



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση Διάσπασης Μονωτήρων με το
Λογισμικό ATP-EMTP:
Μοντέλα Προόδου του Λήντερ

Μιχάλης Τσολακίδης

A.M.: HN08273

Επιβλέπων: Ζαχαρίας Δάτσιος, Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

(Υπογραφή)

.....

ΤΣΟΛΑΚΙΔΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

© 2023 – All rights reserved

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή εργασία αυτή πραγματεύεται την πρόβλεψη της ηλεκτρικής διάσπασης μονωτήρων υψηλής τάσης χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο προόδου του λήντερ. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προβλέψει την τάση διάσπασης και τον χρόνο διάσπασης υπό υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου και εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Οι προσομοιώσεις με το μοντέλο έγιναν με το λογισμικό ATP-EMTP και αφορούσαν μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σε τυπικές εναέρια γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με επίπεδα τάσης 66, 150, 400 και 735 kV. Οι κυματομορφές της τάσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διπλεκθετικές (επίδραση μετώπου και ουράς κυματομορφής) και κυματομορφές της CIGRE (επίδραση μετώπου), οι οποίες αναπαριστούν κεραυνικά ρεύματα. Τα αποτελέσματα έχουν τη μορφή καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης. Αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως για την περιγραφή της συμπεριφοράς των μονωτήρων σε καταπόνηση συγκεκριμένης κυματομορφής.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρική διάσπαση, Κρουστικές Υψηλές Τάσεις, Μοντέλα προόδου του λήντερ, Μονωτήρες, Υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ABSTRACT

This study deals with predicting the electrical breakdown (flashover) of long insulators using a leader development model. This model can predict the breakdown voltage and time under fast-front overvoltages and lightning impulse voltages. Simulations were performed with ATP-EMTP for insulators used at typical power lines with voltages 66, 150, 400 and 735 kV. The waveforms under study are double-exponential (effects of wavefront and wavetail) and CIGRE (effects of wavefront) waveforms. CIGRE waveforms represent lightning currents. Results are presented in the form of voltage-time curves, which are commonly used to describe the behavior of insulators when stressed by a specific waveform.

Keywords: Electrical breakdown, Insulators, Leader development models, Lightning impulse voltages, Lightning overvoltages

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	i
Abstract	iii
Πίνακας Περιεχομένων	v
Πίνακας Εικόνων.....	vii
Κατάλογος Πινάκων.....	ix
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1: Μεθοδοι Προβλεψης της Διασπασης Μεγαλων Διακενων Αερα και Μονωτηρων	3
1.1 Ορισμοί και χρησιμότητα – Συμπεριφορά μονώσεων υπό κρουστικές υψηλές τάσεις και υπερτάσεις	3
1.2 Απλή σύγκριση με κάποια χαρακτηριστική τιμή	3
1.3 Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης	4
1.4 Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης	6
1.5 Μοντέλα προόδου του λήντερ.....	7
1.6 Στόχος της εργασίας και περιπτώσεις προσομοιώσεων	9
Κεφάλαιο 2: Περιπτώσεις Προσομοιωσεων	11
2.1 Κυματομορφές.....	11
2.2 Μονωτήρες.....	13
Κεφάλαιο 3: Διπλεκθετικη Κυματομορφη.....	15
3.1 Διάρκεια μετώπου	15
3.2 Διάρκεια ημίσεος εύρους (ουράς)	20
Κεφάλαιο 4: Κυματομορφη CIGRE	25
Κεφάλαιο 5: Συμπερασματα	31
Βιβλιογραφία.....	33

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

Εικόνα 28: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 400 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.	28
Εικόνα 29: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 735 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.	29
Εικόνα 30: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 735 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.	29

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εξισώσεις ταχυτητας του λήντερ [3]	9
Πίνακας 2: Περιπτώσεις προσομοιώσεων.....	12
Πίνακας 3: Παράδειγμα αποτελέσματος επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για τη δημιουργία καμπυλών V-t. Μονωτήρας 400 kV και διπλεκθετική κυματομορφή 10/66.1 μs.....	14

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόβλεψη της τάσης διάσπασης και του χρόνου διάσπασης ενός μονωτήρα υψηλής τάσης (μεγάλου μήκους) απαιτείται για τις μελέτες προστασίας έναντι κεραυνικών υπερτάσεων και συντονισμού μονώσεων. Από τις μεθόδους που έχουν προταθεί, τα μοντέλα προόδου του λήντερ βασίζονται στο μηχανισμό της ηλεκτρικής διάσπασης και μπορεί να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα μοντέλα αυτά επιλύονται με ανάπτυξη κώδικα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λογισμικό μεταβατικών φαινομένων, όπως το ATP-EMTP.

Αυτή η πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την πρόβλεψη της ηλεκτρικής διάσπασης μονωτήρων υψηλής τάσης χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο προόδου του λήντερ. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προβλέψει την τάση διάσπασης και τον χρόνο διάσπασης υπό υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου και εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Οι προσομοιώσεις με το μοντέλο έγιναν με το λογισμικό ATP-EMTP και αφορούσαν μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σε τυπικές εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με επίπεδα τάσης 66, 150, 400 και 735 kV. Οι κυματομορφές της τάσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διπλεκθετικές (επίδραση μετώπου και ουράς κυματομορφής) και κυματομορφές της CIGRE (επίδραση μετώπου), οι οποίες αναπαριστούν κεραυνικά ρεύματα. Τα αποτελέσματα έχουν τη μορφή καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης. Αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως για την περιγραφή της συμπεριφοράς των μονωτήρων σε καταπόνηση συγκεκριμένης κυματομορφής. Η πτυχιακή αυτή αποτελεί συνέχεια προηγούμενης αντίστοιχης πτυχιακής εργασίας [1], η οποία αφορά τη μέθοδο ολοκλήρωσης (ημι-εμπειρική μέθοδος).

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

1.1 Ορισμοί και χρησιμότητα – Συμπεριφορά μονώσεων υπό κρουστικές υψηλές τάσεις και υπερτάσεις

Για να μελετηθεί η συμπεριφορά των μονώσεων πάνω στις εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όταν καταπονηθούν από υπέρταση μικρής διάρκειας μετώπου χρειάζονται κάποια μοντέλα ή αλλιώς μέθοδοι ώστε να γίνουν οι κατάλληλες προσομοιώσεις για να γίνει η σωστή εκτίμηση της συμπεριφοράς των μονώσεων στη γραμμή αλλά και στους διασυνδεδεμένους υποσταθμούς σε περίπτωση πλήγματος κεραυνού. Με βάση αυτά τα μοντέλων ή τις μεθόδους θα γίνει αντιληπτό το αποτέλεσμα της καταπόνησης από τις υπερτάσεις και θα εκτιμηθεί ο χρόνος διάσπασης της μόνωσης πάνω στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μοντέλα και οι μέθοδοι είναι τα εξής:

- 1) η σύγκριση της υπέρτασης με το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL) ή αντίστοιχα η μέθοδος σύγκρισης της υπέρτασης με την 50% τάσης διάσπασης (CFO) για τη μόνωση της γραμμής
- 2) καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης
- 3) μέθοδος ολοκλήρωση
- 4) μοντέλα προόδου του λήντερ.

Από αυτές οι δύο τελευταίες είναι οι πιο ακριβείς. Αν δεν είχαν ανακαλυφθεί οι παραπάνω μέθοδοι και τα μοντέλα αυτά, ο μόνος τρόπος πρόβλεψης της διάσπασης θα ήταν με πειράματα με μη κανονικές κυματομορφές, όπως προκύπτουν από τις προσομοιώσεις.

Σημειώνεται ότι οι πληροφορίες του κεφαλαίου αυτού έχουν αντληθεί σε μεγάλο βαθμό από τις αναφορές [2]-[7].

1.2 Απλή σύγκριση με κάποια χαρακτηριστική τιμή

Για να εκτιμηθεί η τάση και ο χρόνος διάσπασης της μόνωσης της γραμμής γίνεται απλή σύγκριση της αναπτυσσομένης υπέρτασης με μια χαρακτηριστική τιμή που δείχνει το επίπεδο της μόνωσης. Συνήθως είναι η BIL (βασικό επίπεδο μόνωσης, 10% πιθανότητα διάσπασης), ή πιο συνηθισμένη είναι αυτή με 50% πιθανότητα διάσπασης. Όταν η υπέρταση έχει υπερβεί την χαρακτηριστική τιμή που έχει επιλεγεί τότε συμβαίνει διάσπαση. Παρά το ότι είναι μια πολύ απλή μέθοδος, δεν υπολογίζει τη χαρακτηριστική τάσης-χρόνου διάσπασης της μόνωσης υπό εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Σύμφωνα με τη χαρακτηριστική οι

μεγάλες τιμές της τάσης διάσπασης αντιστοιχούν σε μικρό χρόνο διάσπασης όποτε η υπέρταση για τη στιγμιαία τάση διάσπασης και ο χρόνος διάσπασης είναι εσφαλμένος με τη μέθοδο αυτή. Ωστόσο το CFO της μόνωσης είναι προσδιορισμένο υπό τις κανονικές συνθήκες των εξωτερικών κρουστικών υψηλών τάσεων ωστόσο αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να είναι κατάλληλη ώστε να μπορέσει να προβλεφθεί η συμπεριφορά της μόνωσης όταν η υπέρταση είναι μικρής διάρκειας μετώπου και με μη κανονική κυματομορφή αφού οι χαρακτηριστικές τιμές αναφέρονται σε κανονικές κυματομορφές.

1.3 Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης

Η καμπύλη τάσης-χρόνου ή αλλιώς καμπύλη V-t είναι η καμπύλη που δείχνει τη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που εφαρμόζεται στη μόνωση λίγο πριν τη διάσπαση, αλλά όταν η διάσπαση γίνει στο τελείωμα (ουρά) της κυματομορφής, τότε η καμπύλη V-t δεν μπορεί να αναφερθεί ως καμπύλη στιγμιαίας τάσης διάσπασης αλλά ονομάζεται μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση. Οι καμπύλες V-t στα αποτελέσματά τους δείχνουν έναν μονό συγκεκριμένο διάκενο αέρα ή μονωτήρα και είναι με συγκεκριμένη πολικότητας και κυματομορφή. Ωστόσο η καμπύλη V-t δεν λαμβάνεται υπόψη για τις τιμές της τάσης του χρόνου διάσπασης διότι η καμπύλη κατασκευάζεται από τις μέσες ή τις ελάχιστες για να είναι τα αποτελέσματα πιο ασφαλή, επιπλέον σε ότι αφορά τους μονωτήρες για τις εναέριες γραμμές μεταφοράς η καμπύλες V-t αναφέρονται στις κανονικές εξωτερικές υψηλές τάσης (1.2/50 μs).

Αλλά σύμφωνα με τις καμπύλες V-t η διάσπαση στους μονωτήρες γίνεται όταν κατά μήκος τάση γίνεται ίδια η μεγαλύτερη με την τάση διάσπασης. Ωστόσο αν η πειραματική καμπύλη V-t δεν υπάρχει τότε μπορούν να βρεθούν τα πειραματικά δεδομένα από παρόμοιο μονωτήρα ή να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$U_{FO} = (400 + 710 t_b^{0.75}) \cdot D \quad (1)$$

Οπού το U_{FO} είναι η τάση διάσπασης σε (kV) το t_b είναι ο χρόνος διάσπασης και μετριέται σε (μs) και το D είναι το μήκος του μονωτήρα. Η παραπάνω μαθηματική σχέση ονομάζεται καμπύλη τάσης-χρόνου διάσπασης της CIGRE και αποκτήθηκε από πειράματα πάνω σε αλυσίδες κεραμικών δισκοειδών μονωτήρων διαφορετικών μηκών υπό τις κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσης θετικής πολικότητας. Αυτή η μαθηματική σχέση είναι μονό για τους χρόνους διάσπασης > 1 μs κατόπιν πειραμάτων, επιπλέον η U_{FO} μπορεί να υπολογιστεί και από CFO αν είναι γνωστός ο μονωτήρας από την σχέση:

