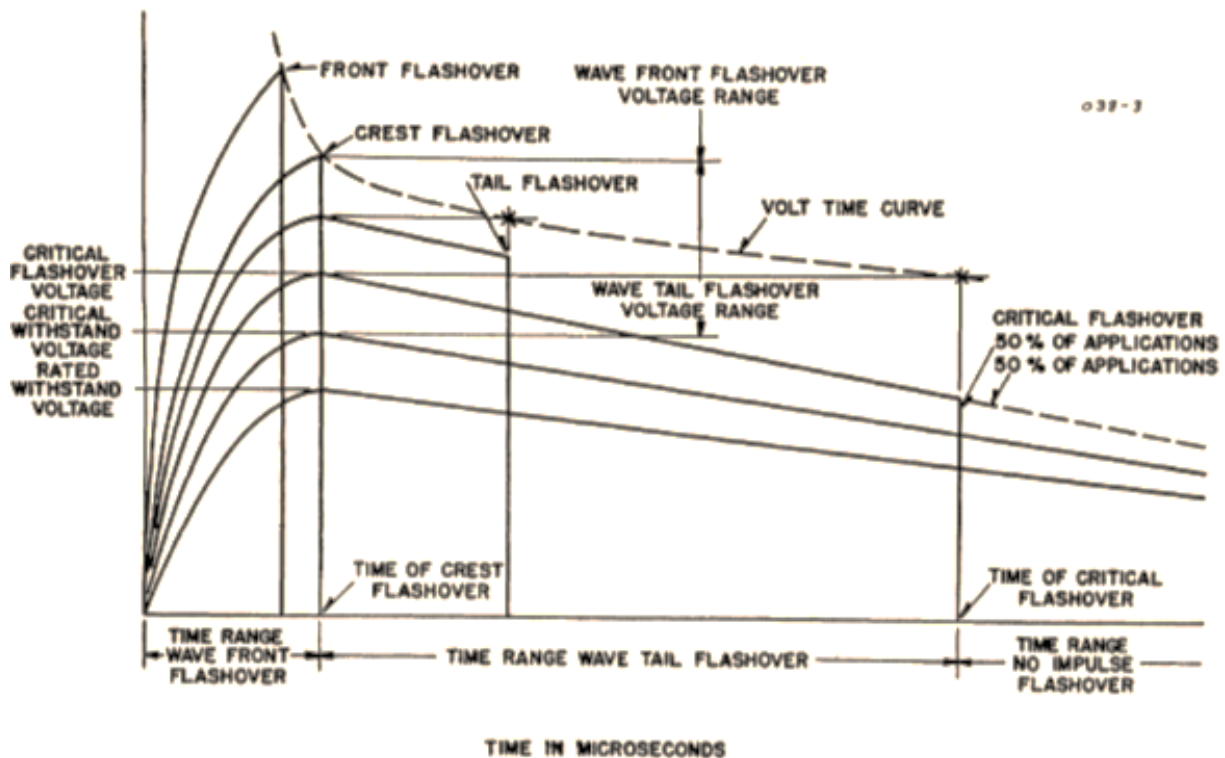
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται κάποια γενικά στοιχεία για την πρόβλεψη της τάσης και του χρόνου διάσπασης της μόνωσης των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα, αναφέρονται πληροφορίες για τις μεθόδους/μοντέλα που εφαρμόζονται για την εκτίμηση της κρουστικής συμπεριφοράς μονώσεων εναέριων γραμμών μεταφοράς, με έμφαση στη μέθοδο ολοκλήρωσης, καθώς και ο στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας. Το κεφάλαιο αυτό προέκυψε βάσει των αναφορών [1]–[3].

1.1 Γενικά στοιχεία

Τα πλήγματα κεραυνού, είτε άμεσα είτε έμμεσα, αποτελούν μια από τις κύριες αιτίες προβλημάτων στα ηλεκτρικά συστήματα. Η επίπτωση του κεραυνικού ρεύματος είναι υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου (fast-front overvoltages, FFO) οι οποίες με την σειρά τους οδηγούν σε καταστροφές στον εξοπλισμό, διακοπές στην ηλεκτροδότηση και φυσικά οικονομικές απώλειες. Η εκτίμηση της συμπεριφοράς της μόνωσης εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όταν σε αυτή εφαρμόζονται υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου είναι καίριας σημασίας για την πρόβλεψη της κεραυνικής συμπεριφοράς και τον συντονισμό τόσο των μονώσεων των εναέριων γραμμών μεταφοράς, όσο και των υποσταθμών του συστήματος. Για κάθε μονωτήρα και γενικά κάθε είδος αυτεπανορθούμενης μόνωσης μπορεί να κατασκευαστεί μια καμπύλη $V-t$. Η καμπύλη $V-t$ ή τάσης-χρόνου διάσπασης, όπως λέγεται, συσχετίζει τη μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στο διάκενο/μονωτήρα προτού συμβεί διάσπαση με τον χρόνο διάσπασης. Άρα συσχετίζει τάσεις και χρόνους που:

1. Συμπίπτουν χρονικά για τις διασπάσεις που γίνονται στο μέτωπο της εφαρμοζόμενης τάσης (αύξηση από το μηδέν έως το μέγιστο), πριν δηλαδή η τάση φτάσει στη μέγιστη τιμή της
2. Δεν συμπίπτουν χρονικά για τις διασπάσεις που γίνονται στην ουρά (μείωση κυματομορφής προς το μηδέν) της εφαρμοζόμενης τάσης, καθώς η στιγμιαία τάση διάσπασης είναι πάντα μικρότερη από τη μέγιστη

Συνεπώς όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, το αριστερό απότομο τμήμα της καμπύλης αντιστοιχεί στην πρώτη περίπτωση και το δεξί σχετικά επίπεδο τμήμα αντιστοιχεί στην δεύτερη περίπτωση. Το αριστερό τμήμα αναφέρεται σε συνθήκες υπέρτασης στις οποίες γίνεται πάντα διάσπαση όσες φορές και αν εφαρμοστεί η τάση ενώ το δεξί τμήμα σε πιθανότητες διάσπασης κοντά στο 0.5.



Σχήμα 1.1: Ο ορισμός των καμπυλών τάσης χρόνου τόσο για εργαστηριακές δοκιμές όσο και για προσομοιώσεις [4].

Οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της συμπεριφοράς των αυτεπανορθούμενων μονώσεων, όπως οι μονωτήρες γραμμών μεταφοράς, όταν καταπονούνται με εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις.

Για την πρόβλεψη της τάσης και του χρόνου διάσπασης της μόνωσης των γραμμών χρησιμοποιούνται ευρέως 4 μέθοδοι/μοντέλα που αναφέρονται παρακάτω. Η πρόβλεψη αυτή είναι απαραίτητη όταν πρέπει να γίνει εκτίμηση αποτελέσματος καταπόνησης με κυματομορφές τάσεων που διαφέρουν από αυτές που έχουν χρησιμοποιηθεί σε δοκιμές. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα στις μελέτες συντονισμού μονώσεων. Οι μέθοδοι πρόβλεψης είναι:

- Μέθοδος ολοκλήρωσης, που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή.
- Σύγκριση της αναπτυσσόμενης υπέρτασης με το βασικό επίπεδο μόνωσης, BIL (Basic Insulation level), ή με το 50% της τάσης διάσπασης CFO (Critical Flashover Voltage, τιμή στα δεξιά των καμπυλών V-t) της μόνωσης της γραμμής.
- Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης, όπως έχουν προκύψει από πειράματα.
- Μοντέλα προόδου του λήντερ (leader progression or development models).

1.2 Μέθοδοι/Μοντέλα εκτίμησης της κρουστικής συμπεριφοράς μονώσεων εναέριων γραμμών μεταφοράς

1.2.1 Μέθοδος ολοκλήρωσης

Η μέθοδος ολοκλήρωσης (integration method), επίσης γνωστή και ως δείκτης δριμύτητας ή μέθοδος επίδρασης καταπόνησης, χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως μια προσέγγιση για την αξιολόγηση του πως οι μετασχηματιστές ισχύος επηρεάζονται από υπερτάσεις κεραυνικής προέλευσης που έχουν μη κανονική κυματομορφή, υπό την οποία δεν υπήρχαν στοιχεία από εργαστηριακά πειράματα. Στην συνέχεια η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε σε πειραματικά αποτελέσματα διασπάσεων διακένων αέρα ακίδας-ακίδας. Πλέον, η μέθοδος ολοκλήρωσης χρησιμοποιείται για να προβλέψει τον τρόπο αντίδρασης μονώσεων αέριας, υγρής ή στερεάς μορφής κατά τη διάρκεια επίδρασης υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου που έχουν μη κανονική κυματομορφή, με βάση πειραματικά αποτελέσματα υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ένα εργαστήριο (κυματομορφή 1.2/50 μs). Βάσει της μεθόδου ολοκλήρωσης, όταν η στιγμιαία τιμή της τάσης καταπόνησης υπερβεί μια τιμή τάσης U_{th} , τότε ταυτόχρονα ξεκινάει η διαδικασία της ηλεκτρικής διάσπαση της μόνωσης. Οι τιμές της τάσης αλλά και το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η τάση υπερβαίνει την U_{th} , επηρεάζουν άμεσα την εξέλιξη της διαδικασίας και την πιθανή ηλεκτρική διάσπαση της μόνωσης. Η γενική σχέση που περιγράφει την μέθοδο ολοκλήρωσης είναι:

$$DE = \int_{t_0}^t (U - U_{th})^k dt \quad (1.1)$$

Στην παραπάνω σχέση με DE εκφράζεται η καταπόνηση που προξενεί η στιγμιαία τιμή της τάσης U στη μόνωση, t_0 η χρονική στιγμή κατά την οποία η U ξεπερνάει την τιμή τάσης U_{th} , t ο χρόνος από την στιγμή εφαρμογής της τάσης και k ένας συντελεστής η τιμή του οποίου εξαρτάται από τον διαφορετικό βαθμό επίδρασης των της τάσης και της διάρκειάς της στη DE. Σύμφωνα με τη μέθοδο ολοκλήρωσης, μόλις το μαθηματικό ολοκλήρωμα της παραπάνω σχέσης (στιγμιαία τιμή DE) ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή καταπόνησης DE^* , τότε άμεσα συμβαίνει το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάσπασης. Για κάποια συγκεκριμένη μόνωση, είναι δυνατόν μέσω της βέλτιστης προσέγγισης πειραματικών καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις, να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων DE^* , u_{th} και k .

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου ολοκλήρωσης γίνεται αντιληπτό πως ένα μεγάλο ελάττωμα είναι η διαδικασία εύρεσης των ιδανικών τιμών της σχέσης (1.1), η οποία ορισμένες φορές επιτυγχάνεται μέσω διαδικασίας δοκιμών. Λόγω αυτού του προβλήματος εφαρμόζονται προσεγγίσεις κατά τις οποίες, είτε θεωρείται $U_{th} = 0$ και κατά συνέπεια $t_0 = 0$, είτε $k = 1$.

Επιπλέον η μέθοδος ολοκλήρωσης, εφόσον είναι εμπειρική, δεν έχει καμία άμεση σχέση με τον μηχανισμό της ηλεκτρικής διάσπασης.

Ανεξαρτήτως των μειονεκτημάτων, η μέθοδος ολοκλήρωσης εφαρμόζεται με επαρκή επιτυχία για την εκτίμηση της κρουστικής συμπεριφοράς μονώσεων υπό μη κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Για να επιτευχθεί ωστόσο αυτό απαιτείται η εύρεση κατάλληλων παραμέτρων με την χρήση πειραματικών δεδομένων παρόμοιας γεωμετρίας με αυτή που μελετάται. Σε περίπτωση που δεν εφαρμοστεί κάτι τέτοιο υπάρχει κίνδυνος λάθους μέχρι 20-30% ή και περισσότερο. Περεταίρω, έχει βρεθεί ότι η κυματομορφή της κρουστικής υψηλής τάσης επηρεάζει τις παραμέτρους της μεθόδου ολοκλήρωσης σε κάποιο βαθμό. Πάντως σήμερα είναι μια από τις πιο πολύ χρησιμοποιούμενες μεθόδους και έτσι θα υιοθετηθεί και στην εδώ εργασία.

1.2.2 Σύγκριση με κάποια χαρακτηριστική τιμή

Η σύγκριση της αναπτυσσόμενης υπέρτασης με κάποια χαρακτηριστική τιμή, όπως την 50% τάση διάσπασης της μόνωσης της γραμμής (CFO), ή το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL) αποτελεί τον γρηγορότερο και ευκολότερο τρόπο πρόβλεψης της τάσης και του χρόνου διάσπασης της μόνωσης της γραμμής. Όταν η τιμή της υπέρτασης ξεπεράσει την χαρακτηριστική τιμή θεωρείται ότι έγινε διάσπαση. Πάραυτα, με τη μέθοδο αυτή δεν δίνεται η απαιτούμενη σημασία στη χαρακτηριστική τάσης-χρόνου διάσπασης της μόνωσης υπό εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Δηλαδή, η αύξηση της καμπύλης $V-t$ στους μικρούς χρόνους αγνοείται. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις για τις στιγμιαίες τάσης διάσπασης αλλά και τον χρόνο διάσπασής κατά την διάρκεια της υπέρτασης να είναι άστοχες. Αυτό την καθιστά ακατάλληλη για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της μόνωσης υπό υπερτάσεις μικρής διάρκειας μέτωπου με μη κανονική κυματομορφή, αλλά ακόμα και με κανονική κυματομορφή σε συνθήκες υπέρτασης.

1.2.3 Καμπύλες τάσης χρόνου διάσπασης

Η καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης ($V-t$, Σχήμα 1.1) αντιστοιχεί στη σχέση μεταξύ της μέγιστης τάσης που εφαρμόζεται στο σύστημα μόνωσης πριν την διάσπασή του και τον χρόνο διάσπασης. Όταν η διάσπαση πραγματοποιείται στην ουρά της κυματομορφής η καμπύλη $V-t$ σχετίζεται με την μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης και όχι με την στιγμιαία τάση διάσπασης. Κάθε καμπύλη $V-t$ αντιστοιχεί σε ένα μόνο διάκενο ή μονωτήρα και παραπέμπει στη συγκεκριμένη πολικότητα και κυματομορφή της εφαρμοζουσας κρουστικής υψηλής τάσης. Ένα μεγάλο μειονέκτημα των καμπυλών $V-t$ (ως μέθοδο πρόβλεψης της συμπεριφοράς της μόνωσης) είναι ότι δεν συμπεριλαμβάνονται σε αυτές, οι διασπορά των τιμών της τάσης και του χρόνου διάσπασης εφόσον οι ίδιες σχεδιάζονται με τις μέσες

τιμές ή ορισμένες φορές για μέγιστη ασφάλεια με τις ελάχιστες τιμές που λαμβάνονται πειραματικά.

Βάσει των καμπυλών τάσης-χρόνου ως μέθοδο πρόβλεψης όταν η στιγμιαία τάση κατά μήκος της μόνωσης γίνεται ίση ή ξεπεράσει την τάση διάσπασης U_{FO} , που υπολογίζεται από την πειραματική καμπύλη $V-t$, τότε προκύπτει η διάσπασή της. Σε μονωτήρες γραμμών μεταφοράς, αν δεν υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης της καμπύλης τους $V-t$ για τον υπολογισμό του U_{FO} , τότε είναι δυνατή η χρήση της καμπύλης κάποιου παρόμοιου μονωτήρα ή κάποια γενική σχέση όπως η παρακάτω (Σχήμα 1.2):

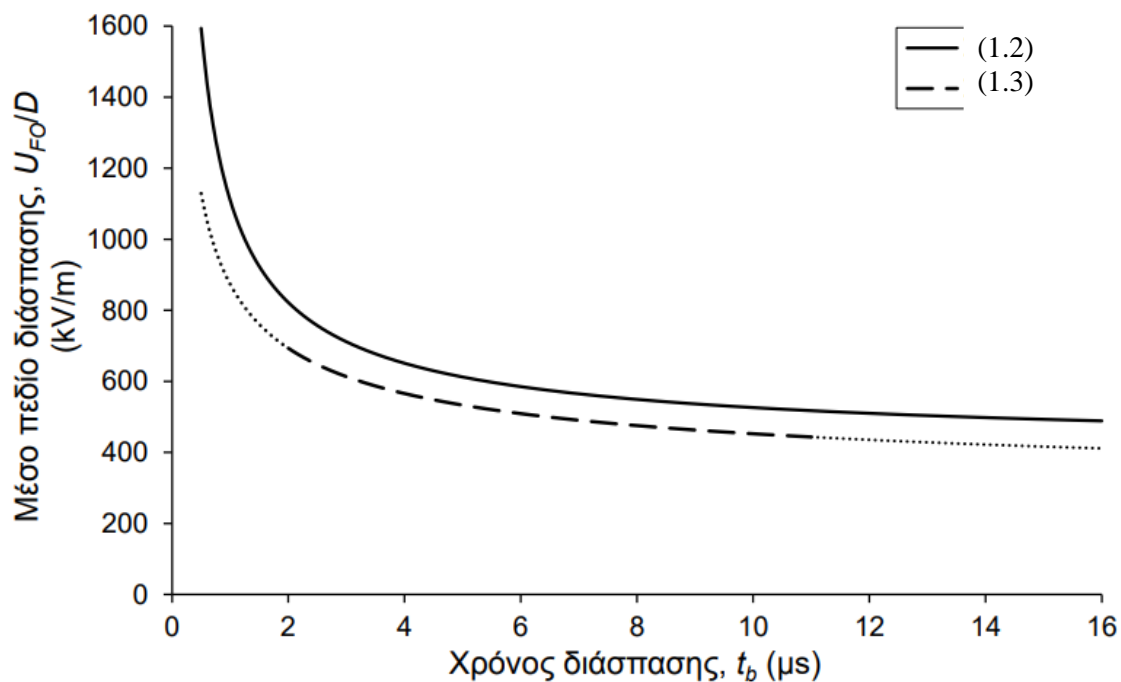
$$U_{FO} = \left(400 + \frac{710}{t_b^{0.75}} \right) \cdot D \quad (1.2)$$

όπου U_{FO} είναι η τάση διάσπασης, t_b ο χρόνος διάσπασης και D το μήκος του μονωτήρα. Η σχέση αυτή συχνά απαντάται με το όνομα καμπύλη τάσης-χρόνου CIGRE και προήλθε μέσω πειραμάτων σε αλυσίδες κεραμικών δισκοειδών μονωτήρων διαφορετικού μήκους υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις θετικής πολικότητας. Η παραπάνω σχέση έχει εφαρμογή και για χρόνους διάσπασης μικρότερους από 1 μs . Σε διαφορετική περίπτωση η U_{FO} υπολογίζεται αν είναι γνωστό το CFO (kV) του μονωτήρα από την σχέση (Σχήμα 1.2):

$$U_{FO} = \left(0.58 + \frac{1.39}{t_b^{0.5}} \right) \cdot CFO \quad (1.3)$$

Οι καμπύλες τάσης-χρόνου τις περισσότερες φορές προκύπτουν πειραματικά χρησιμοποιώντας κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (1.2/50 μs). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι εφικτά συμπεράσματα σχετικά με την αντίδραση της μόνωσης σε εφαρμογή υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου με μη κανονική κυματομορφή. Σε περιπτώσεις που προκύπτει διάσπαση στο μέτωπο της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης, για τη δημιουργία της καμπύλης $V-t$ χρησιμοποιείται η τιμή τάσης την χρονική στιγμή που συμβαίνει η διάσπαση. Αντιθέτως, όταν η διάσπαση γίνεται στην ουρά της κυματομορφής, η οποία συμβαίνει σπανιότερα (σε μικρότερες πιθανότητες διάσπασης), η καμπύλη $V-t$ συνδέει το εύρος της τάσης με τον χρόνο διάσπασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αντιστοιχίζονται τιμές τάσης και χρόνου, οι οποίες δεν ανήκουν στην ίδια χρονική στιγμή. Κάτι τέτοιο οδηγεί σε σφάλμα στον υπολογισμό της τάσης και του χρόνου διάσπασης.

Σημειώνεται ότι υπάρχει και εναλλακτικός ορισμός λιγότερο συχνά χρησιμοποιούμενος για τις καμπύλες τάσης-χρόνου, σύμφωνα με τον οποίο χρησιμοποιείται η στιγμιαία τάση διάσπασης και όχι η μέγιστη. Στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιηθούν και οι δύο ορισμοί.



Σχήμα 1.2: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης αλυσοειδών μονωτήρων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (1.2/50 μs) σύμφωνα με τις σχέσεις (1.1) και (1.2). Τα αποτελέσματα είναι κανονικοποιημένα ανά μονάδα μήκους του μονωτήρα ($CFO/D=430$ kV/m) [1].

1.2.4 Μοντέλα προόδου του λήντερ

Τα μοντέλα προόδου του λήντερ προέκυψαν από τον μηχανισμό διάσπασης μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων υπό εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Το πρώτο μοντέλο παρουσιάστηκε το 1954 στη βάση εργαστηριακών πειραμάτων σε μεγάλα διάκενά αέρα ακίδας-πλάκας με τάση θετικής πολικότητας. Από τότε έως και σήμερα, πολλά μοντέλα προόδου του λήντερ έχουν παρουσιασθεί για μεγάλα διάκενα αέρα ακίδας-πλάκας, ακίδας-ακίδας, μέχρι και για μονωτήρες υπό κανονικές και μη κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις τόσο θετικής όσο και αρνητικής πολικότητας. Σύμφωνα με τα μοντέλα προόδου του λήντερ η διάσπαση μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων διαχωρίζονται σε τρεις φάσεις, οι οποίες είναι η έναυση της αρχικής κορώνας, η ανάπτυξη των νηματίων και η ανάπτυξη του λήντερ. Η τελευταία φάση καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη χρονική διάρκεια και περιγράφεται από μία εξίσωση ταχύτητας του λήντερ, γι' αυτό και τα μοντέλα αυτά ονομάζονται έτσι. Σημειώνεται ότι είναι πιο απαιτητικά από πλευράς υλοποίησης σε λογισμικά μεταβατικών φαινομένων σε σχέση με τη μέθοδο ολοκλήρωσης.

