



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

ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΛΟΓΩ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ

Εκτίμηση της Επίδρασης των Παραμέτρων της
Κυματομορφής του Κεραυνικού Ρεύματος

ΤΟΥ

ΜΟΡΕΛΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

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

LIGHTNING OVERVOLTAGES ARISING AT HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS DUE TO SUBSEQUENT STROKES

INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF LIGHTNING
CURRENT WAVEFORM PARAMETERS

THESIS

MORELOS APOSTOLOS

SUPERVISOR: DATSIOS ZACHARIAS

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 «Υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης λόγω επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων: Εκτίμηση της επίδρασης των παραμέτρων της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος» 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. Δάτσιου Ζαχαρία 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) Μορέλος Απόστολος & Δάτσιος Ζαχαρίας, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Μορέλος Απόστολος

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό τη μελέτη των υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης λόγω επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων. Συγκεκριμένα επικεντρώνεται στην επίδραση των παραμέτρων της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος. Στα πρώτα κεφάλαια γίνεται εισαγωγή των βασικών θεωρητικών εννοιών για την κατανόηση του αντικειμένου. Αρχικά περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας, η χρησιμότητα και τα στοιχεία ενός υποσταθμού. Περιγράφονται εκτενώς οι αιτίες ανάπτυξης των υπερτάσεων λόγω άμεσων κεραυνικών πληγμάτων, αλλά και οι τρόποι προστασίας των υποσταθμών, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα καθώς αποτελούν βασική παράμετρο της μελέτης. Ακολουθεί το τμήμα της εργασίας που αφορά τις προσομοιώσεις, όπου γίνεται λεπτομερής περιγραφή της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης των υπό μελέτη υποσταθμών υψηλής τάσης με το λογισμικό ATP-EMTP. Οι υποσταθμοί που μελετήθηκαν και προσομοιώθηκαν είναι δύο υποσταθμοί τύπου GIS (400 kV και 132 kV) και δύο υποσταθμοί τύπου AIS (400 kV και 161 kV). Ο στόχος της προσομοίωσης ήταν η μεταβολή των παραμέτρων της κυματομορφής CIGRE του κεραυνικού ρεύματος και η παρατήρηση της επίδρασής τους στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις. Στα αποτελέσματα υπάγονται οι καταγεγραμμένες υπερτάσεις της προσομοίωσης, οι κυματομορφές τους αλλά και ραβδογράμματα που καθιστούν ευκολότερη την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στο τελευταίο σκέλος της εργασίας γίνεται σύγκριση και ανάλυση των αποτελεσμάτων μεταξύ των υποσταθμών, από όπου προκύπτουν τελικά σημαντικά και χρήσιμα συμπεράσματα από τη μελέτη.

Λέξεις Κλειδιά

Ανάστροφη Διάσπαση

Κεραυνικές Υπερτάσεις

Συντονισμός Μονώσεων

Σφάλμα Θωράκισης

Υποσταθμοί

Abstract

This diploma thesis is conducted with the goal of studying overvoltages in high-voltage substations due to subsequent lightning strikes, specifically focusing on the impact of the parameters of the lightning current waveform. In the initial chapters, the fundamental theoretical concepts are introduced to facilitate understanding of the study. The operation, purpose, and components of a substation are initially described. The causes of lightning overvoltages and the methods of substation protection are extensively discussed, with particular emphasis on subsequent strokes, as they constitute a key parameter of the study. The simulation section of the work follows, providing a detailed description of the modeling and simulation of the high-voltage substations under investigation. Two GIS-type substations (400 kV and 132 kV) and two AIS-type substations (400 kV and 161 kV) were studied and simulated. More specifically, the simulation aimed to vary the parameters of the CIGRE lightning current waveform and observe their impact on the resulting overvoltages. The results include the recorded overvoltages from the simulation, their waveforms, and peak values that facilitate result interpretation. In the final part of the work, a comparison and analysis of the results between the substations are conducted, leading to significant and valuable conclusions drawn from the study.