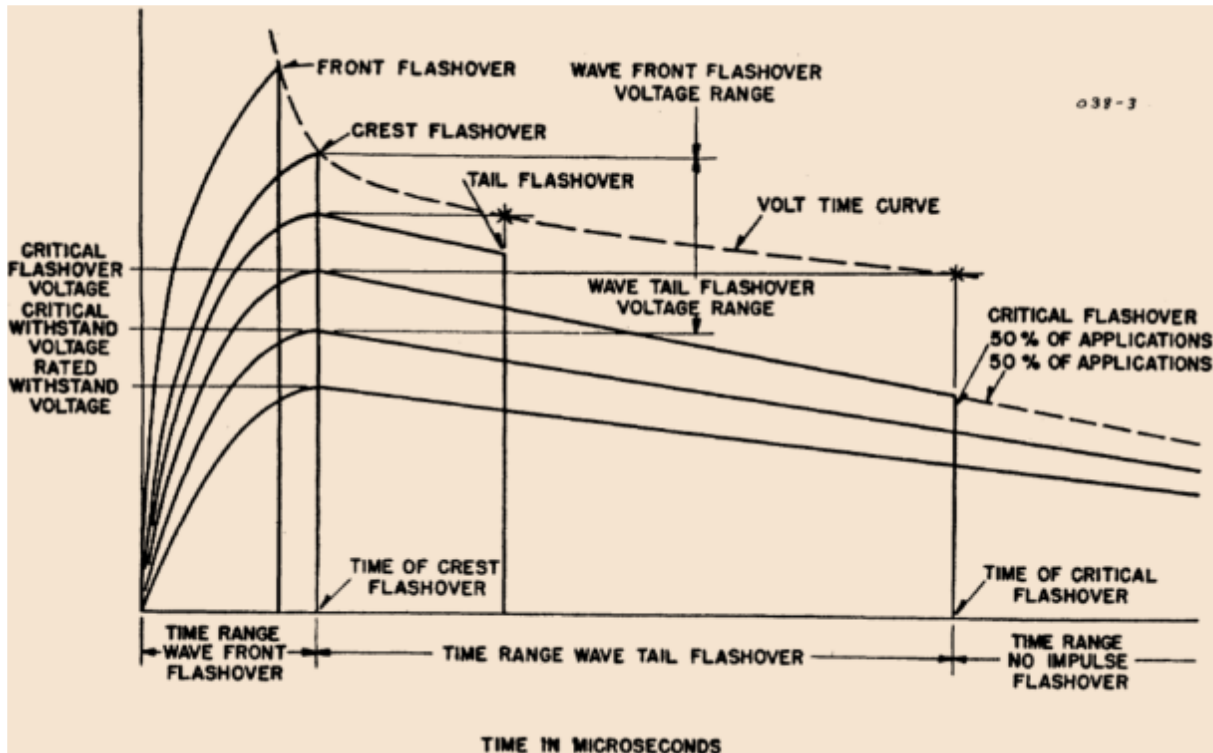
$$U_{FO} = (0.58 + 1.39 t_b^{0.5}) \cdot CFO \quad (2)$$

Οπού εδώ ο χρόνος διάσπασης είναι από 2 έως 11 μs.

Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες V-t είναι βασισμένες σε πειραματικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις όποτε δεν δίνεται με ακρίβεια η συμπεριφορά που έχει η μόνωση υπό την υπέρταση της μικρής διάρκειας μετώπου στην μη κανονική μορφή της κυματομορφής.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι καμπύλες V-t αναφέρονται στη μέγιστη τιμή της τάσης που έχει δημιουργηθεί κατά μήκος του μονωτήρα πριν ολοκληρωθεί η διάσπαση, η οποία μπορεί να είναι διαφορετική από τη στιγμιαία τάση της διάσπασης. Όταν η διάσπαση γίνει στο μέτωπο της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης, η τάση που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της καμπύλης V-t είναι αυτή που ανήκει στην χρονική στιγμή που συμβαίνει η διάσπαση. Ωστόσο η διάσπαση που δημιουργείται στο τελείωμα της κυματομορφής (ουρά) (χαμηλότερες πιθανότητες διάσπασης), η καμπύλη V-t είναι αυτή που σχετίζεται με τη χρονική στιγμή της διάσπασης, δηλαδή σχετίζεται με τις τιμές τάσης και του χρόνου που δεν είναι ταυτόχρονες. Έτσι κατά την πρόβλεψη μπορεί να υπάρχει σφάλμα λόγω αυτού του γεγονότος.

Η Εικόνα 1 απεικονίζει τις καμπύλες V-t και την πρόβλεψη της τάσης και του χρόνου διάσπασης με αυτές.



Εικόνα 1: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης (Καμπύλες V-t) [5]

1.4 Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης

Η μέθοδος ολοκλήρωσης πρωτοξεκίνησε από τους Witzke και Bliss. Η μέθοδος ολοκλήρωσης μπορεί να ονομαστεί και με αλλά δυο ονόματα δείκτης δριμύτητας ή και μέθοδος επίδρασης καταπόνησης. Ξεκίνησε ως μια εμπειρική μεθοδολογία ώστε να μπορέσει να εκτιμηθεί η επίδραση των κεραυνικών υπερτάσεων μη κανονικής κυματομορφής σε μετασχηματιστές ισχύος. Στη συνέχεια την μέθοδο ολοκλήρωσης τη χρησιμοποίησε ο Jones για πειραματικά αποτελέσματα και κυρίως χρησιμοποιήθηκε στη διάσπαση των διακένων ακίδα-ακίδα. Ωστόσο η μέθοδος ολοκλήρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς (απόκρισης) μονώσεων είτε αυτές έχουν υγρή, στερεή, αέρια μορφή όταν γίνεται καταπόνηση από υπέρτασεις μικρής διάρκειας μετώπου. Αυτό γίνεται στη βάση των πειραματικών μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια των χρόνων. Με βάση την μέθοδο ολοκλήρωσης, αν στην καταπόνηση των μονωτήρων ξεπεραστεί η στιγμιαία η τάση U_{th} , η ηλεκτρική διάσπαση εξαρτάται από τις τιμές τάσης και από το χρονικό διάστημα στο οποίο εφαρμόζονται. Όλο αυτό δίνεται από τη μαθηματική μέθοδο ολοκλήρωσης:

$$DE = \int_{t_0}^t (U - U_{th})^k dt \quad (3)$$

Το DE δείχνει τι καταπόνηση προκαλεί η στιγμιαία τάση, το U δείχνει την καταπόνηση της μόνωσης σε kV, στη συνέχεια το t_0 δείχνει τη χρονική στιγμή που υπερβαίνεται η τάση το U_{th} και το t είναι ο χρόνος από την στιγμή της εφαρμογής της τάσης και τέλος το k είναι εκθέτης (p.u.). Με βάση τη μέθοδο ολοκλήρωσης στην παραπάνω σχέση η U_{th} και ο εκθέτης k προσδιορίζονται με την προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων και καμπυλών τάσης-χρόνου κατά τη διάσπαση υπό των κανονικών εξωτερικών κρουστικών υψηλών τάσεων.

Το μειονέκτημα της μεθόδους ολοκλήρωσης είναι ότι υπάρχει δυσκολία στον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων η όποια απαιτεί διαδικασία δόκιμων όποτε τη μέθοδο ολοκλήρωσης τη χρησιμοποιούμε εμπειρικά και δεν σχετίζεται με τον μηχανισμό της ηλεκτρικής διάσπασης παρόλο που οι Darveniza και Vlastos πρότειναν θεωρητικό υπόβαθρο για τη μέθοδο ολοκλήρωσης μετά από πολλά χρόνια από την εισαγωγή της στις προσομοιώσεις. Σύμφωνα με τους Witzke και Bliss η μέθοδος ολοκλήρωσης δεν έχει κάποια φυσική σημασία. Ακόμη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το κριτήριο του Kind για τη διάσπαση των ομοιογενών διακένων, το οποίο είναι βασισμένο στη φυσική. Στην ουσία αυτό το κριτήριο μας υποδεικνύει την παραπάνω μαθηματική σχέση χωρίς τον εκθέτη.

Παρόλο που υπάρχουν μειονεκτήματα για τη μέθοδο της ολοκλήρωσης που παρατηρηθήκαν παραπάνω, η μέθοδος ολοκλήρωσης μπορεί και έχει χρησιμοποιηθεί για να γίνει πρόβλεψη ηλεκτρικής διάσπασης στις μόνωσης για την κρουστική συμπεριφορά, δηλαδή στις μη

κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Αλλά ενδέχεται να υπάρχουν σφάλματα σε ποσοστό 20% με 30%. Με βάση τους Chowdhuri et al. οι παράμετροι για τη μέθοδο ολοκλήρωσης είναι βασισμένες στις κυματομορφές των κρουστικών υψηλών τάσεων. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος ολοκλήρωσης πρέπει να διερευνηθεί με πιο πολλή λεπτομέρεια πάνω στη διηλεκτρική συμπεριφορά των μονώσεων στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με τις μη κανονικές κρουστικές υψηλές τάσεις.

1.5 Μοντέλα προόδου του λήντερ

Τα μοντέλα προόδου του λήντερ ξεκίνησαν από τη δεκαετία του 50 από τους Akorian et al. όταν και δημιουργήθηκε το πρώτο μοντέλο. Τα μοντέλα προόδου αναπτύχθηκαν με βάση τους μηχανισμούς διάσπασης μεγάλων διακένων αέρα αλλά και για τους μονωτήρες υπό εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Η αρχική δοκιμή των μοντέλων προόδου του λήντερ ξεκίνησε μέσω εργαστηριακών δοκιμών και πειραμάτων. Το πρώτο πείραμα έγινε πάνω σε μεγάλα διάκενα αέρα ακίδας-πλακάς υπό τάση θετικής πολικότητας. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν ακόμα διάφορα εργαστηριακά πειράματα που αυτήν τη φορά το διάκενο του αέρα ακίδας-ακίδας ήταν 1.25 m μήκος μετά από αυτό το εργαστηριακό πείραμα προχώρησε και σε άλλα μήκη διακένων. Από την πρώτη δόκιμη που πραγματοποιήθηκε το 1954 μέχρι και σήμερα έχουν δοκιμαστεί και έχουν προστεθεί και άλλα μοντέλα προόδου του λήντερ σε μεγάλα διάκενα αέρα. Αυτά τα μοντέλα είναι για διάκενα ακίδας-πλακάς ή ακίδας-ακίδας αλλά οι δόκιμες πραγματοποιήθηκαν και πάνω σε μονωτήρες υπό κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις αλλά και σε μονωτήρες με μη κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις. Οι δόκιμες έγιναν είτε με θετική πολικότητα είτε με αρνητική πολικότητα. Μετά από όλες αυτές τις δόκιμες τα μοντέλα προόδου του λήντερ χωρίστηκαν σε τρεις διαδοχικές φάσεις της ηλεκτρικής διάσπασης των μεγάλων διασπώμενων διακένων αέρα και των μονωτήρων. Αυτές οι φάσεις είναι:

- Την εναυση της πρώτης κορώνας
- Την ανάπτυξη των νηματίων
- Την ανάπτυξη του λήντερ .

Έναυση πρώτης κορώνας

Στην πρώτη κορώνα για τα μοντέλα του λήντερ, η τάση εναυσης συνήθως είναι αμελητέα γιατί η εμφάνισή της γίνεται πολύ γρήγορα για τον λόγο ότι κατά την διάρκεια του μετώπου της υπερτάσης που καταπονεί το διάκενο στην πράξη είναι πολύ μικρή η τάση εναυσης . Για

την αρχική κορώνα ο χρόνος έναυσης συμπεριλαμβάνεται στον χρόνο για την ανάπτυξη των νηματίων.

Ανάπτυξη των νηματίων

Στα μοντέλα προόδου του λήντερ η πλήρης ανάπτυξη των νηματίων έχει πραγματοποιηθεί όταν στο διάκενο τα νημάτια έχουν ενωθεί μεταξύ τους πλήρως. Αυτό παρατηρείται συνήθως όταν η πεδιακή ένταση του διακένου και η κρίσιμη τιμή γίνουν ίδιες, αυτό εξαρτάται από κάποιους παράγοντες, όπως από τον μονωτήρα (τι είδος μονωτήρας είναι) και τι πολικότητα έχει η τάση. Συνήθως, εφαρμόζεται η μέθοδος του του κρίσιμου πεδίου αν και υπάρχουν και άλλες.

Ανάπτυξη του ληνερ

Αφού έχει γίνει η ολοκλήρωση της ανάπτυξης των νηματίων, στη συνέχεια αρχίζει η ανάπτυξη του λήντερ. Ο λήντερ ξεκινά να αναπτύσσεται από το ένα ηλεκτρόδιο αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που γίνεται και από τα δυο ηλεκτρόδια. Η διάσπαση με τον λήντερ συμβαίνει συνήθως όταν γεφυρωθεί το διάκενο από τον λήντερ ή όταν συμβεί συνάντηση των δύο λήντερ στο κέντρο του διακένου. Ο λήντερ σταματά να αναπτύσσεται όταν στο μη γεφυρωμένο μέρος του διακένου η πεδιακή ένταση είναι μικρότερη του κρίσιμου πεδίου, όποτε σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει διάσπαση. Από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν η ανάπτυξη του λήντερ περιγράφεται από μαθηματική συνάρτηση για την ταχύτητα του λήντερ. Η σχέση εξαρτάται από την στιγμιαία τάση που καταπονεί το διάκενο αλλά και το μήκος του αγεφύρωτου διακένου, καθώς ο λήντερ είναι αγωγίμος. Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν διάφορα μοντέλα του λήντερ. Στα μοντέλα των Wagner και Hileman, της CIGRE (αυτό χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή) και των Pignini et al. ο λήντερ μπορεί να αναπτυχτεί μονό από ένα ηλεκτρόδιο ενώ στα μοντέλα των Shindo και Suzuki, Motoyama και των Wang et al. (βασίζεται στον Motoyama) έδειξαν ότι χρειάζονται ένα ή δυο λήντερ αναλόγως τη γεωμετρία του διακένου και το είδος του μονωτήρα.