1.3 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Λαμβάνοντας κανείς υπόψιν όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται εύκολα κατανοητό πως το αντικείμενο αυτό είναι ακόμα αντικείμενο έρευνας μιας και υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι/μοντέλα πρόβλεψης που δίνουν διαφορές στα αποτελέσματά τους (τάση και χρόνος διάσπασης). Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα του μηχανισμού της ηλεκτρικής διάσπασης των μονώσεων. Η επίδραση της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης τάσης στα αποτελέσματα της πρόβλεψης (τάση και χρόνος διάσπασης) έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι με την χρήση της μεθόδου ολοκλήρωσης, να γίνει εκτίμηση της επίδρασης της διάρκειας μετώπου, της διάρκειας ημίσεος εύρους, της μορφής της κυματομορφής και στην πρόβλεψη της διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους, που χρησιμοποιούνται σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη βοήθεια του λογισμικού μεταβατικών φαινομένων ATP-EMTP θα γίνει η προσομοίωση μονωτήρων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και μήκη καθώς και υπό διάφορες κυματομορφές κρουστικών υψηλών τάσεων και υπερτάσεων έχοντας ως στόχο την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 2: Περιπτώσεις και παράμετροι προσομοίωσης

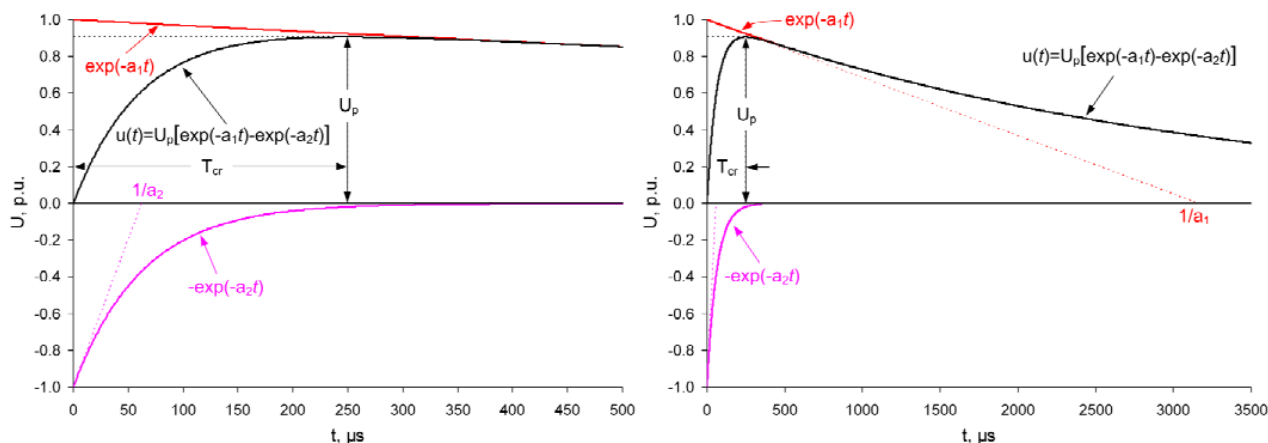
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα είδη των κυματομορφών και ποιες από αυτές χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν. Επιπλέον, σημειώνονται κάποια στοιχεία για τη λειτουργία των μονωτήρων και τα χαρακτηριστικά τους, και παρουσιάζονται οι μονωτήρες που θα μελετηθούν.

2.1 Κυματομορφές

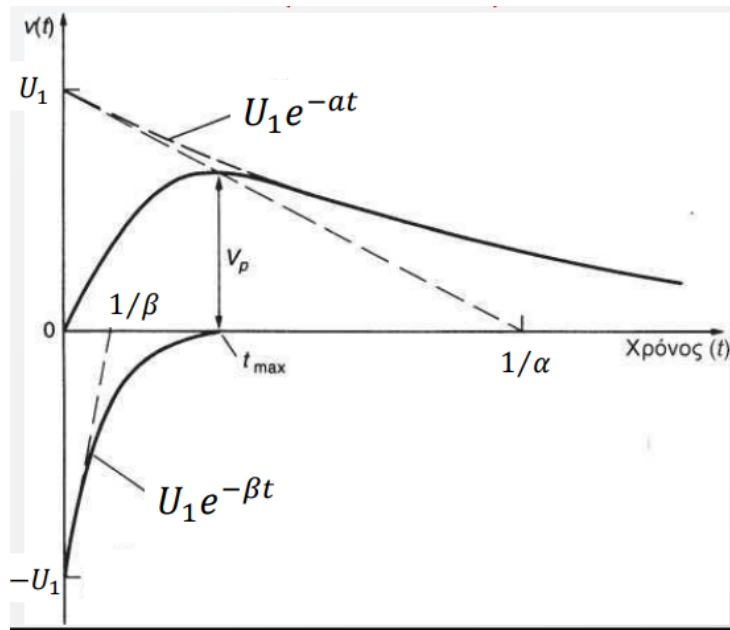
Γενικά, στη βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλος αριθμός κυματομορφών, άλλες αναφέρονται σε εργαστηριακές δοκιμές ενώ άλλες προσομοιώνουν κυματομορφές που έχουν παρατηρηθεί σε πραγματικά συστήματα, π.χ. λόγω κεραυνών.

2.1.1 Διπλεκθετική κυματομορφή

Η χαρακτηριστική κυματομορφή των κρουστικών υψηλών τάσεων που παράγεται σε ένα εργαστήριο, σχηματίζεται από απότομη αύξηση της τάσης μέχρι το μέγιστο και άμεση μείωση έπειτα με πιο αργό ρυθμό προς τη μηδενική τιμή, και αναπαρίσταται ως διαφορά δύο φθινουσών εκθετικών συναρτήσεων (Σχήμα 2.1 και 2.2). Συνεπώς, από κυκλώματα εκφόρτισης πυκνωτών μέσω αντιστάσεων, κατάλληλης τιμής είναι δυνατόν να προκληθούν κρουστικές υψηλές τάσεις με επιθυμητή κυματομορφή της τάσης. Οι κυματομορφές αυτές απαιτούν τη γνώση των σταθερών στους εκθετικούς όρους. Η μεταβλητή με την οποία πολλαπλασιάζεται η διαφορά των εκθετικών όρων καθορίζει το μέγιστο και μάλιστα είναι μεγαλύτερη από αυτό.



Σχήμα 2.1: Παραγωγή κρουστικών υψηλών τάσεων, U_p (τάση κορυφής), T_{cr} (διάρκεια μετώπου), $a_2 \gg a_1$ [5].

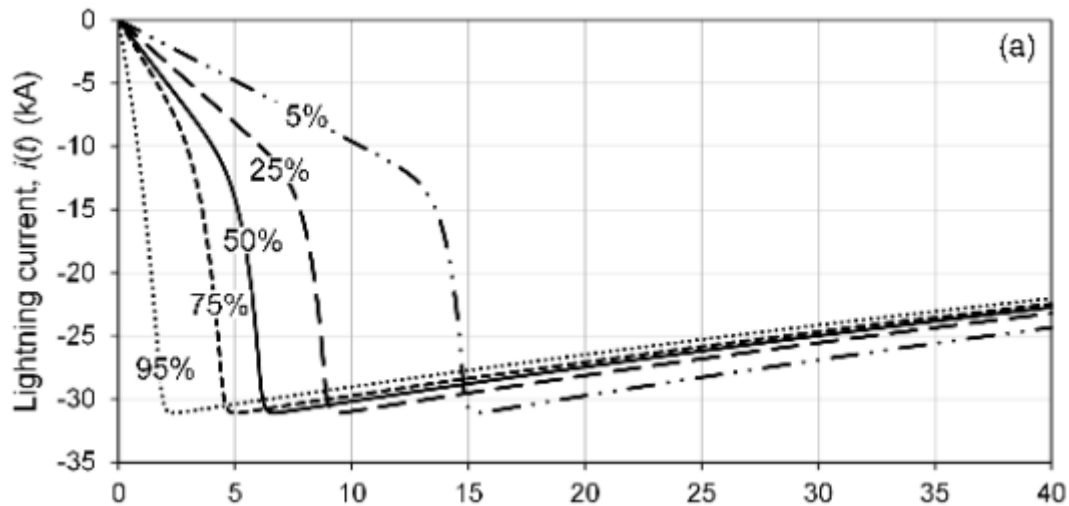


Σχήμα 2.2: Γενική σχέση διπλεκθετικής συνάρτησης $U(t)=U_1(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t})$, $\alpha<\beta$ [6].

2.1.2 Κυματομορφή CIGRE

Η χρήση των κυματομορφών CIGRE είναι ευρέως διαδεδομένη και χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε προσομοιώσεις κεραυνικών πληγμάτων αναπαριστώντας το κεραυνικό ρεύμα. Οι κυματομορφές CIGRE χαρακτηρίζονται από δύο μέρη (Σχήμα 2.3). Το κοίλο μπροστινό μέρος του μετώπου, το οποίο εκτείνεται μέχρι το 90% του μεγίστου ρεύματος, αναπαρίσταται από το άθροισμα δύο όρων, ενός γραμμικού και ενός με μορφή δύναμης. Το εναπομένον μέρος του μετώπου καθώς και η ουρά της κυματομορφής αναπαρίστανται μέσω μιας διπλεκθετικής συνάρτησης. Η μορφή τους είναι τέτοια ώστε να μοιάζουν με καταγεγραμμένα ρεύματα κεραυνού. Οι απαιτούμενες παράμετροι για την κυματομορφή CIGRE είναι:

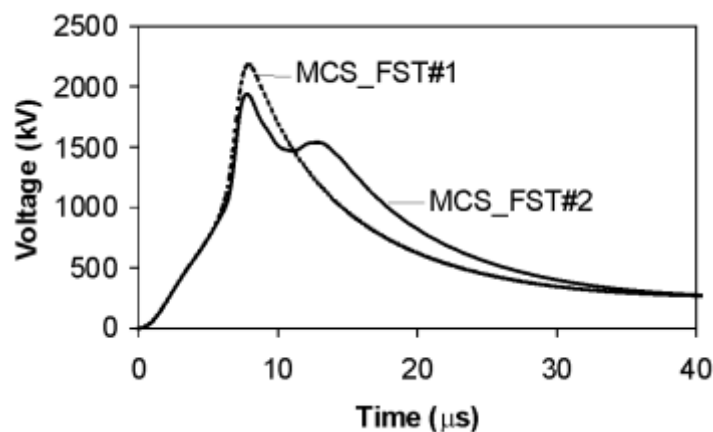
- Η μέγιστη τιμή του ρεύματος (πλάτος).
- Η χρονική διάρκεια του μετώπου, η οποία ορίζεται ως η χρονική διαφορά μεταξύ των σημείων που αντιστοιχούν στο 30% και 90% διαιρούμενη με το 0.6.
- Η μέγιστη κλίση, που ορίζεται στο σημείο που είναι το 90% του μεγίστου ρεύματος στο μέτωπο της κυματομορφής.
- Ο χρόνος που απαιτείται μέχρι το μισό της τιμής.



Σχήμα 2.3: Τυπικές κυματομορφές για αρνητικούς κατερχόμενους κεραυνούς με την χρήση της κυματομορφής CIGRE [7].

2.1.3 Κυματομορφές με δύο κορυφές

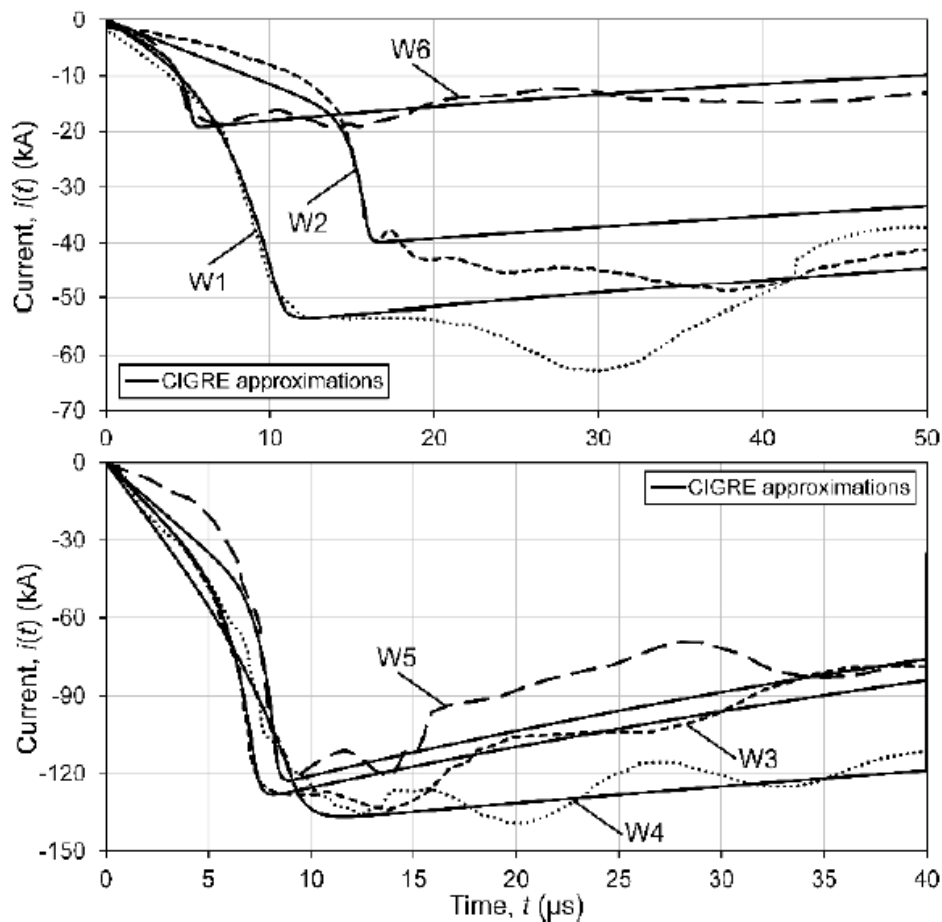
Οι κυματομορφές του ρεύματος του πρώτου πλήγματος ενός κεραυνού χαρακτηρίζονται από έντονη στροφή των κοίλων προς τα άνω κατά την διάρκεια του μετώπου ενώ εμφανίζουν περισσότερες από μία κορυφές στη συνέχεια, με την πρώτη κορυφή να είναι αυτή με την μέγιστη κλίση και τη δεύτερη με το μεγαλύτερο πλάτος. Για τη δημιουργία κυματομορφών δύο κορυφών είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές συναρτήσεις τύπου Heidler. Έτσι προέκυψαν οι κυματομορφές με τις δύο κορυφές (Σχήμα 2.4) οι οποίες όμως είναι δύσχρηστες γιατί απαιτούν πολύ μεγάλο αριθμό παραμέτρων για να παραχθούν. Γι' αυτό δεν είναι τόσο διαδεδομένες.



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα σύγκρισης δύο κυματομορφών με μία και δύο κορυφές [8].

2.1.4 Πραγματικές κυματομορφές κεραυνικών υπερτάσεων

Στις προσομοιώσεις με λογισμικά μεταβατικών φαινομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον των προηγούμενων πραγματικές κυματομορφές κεραυνικών υπερτάσεων, οι οποίες έχουν καταγραφεί σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν οι κυματομορφές καταγεγραμμένων κεραυνικών ρευμάτων, όπως έγινε στην αναφορά [9]. Στο Σχήμα 2.5 φαίνονται κάποιες κυματομορφές με τις αντίστοιχες CIGRE (Ενότητα 2.1.3) που τις προσεγγίζουν.



Σχήμα 2.5: Πραγματικές κυματομορφές κεραυνικών ρευμάτων και προσεγγίσεις CIGRE [9].

2.2 Κυματομορφές που προσομοιώθηκαν

Οι κυματομορφές που χρησιμοποιήθηκαν από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι οι διπλεκθετικές, οι CIGRE και οι πραγματικές. Όλες οι κυματομορφές προσομοιώθηκαν σε μονωτήρες γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με επίπεδα τάσης 66 kV, 150 kV, 400 kV και 735 kV.

Οι διπλεκθετικές κυματομορφές διαχωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες. Σε πρώτη φάση προσομοιώθηκαν κυματομορφές με διαφορετικές τιμές διάρκειας μετώπου, ενώ σε δεύτερη φάση άλλαζαν οι τιμές της διάρκειας ουράς. Επιπλέον, προσομοιώθηκαν πέντε διαφορετικοί τύποι κυματομορφών CIGRE. Τα στοιχεία των κυματομορφών αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1).

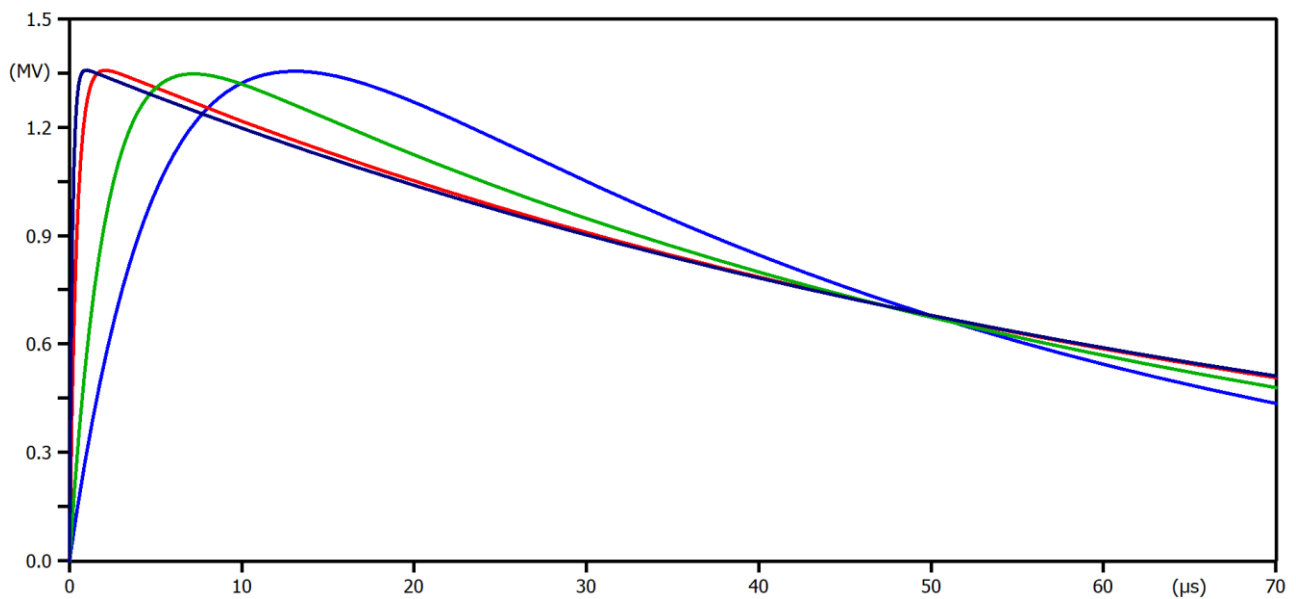
Σημειώνεται ότι τα στοιχεία των κυματομορφών CIGRE προέκυψαν έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψιν τη στατιστική διακύμανση των κεραυνικών ρευμάτων στην πράξη. Χρησιμοποιήθηκαν κυματομορφές που αντιστοιχούν σε κεραυνικά ρεύματα 5 kA, 30 kA, 50 kA, 100 kA και 200 kA. Δηλαδή, καλύπτουν όλο το εύρος των κεραυνικών ρευμάτων που μπορεί να εφαρμοστούν στην πράξη. Στον Πίνακα 2.1 το ελάχιστο κεραυνικό ρεύμα των 5 kA αντιστοιχεί στην κυματομορφή 2.4/77.5 μ s ενώ το μέγιστο των 200 kA σε αυτή των 8/77.5 μ s. Οι υπόλοιπες αντιστοιχούν στα ρεύματα των 30 kA, 50 kA και 100 kA, δηλαδή το μέτωπο αυξάνει με την αύξηση του ρεύματος.

Στα Σχήματα 2.6 έως 2.8 παρουσιάζονται οι κυματομορφές (διπλεκθετικές και CIGRE) που χρησιμοποιήθηκαν στη διερεύνηση της εργασίας. Για τις διπλεκθετικές κυματομορφές επίδρασης της διάρκειας μετώπου παρατηρείται πως για κοινή τιμή κορυφή, οι μεγαλύτερες χρονικές διάρκειες μετώπου αυξάνουν τάση με χαμηλότερο ρυθμό και παρουσιάζουν μεγαλύτερη καμπύλη στην κορυφή. Ωστόσο παρότι η τιμή τάσης μειώνεται για αυτές με χαμηλότερο ρυθμό αρχικά, εν τέλη στο χρονικό διάστημα των περίπου 50 μ s η τάση γίνεται εκ νέου πιο χαμηλή από την τάση των μικρότερων χρονικά μετώπων. Οι διπλεκθετικές κυματομορφές επίδρασης της διάρκειας ουράς (διάρκεια ημίσεος εύρους), αυξάνουν με ίδιο ρυθμό μέχρι την κοινή τιμή κορυφής, αλλά μειώνουν τάση με διαφορετική κλίση καθώς οι μικρότερες σε χρονική διάρκεια ουρές μειώνουν την τάση με μεγαλύτερο ρυθμό, ενώ η 1.2/5 μ s μηδενίζει σε μόλις περίπου 23 μ s. Τέλος οι κυματομορφές CIGRE αυξάνουν πιο γρήγορα τάση για προσομοιώσεις μικρότερων κεραυνικών ρευμάτων και διατηρούν όμοια κλίση στη μείωση μετά την κορυφή καθώς όλες αναφέρονται στα 77.5 μ s.

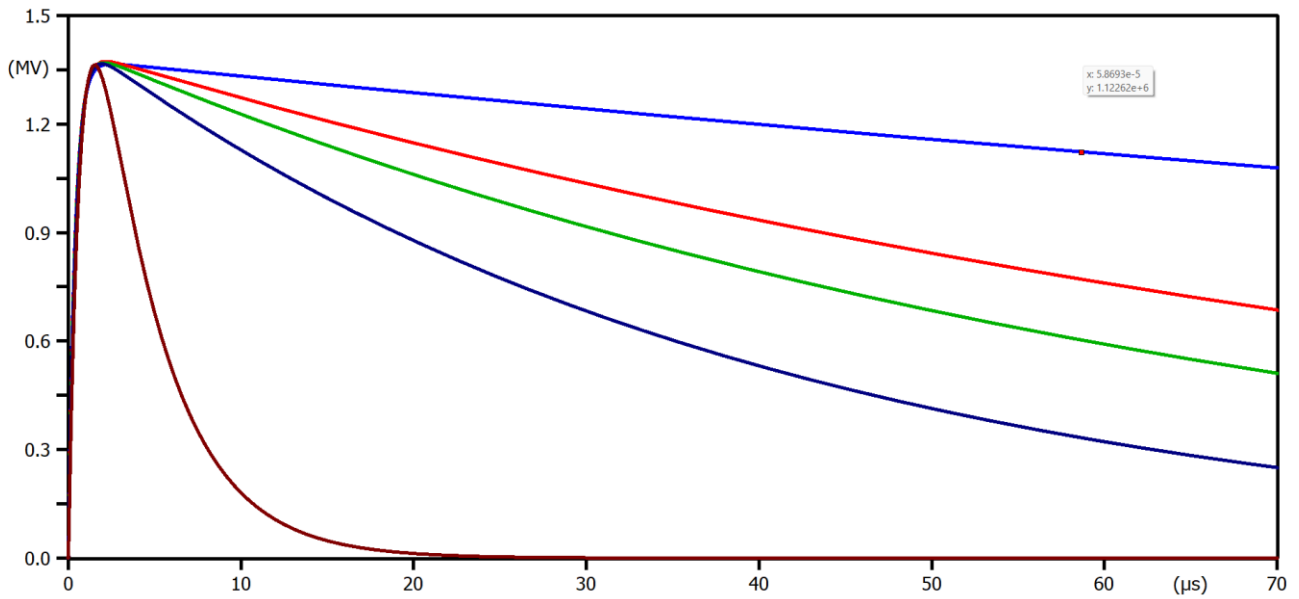
Με τις κυματομορφές αυτές καλύφθηκαν οι πιο συνηθισμένες χρονικές διάρκειες που μπορεί να εμφανιστούν στην πράξη. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και οι κυματομορφές W1 και W3 του Σχήματος 2.5 μαζί με τις προσεγγίσεις CIGRE τους.