Keywords

Backflashover

Insulation Coordination

Lightning Overvoltages

Shielding Failure

Substations

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Δάτσιο Ζαχαρία που μου έδωσε τη δυνατότητα να εκπονήσω τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αλλά και για τη σημαντική βοήθεια που μου πρόσφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου πρόσφερε μέχρι να φτάσω εδώ.

ΚΟΖΑΝΗ/ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΛΟΓΩ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος εικόνων και γραφημάτων	13
Κατάλογος πινάκων	15
Πρόλογος	17
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στους υποσταθμούς υψηλής τάσης	19
1.1 Γενικά στοιχεία	19
1.2 Εξοπλισμός υποσταθμών υψηλής τάσης	21
1.3 Προστασία έναντι υπερτάσεων	25
1.4 Σκοπός της εργασίας	26
Κεφάλαιο 2: Υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης λόγω κεραυνικών πληγμάτων	27
2.1 Αιτίες ανάπτυξης κεραυνικών υπερτάσεων	27
2.2 Προστασία υποσταθμών υψηλής τάσης έναντι άμεσων κεραυνικών πληγμάτων	28
2.3 Ανάπτυξη υπερτάσεων λόγω κεραυνικών πληγμάτων στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	29
Κεφάλαιο 3: Επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα	31
3.1 Γενικές πληροφορίες για τα πρώτα και τα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα	31
3.2 Γενική μορφή καταγεγραμμένων ρευμάτων –Κυματομορφή CIGRE	32
3.3 Παράμετροι κυματομορφής–Πιθανοτικές κατανομές	35
Κεφάλαιο 4: Υποσταθμοί που προσομοιώθηκαν	37
4.1 Γενική περιγραφή	37
4.2 Μοντελοποίηση	38
4.3 Σύνοψη περιπτώσεων προσομοίωσης	40
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συζήτηση	41
5.1 Υποσταθμός GIS 400 kV	41
5.1.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα	41
5.1.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης	42
5.2 Υποσταθμός GIS 132 kV	48
5.2.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα	48
5.2.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης	49
5.3 Υποσταθμός AIS 400 kV	54
5.3.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα	54

5.3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης	54
5.4 Υποσταθμός AIS 161 kV	59
5.4.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα	59
5.4.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης	60
5.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων	64
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	67
Βιβλιογραφία	69

Κατάλογος Εικόνων και Γραφημάτων

Εικόνα 1.1 Μετασχηματιστής ισχύος σε υποσταθμό υψηλής τάσης [1].	21
Εικόνα 1.2 Διακόπτες ισχύος τύπου περιβλήματος υπό τάση σε υποσταθμό AIS υψηλής τάσης [2].	22
Εικόνα 1.3 Τυπικός αποζεύκτης σε υποσταθμό AIS υψηλής τάσης [2].	23
Εικόνα 1.4 Εκτροπείς υπέρτασης σε υποσταθμό AIS υψηλής τάσης 330 kV [3].	23
Εικόνα 1.5 Μετασχηματιστής οργάνων που συνδυάζει μετασχηματιστή τάσης και έντασης σε υποσταθμό AIS υψηλής τάσης [4].	24
Εικόνα 1.6 Εκτροπείς υπέρτασης οξειδίου του ψευδαργύρου [6].	25
Εικόνα 2.1 Οδεύοντα και επαγόμενα κύματα λόγω άμεσου πλήγματος σε αγωγό προστασίας, περίπτωση ανάστροφης διάσπασης [8].	30
Εικόνα 2.2 Οδεύοντα κύματα λόγω άμεσου πλήγματος σε αγωγό φάσης, περίπτωση σφάλματος θωράκισης [8].	30
Εικόνα 3.1 Ενδιάμεση τιμή κεραυνικού ρεύματος πρώτων πληγμάτων [14].	34
Εικόνα 3.2 Ενδιάμεση τιμή κεραυνικού ρεύματος των επακόλουθων πληγμάτων [14].	34
Εικόνα 3.3 Παράδειγμα κυματομορφής CIGRE για κατερχόμενο αρνητικό κεραυνό (πρώτο πλήγμα) [7].	34
Γράφημα 5.1.2.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων για διάφορες τιμές της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	42
Γράφημα 5.1.2.2 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .	43
Γράφημα 5.1.2.3 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .	43
Γράφημα 5.1.2.4 Ραβδόγραμμα που απεικονίζει μέγιστες αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	44
Γράφημα 5.1.2.5 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	44
Γράφημα 5.1.2.6 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .	45
Γράφημα 5.1.2.7 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .	45
Γράφημα 5.1.2.8 Ραβδόγραμμα που απεικονίζει μέγιστες αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	46
Γράφημα 5.1.2.9 Κεραυνικά ρεύματα (80 kA) για μεταβλητό t_f στιγμιαίες τάσεις διάσπασης και αντίστοιχες υπερτάσεις για τις περιπτώσεις 50% και 5%.	47
Γράφημα 5.1.2.10 Κεραυνικά ρεύματα (80 kA) για μεταβλητό t_f στιγμιαίες τάσεις διάσπασης και αντίστοιχες υπερτάσεις για τις περιπτώσεις 50% και 5%.	47
Γράφημα 5.2.1.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων που προκάλεσαν διάσπαση, με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	49
Γράφημα 5.2.1.2 Ραβδόγραμμα που απεικονίζει αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	49
Γράφημα 5.2.2.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	50