Μέσω κάποιων πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στην διάσπαση των διακένων αέρα και των μεγάλων μονωτήρων και στην ανάπτυξη του λήντερ φάνηκε ότι το διάκενο διαπερνάται από ρεύμα, το οποίο ρεύμα μας έδειξε ότι επηρεάζει την παράγωγη της κρουστικής υψηλής τάσης και έτσι αλλοιώνεται η κυματομορφή. Η ονομασία του ρεύματος αυτού είναι ρεύμα προεκκενωσεως. Το ρεύμα αυτό θεωρείται ανάλογο με την ταχύτητα του λήντερ και αυτό εξαρτάται από τον συντελεστή αναλογίας φορτίου. Επίσης το ρεύμα της προεκκένωσης είναι δύσκολο να γίνει αντιληπτό στο πείραμα με μεγάλη ακρίβεια.

Ο Πίνακας 1 που προέρχεται από την αναφορά [3] περιέχει τις πιο κοινές εξισώσεις ταχύτητας του λήντερ από τη βιβλιογραφία. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται η τρίτη εξίσωση, δηλαδή αυτή της CIGRE.

Πίνακας 1: Εξισώσεις ταχύτητας του λήντερ [3]

Μοντέλο	Ταχύτητα λήντερ	Κριτήριο διάσπασης
Wagner και Hileman [7]	$\frac{dx}{dt} = K_{WH} \cdot D \left(\frac{U}{D-x} - E_0 \right)$	$x \geq D$
Shindo και Suzuki [8]	$\frac{dx}{dt} = k_1 \cdot \frac{U^2}{D-x} + k_2 \cdot \frac{C_1 \cdot U^2 \cdot v \cdot x}{D(D-x)}$	$x \geq D^a$
	$\frac{dx}{dt} = k_1 \cdot \frac{U^2}{D-2x} + k_2 \cdot \frac{C_1 \cdot U^2 \cdot v \cdot x}{D(D-2x)}$	$2x \geq D^a$
CIGRE [9]	$\frac{dx}{dt} = k_3 \cdot U \left(\frac{U}{D-x} - E_0 \right)$	$x \geq D$
Pigini et al. [10]	$\frac{dx}{dt} = 170 \cdot D \left(\frac{U}{D-x} - E_0 \right) e^{1.5 \cdot 10^{-3} \cdot U/D}$	$x \geq D$
Motoyama [11] ^c	$\frac{dx}{dt} = K_{10} \left(\frac{U}{D-2x} - E_0 \right), \quad \left(0 \leq 2x \leq \frac{D}{2} \right)$	$2x \geq D$
	$\frac{dx}{dt} = K_{11} \left(\frac{U}{D-2x} - E' \right) + v', \quad \left(\frac{D}{2} \leq 2x \leq D \right)$	
Wang et al. [12]	$\frac{dx}{dt} = k_0 \left(\frac{U}{D-x} - E_0 \right)$	$x \geq D^d$ $2x \geq D^e$

όπου x (m) είναι το μήκος του λήντερ,
 k_0 ($m^2 \cdot kV^{-1} \cdot s^{-1}$), k_1 ($m^2 \cdot kV^{-2} \cdot s^{-1}$), k_2 ($m^2 \cdot kV^{-1} \cdot A^{-1} \cdot s^{-1}$), k_3 ($m^2 \cdot kV^{-2} \cdot s^{-1}$), K_{WH} ($m \cdot kV^{-1} \cdot s^{-1}$),
 K_{10} ($m^2 \cdot kV^{-1} \cdot s^{-1}$) και K_{11} ($m^2 \cdot kV^{-1} \cdot s^{-1}$) παράμετροι,
 U (kV) η στιγμιαία τάση που καταπονεί τον μονωτήρα ή το διάκενο,
 D (m) το μήκος του μονωτήρα ή του διακένου,
 C_1 (F/m) η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους του λήντερ ως προς τη γη,
 v (m/s) η ταχύτητα του λήντερ,
 E_0 (kV/m) η κρίσιμη τιμή της μέσης πεδιακής έντασης,
 E' (kV/m) η τιμή του $U/(D-2x)$ όταν το x είναι ίσο με $D/4$,
 v' (m/s) η τιμή του dx/dt όταν το x είναι ίσο με $D/4$.

^aΔιάκενο ακίδας-πλάκας. ^bΔιάκενο ακίδας-ακίδας.
^cΚριτήριο νηματίων: σύμφωνα με τη σχέση (5.5) [11] ή $U/D = 500$ kV/m [41] ή E_0 [42].
^dΑλυσσοειδής μονωτήρας. ^eΠολυμερής μονωτήρας.

1.6 Στόχος της εργασίας και περιπτώσεις προσομοιώσεων

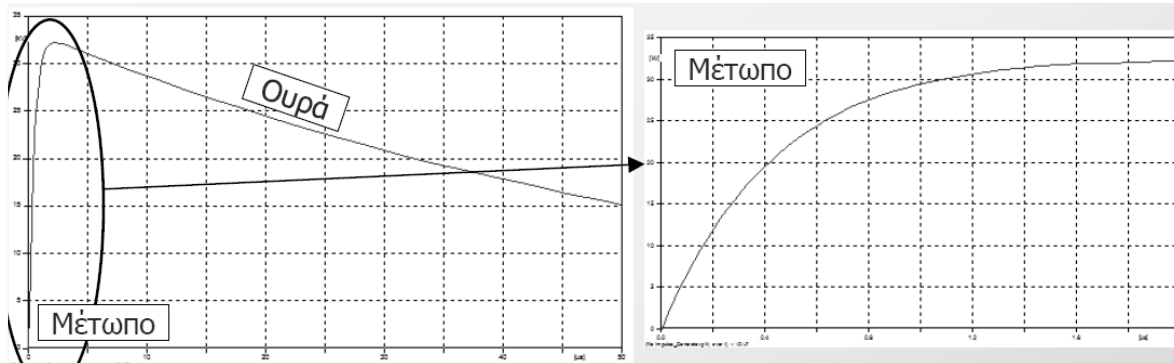
Ο στόχος της πτυχιακής εργασίας αυτής είναι να πραγματοποιηθούν κάποιες προσομοιώσεις με το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE με τη βοήθεια του προγράμματος ATP-EMTP διερευνώντας με αυτόν τον τρόπο την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων της εφαρμοζόμενης κυματομορφής. Επομένως στα παρακάτω κεφάλαια θα δοθούν καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης (δηλαδή, V-t), οι οποίες προκύπτουν από τις προσομοιώσεις. Επομένως θα πραγματοποιηθεί μια διερεύνηση των παραμέτρων των κυματομορφών, του

χρόνου διάρκειας του μετώπου και ημισεος εύρους των διπλεκθετικων κυματομορφων. Το ίδιο θα γίνει και για την κυματομορφή της CIGRE αλλά μόνο για το μέτωπο. Η κυματομορφή αυτή διαφέρει ως προς το μέτωπό της.

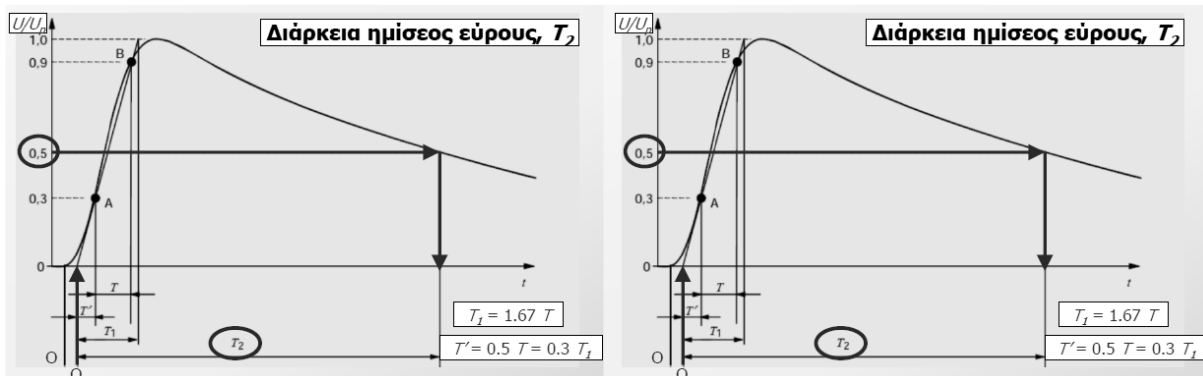
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

2.1 Κυματομορφές

Αρχικά οι κυματομορφές που μελετήθηκαν είναι διπλεκθετικές, οι οποίες παράγονται συνήθως από τα εργαστήρια υψηλών τάσεων. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την διπλεκθετική κυματομορφή. Φαίνεται ότι στην αρχή η τάση αυξάνεται πολύ γρήγορα προς τη μέγιστη τιμή της και ότι μειώνεται με πολύ αργή ταχύτητα για να φτάσει ξανά στο μηδέν. Επόμενος το πρώτο μέρος του σχήματος δείχνει το μέτωπο και το δεύτερο μέρος δείχνει την ουρά. Οι διάρκειες των δύο θα μεταβληθούν στις προσομοιώσεις. Οι ορισμοί για τις χρονικές διάρκειες μετώπου και ουράς φαίνονται στην Εικόνα 3.



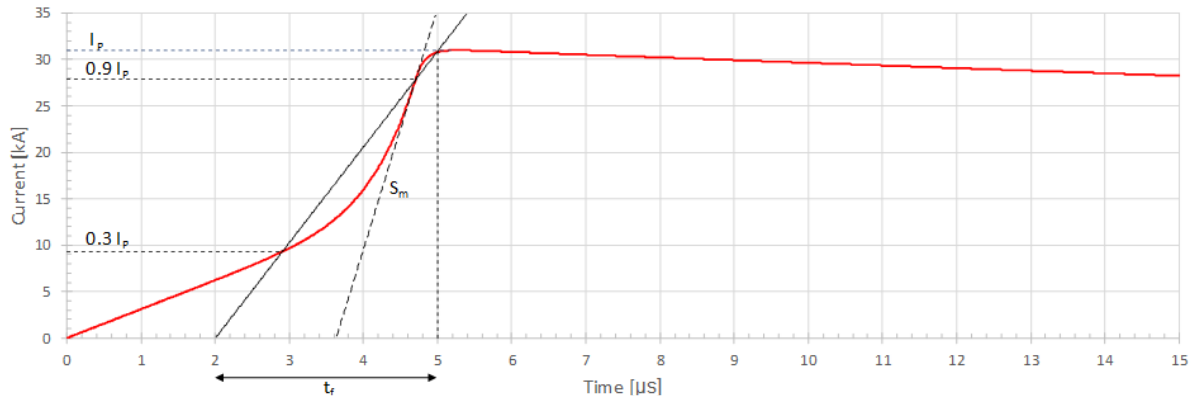
Εικόνα 2: Παράδειγμα διπλεκθετικής κυματομορφής [6]



Εικόνα 3: Τρόπος υπολογισμού διάρκειας μετώπου και ημίσεος εύρους διπλεκθετικής κυματομορφής [6]

Στη συνέχεια μελετήθηκαν κυματομορφές CIGRE, οι οποίες είναι καλύτερες από τις διπλεκθετικές κυματομορφές για την αναπαράσταση ρεύματος κερανού. Η βασική διαφορά είναι στο μέτωπο της κυματομορφής όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Σημειώνεται ότι δεν μπορεί να γίνει εύκολα η παραγωγή τέτοιων κυματομορφών στα εργαστήρια υψηλών τάσεων.

Σε αυτήν την εργασία πραγματοποιήθηκαν δόκιμες πάνω την διάρκεια μετώπου της κυματομορφής της CIGRE. Η διάρκεια της ουράς κρατήθηκε σταθερή και ίση με 77.5 μs . Στον Πίνακα 2 φαίνονται όλες οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Οι κυματομορφές της CIGRE αντιστοιχούν σε μέσες τιμές παραμέτρων για ρεύματα: 5, 30, 50, 100, 200 kA αντίστοιχα.

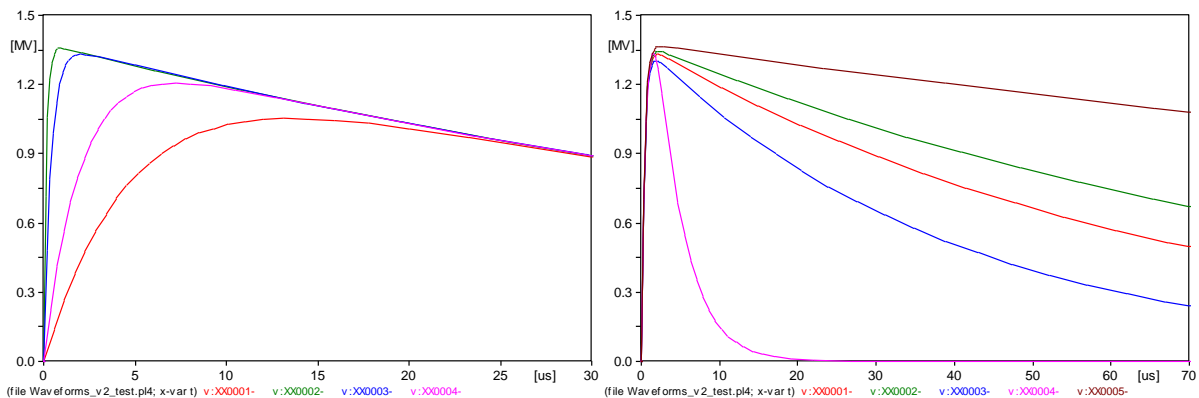


Εικόνα 4: Κυματομορφή της CIGRE [7]. Αναπαριστά κεραυνικά ρεύματα.