Πίνακας 2.1: Τα στοιχεία των κυματομορφών που χρησιμοποιήθηκαν στη διερεύνηση.

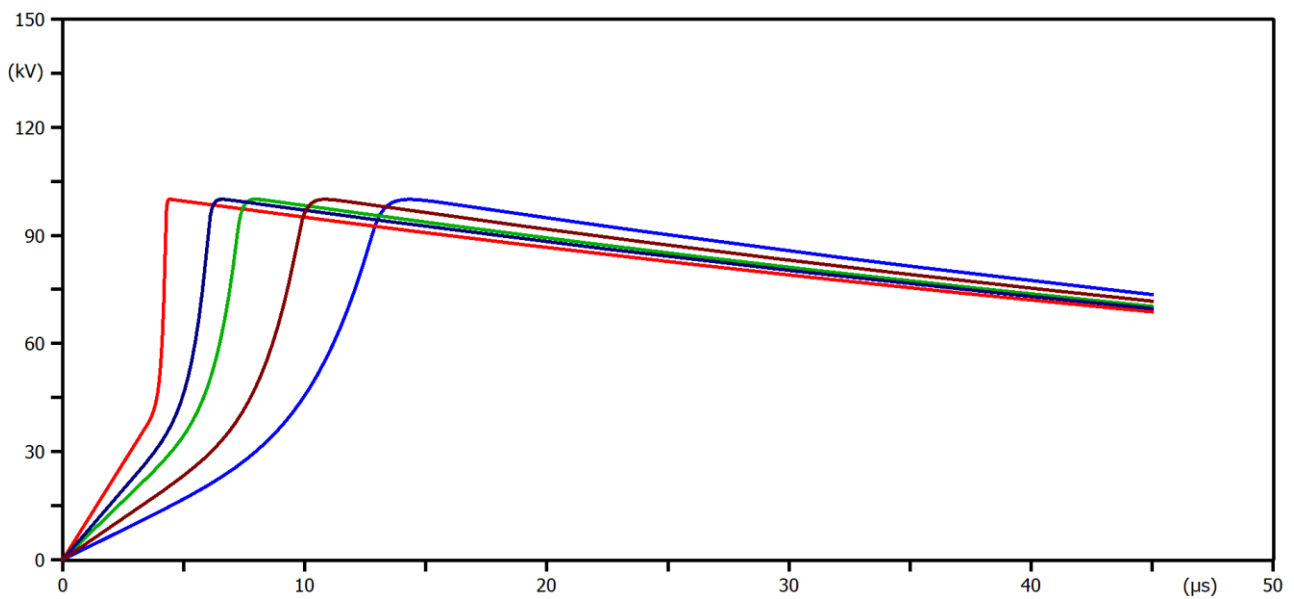
Επίδραση μετώπου (Διπλεκθετική)	Επίδραση ουράς (Διπλεκθετική)	CIGRE
0.5/50 μs	1.2/5 μs	2.4/77.5 μs
1.2/50 μs	1.2/30 μs	3.67/77.5 μs
5/50 μs	1.2/50 μs	4.52/77.5 μs
10/50 μs	1.2/70 μs	6.01/77.5 μs
–	1.2/200 μs	8/77.5 μs



Σχήμα 2.6: Γραφική αναπαράσταση των διπλεκθετικών κυματομορφών 0.5/50 μs (σκούρο μπλε), 1.2/50 μs (κόκκινο), 5/50 μs (πράσινο), 10/50 μs (μπλε ανοιχτό) με κοινή τιμή κορυφής. (Διερεύνηση επίδρασης μετώπου.)



Σχήμα 2.7: Γραφική αναπαράσταση των διπλεκθετικών κυματομορφών 1.2/5 μs (καφέ), 1.2/30 μs (σκούρο μπλε), 1.2/50 μs (πράσινο), 1.2/70 μs (κόκκινο), 1.2/200 μs (μπλε ανοιχτό). (Διερεύνηση επίδρασης ουράς.)

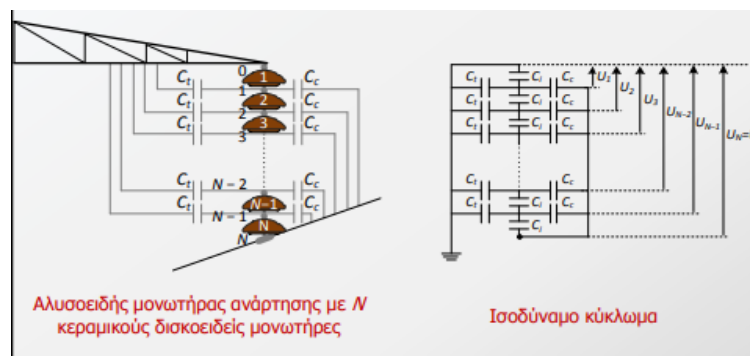


Σχήμα 2.8: Γραφική αναπαράσταση των κυματομορφών CIGRE 2.4/77.5 μs (κόκκινο), 3.67/77.5 μs (σκούρο μπλε), 4.52/77.5 μs (πράσινο), 6.01/77.5 μs (καφέ), 8/77.5 μs (μπλε ανοιχτό).

2.3 Μονωτήρες γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι μονωτήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε μονωτήρες ανάρτησης και μονωτήρες τάνυσης με πιο συνηθισμένους τους πρώτους. Πιο συγκεκριμένα οι μονωτήρες ανάρτησης που αποτελούνται από αλυσίδες κεραμικών δισκοειδών μονωτήρων, και θα μελετηθούν στην εργασία αυτή, αποκαλούνται αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης. Οι μονωτήρες κατασκευάζονται έτσι ώστε να αντέχουν τις αναμενόμενες υπερτάσεις, τη μηχανική καταπόνηση, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την πιθανή θερμική καταπόνηση, τη ρύπανση και φυσικά την τάση λειτουργίας του συστήματος. Οι αλυσοειδής μονωτήρες ανάρτησης διαχωρίζονται σε κανονικού τύπου και τύπου ομίχλης οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές HVDC και για περιοχές με έντονες συνθήκες ρύπανσης. Οι μονωτήρες αυτοί φέρουν πτυχώσεις για την αύξηση του μήκους ερπυσμού οι οποίες όσο μεγαλύτερες αλλά και περισσότερες είναι, από τόσο περισσότερη συγκέντρωση ρύπανσης κινδυνεύουν. Ωστόσο, υπάρχουν και οι δισκοειδής μονωτήρες ανοικτού προφίλ η οποίοι έχουν αυξημένο διάμετρο και δεν φέρουν πτυχώσεις. Βέβαια τα μειονεκτήματα που τους χαρακτηρίζουν είναι πως απαιτούν πιο μεγάλα μήκη αλυσίδων εξαιτίας μικρότερου μήκους ερπυσμού και πως συγκεντρώνουν αυξημένα επίπεδα ρύπανσης σε συνθήκες ταχείας ρύπανσης. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός αλυσοειδούς μονωτήρα ανάρτησης με N κεραμικούς μονωτήρες. Σημειώνεται ότι πλέον χρησιμοποιούνται πολύ συχνά και πολυμερείς μονωτήρες οι οποίοι υπερτερούν σε κάποια χαρακτηριστικά τους των αλυσοειδών μονωτήρων.

Οι αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς διαφέρουν εξαρτώνται από την τάση της και τις αναμενόμενες υπερτάσεις. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση της γραμμής τόσο μεγαλύτερο είναι και το μήκος του μονωτήρα. Έτσι λοιπόν, για γραμμή τάσης 66 kV το τυπικό μήκος του μονωτήρα φτάνει τα 0.73 m, για 150 kV τα 1.86 m, για 400 kV τα 3.62 m και για 735 kV τα 4.8 m αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές ενδέχεται να αλλάζουν ελαφρώς καθώς συνήθως προστίθενται και



Σχήμα 2.9: Αλυσοειδής μονωτήρας ανάρτησης με N κεραμικούς δισκοειδής μονωτήρες και αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα [6].

αφαιρούνται δισκοειδείς μονωτήρες από τις γραμμές όπως απαιτείται. Επιπλέον, ένα σημαντικό μέγεθος το οποίο διαφέρει σε κάθε μονωτήρα ανάλογα με τη γραμμή μεταφοράς στην οποία εφαρμόζεται είναι το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL). Η τιμή του βασικού επιπέδου μόνωσης ορίζει την τιμή της τάσης μέχρι την οποία ο μονωτήρας μπορεί να αντέξει χωρίς να υπάρξει διάσπαση από κάποια υπέρταση στο 90% των περιπτώσεων (μόλις 10% πιθανότητα διάσπασης). Η τιμή του βασικού επιπέδου μόνωσης πάντα αναφέρεται στα σχετικά πρότυπα και τις προδιαγραφές του κάθε μονωτή. Όπως το μήκος έτσι και η το βασικό επίπεδο μόνωσης αυξάνεται με την αύξηση τάσης της γραμμής. Επομένως για γραμμές μεταφοράς 66 kV το βασικό επίπεδο μόνωσης καθορίζεται τουλάχιστον στα 325 kV, για 150 kV στα 750 kV, για 400 kV στα 1425 kV και για 735 kV στα 1900 kV αντίστοιχα. Οι τιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2.

Οι αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης του Πίνακα 2.2 καλύπτουν όλο το εύρος των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με εξαίρεση τις γραμμές μεταφοράς άνω των 765 kV οι οποίες όμως είναι σπανιότερες. Έτσι τα συμπεράσματα των προσομοιώσεων θα είναι κατά το δυνατόν γενικευμένα.

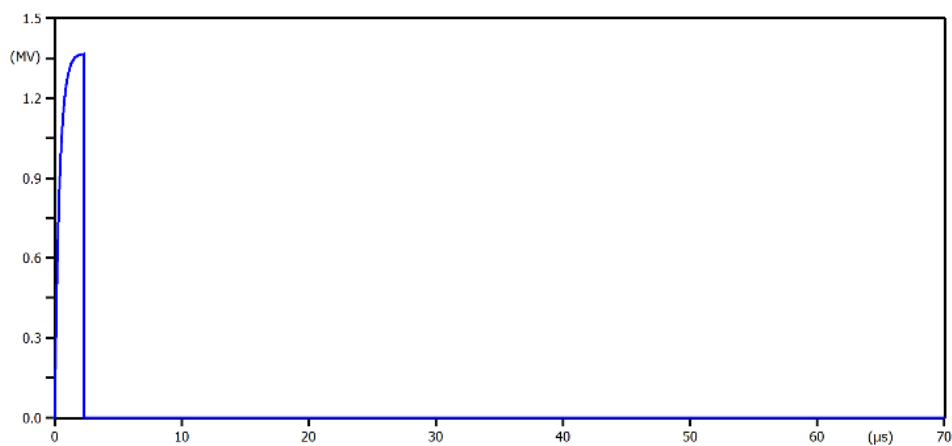
Πίνακας 2.2: Πίνακας με το βασικό επίπεδο μόνωσης και το μήκος του μονωτήρα ανάλογα την τάση της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τους μονωτήρες που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή.

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

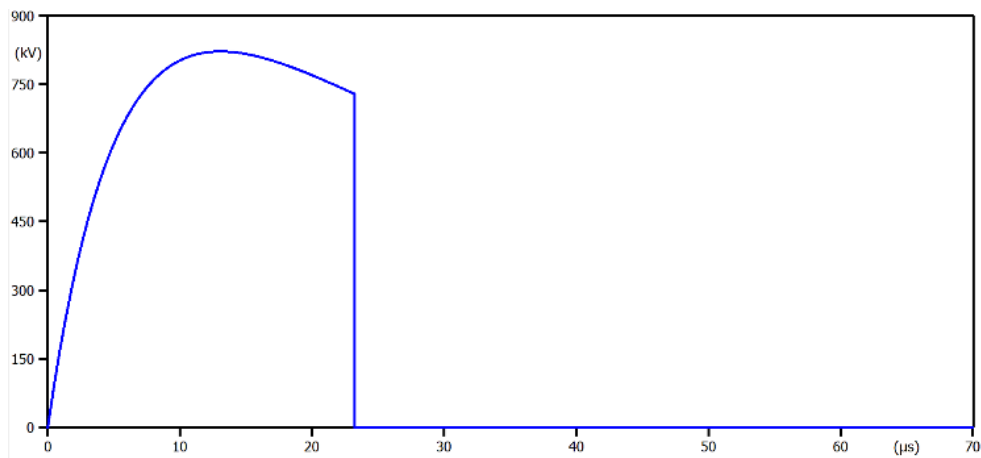
ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 3: Διπλεκθετική κυματομορφή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πρόβλεψης της ηλεκτρικής διάσπασης των μονωτήρων του Πίνακα 2.2 με τη μέθοδο ολοκλήρωσης. Οι προσομοιώσεις έγιναν με τις διπλεκθετικές κυματομορφές του Πίνακα 2.1 και των Σχημάτων 2.6 και 2.7 που απεικονίζουν αντοχή των μονωτήρων που καταπονούνται. Οι γενικές μορφές των κυματομορφών διάσπασης που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις είναι 2. Στη μια μορφή η διάσπαση συμβαίνει στο μέτωπο, δηλαδή πριν την μέγιστη τιμή τάσης, ενώ στην άλλη θα προκύπτει στην ουρά, συνεπώς μετά την μέγιστη τιμή της. Αυτές παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1 και 3.2.



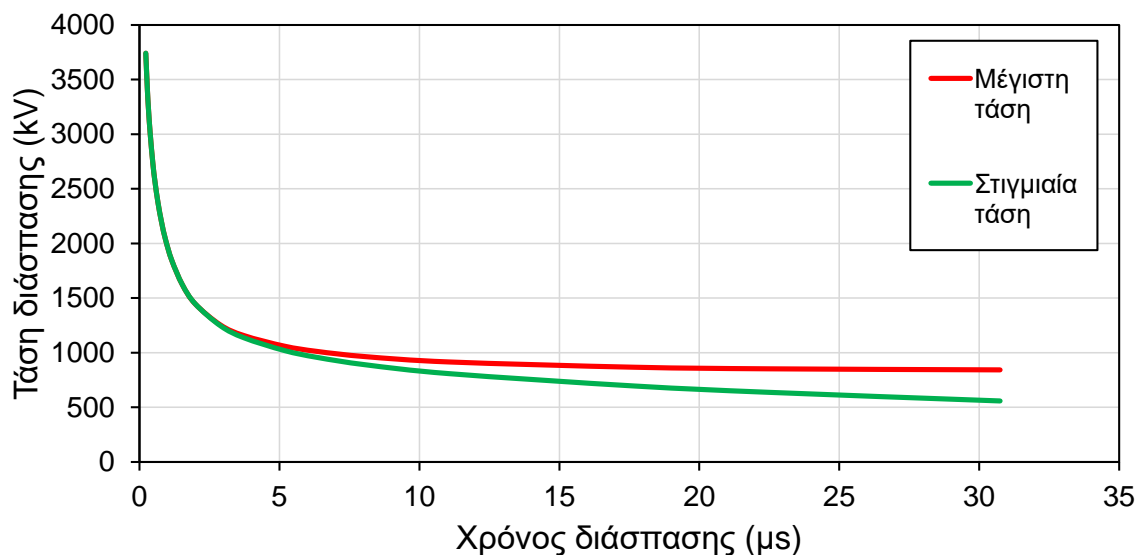
Σχήμα 3.1: Προσομοίωση διάσπασης μονωτήρα 150 kV με διάσπαση στο μέτωπο.



Σχήμα 3.2: Προσομοίωση διάσπασης μονωτήρα 150 kV με διάσπαση στην ουρά.

Από τις κυματομορφές διάσπασης, όπως αυτές που φαίνονται παραπάνω, προσδιορίζονται τα εξής: μέγιστη τάση, στιγμιαία τάση διάσπασης και χρόνος διάσπασης. Έτσι δημιουργείται μια καμπύλη τάσης-χρόνου για κάθε ορισμό που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1. Επομένως, με τις προσομοιώσεις αυτής της διπλωματικής εργασίας προκύπτουν σαν αποτέλεσμα δυο καμπύλες. Η μια είναι καμπύλη τάσης-χρόνου με στιγμιαία τιμή τάσης, ενώ η άλλη είναι καμπύλη τάσης-χρόνου με μέγιστη τιμή τάσης. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Φαίνεται ότι οι δύο καμπύλες είναι ίδιες στους μικρούς χρόνους διάσπασης γιατί η στιγμιαία τάση είναι ίση με τη μέγιστη όταν η διάσπαση συμβαίνει πριν το μέγιστο (Σχήμα 3.1). Αυτό αλλάζει για διασπάσεις στην ουρά όπου η μέγιστη τάση είναι πιο μεγάλη (Σχήμα 3.2). Ο πιο διαδεδομένος ορισμός είναι με τη μέγιστη τάση. Σημειώνεται ότι οι καμπύλες χρησιμοποιούνται στον συντονισμό μονώσεων για παράδειγμα στην προστασία εξοπλισμού μέσω προστατευτικών διακένων, όπου η καμπύλη του εξοπλισμού πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την καμπύλη του διακένου (για τον ίδιο χρόνο μεγαλύτερη τάση διάσπασης) ώστε να διασπάται το διάκενο πρώτο.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η κάθε καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης αποτελείται από μεγάλο αριθμό σημείων (δεν απεικονίζονται στα αντίστοιχα σχήματα). Κάθε σημείο είναι αποτέλεσμα μίας προσομοίωσης. Δηλαδή, για να κατασκευαστεί μία καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης γίνεται μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων με αυξανόμενη μέγιστη τιμή της τάσης καταπόνησης. Το κριτήριο για τη μέγιστη τιμή της τάσης που επιλέγεται είναι να είναι τουλάχιστον 4 φορές μεγαλύτερη από την ελάχιστη.



Σχήμα 3.3: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης διπλεκθετικής κυματομορφής και με τους δύο ορισμούς. Τυπικά αποτελέσματα για μονωτήρα 150 kV.

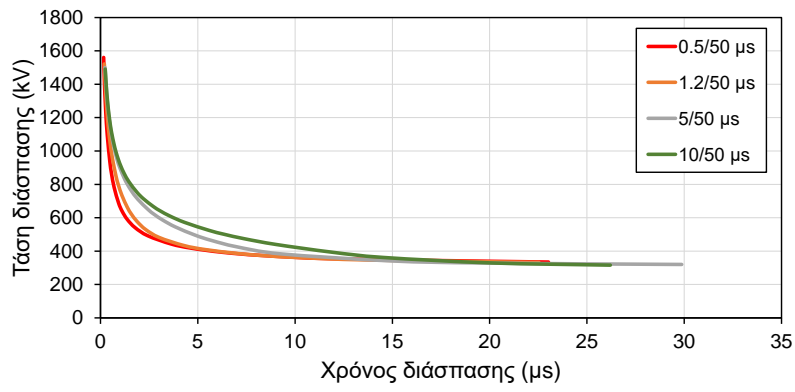
3.1 Επίδραση του μετώπου

Με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP προσομοιώθηκαν 4 διαφορετικές κυματομορφές με διαφορετικό χρόνο επίδρασης του μετώπου (Πίνακας 2.1). Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα με βάση τον ορισμό των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης με τη μέγιστη τάση για όλους τους μονωτήρες που μελετήθηκαν. Παρατηρούμε πως όσο μεγαλύτερη η τάση που εφαρμόζεται στον μονωτήρα, τόσο μεγαλύτερη και η τάση διάσπασης σε όλες τις περιπτώσεις. Σε ό,τι αφορά τον χρόνο διάσπασης, στα 150 kV και 400 kV ο μεγαλύτερος χρόνος διάσπασης παρατηρείται για κυματομορφή 1.2/50 μ s, ενώ στα 66 kV για 5/50 μ s και στα 735 kV για 10/50 μ s αντίστοιχα. Αντίθετα στα 66 kV και 735 kV η κυματομορφή 1.2/50 αποφέρει τους μικρότερους χρόνους διάσπασης. Βέβαια αυτό έχει να κάνει και με τη επιλογή των ελάχιστων τιμών τάσης που εφαρμόστηκαν σε κάθε περίπτωση διότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι ντετερμινιστικά (ίδια αποτελέσματα όσες φορές γίνει προσομοίωση με την ίδια τάση). Μικρή μεταβολή της ελάχιστης τάσης αντιστοιχεί σε μεγάλες μεταβολές του μέγιστου χρόνου διάσπασης καθώς η καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης γίνεται επίπεδη στο τέλος της (δεξιά τμήμα).

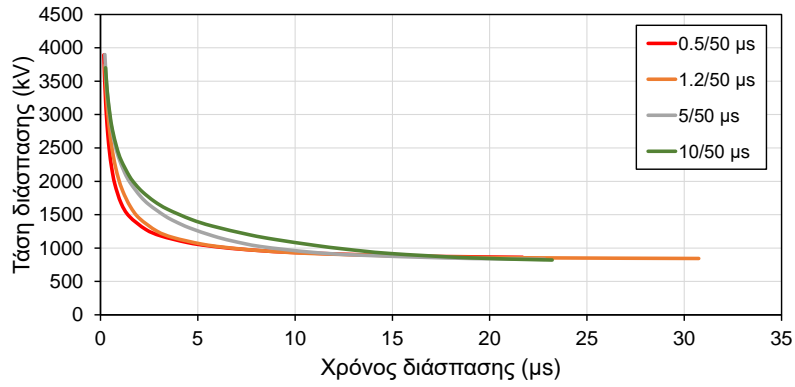
Από το Σχήμα 3.4 φαίνεται επίσης πως οι μικρότερες τιμές χρόνου μετώπου παρουσιάζουν μεγαλύτερη κυρτότητα στην καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης (πιο απότομη άνοδο). Επίσης οι καμπύλες συγκλίνουν στους πολύ μικρούς χρόνους διάσπασης, δηλαδή στις μεγάλες τάσεις και αντίστοιχα και στο άλλο άκρο τους, δηλαδή στις μικρές τιμές τάσης διάσπασης που αντιστοιχούν σε μεγάλους χρόνους. Η επίδραση της διάρκειας μετώπου γίνεται προφανείς στους ενδιαμέσους χρόνους όπου οι πιο αργές κυματομορφές, δηλαδή τα μεγαλύτερα μέτωπα, απαιτούν μεγαλύτερη τάση για να διασπαστούν στον ίδιο χρόνο.

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για τον ορισμό με τη στιγμιαία τάση. Παρατηρώντας τα γραφήματα καταλήγουμε στα ίδια συμπεράσματα με τον προηγούμενο ορισμό σε γενικές γραμμές. Βασική διαφορά, όμως, είναι το γεγονός ότι οι καμπύλες τάσης χρόνου διάσπασης δεν συγκλίνουν στους μεγάλους χρόνους. Οι πιο αργές κυματομορφές (μεγαλύτερα μέτωπα) αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τιμές τάσης διάσπασης σε αυτή την περίπτωση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το Σχήμα 2.6 από όπου φαίνεται ότι οι πιο αργές κυματομορφές έχουν μεγαλύτερες στιγμιαίες τιμές τάσης για τους ίδιους χρόνους έως τα 50 μ s.

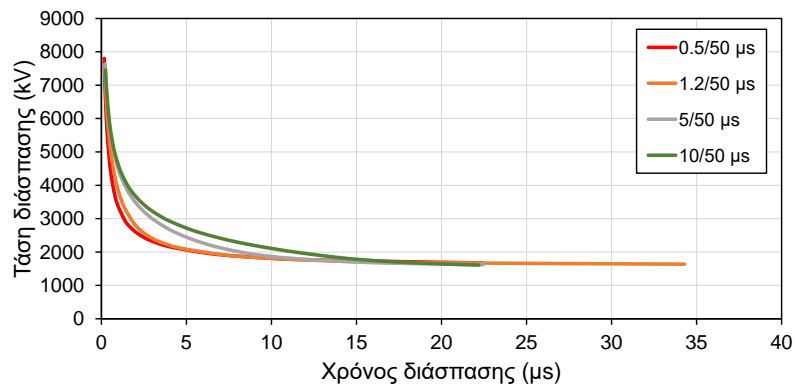
Για να διευκολυνθεί η σύγκριση και να προκύψουν γενικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των διαφορετικών κυματομορφών και μονωτήρων εφαρμόστηκε η μέθοδος της κανονικοποίησης. Οι τιμές τάσης διάσπασης διαιρέθηκαν με την ελάχιστη τάση διάσπασης (στα δεξιά της καμπύλης, αντιστοιχεί στην 50% τάση διάσπασης, CFO, στον ορισμό με τη μέγιστη τάση διάσπασης). Δηλαδή, πλέον όλες οι καμπύλες καταλήγουν σε τιμή ίση με 1. Με την βοήθεια των Σχημάτων 3.6 και 3.7 οι οποίες απεικονίζουν τις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν και για τους δύο ορισμούς



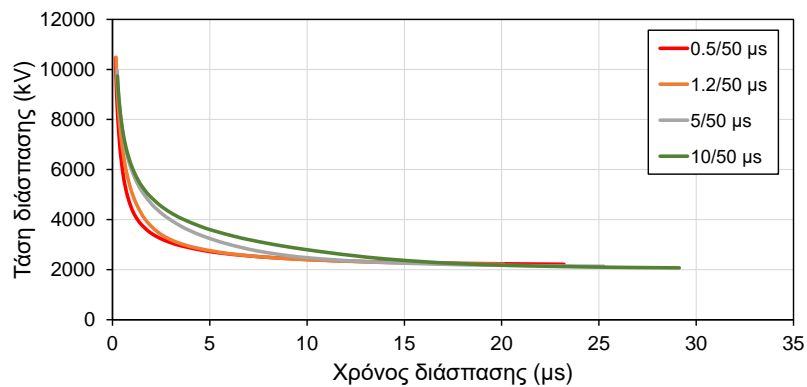
α) 66 kV



β) 150 kV

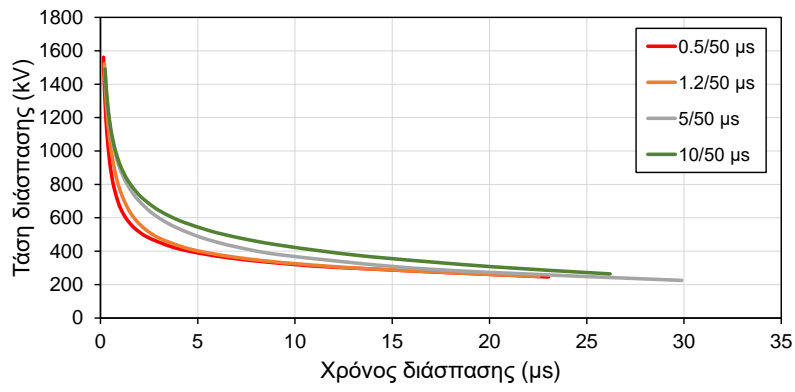


γ) 400 kV

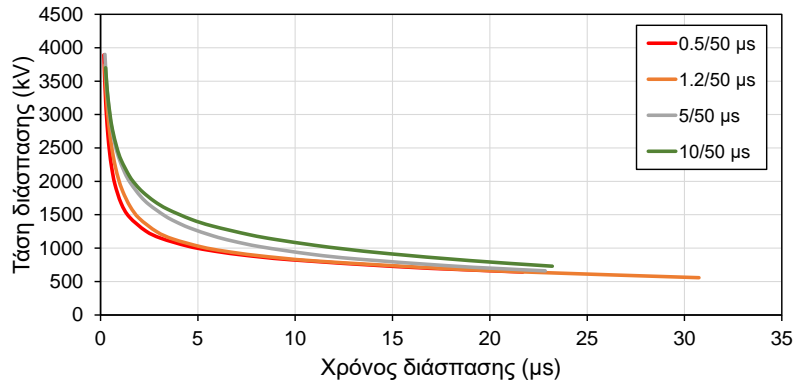


δ) 735 kV

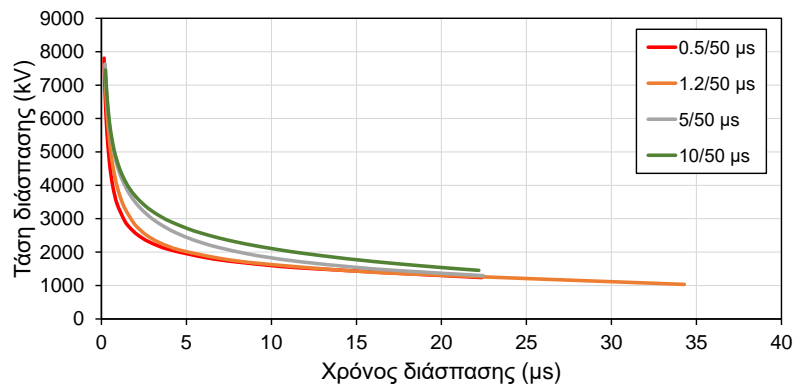
Σχήμα 3.4: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση. Επίδραση διάρκειας μετώπου.



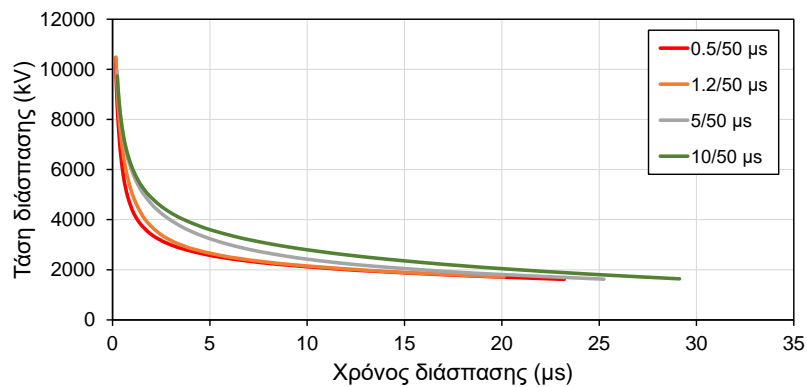
α) 66 kV



β) 150 kV

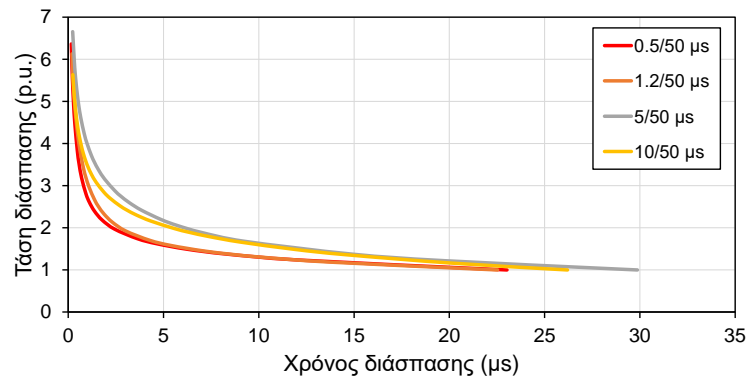


γ) 400 kV

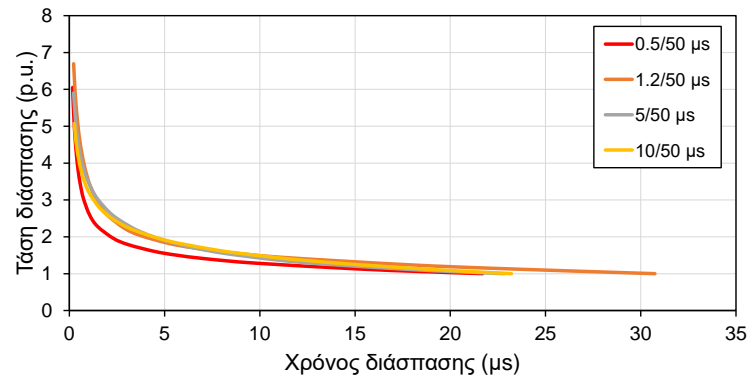


δ) 735 kV

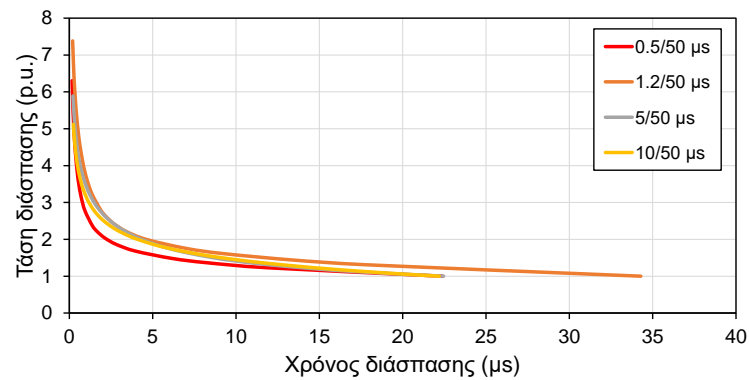
Σχήμα 3.5: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση. Επίδραση διάρκειας μετώπου.



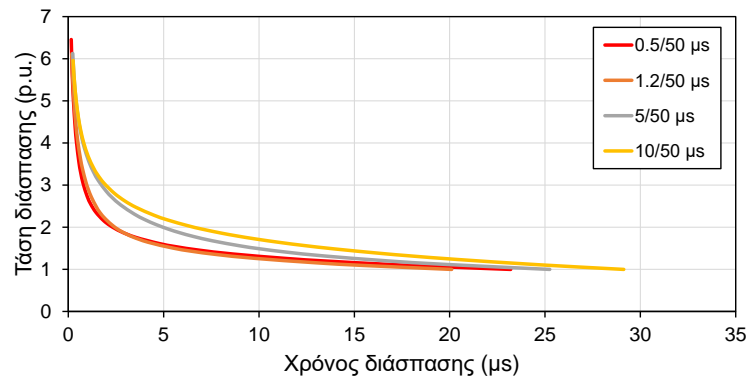
α) 66 kV



β) 150 kV

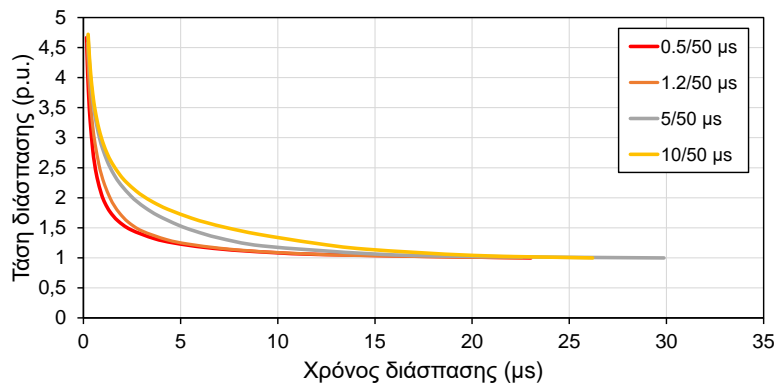


γ) 400 kV

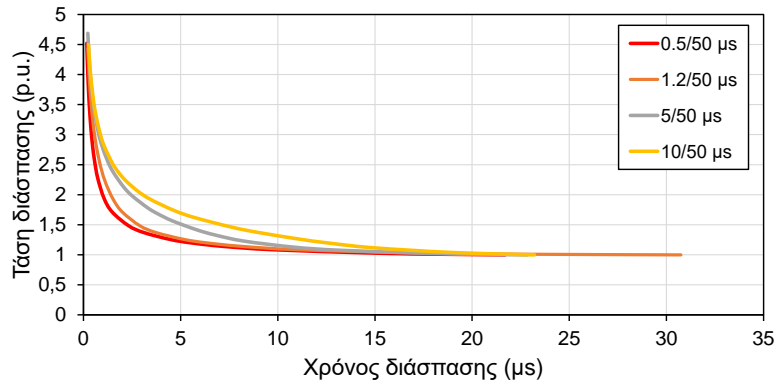


δ) 735 kV

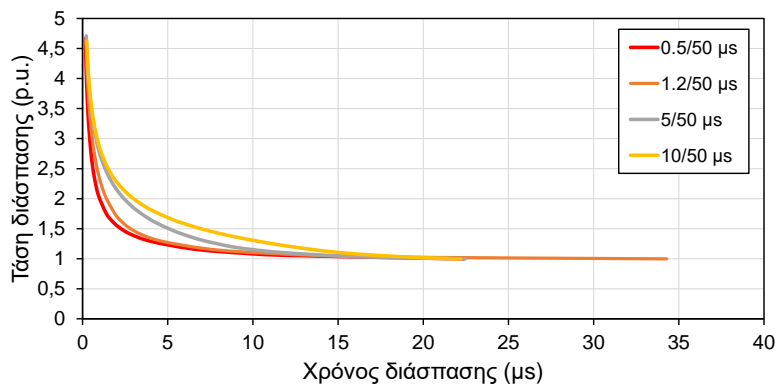
Σχήμα 3.6: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Επίδραση της διάρκειας μετώπου.



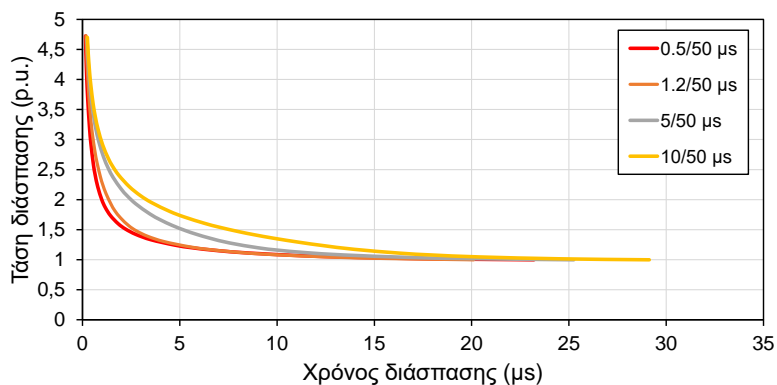
α) 66 kV



β) 150 kV



γ) 400 kV



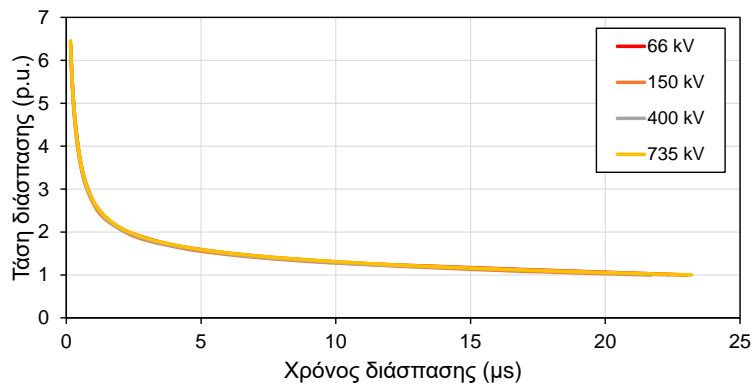
δ) 735 kV

Σχήμα 3.7: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Επίδραση διάρκειας μετώπου.

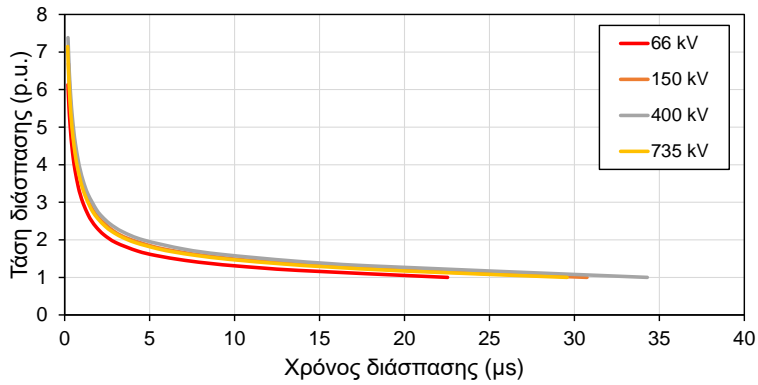
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

μπορούν εύκολα να επιβεβαιωθούν τα παραπάνω συμπεράσματα. Επιπλέον αυτών, μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο χρόνος σύγκλισης των καμπυλών στη μονάδα είναι κοινός και ίσος με $\sim 15 \mu\text{s}$ (Σχήμα 3.7). Αντίθετα για τη στιγμιαία τάση διάσπασης (Σχήμα 3.6) αυτό εξαρτάται από τον μονωτήρα που προσομοιώνεται. Αυτό δίνει το έναυσμα για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μονωτήρων μεταξύ τους.

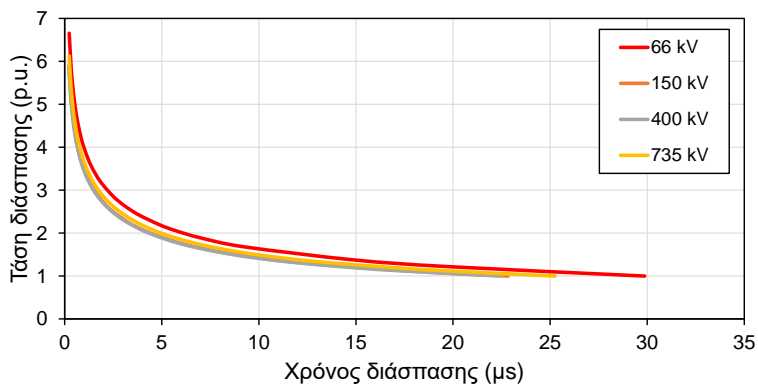
Στο Σχήμα 3.8 φαίνονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης αυτή τη φορά ανά κυματομορφή ώστε να μπορούν συγκριθούν τα αποτελέσματα για διαφορετικούς μονωτήρες. Φαίνεται ότι η γενική μορφή των καμπυλών είναι σχεδόν ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Πράγμα που σημαίνει ότι με τη μέθοδο ολοκλήρωσης η μεταβολή της τάσης διάσπασης (κανονικοποιημένη) είναι ποιοτικά ίδια για όλα τα μήκη των μονωτήρων όταν η καταπόνηση είναι συγκεκριμένη (ίδια κυματομορφή). Μικρές διαφορές στο σχήμα παρακάτω αποδίδονται πιθανόν στην επιλογή της ελάχιστης τάσης διάσπασης (που σταμάτησαν οι προσομοιώσεις). Γενικά αυτό ίσως δεν είναι απόλυτα αναμενόμενο με βάση τον μηχανισμό της ηλεκτρικής επιφανειακής διάσπασης των μονωτήρων και ίσως να προκύπτει από το γεγονός ότι η μέθοδος είναι ημιεμπειρική. Για να διερευνηθεί περαιτέρω αυτό το αποτέλεσμα χρειάζεται να εφαρμοστούν άλλες μέθοδοι όπως είναι τα μοντέλα προόδου του λήντερ που έχουν φυσική σημασία γιατί βασίζονται στον μηχανισμό της ηλεκτρικής διάσπασης.



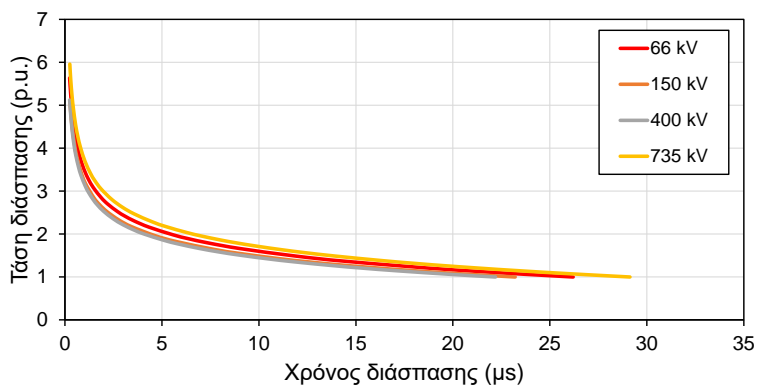
α) 0.5/50 μ s



β) 1.2/50 μ s



γ) 5/50 μ s



δ) 10/50 μ s

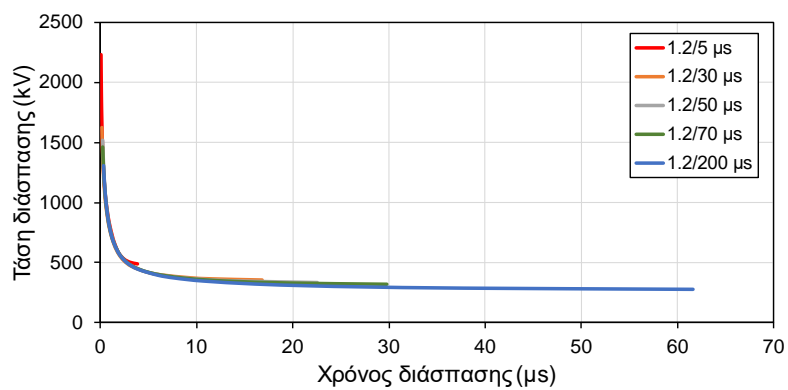
Σχήμα 3.8: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για κάθε τιμή διάρκειας μετώπου που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή.