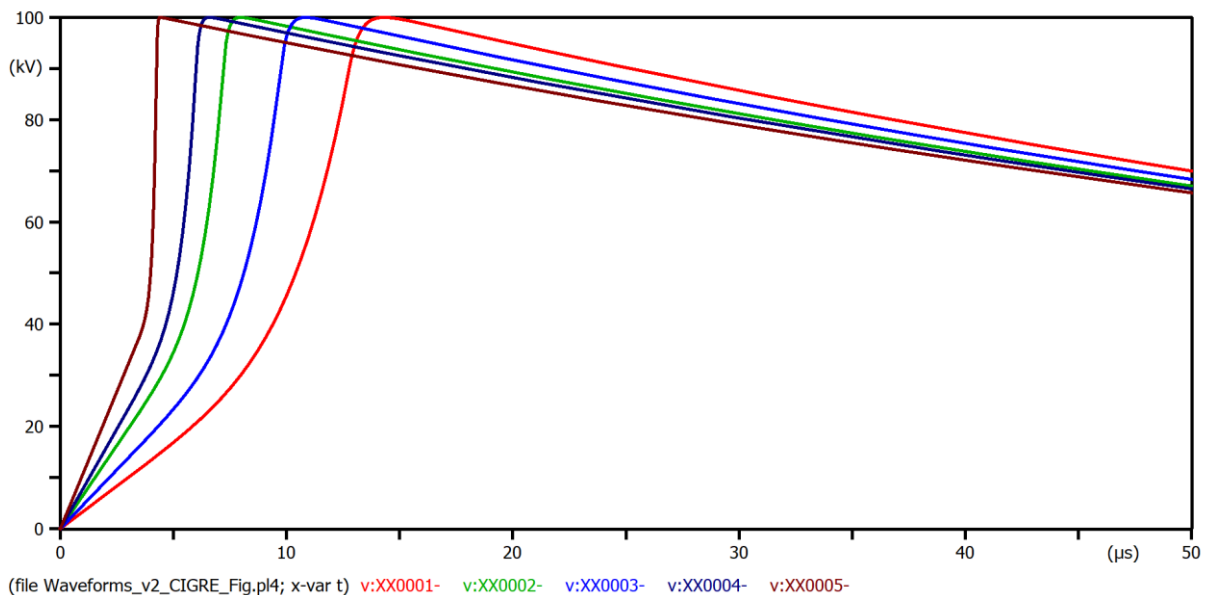
Πίνακας 2: Περιπτώσεις προσομοιώσεων

Κυματομορφή	Χαρακτηριστικά				
Διπλεκθετική Διάρκεια μετώπου	0.48/48.5	1.2/50	5/56.8	10/66.1	–
Διπλεκθετική Διάρκεια ουράς	1.2/4.8	1.15/30	1.2/50	1.22/70	1.2/200
CIGRE Διάρκεια μετώπου	2.4/77.5	3.67/77.5	4.52/77.5	6.01/77.5	8/77.5

Η Εικόνα 5 παρουσιάζει τις κυματομορφές με διπλεκθετική μορφή και η Εικόνα 6 αυτές με μορφή CIGRE.



Εικόνα 5: Διπλεκθετικές κυματομορφές υπό διερεύνηση.



Εικόνα 6: Κυματομορφές της CIGRE υπό διερεύνηση.

2.2 Μονωτήρες

Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι μονωτήρες με τα παρακάτω χαρακτηριστικά: 66 kV (μήκος 0.73 m), 150 kV (μήκος 1.86 m) 400 kV (μήκος 3.62 m) και 735 kV (μήκος 4.8 m). Αυτοί οι μονωτήρες ονομάζονται αλυσοειδείς και χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επιλέχθηκαν δηλαδή μονωτήρες από διάφορα επίπεδα τάσης για να φανεί η επίδρασή τους στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με το μοντέλο προόδου του λήντερ.

Για να μπορέσουν να κατασκευαστούν οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης έγινε εφαρμογή τάσεων στο πρόγραμμα ATP-EMTP με σταδιακή αύξηση της τάσης. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζεται ένα παράδειγμα για μονωτήρα 400 kV και διπλεκθετική κυματομορφή 10/66.1 μ s (Πινάκας 2, Εικόνα 5). Αντίστοιχοι πίνακες κατασκευάστηκαν στο MS Excel για όλους τους μονωτήρες και όλες τις κυματομορφές. Στη συνέχεια έγιναν οι καμπύλες τάσης-χρόνου είτε με βάση την τιμή κορυφής της τάσης πριν τη διάσπαση (πιο διαδεδομένος ορισμός) είτε με τη στιγμιαία τάση διάσπασης. Στη δεύτερη περίπτωση οι τάσεις ταυτίζονται με τις χρονικές στιγμές. Στην πρώτη όχι, εκτός αν η διάσπαση γίνεται πριν το μέγιστο.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE αντιστοιχούν σε αλυσοειδής κεραμικούς μονωτήρες. Η πολικότητα που υιοθετήθηκε είναι αρνητική.

Πίνακας 3: Παράδειγμα αποτελέσματος επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για τη δημιουργία καμπυλών V-t. Μονωτήρας 400 kV και διπλεκθετική κυματομορφή 10/66.1 μ s.

400 kV (10/66.1 μ s)			
Εφαρμοζόμενη τάση (kV)	Τάση πριν την διάσπαση (kV)	Χρόνος της διάσπασης (μ s)	Στιγμαία διάσπαση (kV)
9000000	7255.5	0.433	7255.5
8000000	6999.9	0.472	6999.9
6000000	6425.9	0.585	6425.9
4000000	5695.3	0.796	5695.3
3000000	5228.9	0.996	5228.9
2000000	4638.5	1.382	4638.5
1500000	4260.2	1.763	4260.2
1000000	3767.7	2.538	3767.7
900000	3647	2.807	3647
700000	3365.5	3.618	3365.5
600000	3195.1	4.282	3195.1
500000	2993.1	5.33	2993.1
450000	2873.5	6.134	2873.5
400000	2733.9	7.314	2733.9
390000	2702.6	7.624	2702.6
380000	2699.8	7.969	2699.8
370000	2635.2	8.357	2635.2
360000	2598.7	8.799	2598.7
350000	2559.6	9.308	2559.6
345000	2539	9.595	2539
340000	2517.6	9.907	2517.6
335000	2495.1	10.25	2495.1
330000	2471.5	10.629	2471.5
325000	2446.6	11.052	2446.6
320000	2420.1	11.531	2420.1
315000	2391.4	12.08	2391.4
310000	2360.2	12.725	2360.2
305000	2325.3	13.504	2325.3
300000	2287.2	14.493	2284.9
296000	2256.7	15.54	2245.9
288000	2195.8	20.112	2105
287000	2188.1	22.187	2048.7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΠΛΕΚΘΕΤΙΚΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ

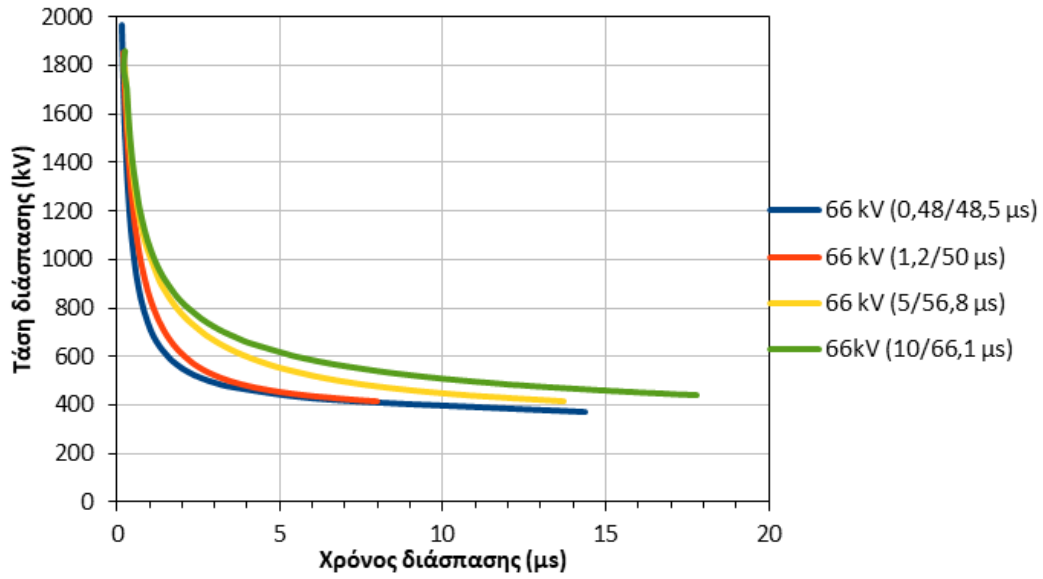
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν συγκεντρωμένα όλα τα αποτελέσματα που έχουν σχέση με τις διπλεκθετικές κυματομορφές. Συγκεκριμένα θα μελετηθεί η επίδραση της διάρκειας μετώπου και της διάρκειας της ουράς (ημισεος εύρος) μέσω των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης για τους τέσσερις μονωτήρες που δοκιμάστηκαν.

3.1 Διάρκεια μετώπου

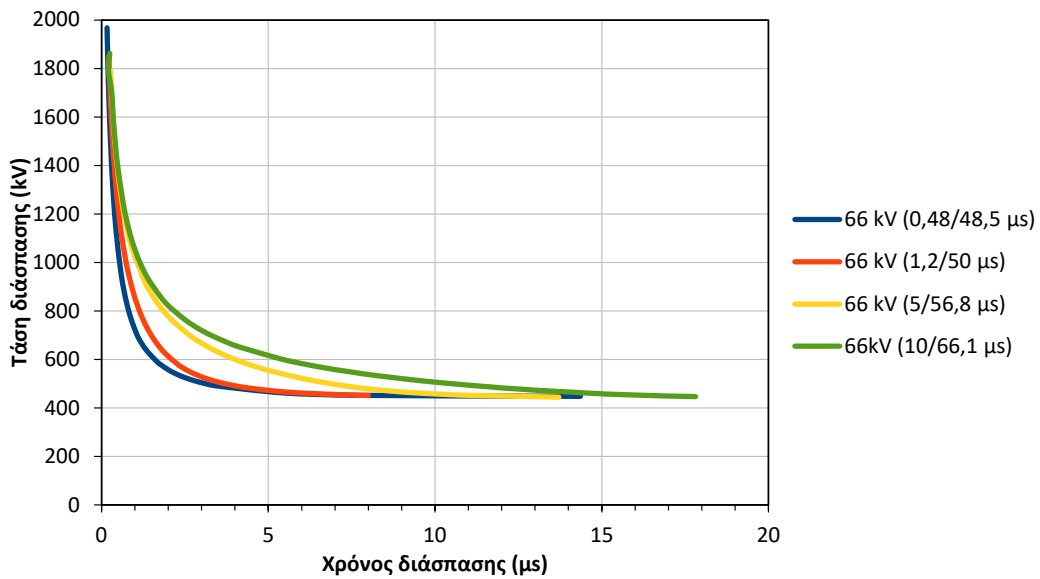
Εδώ θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη διερεύνηση της επίδρασης του μετώπου της διπλεκθετικής κυματομορφής (παράμετροι στον Πίνακα 2). Στις Εικονες από 7-14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά μονωτήρα με παράμετρο την κυματομορφή. Όσο ο χρόνος διάσπασης μειώνεται η τάση διάσπασης αυξάνεται. Αυτό ισχύει σε όλα τα αποτελέσματα με τις διπλεκθετικές κυματομορφές. Όμως υπάρχει εξάρτηση της τάσης και του χρόνου διάσπασης από την κυματομορφή και από τον μονωτήρα (διαφορετικό μήκος). Από τα γραφήματα αυτά φαίνεται ότι ο χρόνος μετώπου επηρεάζει τις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης. Όσο μικρότερο είναι το μέτωπο τόσο πιο εύκολα γίνεται διάσπαση του μονωτήρα. Η επίδραση είναι εντονότερη στους ενδιάμεσους χρόνους διάσπασης ενώ μειώνεται στην αρχή και το τέλος των καμπυλών.

Όσον αφορά την επίδραση του ορισμού (στιγμιαία τάση διάσπασης έναντι μέγιστης) για τις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης μπορεί να ειπωθεί ότι η επίδραση είναι υπαρκτή στους μεγάλους χρόνους όπου η διάσπαση γίνεται στην ουρά. Στο μέτωπο οι καμπύλες των δύο ορισμών ταυτίζονται.