3.2 Επίδραση της ουράς

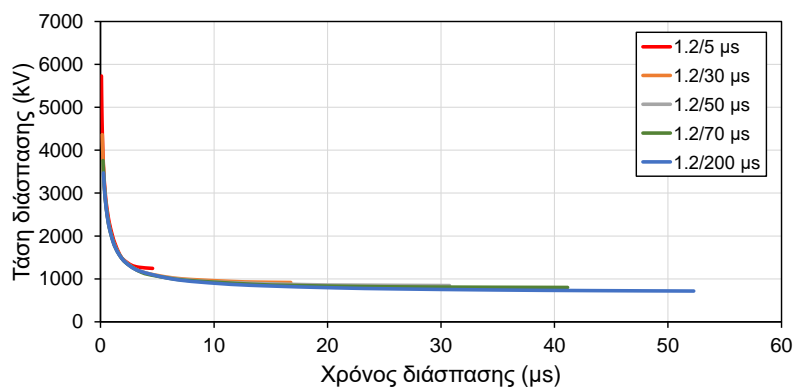
Αντίστοιχα με την προηγούμενη ενότητα προσομοιώθηκαν 5 διαφορετικές κυματομορφές με διαφορετικό χρόνο επίδρασης της ουράς (Πίνακας 2.1). Στο Σχήμα 3.9 διακρίνουμε τα αποτελέσματα με βάση τον ορισμό των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης με τη μέγιστη τάση για όλους τους μονωτήρες που προσομοιώθηκαν. Είναι φανερό πως για μονωτήρα μεγαλύτερης τάσης έχουμε μεγαλύτερη τάση διάσπασης και εδώ. Επίσης φαίνεται ότι μεγαλύτερης διάρκειας ουρές οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο διάσπασης, με εξαίρεση στον μονωτήρα 400 kV στον οποίο ο χρόνος διάσπασης της κυματομορφής 1.2/50 μ s ξεπερνάει αυτόν της 1.2/70 μ s. Όπως και στην επίδραση του μετώπου έτσι και εδώ η καμπύλη γίνεται επίπεδη στο τέλος της πράγμα που σημαίνει πως μικρή μεταβολή στην ελάχιστη τάση που εφαρμόζεται οδηγεί σε μεγάλες μεταβολές του μεγίστου χρόνου διάσπασης. Γενικότερα οι καμπύλες παρουσιάζοντας την ίδια κυρτότητα χαράζουν παρόμοια πορεία, άρα και ίδια δυσκολία διάσπασης, διαφέροντας κυρίως ως προς τους χρόνους διάσπασης, που όπως προαναφέρθηκε έχει να κάνει και με τη επιλογή των ελάχιστων τιμών τάσης που εφαρμόστηκαν σε κάθε περίπτωση διότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι ντετερμινιστικά.

Από το Σχήμα 3.9 μπορεί να παρατηρηθεί ότι στους μικρούς χρόνους διάσπασης όλες οι καμπύλες είναι κοινές. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί εύκολα βλέποντας το Σχήμα 2.7 που δείχνει τις εφαρμοζόμενες κυματομορφές. Αυτές έχουν διάρκεια μετώπου όλες 1.2 μ s με συνέπεια να ταυτίζονται έως την κορυφή τους. Έτσι είναι προφανές ότι για διασπάσεις στο μέτωπο οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης θα ταυτίζονται. Επιπλέον οι εξαιρετικά μικροί χρόνοι διάσπασης της κυματομορφής 1.2/5 μ s οφείλονται στην πολύ γρήγορη μείωσή της προς το μηδέν (Σχήμα 2.7). 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 και οφείλεται στη γενική μορφή των διπλεκθετικών κυματομορφών, οι οποίες διαφέρουν τόσο στο μέτωπο όσο και στην ουρά όταν η διάρκεια μετώπου μεταβαλλεται σημαντικά (Σχήματα 2.6 και 2.7). Αντίθετα οι διπλεκθετικές κυματομορφές διαφέρουν μόνο στην ουρά όταν το μέτωπο είναι ίδιο.

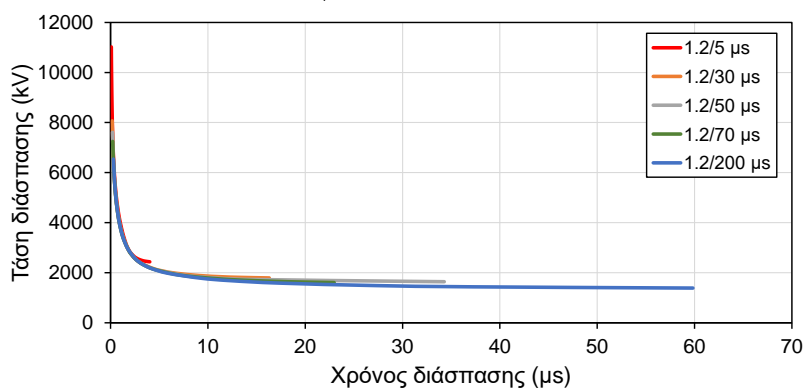
Από το Σχήμα 3.9 τέλος φαίνεται ότι οι κυματομορφές με τη μικρότερη ουρά απαιτούν μεγαλύτερη τάση για να οδηγήσουν σε διάσπαση στον ίδιο χρόνο. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο η ουρά αυξάνεται διατηρούνται μεγαλύτερες τιμές τάσης καταπόνησης του μονωτήρα με συνέπεια την πιο εύκολη διάσπασή του. Ωστόσο, όπως είναι φανερό από το Σχήμα 3.10 η στιγμιαία τάση διάσπασης είναι μικρότερη για τις κυματομορφές με τις μικρότερες ουρές. Αυτό είναι προφανές γιατί οι κυματομορφές αυτές μειώνονται πιο γρήγορα προς το μηδέν. Έτσι ενώ απαιτείται μεγαλύτερη μέγιστη τάση για τη διάσπαση, η στιγμιαία τάση διάσπασης είναι πιο μικρή. Από το συμπέρασμα αυτό γίνεται σαφές γιατί χρησιμοποιείται ο ορισμός της μέγιστης τάσης στον συντονισμό μονώσεων, καθώς ο ορισμός με τη στιγμιαία τάση μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα.



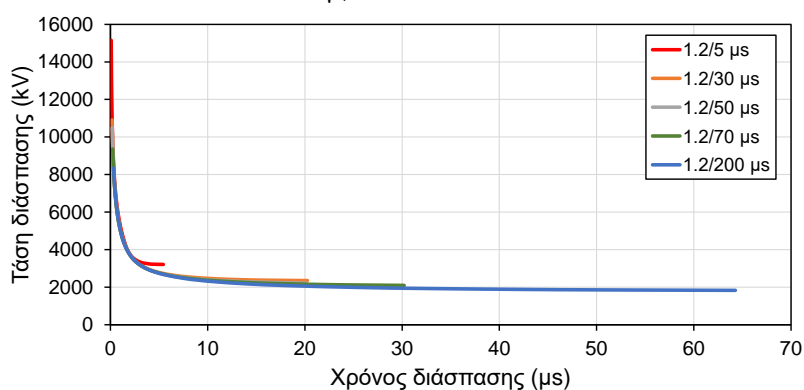
α) 66 kV



β) 150 kV

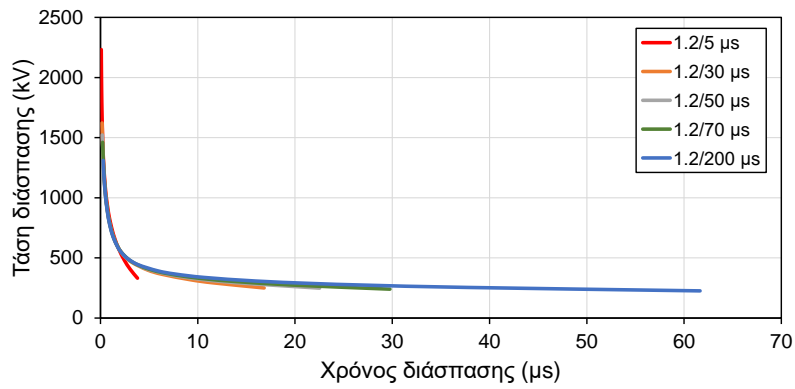


γ) 400 kV

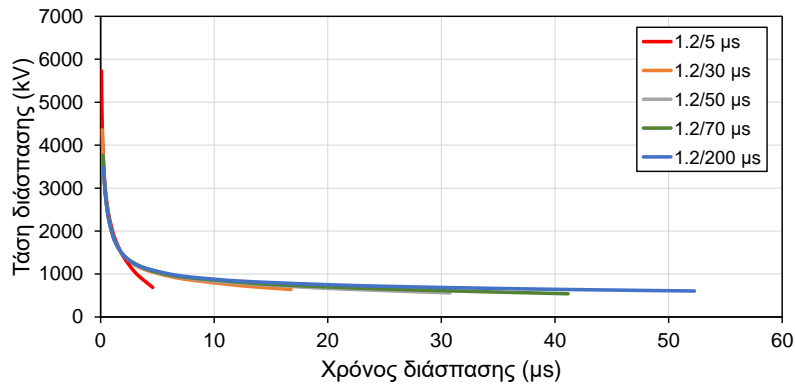


δ) 735 kV

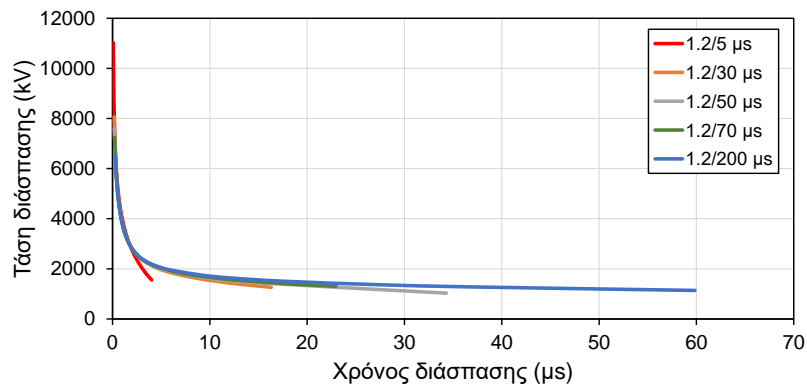
Σχήμα 3.9: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση. Επίδραση της διάρκειας ημίσεως εύρους (ουράς).



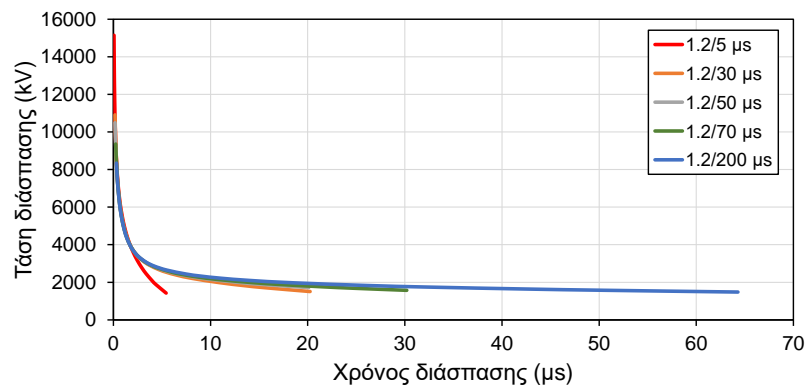
α) 66 kV



β) 150 kV



γ) 400 kV



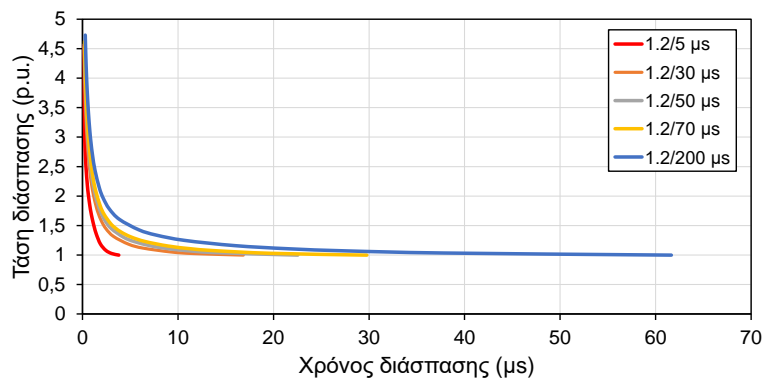
δ) 735 kV

Σχήμα 3.10: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση. Επίδραση της διάρκειας ημίσεως εύρους (ουράς).

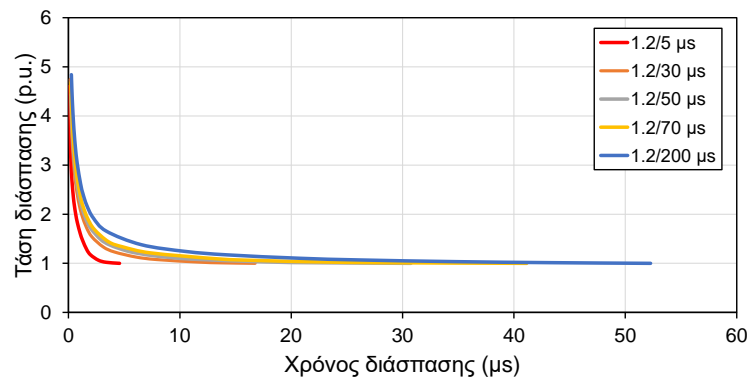
Όπως και προηγουμένως για να διευκολυνθεί η σύγκριση και να προκύψουν γενικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των διαφορετικών κυματομορφών και μονωτήρων εφαρμόστηκε η μέθοδος της κανονικοποίησης. Με την βοήθεια των Σχημάτων 3.11 και 3.12 τα οποία απεικονίζουν τις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν και για τους δύο ορισμούς, φαίνεται ότι 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.

Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης αυτή τη φορά ανά κυματομορφή (με παράμετρο στο κάθε γράφημα τον μονωτήρα) ώστε να μπορούν συγκριθούν τα αποτελέσματα για διαφορετικούς μονωτήρες. Φαίνεται ότι η γενική μορφή των καμπυλών είναι σχεδόν ίδια σε όλες τις περιπτώσεις με εξαίρεση την κυματομορφή 1.2/5 μs . Πράγμα που σημαίνει ότι με τη μέθοδο ολοκλήρωσης η μεταβολή της τάσης διάσπασης (κανονικοποιημένη) είναι ποιοτικά ίδια για όλα τα μήκη των μονωτήρων όταν η καταπόνηση είναι συγκεκριμένη (ίδια κυματομορφή). Μικρές διαφορές στο σχήμα παρακάτω αποδίδονται πιθανόν στην επιλογή της ελάχιστης τάσης διάσπασης (που σταμάτησαν οι προσομοιώσεις), όπως και στην περίπτωση της διερεύνησης της επίδρασης της διάρκειας μετώπου. Τα αποτελέσματα της κυματομορφής 1.2/5 μs οφείλονται στη πολύ σύντομη ουρά (απότομη μείωση προς το μηδέν) που επιδρά διαφορετικά για διαφορετικό μήκος και επομένως επίπεδο μόνωσης μονωτήρων.

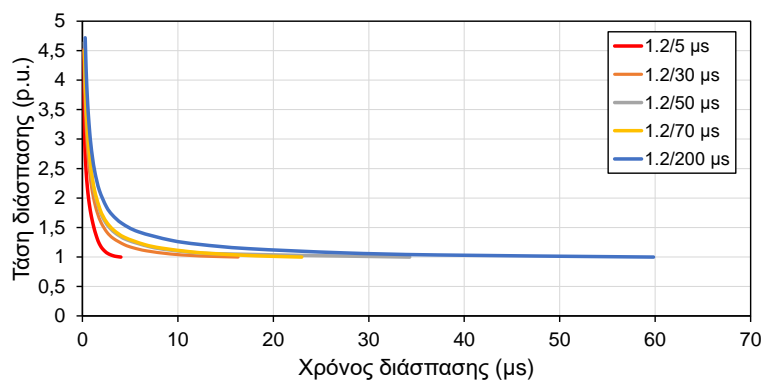
Ως γενικότερο συμπέρασμα προκύπτει ότι η διάρκεια μετώπου επιδρά κυρίως στους ενδιάμεσους χρόνους διάσπασης (όχι πολύ σύντομοι και ούτε πολύ μεγάλοι). Αντίθετα η επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (διάρκεια ουράς) αφορά τους μεγάλους χρόνους διάσπασης.



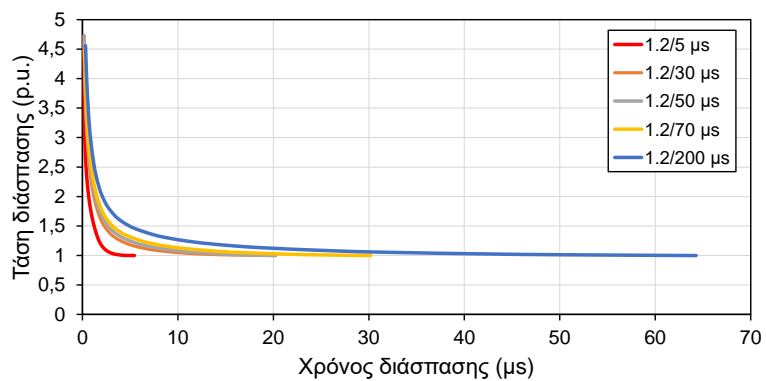
α) 66 kV



β) 150 kV

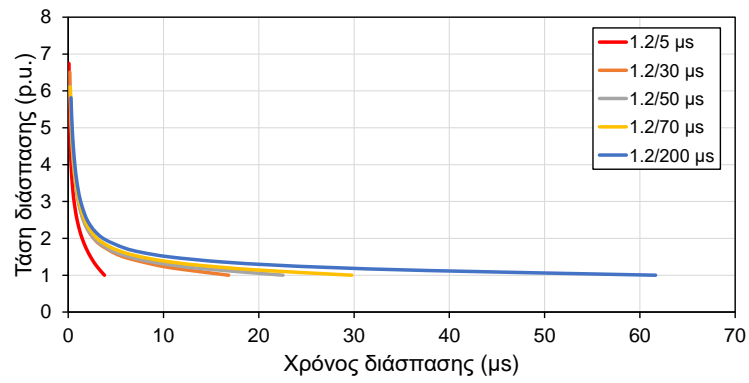


γ) 400 kV

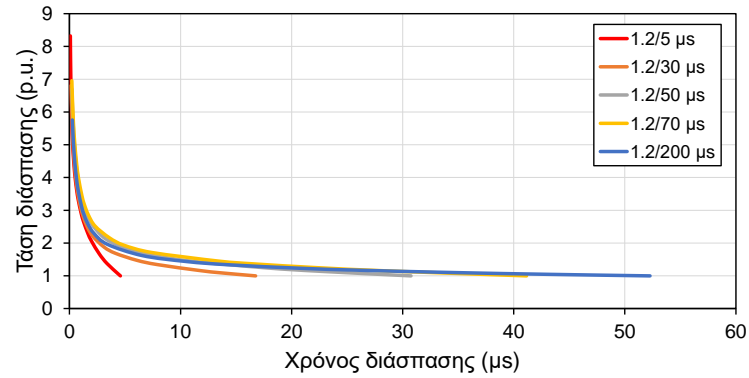


δ) 735 kV

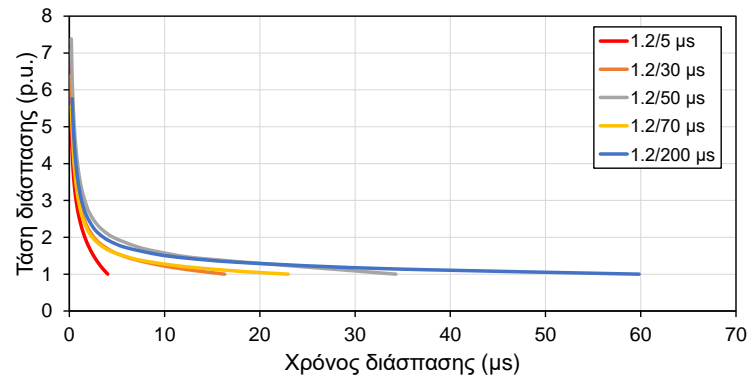
Σχήμα 3.11: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Επίδραση της διάρκειας ημίσεως εύρους (ουράς).



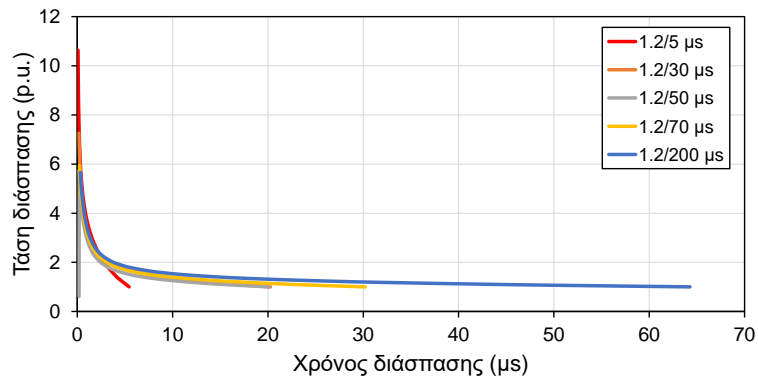
α) 66 kV



β) 150 kV

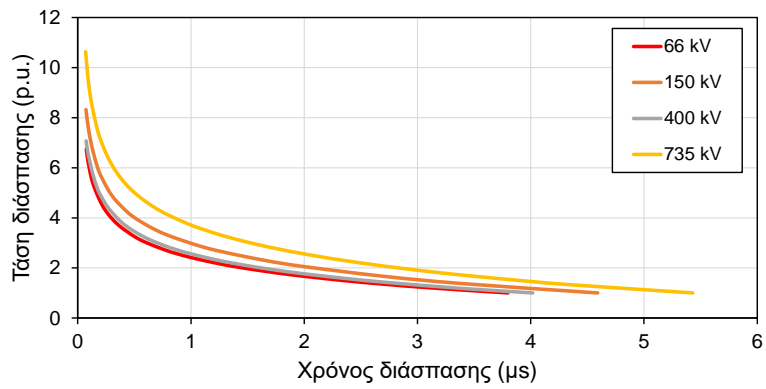


γ) 400 kV

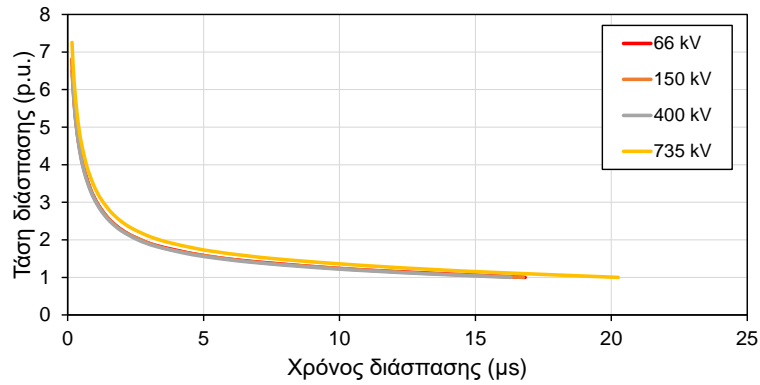


δ) 735 kV

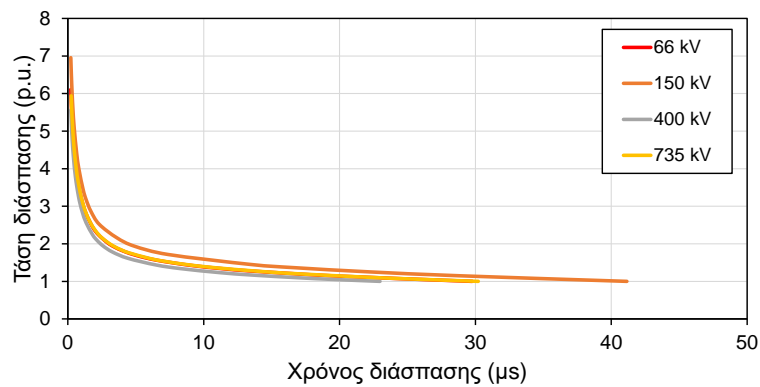
Σχήμα 3.12: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Επίδραση της διάρκειας ημίσεως εύρους (ουράς).



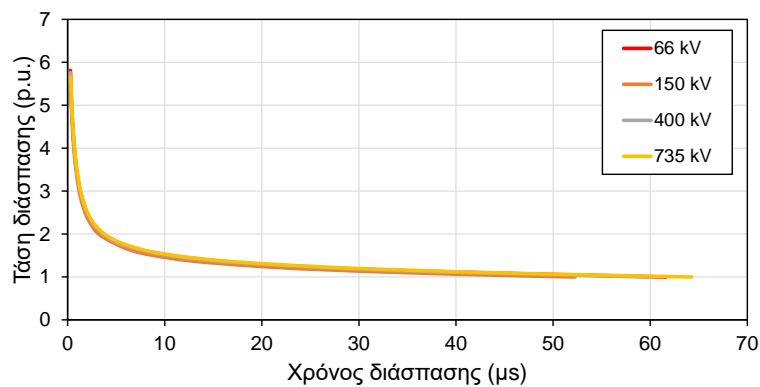
α) 1.2/5 μ s



β) 1.2/30 μ s



γ) 1.2/70 μ s



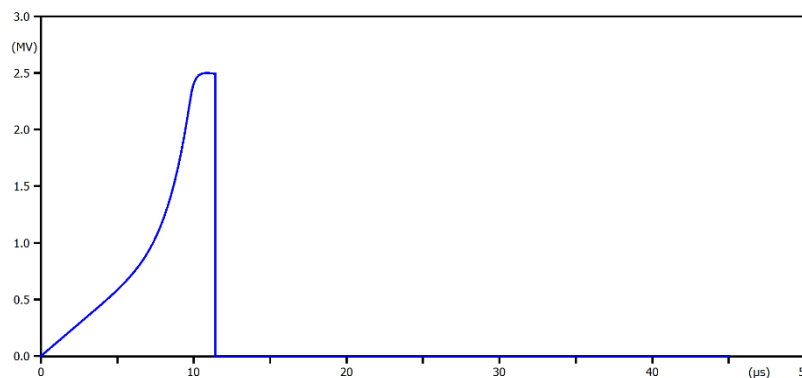
δ) 1.2/200 μ s

Σχήμα 3.13: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης των μονωτήρων για κάθε τιμή διάρκειας ουράς που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή.

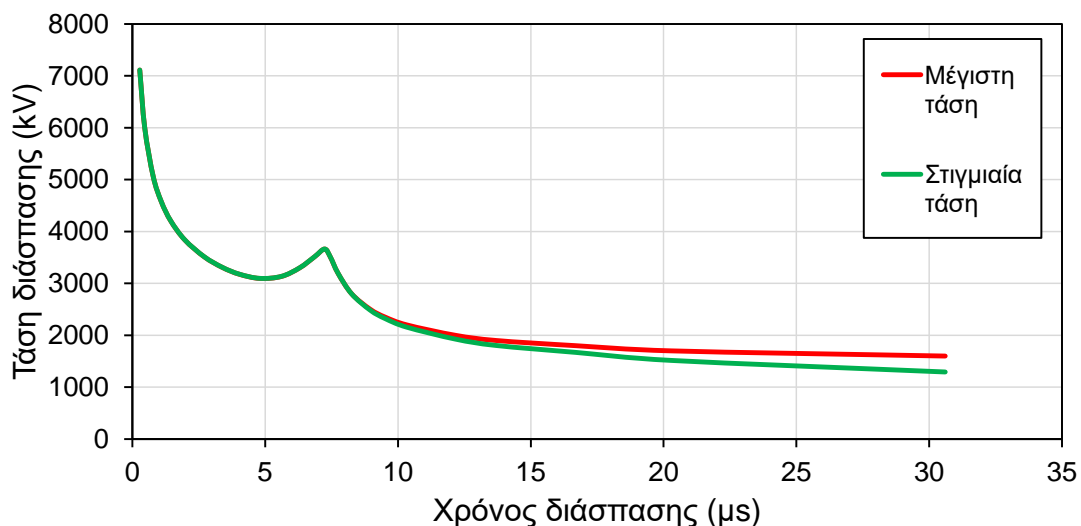
Κεφάλαιο 4: Κυματομορφή CIGRE

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσομοιωθούν διασπάσεις με τη χρήση της κυματομορφής CIGRE (Κεφάλαιο 2.1.1). Σε αυτές τις κυματομορφές η τάση ξεκινάει να αυξάνεται ομαλά μέχρι ένα χρονικό σημείο, από το οποίο και μετά αυξάνει απότομα μέχρι και το μέγιστο. Μετά μειώνεται με πιο αργό ρυθμό (Σχήματα 2.3 και 2.8).

Όπως και με την προηγούμενη κυματομορφή (διπλεκθετική) έτσι και με τη CIGRE από τη διάσπαση (κατάρρευση της τάσης στο μηδέν, Σχήμα 4.1) δημιουργείται η καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης. Μία τυπική καμπύλη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 και αποτελείται από μεγάλο αριθμό σημείων (κάθε σημείο απαιτεί μία προσομοίωση). Η μορφή της καμπύλης τάσης-χρόνου διάσπασης της CIGRE παρουσιάζει μια χαρακτηριστική αυξομείωση, η οποία σχηματίζει μια κορυφή. Αυτή οφείλεται στην αλλαγή κλίσης στο μέτωπο της κυματομορφής (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 4.1: Προσομοίωση διάσπασής μονωτήρα 400 kV με κυματομορφή CIGRE.



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης κυματομορφής CIGRE.

Από το Σχήμα 4.2 παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά με τις διπλεκθετικές κυματομορφές (Σχήμα 3.3) αν συγκριθούν οι δύο ορισμοί των καμπυλών $V-t$. Δηλαδή, οι καμπύλες διαφέρουν από το χρονικό σημείο (χρόνος διάσπασης) στο οποίο η διάσπαση αρχίζει να γίνεται στην ουρά με συνέπεια η μέγιστη και η στιγμιαία τάση διάσπασης να μην είναι ίδιες.

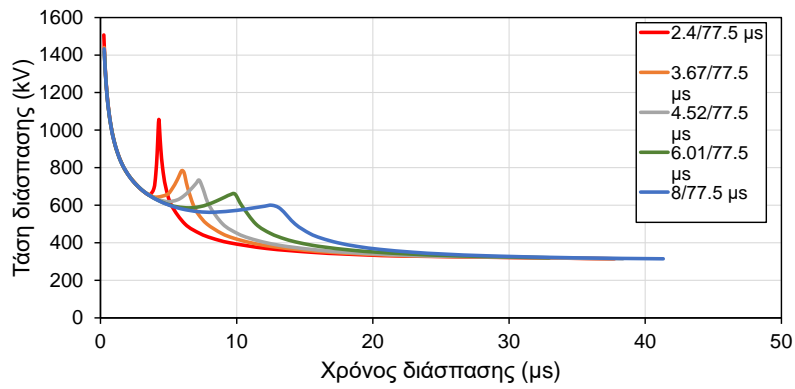
4.1 Επίδραση της κυματομορφής

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με βάση τον ορισμό των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης με τη μέγιστη τάση για όλους τους μονωτήρες που προσομοιώθηκαν με την κυματομορφή CIGRE. Προκύπτει στο συμπέρασμα πως όσο πιο μικρή είναι η διάρκεια μετώπου τόσο μεγαλύτερη είναι η κορυφή (τοπικό μέγιστο) που σχηματίζεται στο διάγραμμα, δηλαδή η αυξομείωση της τάσης διάσπασης. Επιπλέον, με μικρότερη διάρκεια μετώπου, παρατηρείται σε μικρότερο χρόνο ο σχηματισμός της προ αναφέρουσας κορυφής, με μάλιστα πιο απότομη κλίση και μικρότερο χρόνο διάσπασης. Αυτό συμβαίνει γιατί η αλλαγή κλίσης στο μέτωπο της κυματομορφής γίνεται νωρίτερα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.8. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι οι καμπύλες ταυτίζονται στην αρχή και στο τέλος τους σε όλες τις κυματομορφές και διαφέρουν στους ενδιάμεσους χρόνους, όπως συμβαίνει και στην επίδραση του μετώπου των διπλεκθετικών κυματομορφών (Κεφάλαιο 3.1, Σχήμα 3.4), με τις καμπύλες των μικρότερων μετώπων να δίνουν πιο εύκολα διάσπαση (με εξαίρεση το τοπικό μέγιστο).

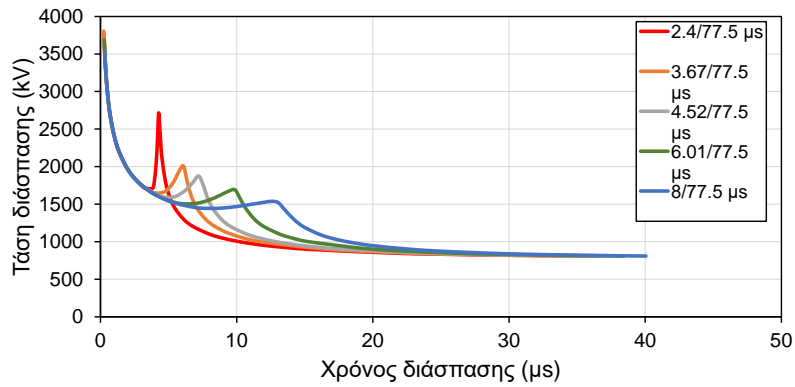
Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για τον ορισμό με τη στιγμιαία τάση. Παρατηρώντας τα γραφήματα προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα με τον προηγούμενο ορισμό. Επιπλέον φαίνεται ότι οι κυματομορφές με το πιο μεγάλο μέτωπο οδηγούν σε λίγο μεγαλύτερες στιγμιαίες τάσεις διάσπασης στο δεξί τμήμα τους. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με βάση το Σχήμα 2.8 από το οποίο φαίνεται για την ίδια τιμή κορυφής (μέγιστο) και για τον ίδιο χρόνο οι κυματομορφές αυτές εμφανίζουν μεγαλύτερες στιγμιαίες τάσεις.

Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για να διευκολυνθεί η σύγκριση και να προκύψουν γενικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των κυματομορφών και μονωτήρων εφαρμόστηκε η μέθοδος της κανονικοποίησης. Με την βοήθεια των Σχημάτων 4.5 και 4.6 τα οποία απεικονίζουν τις κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν και για τους δύο ορισμούς, επιβεβαιώνονται τα προηγούμενα συμπεράσματα. Επίσης φαίνεται ότι οι μορφές είναι παρόμοιες ανάμεσα στους διαφορετικούς μονωτήρες, αν και σε απόλυτη τιμή η τάση διάσπασης είναι πιο μεγάλη για μονωτήρες μεγαλύτερης τάσης.

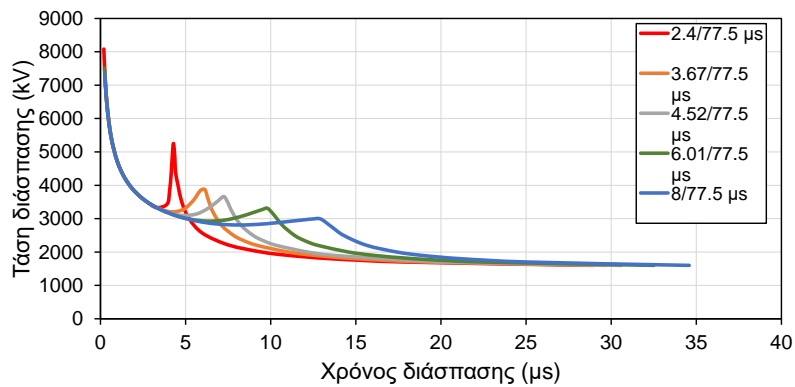
Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 4.7 που συγκρίνει τις καμπύλες $V-t$ ανά κυματομορφή για όλους τους μονωτήρες. Φαίνεται ότι και εδώ, όπως και στις διπλεκθετικές κυματομορφές, η γενική μορφή



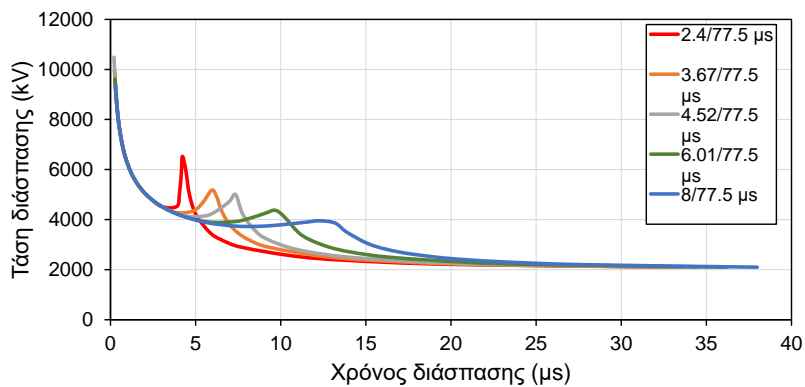
α) 66 kV



β) 150 kV

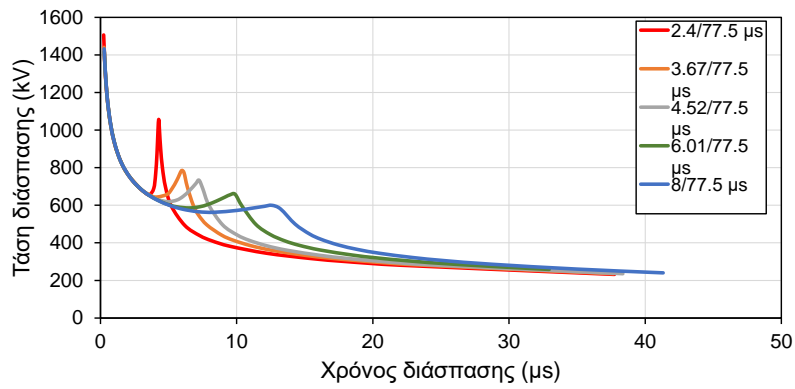


γ) 400 kV

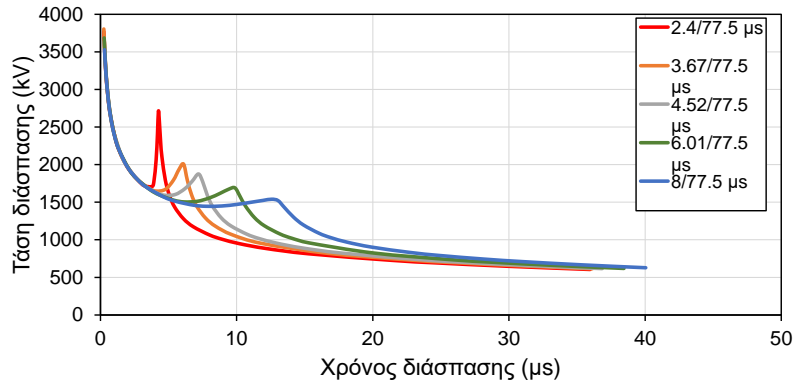


δ) 735 kV

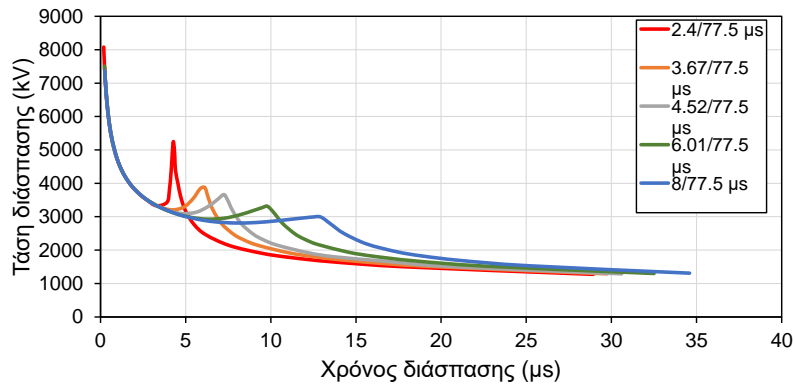
Σχήμα 4.3: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση. Κυματομορφή CIGRE.



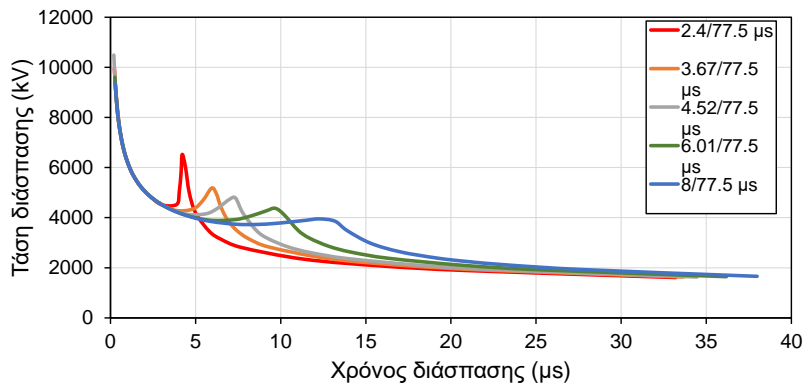
α) 66 kV



β) 150 kV

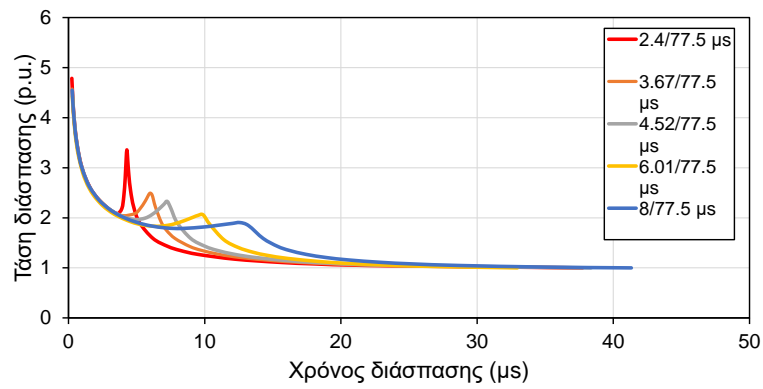


γ) 400 kV

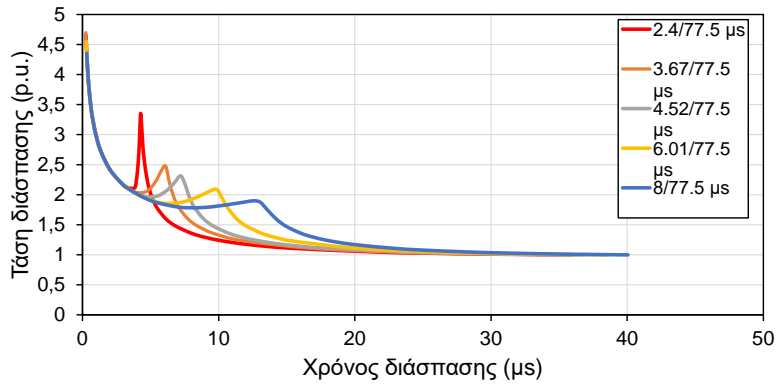


δ) 735 kV

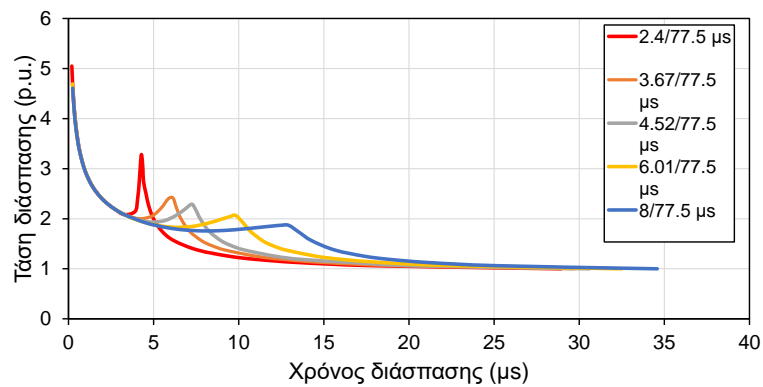
Σχήμα 4.4: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρα για τη στιγμιαία τάση. Κυματομορφή CIGRE.