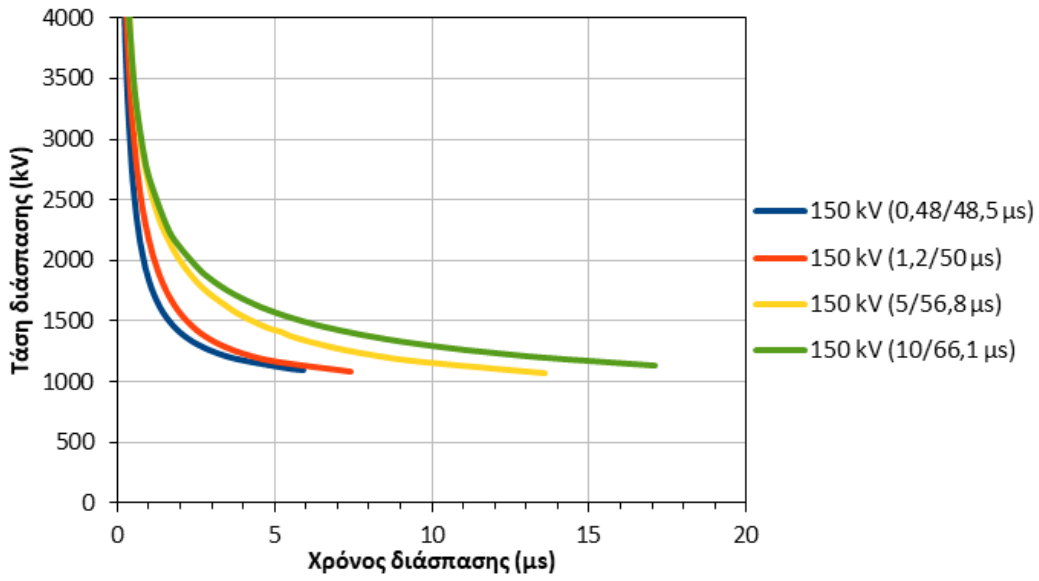
Για τους μονωτήρες ισχύουν τα εξής. Όσο αυξάνεται το μήκος του μονωτήρα (άρα και το επίπεδο τάσης) αυξάνεται η τάση που απαιτείται για τη διάσπαση στον ίδιο χρόνο διάσπασης. Έτσι οι μικρότερες τάσεις αντιστοιχούν στα 66 kV και οι μεγαλύτερες στα 735 kV.



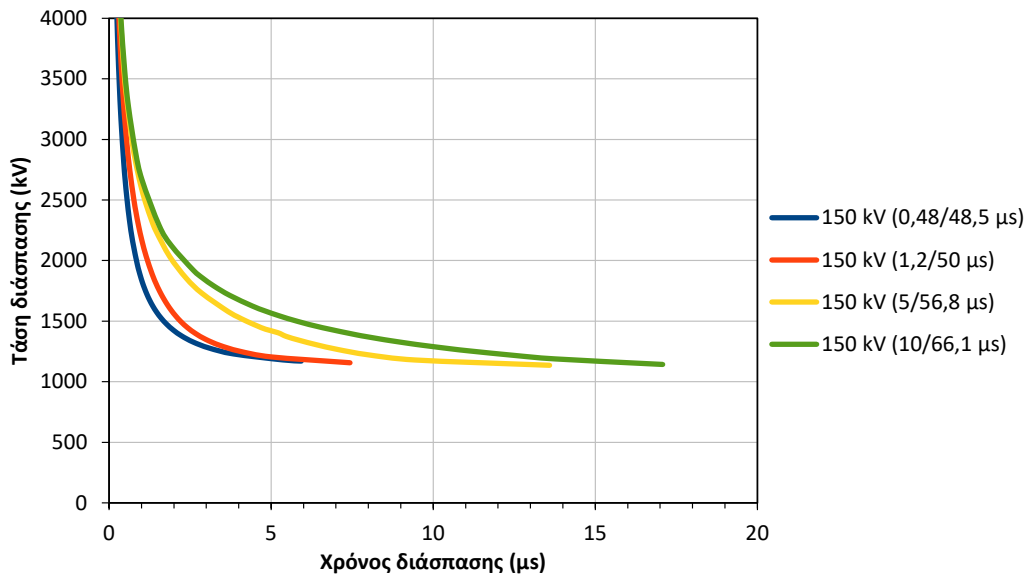
Εικόνα 7: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 66 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



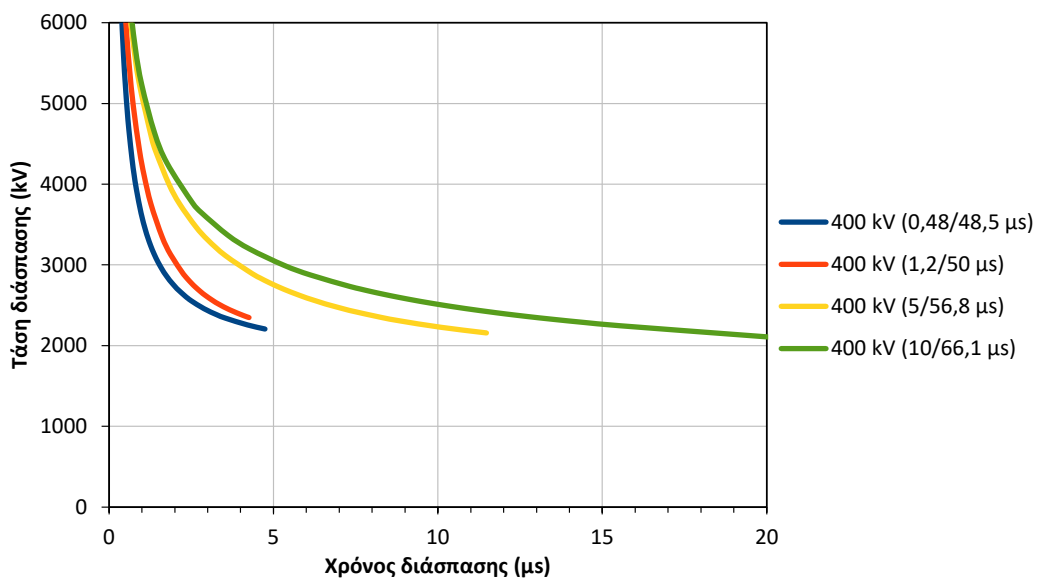
Εικόνα 8: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 66 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



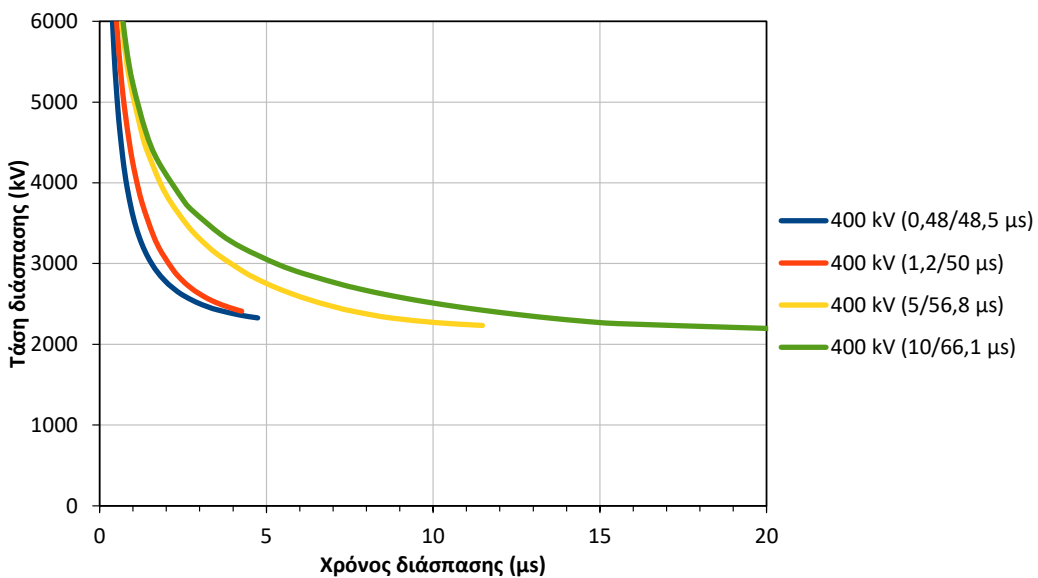
Εικόνα 9: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 150 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



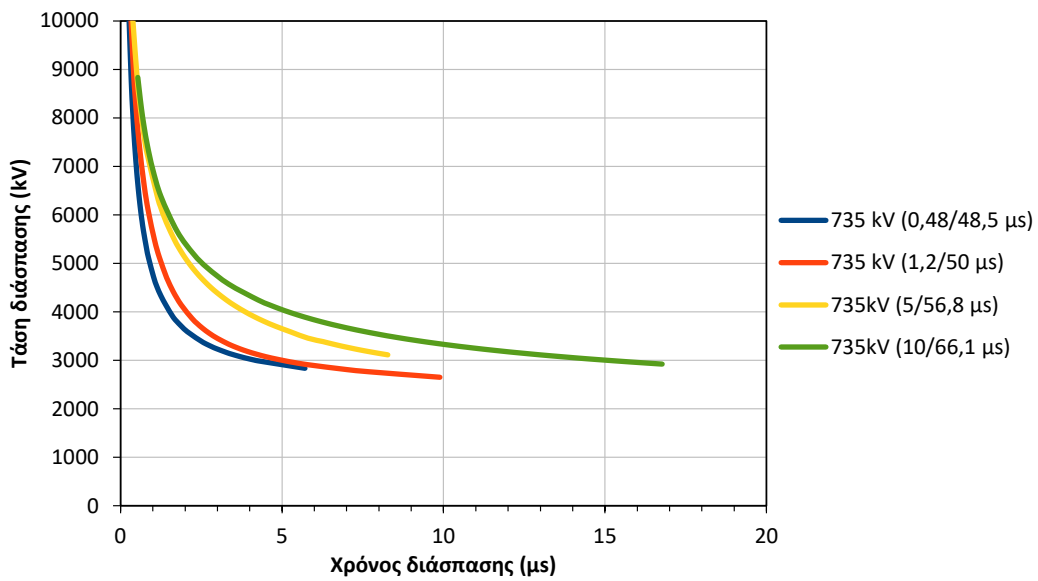
Εικόνα 10: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 150 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



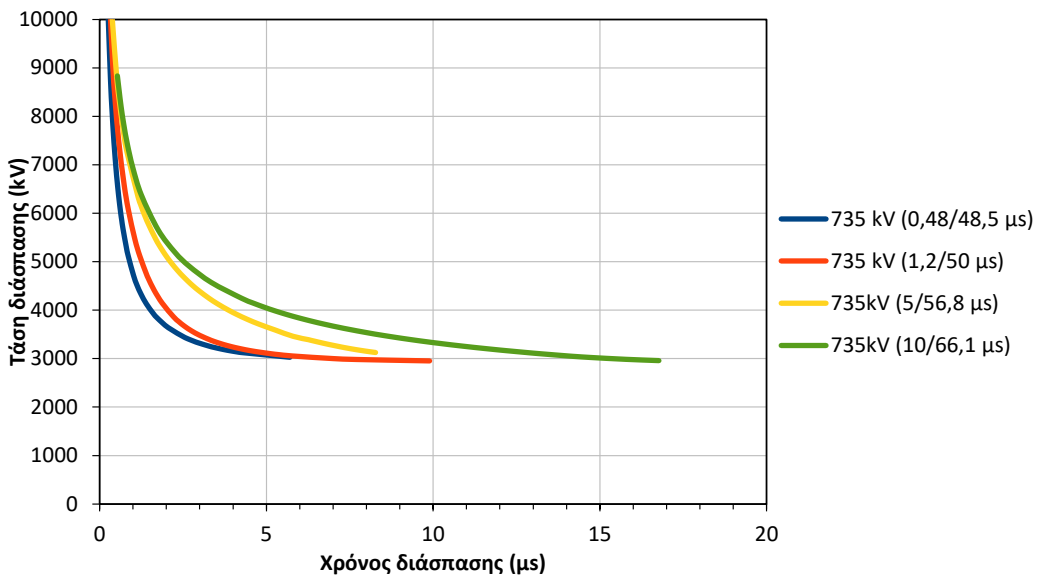
Εικόνα 11: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 400 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



Εικόνα 12: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 400 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



Εικόνα 13: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 735 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



Εικόνα 14: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 735 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.