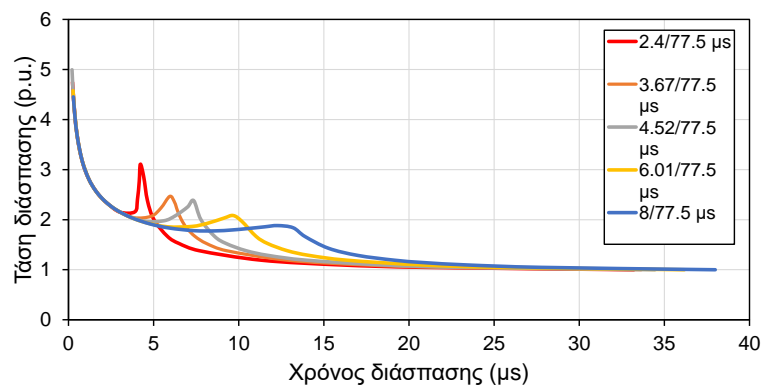
α) 66 kV



β) 150 kV

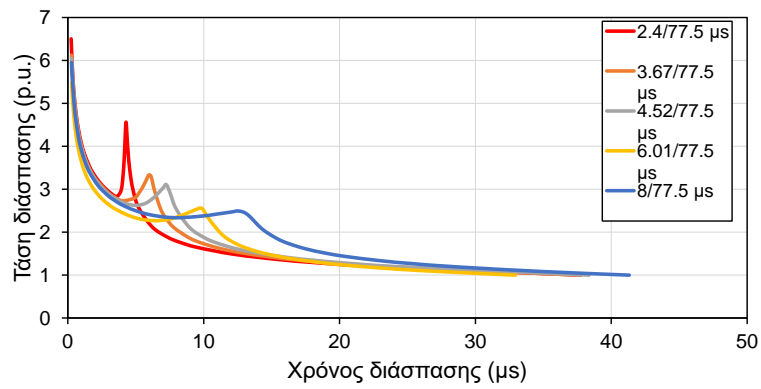


γ) 400 kV

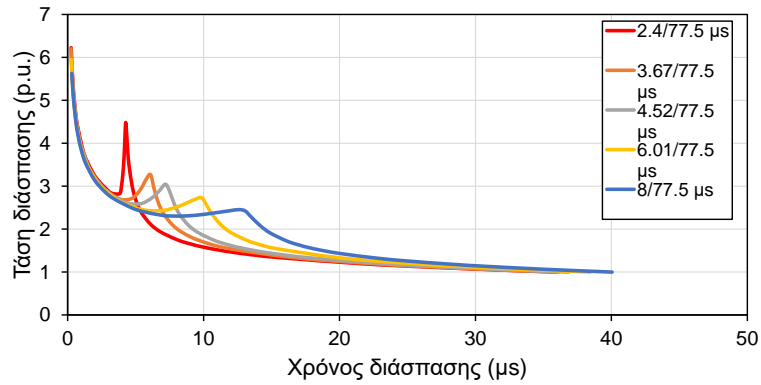


δ) 735 kV

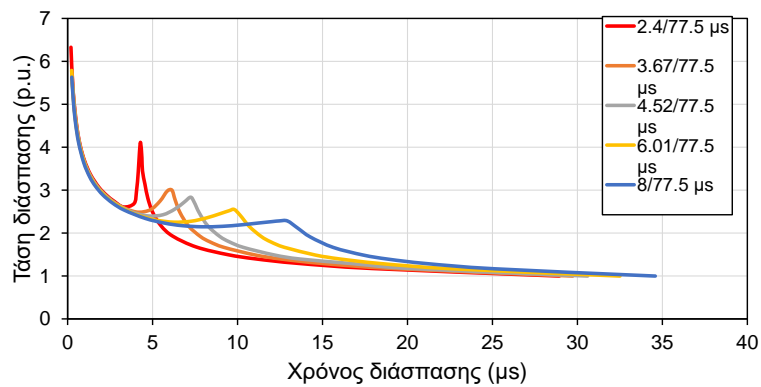
Σχήμα 4.5: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη μέγιστη τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Κυματομορφή CIGRE.



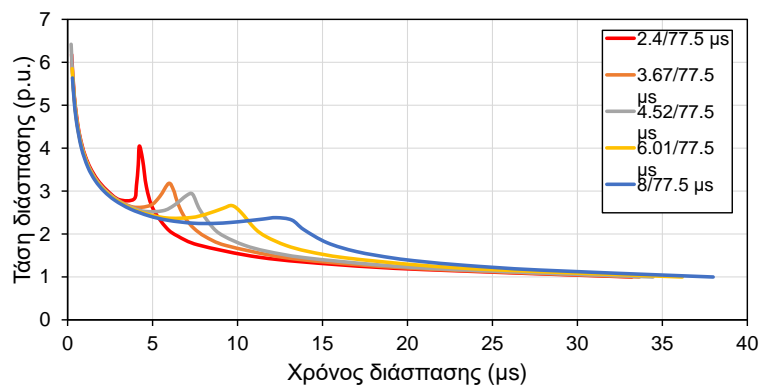
α) 66 kV



β) 150 kV

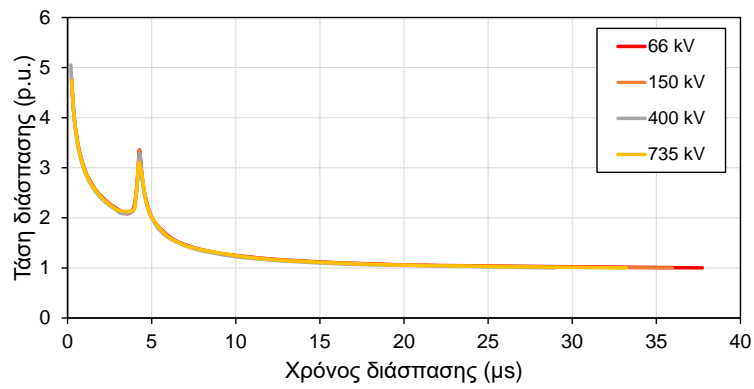


γ) 400 kV

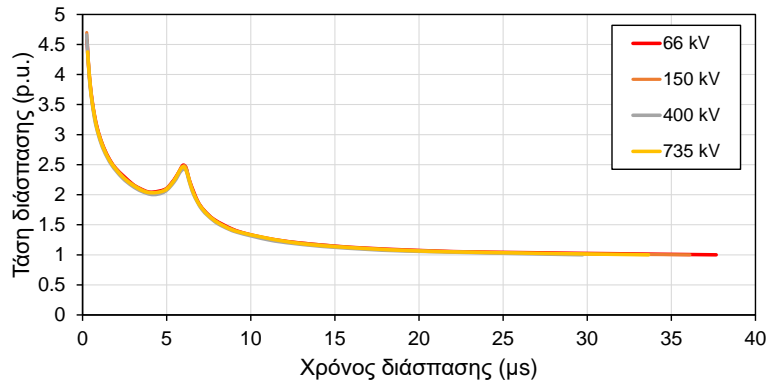


δ) 735 kV

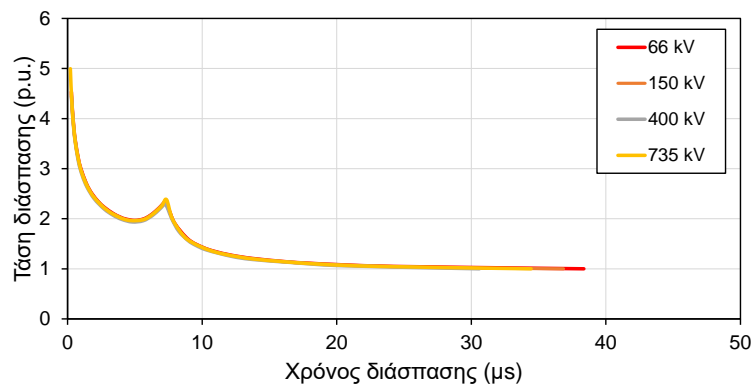
Σχήμα 4.6: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μονωτήρων για τη στιγμιαία τάση κανονικοποιημένες ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασης. Κυματομορφή CIGRE.



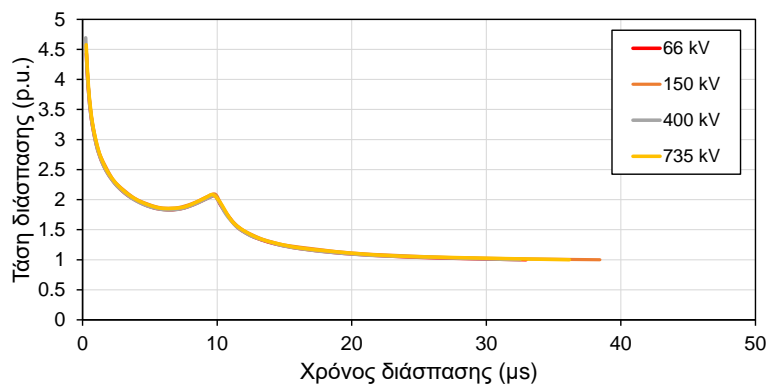
α) 2.4/77.5 μ s



β) 3.67/77.5 μ s

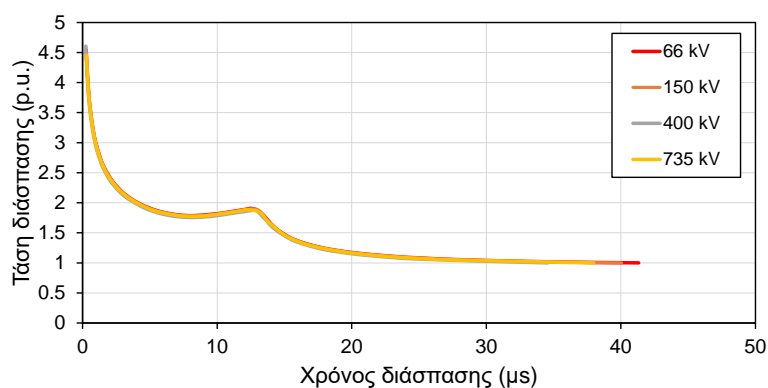


γ) 4.52/77.5 μ s



δ) 6.01/77.5 μ s

Σχήμα 4.7: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης των μονωτήρων για κάθε τιμή διάρκειας ουράς που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή. Κυματομορφή CIGRE.



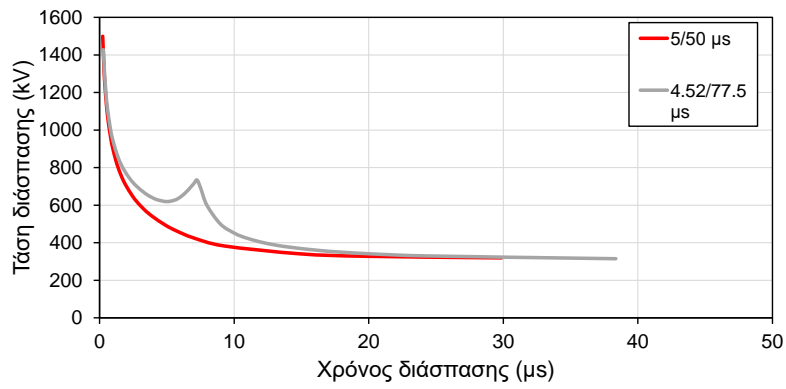
ε) 8/77.5 μs

Σχήμα 4.7 (συνέχεια): Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης των μονωτήρων για κάθε τιμή διάρκειας ουράς που προσομοιώθηκε σε κανονικοποιημένη μορφή. Κυματομορφή CIGRE.

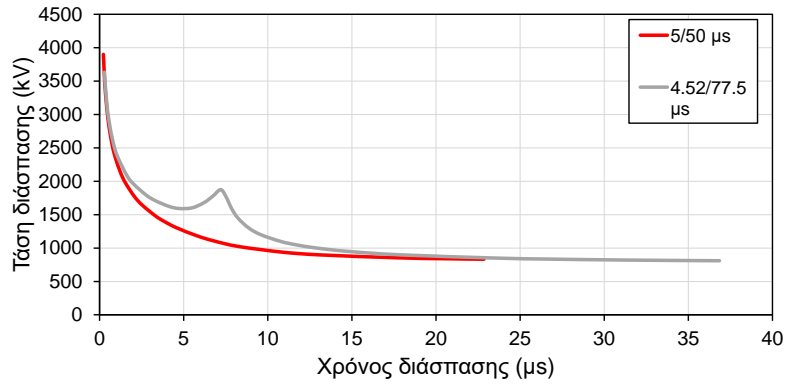
είναι ίδια για όλους τους μονωτήρες ανά κυματομορφή CIGRE. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα κανονικοποιούνται με το CFO και το μήκος των μονωτήρων. Δηλαδή, αν είναι γνωστό το CFO και η γενική μορφή της καμπύλης (κανονικοποιημένη) μπορεί να βρεθεί η καμπύλη V-t.

4.2 Σύγκριση διπλεκθετικών κυματομορφών με κυματομορφές CIGRE

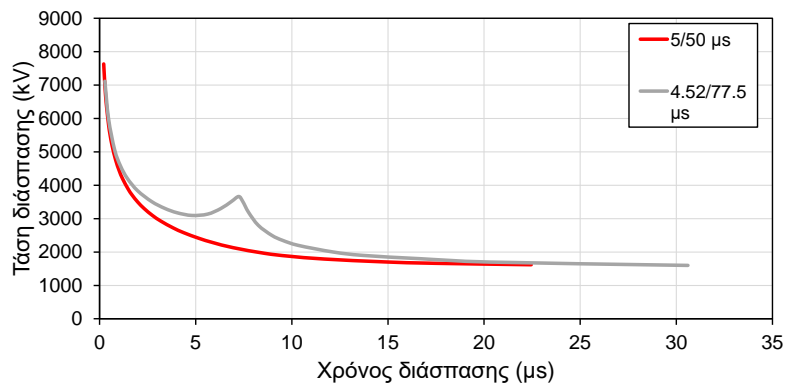
Συγκρίνοντας τα γραφήματα του κεφαλαίου αυτού για την κυματομορφή της CIGRE και τα γραφήματα για τις διπλεκθετικές κυματομορφές από το Κεφάλαιο 3 μπορούν να εξαχθούν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Με την βοήθεια των Σχημάτων 4.8 και 4.9, που αφορούν κυματομορφές με κοντινό χρόνο μετώπου και τον ορισμό της μέγιστης τάσης, διαπιστώνεται πως οι κυματομορφές CIGRE οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο διάσπασης σε σχέση με τις διπλεκθετικές. Για όλους τους μονωτήρες. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ημίσεος εύρους (ουράς) που θεωρήθηκε εδώ (Πίνακας 2.1) αλλά και λόγω της διαφορετικής μορφής του μετώπου. Αυτή ακριβώς η διαφορετική μορφή οδηγεί σε μεγαλύτερες τάσεις διάσπασης (πιο δύσκολη διάσπαση) για τον ίδιο χρόνο στις κυματομορφές CIGRE. Ωστόσο, και πάλι οι τιμές της τάσης διάσπασης στο δεξί άκρο των καμπυλών V-t είναι παρόμοιες, πράγμα που σημαίνει παρόμοια CFO και για τις δύο κυματομορφές. Το ίδιο ισχύει και σε συνθήκες υπέρτασης (αριστερό άκρο κυματομορφών).



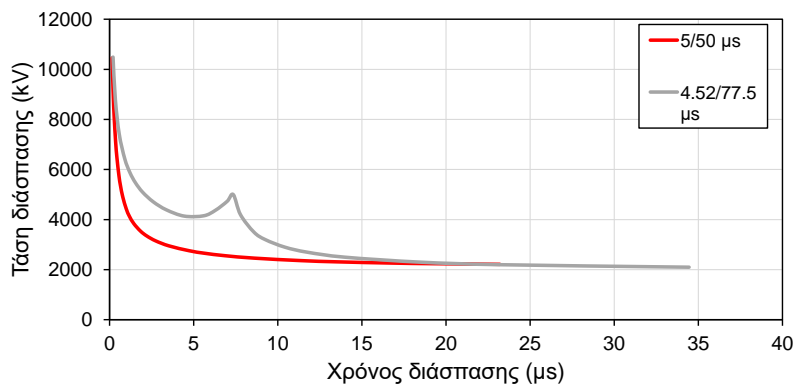
α) 66 kV



β) 150 kV

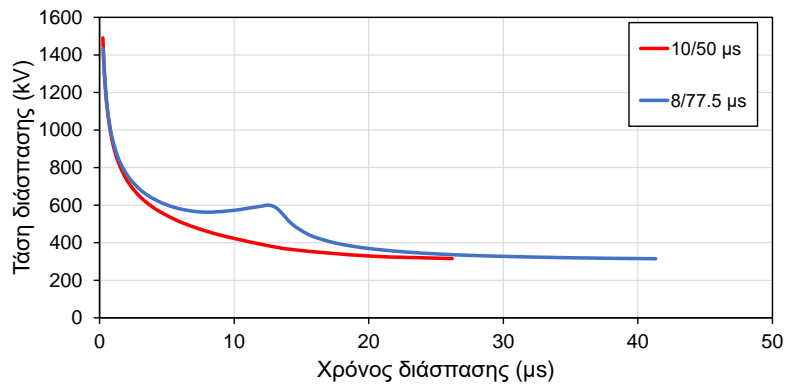


γ) 400 kV

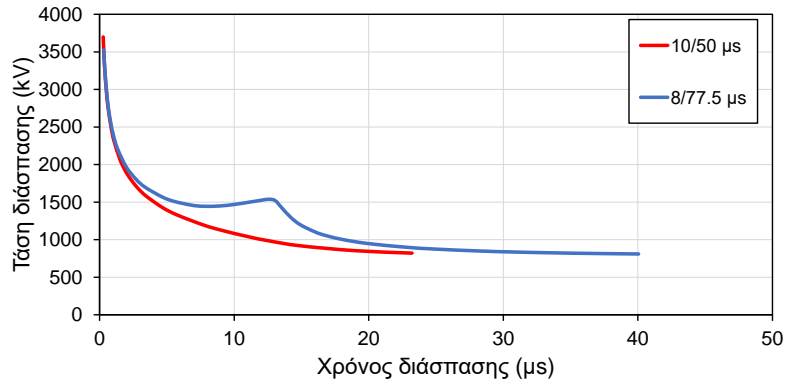


δ) 735 kV

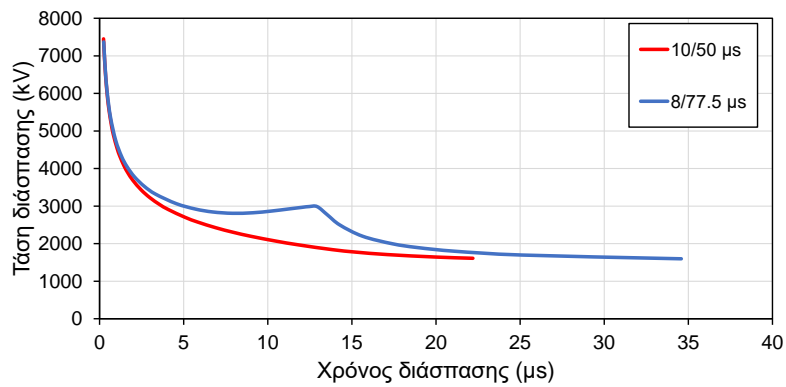
Σχήμα 4.8: Σύγκριση γραφημάτων διπλεκθετικής 5/50 μs και CIGRE 4.52/77.5 μs με ορισμό μέγιστης τάσης.



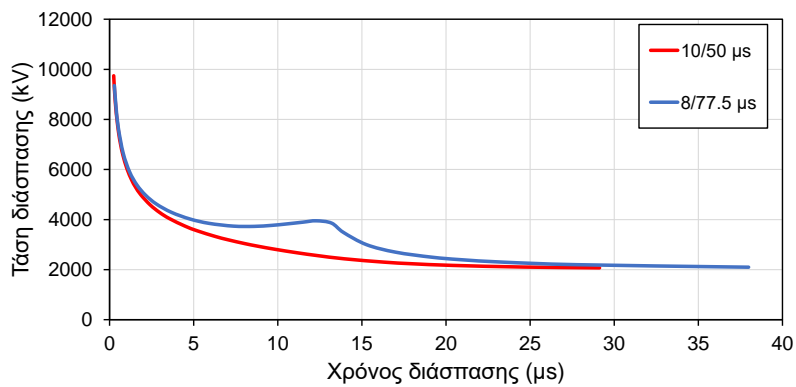
α) 66 kV



β) 150 kV



γ) 400 kV



δ) 735 kV

Σχήμα 4.9: Σύγκριση γραφημάτων διπλεκθετικής 10/50 μs και CIGRE 8/77.5 μs με ορισμό μέγιστης τάσης.

Κεφάλαιο 5: Πραγματικές κυματομορφές

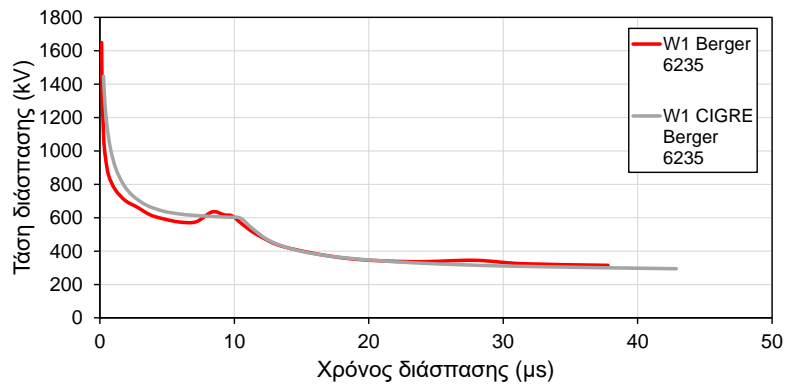
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις πραγματικές κυματομορφές του κεραυνού και τις κυματομορφές της CIGRE που τις προσεγγίζουν (Σχήμα 2.5, W1 και W3).

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με βάση τον ορισμό των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης με τη μέγιστη τάση για την πραγματική κυματομορφή W1 Berger 6235 και την αντίστοιχη αναπαράστασή της σε CIGRE για όλους τους μονωτήρες που προσομοιώθηκαν. Φαίνεται ότι η καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης της κυματομορφής CIGRE είναι εξαιρετικά όμοια με ελάχιστες διαφορές. Διακρίνουμε πως για όλους τους μονωτήρες στα πρώτα μς η τάση διάσπασης της CIGRE είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της πραγματικής κυματομορφής. Επιπλέον, στους μονωτήρες 150 kV και 735 kV ο μέγιστος χρόνος διάσπασης της πραγματικής κυματομορφής είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν της CIGRE. Διαφορές υπάρχουν και κοντά στο τοπικό μέγιστο. Γενικά φαίνεται ότι η καμπύλη της πραγματικής κυματομορφής είναι πιο «ανομοιόμορφη» από αυτή της CIGRE γεγονός που οφείλεται στη μορφή της πραγματικής κυματομορφής (Σχήμα 2.5). Μάλιστα παρουσιάζουν ένα ακόμη αλλά μικρότερο τοπικό μέγιστο πιο κοντά στο CFO.

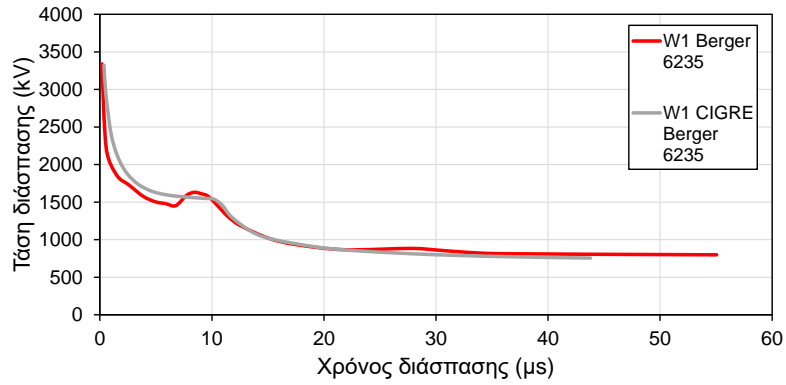
Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλους τους μονωτήρες αυτή τη φορά με τον ορισμό της στιγμιαίας τάσης διάσπασης. Προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα με τον προηγούμενο ορισμό, με πιο έντονο δεύτερο τοπικό μέγιστο.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με βάση τον ορισμό των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης με τη μέγιστη τάση για την πραγματική κυματομορφή W3 Narita 1 και την αντίστοιχη αναπαράστασή της σε CIGRE για όλους τους μονωτήρες που προσομοιώθηκαν. Και εδώ η καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης της κυματομορφής CIGRE που αναπαριστά την πραγματική κυματομορφή είναι εξαιρετικά όμοια με ελάχιστες διαφορές (μικρότερες από τη W1). Η διαφορά που εντοπίζεται είναι πως η πραγματική κυματομορφή σχηματίζει πιο αιχμηρή κορυφή από την αντίστοιχη CIGRE. Αυτό ίσως να οφείλεται και τον αριθμό των σημείων γύρω από το τοπικό μέγιστο. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται η ίδια σύγκριση αλλά με βάση τον ορισμό της στιγμιαίας τάσης. Και στην περίπτωση αυτή καταλήγουμε στα ίδια βασικά συμπεράσματα.