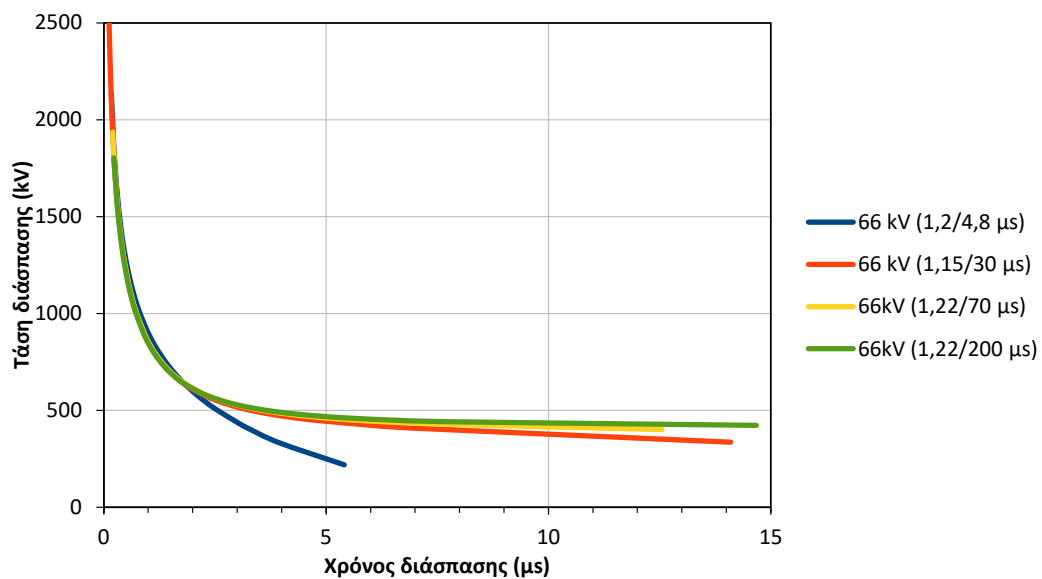
3.2 Διάρκεια ημίσεος εύρους (ουράς)

Εδώ θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για την επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (Πίνακας 2), δηλαδή για την επίδραση της ουράς της διπλεκθετικής κυματομορφής. Στις Εικόνες 15-22 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης και για τους δύο ορισμούς (στιγμιαία τάση διάσπασης και μέγιστη τάση διάσπασης) και για τους τέσσερις μονωτήρες. Τα συμπεράσματα:

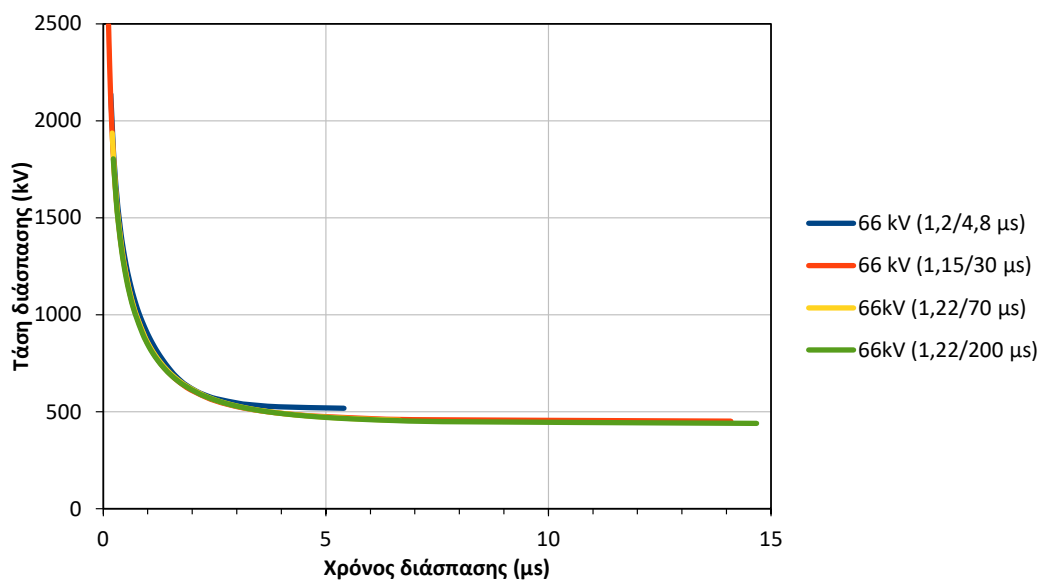
1. της σύγκρισης μεταξύ των μονωτήρων διαφορετικού μήκους
2. της σύγκρισης των δύο ορισμών
3. της μορφής των καμπυλών

που προέκυψαν από την προηγούμενη ενότητα για το μέτωπο ισχύουν και για την περίπτωση της ουράς.

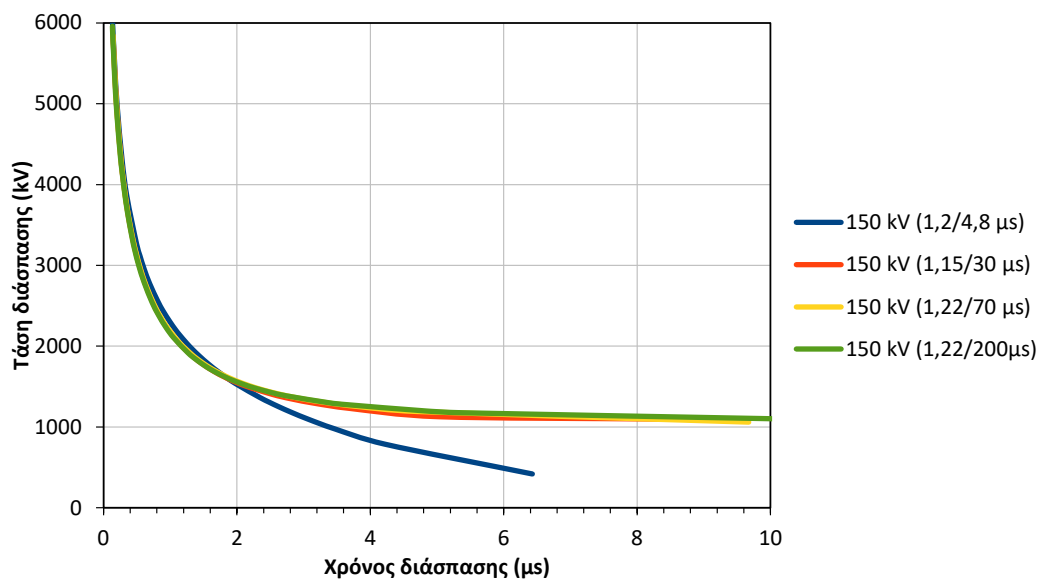
Η ουρά επιδρά και αυτή στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης αλλά λιγότερο από το μέτωπο. Η επίδρασή της αφορά τους μεγάλους χρόνους διάσπασης δηλαδή, τις διασπάσεις στην ουρά. Αυτό είναι λογικό αφού το μέτωπο παραμένει σχεδόν ίδιο. Γενικά, από τον ορισμό με το μέγιστο, φαίνεται ότι όσο πιο μεγάλη είναι η ουρά τόσο πιο εύκολα γίνεται η διάσπαση καθώς απαιτείται μικρότερη τάση για τον ίδιο χρόνο. Αντίθετα η στιγμιαία τάση είναι μεγαλύτερη καθώς η τάση στην ουρά μειώνεται λιγότερο όσο πιο μεγάλη είναι η διάρκεια ημίσεος εύρους. Αυτά ισχύουν για όλους τους μονωτήρες που εξετάστηκαν.



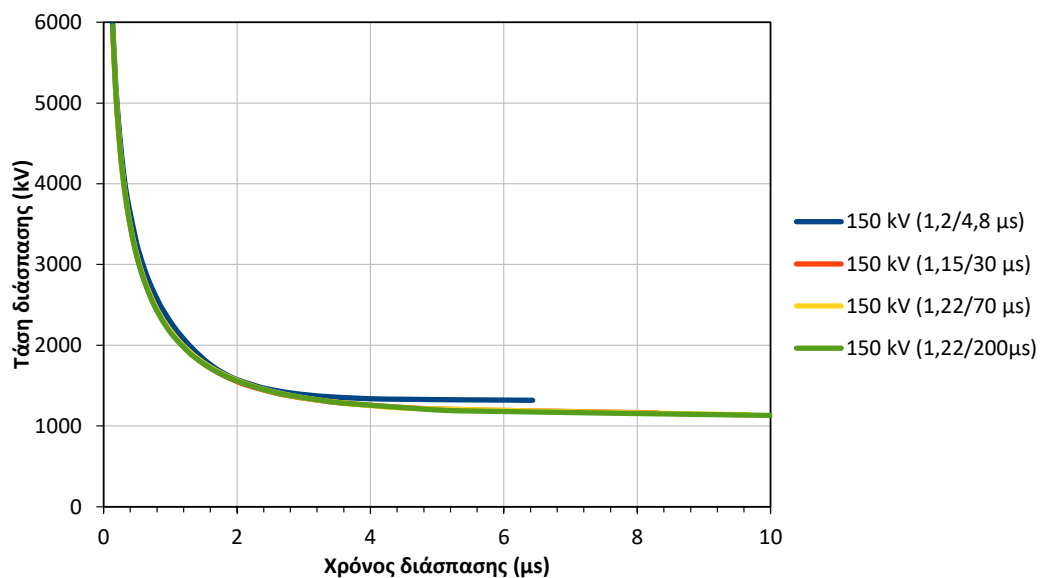
Εικόνα 15: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 66 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας ημίσειας εύρους (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



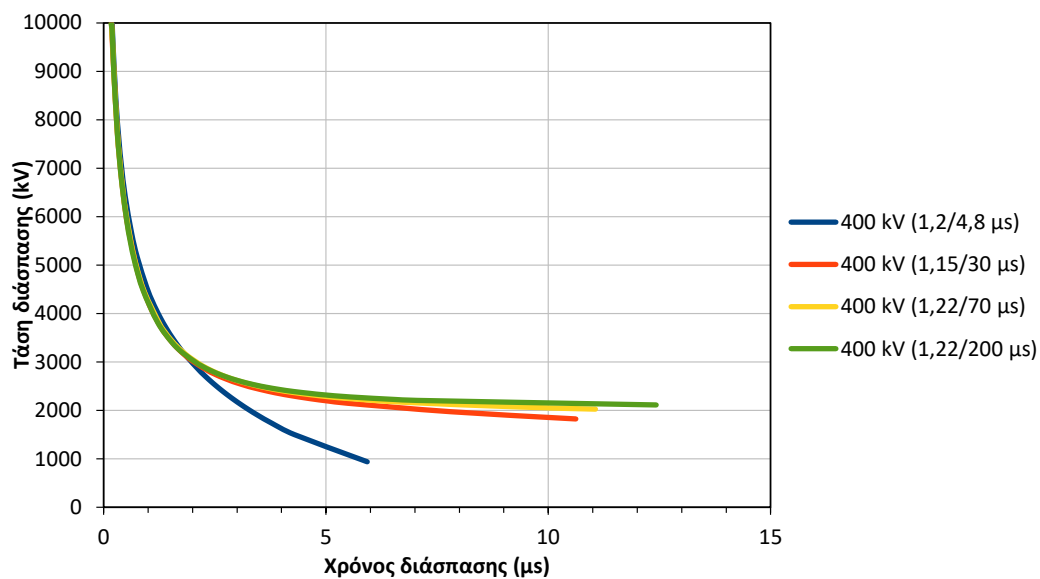
Εικόνα 16: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 66 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας ημίσειας εύρους (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



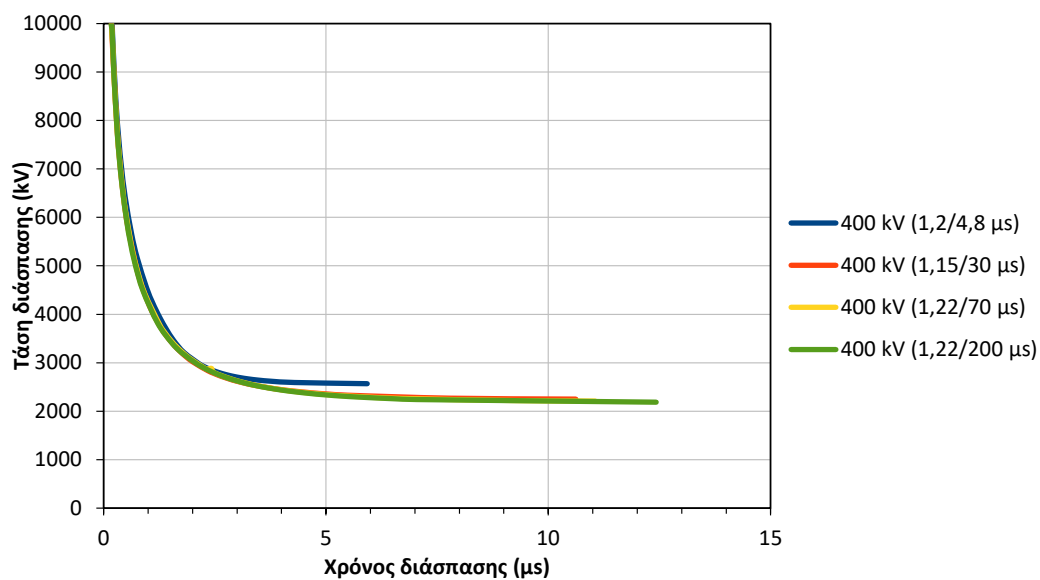
Εικόνα 17: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 150 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



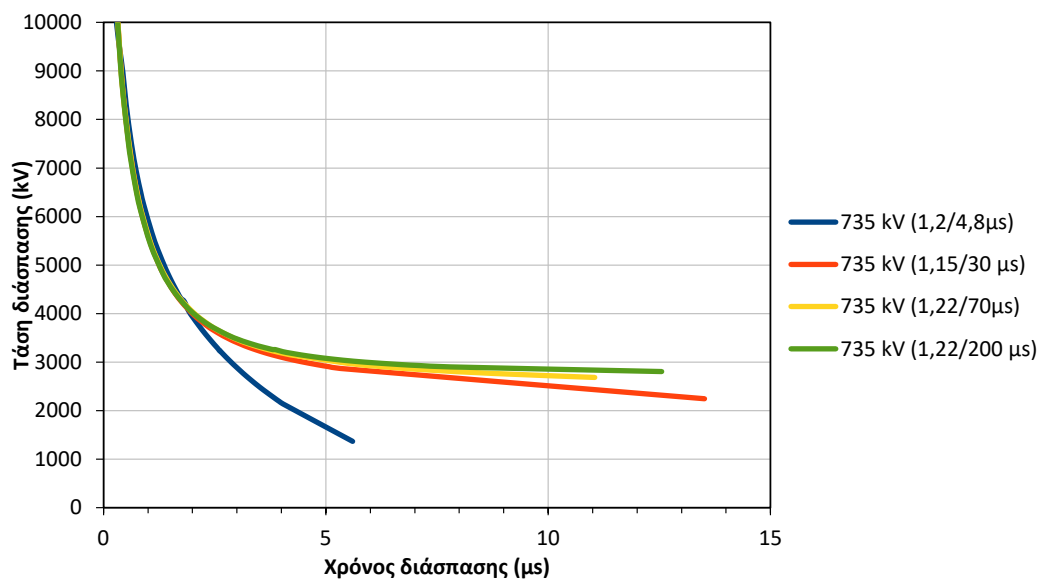
Εικόνα 18: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 150 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας ημίσεος εύρους (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



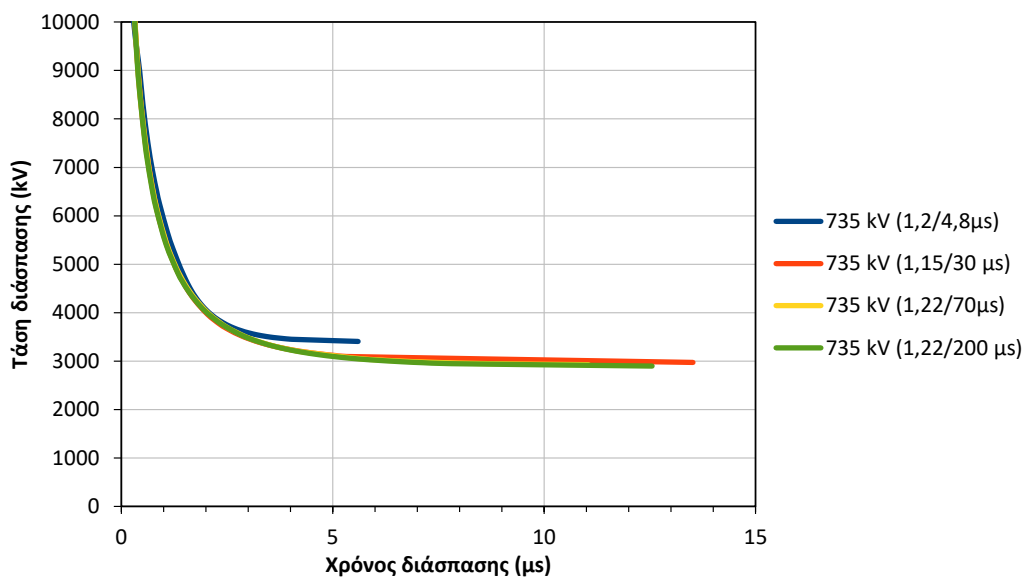
Εικόνα 19: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 400 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας ημίσεως εύρους (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



Εικόνα 20: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 400 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας ημίσεως εύρους (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



Εικόνα 21: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 735 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας ημίσειας εύρους (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



Εικόνα 22: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 735 kV. Διπλεκθετικές κυματομορφές. Επίδραση της διάρκειας ημίσειας εύρους (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ CIGRE

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν συγκεντρωμένα όλα τα αποτελέσματα που έχουν σχέση με την κυματομορφή της CIGRE. Συγκεκριμένα θα μελετηθεί η επίδραση της διάρκειας μετώπου μέσω των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπασης για τους τέσσερις μονωτήρες που δοκιμάστηκαν. Συγκεκριμένα οι Εικόνες 23-30 περιέχουν όλα τα αποτελέσματα.

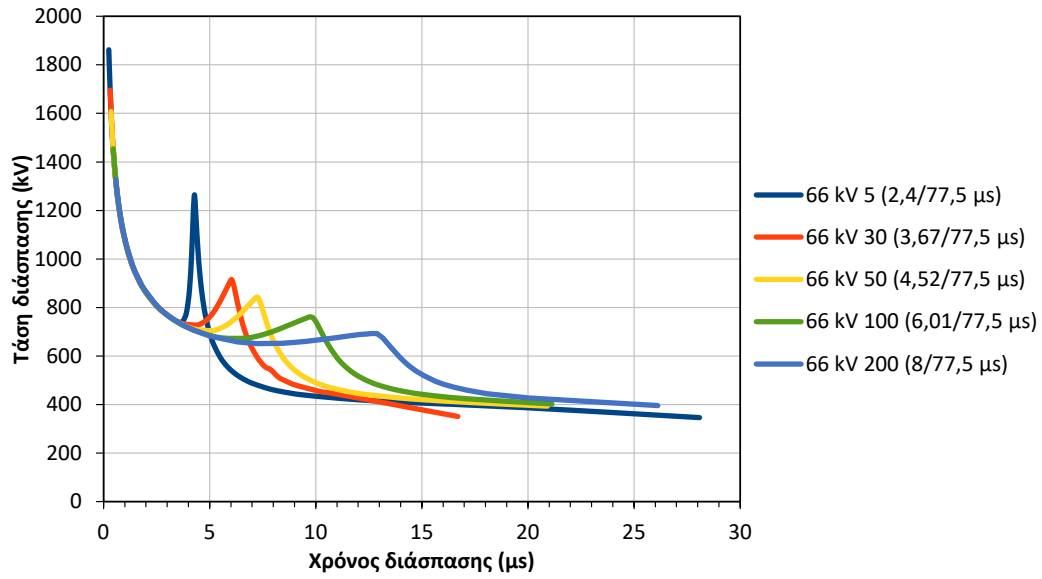
Απευθείας μπορεί να παρατηρηθεί ότι σε σχέση με τις διπλεκθετικές κυματομορφές η μορφή των καμπυλών τάσης-χρόνου διάσπαση αλλάζει. Αυτό οφείλεται στη γενική μορφή της κυματομορφής της CIGRE. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 και στην Εικόνα 6 στο Κεφάλαιο 2 όπου περιγράφηκαν οι κυματομορφές, οι κυματομορφές της CIGRE στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω στο μέτωπο. Δηλαδή, έχουν ένα «γόνατο» στο μέτωπο. Επίσης η συμπεριφορά της κυματομορφής CIGRE αλλάζει στο 90% του ρεύματος. Στις καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης το σημείο αλλαγής συμπεριφοράς εμφανίζεται στις Εικόνες 23-30 ως ένα τοπικό μέγιστο σε σταθερό χρόνο ανά κυματομορφή, λόγω της αλλαγή κλίσης της υπέρτασης στο μέτωπο.

Γενικά εδώ μπορεί να παρατηρηθεί ότι υπάρχει σύγκλιση των καμπυλών στην αρχή (μικρή χρόνοι διάσπασης) και στο τέλος τους (μεγάλοι χρόνοι διάσπασης). Οι διαφορές ανάμεσα στις κυματομορφές εμφανίζονται σε ενδιάμεσους χρόνους. Οι πιο γρήγορες κυματομορφές δίνουν πιο εύκολα διάσπαση (μικρότερη τάση διάσπασης για τον ίδιο χρόνο). Η αλλαγή συμπεριφοράς εμφανίζεται όλο και νωρίτερα όσο πιο γρήγορο γίνεται το μέτωπο της κυματομορφής και επίσης γίνεται όλο και πιο έντονη με τη μείωση της διάρκειάς του.

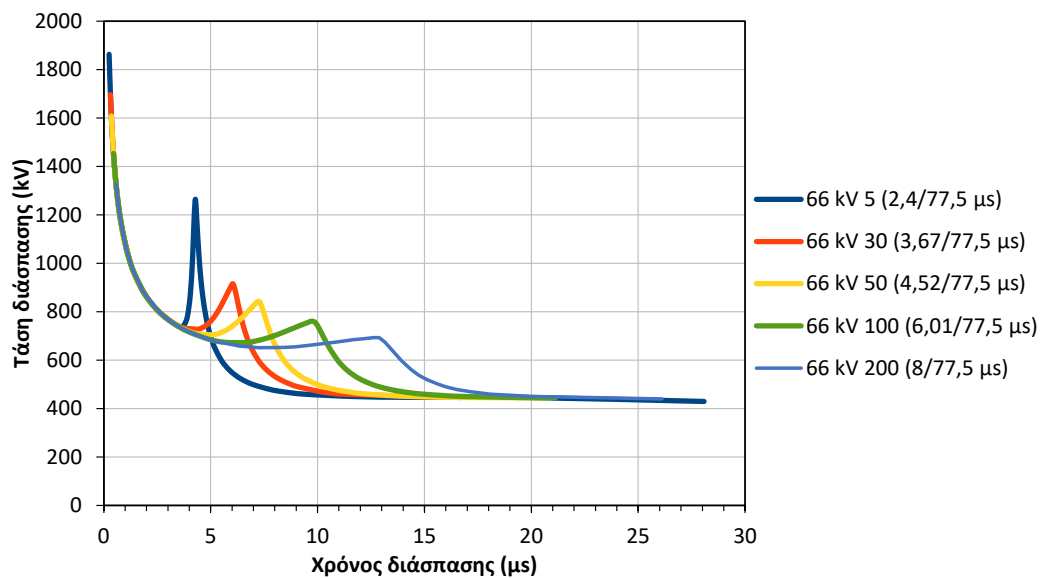
Τα συμπεράσματα:

1. της σύγκρισης μεταξύ των μονωτήρων διαφορετικού μήκους
2. της σύγκρισης των δύο ορισμών

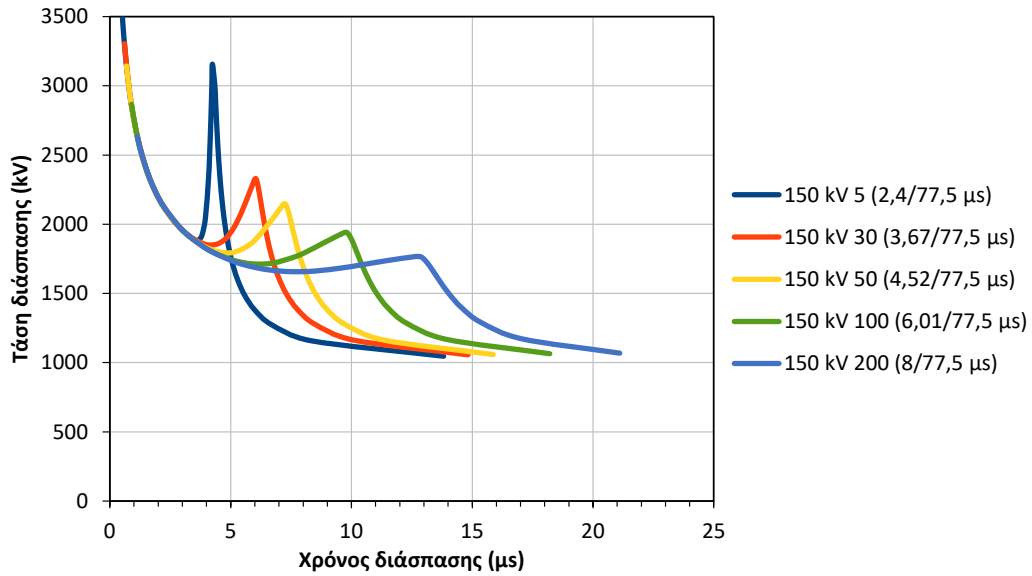
που προέκυψαν από το προηγούμενο κεφάλαιο ισχύουν και για την περίπτωση της κυματομορφής της CIGRE.