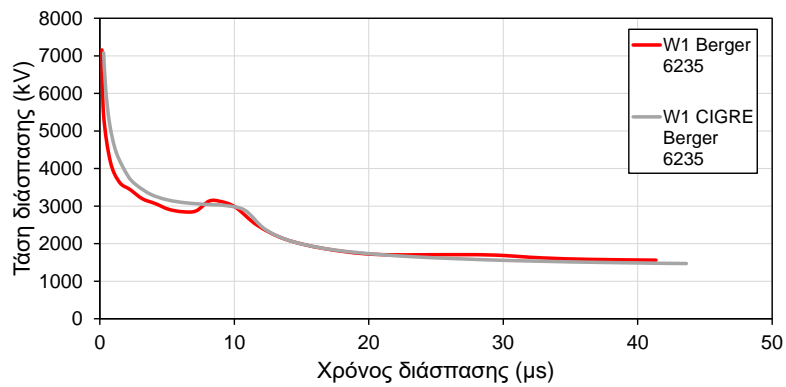
Γενικά, η αναπαράσταση πραγματικών κυματομορφών με κυματομορφές CIGRE δείχνει να οδηγεί σε πιο δύσκολη διάσπαση στους μικρούς χρόνους διάσπασης, δηλαδή σε συνθήκες υπέρτασης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της διάσπασης της μόνωσης σε μελέτες συντονισμού μονώσεων. Αντίθετα σε μεγαλύτερους χρόνους κοντά στο CFO η προσέγγιση της αναπαράστασης είναι καλύτερη.



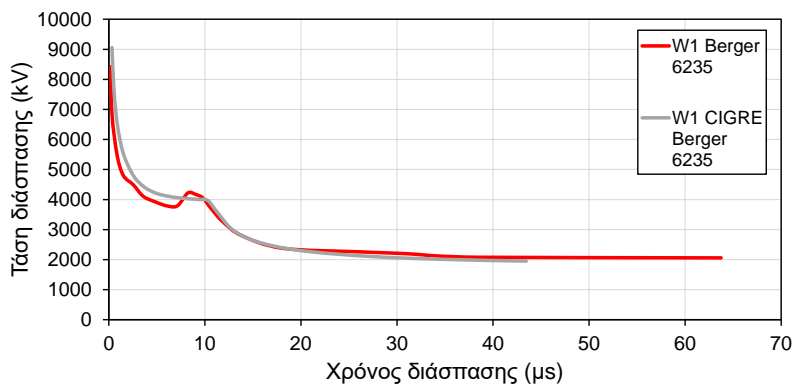
α) 66 kV



β) 150 kV

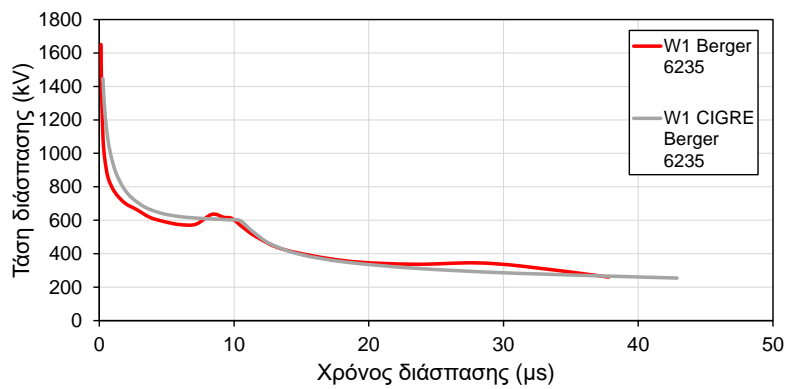


γ) 400 kV

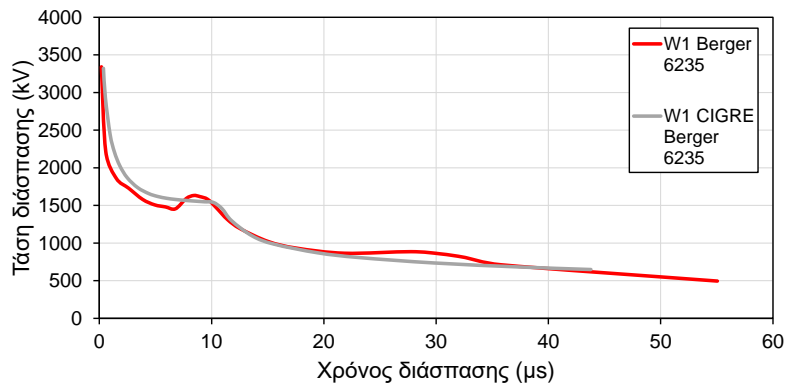


δ) 735 kV

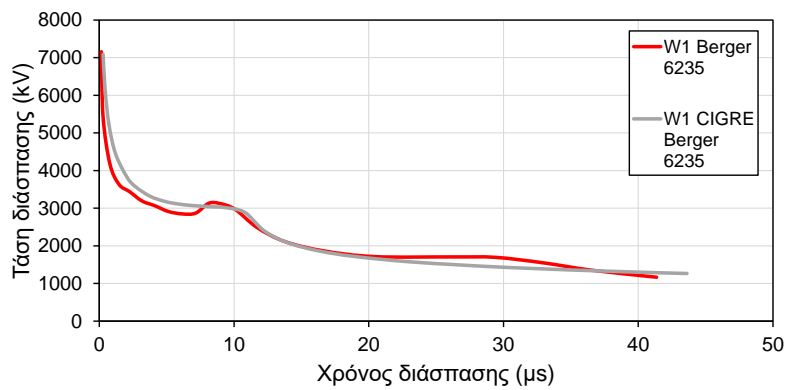
Σχήμα 5.1: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W1 με την αναπαράστασή της σε CIGRE με ορισμό μέγιστης τάσης.



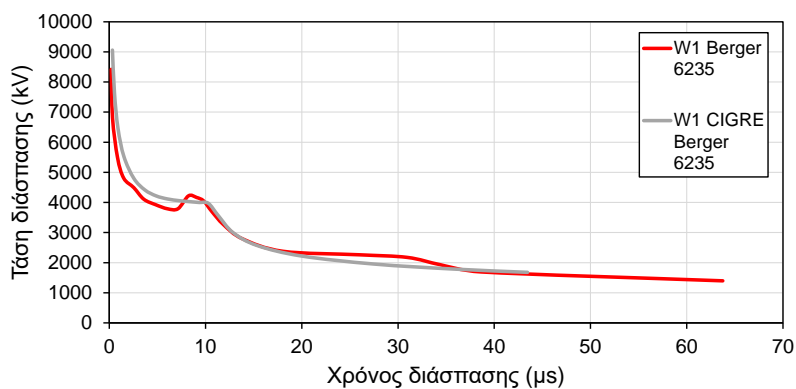
α) 66 kV



β) 150 kV

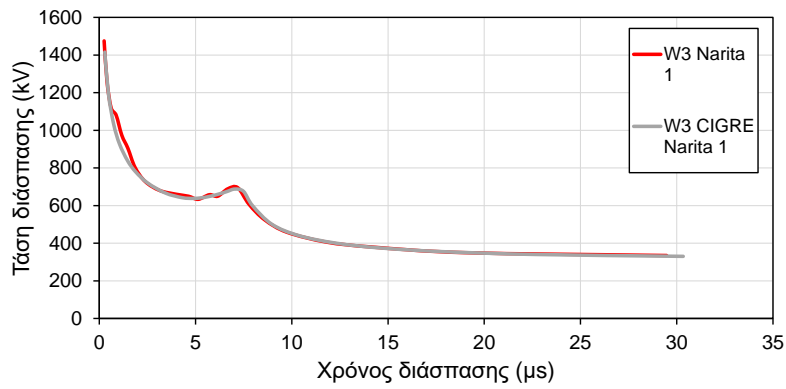


γ) 400 kV

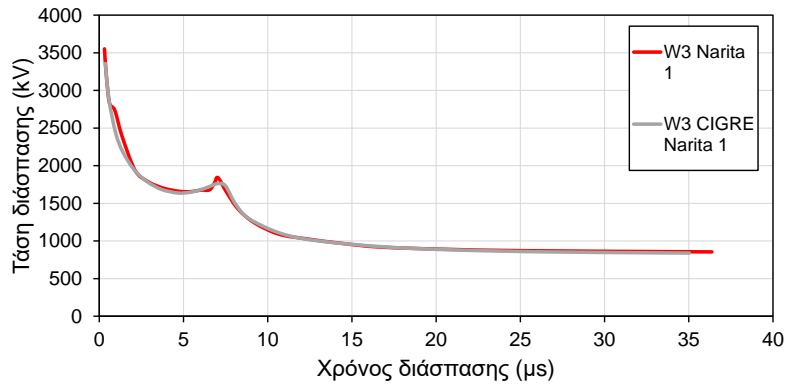


δ) 735 kV

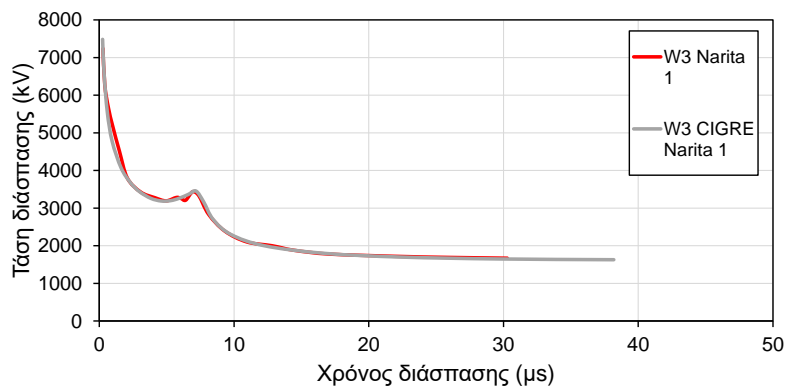
Σχήμα 5.2: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W1 με την αναπαράστασή της σε CIGRE με ορισμό στιγμιαίας τάσης.



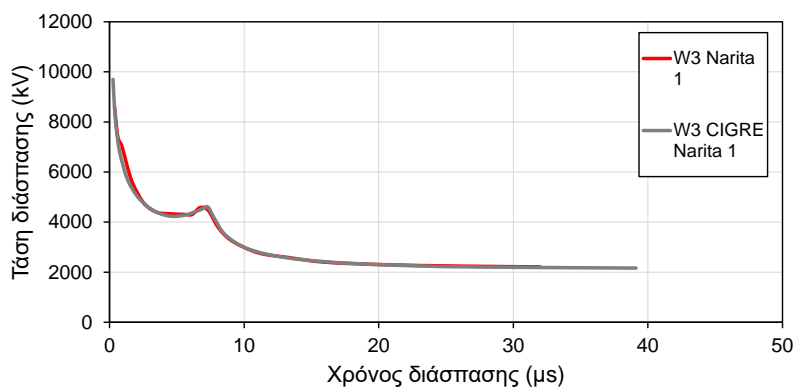
α) 66 kV



β) 150 kV

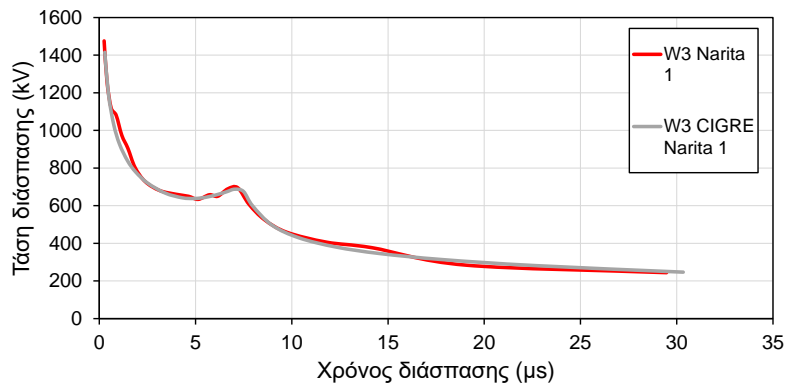


α) 400 kV

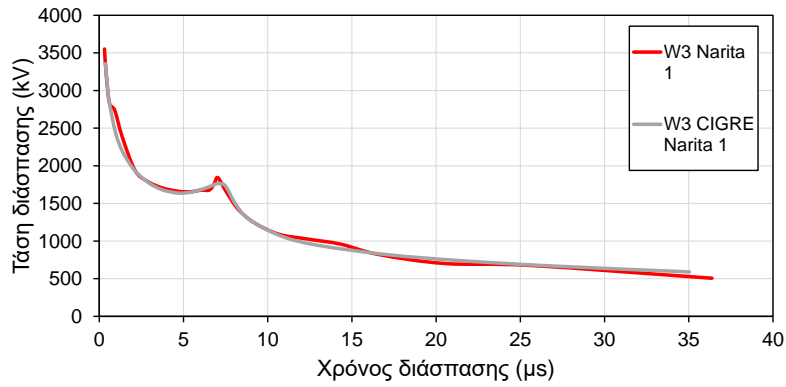


δ) 735 kV

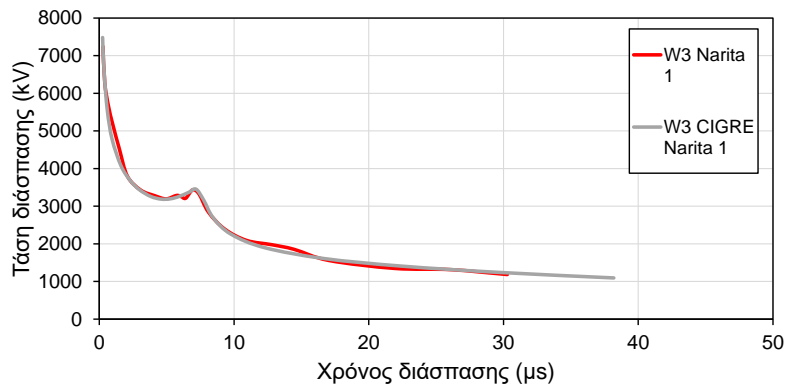
Σχήμα 5.3: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W3 με την αναπαράστασή της σε CIGRE με ορισμό μέγιστης τάσης.



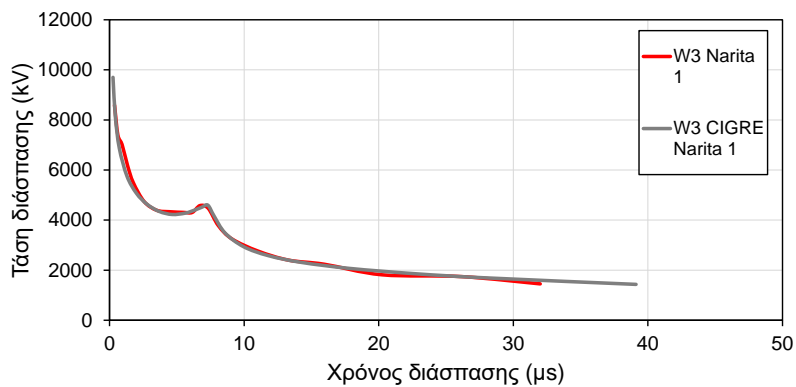
α) 66 kV



β) 150 kV



γ) 400 kV



δ) 735 kV

Σχήμα 5.4: Σύγκριση καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης πραγματικής κυματομορφής W3 με την αναπαράστασή της σε CIGRE με ορισμό στιγμιαίας τάσης.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Σε αυτή την διπλωματική εργασία χρησιμοποιώντας το λογισμικό ATP-EMTP πραγματοποιήθηκε η πρόβλεψη της ηλεκτρικής διάσπασης μονωτήρων μεγάλου μήκους όταν καταπονούνται με εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις ή/και κεραυνικές υπερτάσεις μη κανονικής κυματομορφής με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης τάσης στην τάση διάσπασης και στον χρόνο διάσπασης. Προσομοιώθηκαν διπλεκθετικές κυματομορφές με διαφορετικές διάρκειες μετώπου και ημίσεος εύρους (ουράς), καθώς και κυματομορφές πραγματικών κεραυνών και CIGRE. Μελετήθηκαν τέσσερις τυπικοί αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των 66 kV, 150 kV, 400 kV και 735 kV, οι οποίοι έχουν διαφορετικό μήκος και επίπεδο μόνωσης. Οι προσομοιώσεις έγιναν με την ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο ολοκλήρωσης, η οποία είναι ημιεμπειρική. Έτσι προέκυψαν καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης συσχετίζουν είτε τη μέγιστη τάση που καταπόνησε τη μόνωση πριν τη διάσπαση είτε τη στιγμιαία τάση διάσπασης με τον χρόνο διάσπασης. Για κυματομορφές όπως οι διπλεκθετικές που δεν αλλάζουν μορφή κατά τη διάρκειά τους, οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης αρχικά μειώνονται απότομα ως προς την τάση διάσπασης και μετά με πολύ μικρότερο ρυθμό στους μεγάλους χρόνους διάσπασης. Εκεί οι τάση διάσπασης αντιστοιχεί σε πιθανότητα διάσπασης 50% και συμβολίζεται ως CFO. Στις κυματομορφές που αλλάζουν μορφή, όπως οι κυματομορφές CIGRE, παρατηρήθηκε τοπικό μέγιστο στις καμπύλες.

Σχετικά με την επίδραση του μετώπου βρέθηκε ότι οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης συγκλίνουν στους μικρούς και μεγάλους χρόνους διάσπασης, δηλαδή σε συνθήκες υπέρτασης και κοντά στο CFO αντίστοιχα. Στους ενδιάμεσους χρόνους μεγαλύτεροι χρόνοι μετώπου έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μέγιστη και στιγμιαία τάση διάσπασης για τον ίδιο χρόνο, δηλαδή δυσκολότερη διάσπαση.

Σχετικά με την επίδραση της ουράς βρέθηκε ότι οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης ταυτίζονται στους μικρούς χρόνους διάσπασης (συνθήκες υπέρτασης) καθώς τα μέτωπά τους είναι ίδια. Κοντά στο CFO οι καμπύλες για τις μικρές ουρές τελειώνουν νωρίτερα, δηλαδή δεν συμβαίνει διάσπαση σε μεγάλους χρόνους, και η τάση διάσπασης είναι μεγαλύτερη. Το αντίθετο προκύπτει για τη στιγμιαία τάση διάσπασης καθώς μικρή ουρά ισοδυναμεί με μεγάλη και σύντομη μείωση τάσης.

Στις κυματομορφές CIGRE παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο (αιχμή) στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης λόγω της αλλαγής κλίσης (μορφής) στο μέτωπο της κυματομορφής. Αυτό το τοπικό μέγιστο είναι εντονότερο και εμφανίζεται νωρίτερα για μικρά μέτωπα. Κατά τα λοιπά, οι καμπύλες συγκλίνουν στους μικρούς και μεγάλους χρόνους διάσπασης, δηλαδή σε

συνθήκες υπέρτασης και κοντά στο CFO αντίστοιχα, όπως και στις διπλεκθετικές κυματομορφές. Στους ενδιαμέσους χρόνους μεγαλύτεροι χρόνοι μετώπου έχουν και πάλι ως αποτέλεσμα δυσκολότερη διάσπαση.

Συγκρίνοντας τις διπλεκθετικές κυματομορφές με τις CIGRE, φαίνεται ότι οι CIGRE οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο διάσπασης σε σχέση με τις διπλεκθετικές και σε μεγαλύτερες τάσεις διάσπασης σε ενδιαμέσους χρόνους. Αλλά οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης συγκλίνουν σε μικρούς και μεγάλους χρόνους.

Η αναπαράσταση πραγματικών κυματομορφών με κυματομορφές CIGRE, η οποία είναι η τακτική που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις διεθνώς, δείχνει να προκαλεί σε πιο δύσκολη διάσπαση στους μικρούς χρόνους, δηλαδή σε συνθήκες υπέρτασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποεκτίμηση της διάσπασης των μονωτήρων σε μελέτες συντονισμού μονώσεων. Αντίθετα σε μεγαλύτερους χρόνους κοντά στο CFO η προσέγγιση της αναπαράστασης CIGRE είναι καλύτερη και μάλιστα οδηγεί σε μικρότερες τάσεις διάσπασης, δηλαδή σε αποτελέσματα στην ασφαλή πλευρά.

Τέλος, είναι σημαντικό ότι για την ίδια κυματομορφή, οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μεταξύ των διαφορετικών μονωτήρων έχουν την ίδια μορφή αν κανονικοποιηθούν ως προς την ελάχιστη τάση διάσπασής τους. Άρα η επίδραση της κυματομορφής είναι ίδια ανεξάρτητα από το μήκος και το βασικό επίπεδο μόνωσης των μονωτήρων που εξετάζονται.

Βιβλιογραφία

- [1] Δάτσιος, Ζ. (2017). Διερεύνηση του φαινομένου ιονισμού του εδάφους γύρω από συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης: Επίδραση στην κεραυνική συμπεριφορά γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- [2] Datsios, Z., Mikropoulos, P., Tsovilis, T. (2014). 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.
- [3] Chisholm, W. (2010). New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 26 (2), 14-25.
- [4] EEI-NEMA Subcommittee Report, (1940). Recommendations for high voltage testing. *Electrical Engineering*, 59 (10), 598-602.
- [5] Μικρόπουλος, Π. (2008). Εργαστηριακές ασκήσεις στην τεχνολογία των υψηλών τάσεων. [Σημειώσεις μαθήματος] Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- [6] Δάτσιος, Ζ. (2022). Θεωρία μαθημάτων υψηλών τάσεων I, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη.
- [7] Datsios, Z., Patsalis, D., Mikropoulos, P., Tsovilis, T. (2022). Effects of lightning current waveform on the fast-front overvoltages and critical currents causing insulation flashover to a 150 kV overhead transmission line. *ICLP, South Africa*.
- [8] Visacro, S., De Conti, A. (2007), Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49 (2), 448-451.
- [9] Datsios, Z., Patsalis, D., Mikropoulos, P., Tsovilis, T. (2023). 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*, early access.