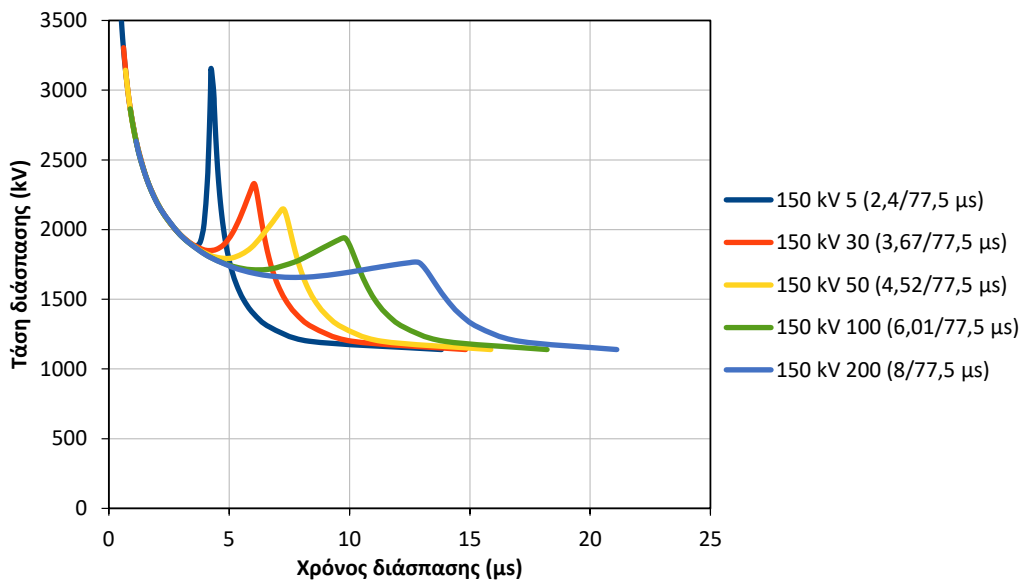
Εικόνα 23: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 66 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



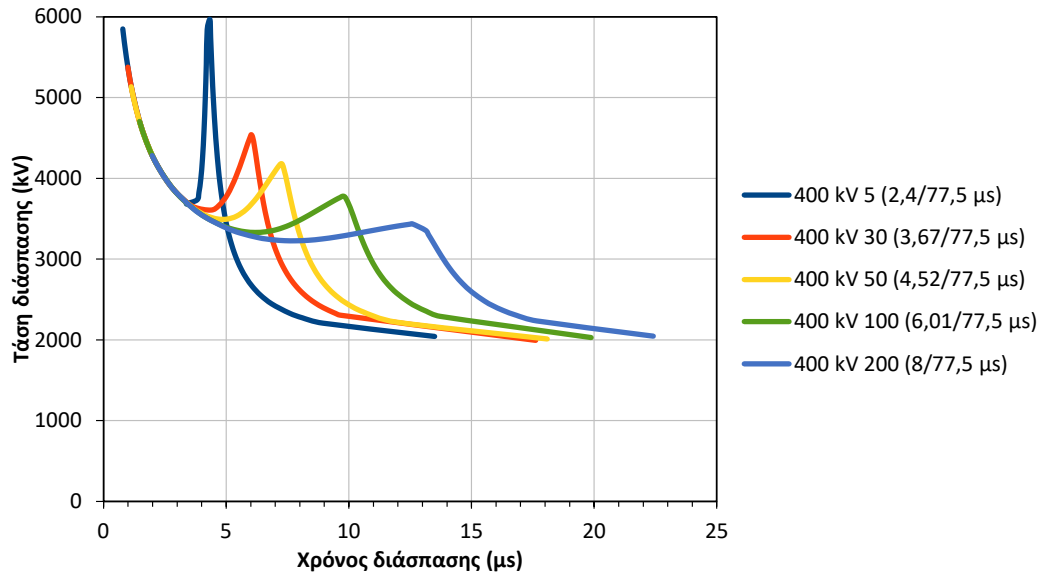
Εικόνα 24: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 66 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



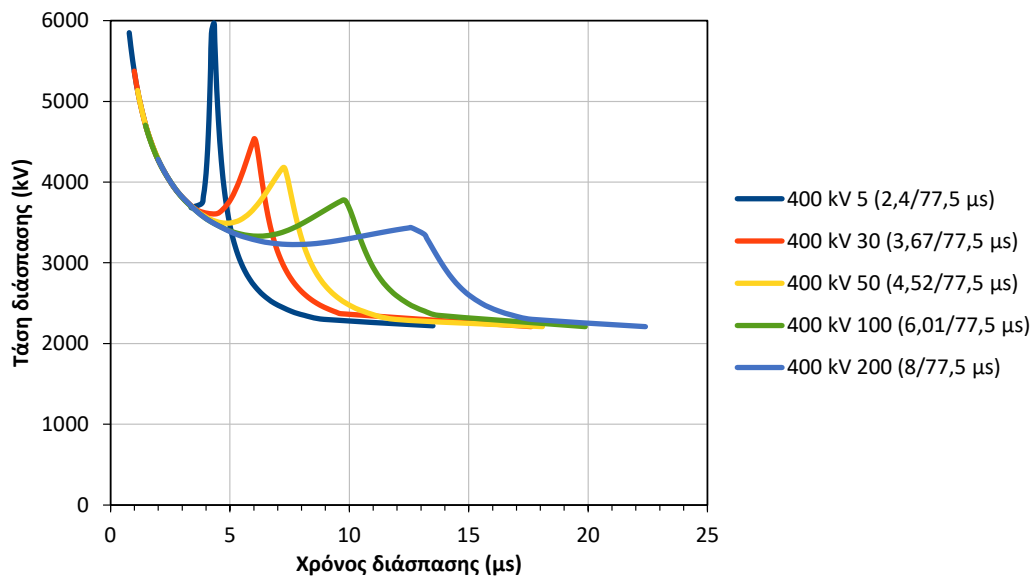
Εικόνα 25: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 150 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



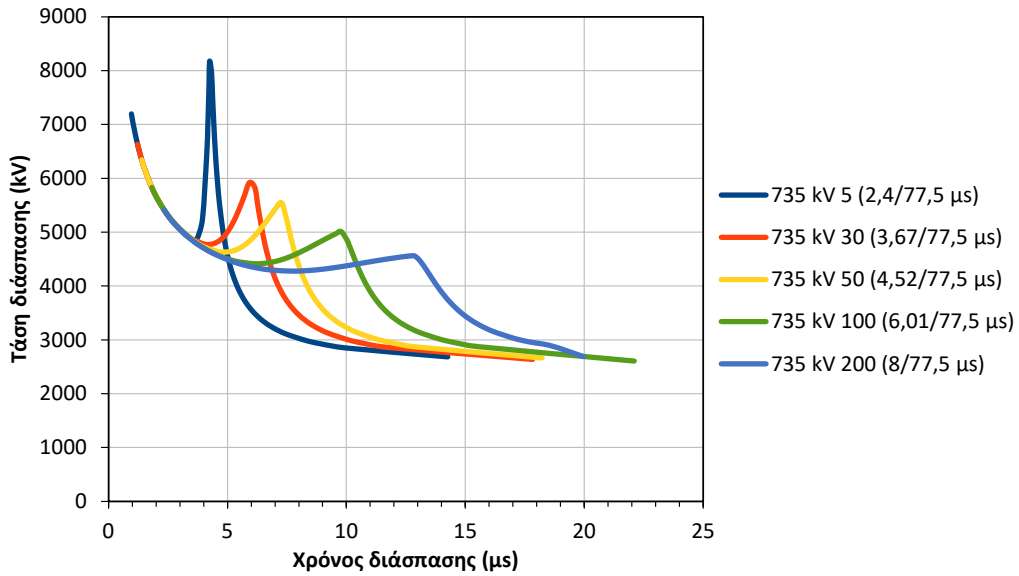
Εικόνα 26: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 150 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



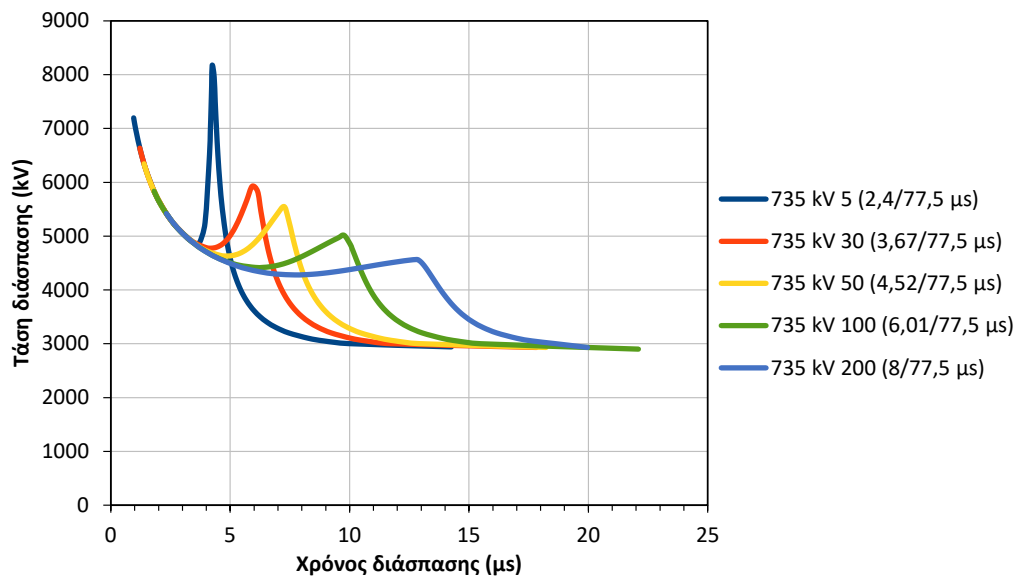
Εικόνα 27: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 400 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



Εικόνα 28: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 400 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.



Εικόνα 29: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 735 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη στιγμιαία τάση διάσπασης.



Εικόνα 30: Καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης του μονωτήρα 735 kV. Κυματομορφές CIGRE. Επίδραση της διάρκειας μετώπου (Πίνακας 2). Ορισμός με τη μέγιστη τάση διάσπασης.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αντικείμενο της εργασίας ήταν η μελέτη της κρουστικής συμπεριφοράς μεγάλων αλυσοειδών μονωτήρων που χρησιμοποιούνται σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Η διερεύνηση έγινε μέσω του λογισμικού ATP-EMTP υπό εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις χρησιμοποιώντας το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη φυσική της ηλεκτρικής διάσπασης διακένων αέρα μεγάλου μήκους αλλά και μονωτήρων. Χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη συμπεριφοράς μονώσεων όταν οι κυματομορφές είναι μη κανονικές. Επιλέχθηκαν προς διερεύνηση μονωτήρες από γραμμές μεταφοράς 66 kV, 150 kV, 400 kV και 735 kV, οι οποίοι διαφέρουν σε μήκος. Η μελέτη αφορά την επίδραση του χρόνου μετώπου και ουράς διπλεκθετικών κυματομορφών αλλά και μετώπου κυματομορφών CIGRE. Αυτές αφορούν ρεύματα κερανού και έχουν διαφορετική μορφή στο μέτωπό τους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως καμπύλες τάσης-χρόνου διάσπασης.

Βρέθηκε ότι για τις διπλεκθετικές κυματομορφές η τάση διάσπασης είναι μεγαλύτερη για μικρότερους χρόνους διάσπασης. Επίσης οι μονωτήρες μεγαλύτερου μήκους και επιπέδου τάσης απαιτούν μεγαλύτερη τάση για να διασπαστούν.

Οι πιο γρήγορες κυματομορφές (μικρό μέτωπο) προκαλούν πιο εύκολα διάσπαση στον ίδιο μονωτήρα. Η επίδραση της ουράς είναι πιο ήπια. Συμβαίνει μόνο στο τέλος των καμυλών V-t. Στο τμήμα αυτό η διάσπαση συμβαίνει στην ουρά των εφαρμοζόμενων κυματομορφών. Οι κυματομορφές με μεγάλες ουρές δίνουν πιο εύκολα διάσπαση (μικρότερη απαιτούμενη τάση).

Οι καμπύλες V-t που αντιστοιχούν στην κυματομορφή της CIGRE έχουν διαφορετική μορφή. Εμφανίζουν ένα χαρακτηριστικό τοπικό μέγιστο που οφείλεται στις αλλαγές κλίσης στο μέτωπο της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης τάσης. Και εδώ μικρότερα μέτωπα (πιο γρήγορες κυματομορφές έχουν ως αποτέλεσμα πιο εύκολη διάσπαση. Όμως στους μικρούς και τους μεγάλους χρόνους διάσπασης όλες οι κυματομορφές δίνουν παρόμοια αποτελέσματα.

Ως μελλοντική δουλειά θα μπορούσαν να μελετηθούν επιπλέον μονωτήρες με διαφορετική μορφολογία (άρα και σταθερές στο μοντέλο) αλλά και η επίδραση της πολοκότητας της εφαρμοζόμενης τάσης (εδώ ήταν αρνητική).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Θ. Αγγέλου, Πρόβλεψη διάσπασης μεγάλων διακένων αέρα και μονωτήρων με το λογισμικό ATP-EMTP: Μέθοδος ολοκλήρωσης, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., πρώην Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2023.
- [2] Π. Ν. Μικρόπουλος, Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 2008.
- [3] Ζ. Γ. Δάτσιος, Διερεύνηση του Φαινομένου Ιονισμού του Εδάφους γύρω από Συγκεντρωμένα Συστήματα Γείωσης: Επίδραση στην Κεραυνική Συμπεριφορά Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 2017.
- [4] W. A. Chisholm, "New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 26, no. 2, pp. 14-25, March-April 2010.
- [5] EEI-NEMA Subcommittee Report, "Recommendations for high voltage testing," Electrical Engineering, vol. 59, no. 10, pp. 598-602, October 1940.
- [6] Ζ. Γ. Δάτσιος, Διαλέξεις στην Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων (3η Διάλεξη), Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., πρώην Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2021.
- [7] CIGRE Working Group 33.01, Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, Technical Brochure 63, October 1991.