Γράφημα 5.2.2.2 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .	50
Γράφημα 5.2.2.3 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .	51
Γράφημα 5.2.2.4 Ραβδόγραμμα που απεικονίζει αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	51
Γράφημα 5.2.2.5 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	52
Γράφημα 5.2.2.6 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .	52
Γράφημα 5.2.2.7 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .	53
Γράφημα 5.2.2.8 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	53
Γράφημα 5.3.2.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	55
Γράφημα 5.3.2.2 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .	55
Γράφημα 5.3.2.3 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .	56
Γράφημα 5.3.2.4 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	56
Γράφημα 5.3.2.5 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	57
Γράφημα 5.3.2.6 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .	57
Γράφημα 5.3.2.7 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .	58
Γράφημα 5.3.2.8 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	58
Γράφημα 5.4.2.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	60
Γράφημα 5.4.2.2 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .	60
Γράφημα 5.4.2.3 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .	61
Γράφημα 5.4.2.4 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	61
Γράφημα 5.4.2.5 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .	62
Γράφημα 5.4.2.6 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .	62
Γράφημα 5.4.2.7 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .	63
Γράφημα 5.4.2.8 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Παράμετροι της λογαριθμικής κανονικής κατανομής για κατερχόμενους αρνητικούς κεραυνούς [14].	33
Πίνακας 3.2 Πίνακας που απεικονίζει παράδειγμα παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στην κυματομορφή CIGRE για τα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα.	35
Πίνακας 5.1.1.1 Μετρημένες τιμές μήκους λήντερ στους μονωτήρες των φάσεων (A,B,C) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.	42
Πίνακας 5.2.1.1 Μετρημένες τιμές μήκους λήντερ στους μονωτήρες των φάσεων (A,B,C) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.	48
Πίνακας 5.3.1.1 Μετρημένες τιμές μήκους λήντερ στους μονωτήρες των φάσεων (A,B,C) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.	54
Πίνακας 5.4.1.1 Μετρημένες τιμές μήκους λήντερ στους μονωτήρες των φάσεων (A,B,C) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.	59
Πίνακας 5.5.1 Μέγιστες υπερτάσεις στους υποσταθμούς υψηλής τάσης σε σύγκριση με το βασικό επίπεδο μόνωσής τους. Περίπτωση σφάλματος θωράκισης.	65

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΛΟΓΩ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ
ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στην Κοζάνη κατά την περίοδο του εαρινού εξαμήνου 2023 στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η προστασία των υποσταθμών έναντι κεραυνικών υπερτάσεων και συνδέεται με το μάθημα των Υψηλών Τάσεων. Με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις κεραυνικών πληγμάτων προκειμένου να γίνει εκτίμηση υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Τελικά από τις υπερτάσεις διερευνάται η επίδραση της κυματομορφής των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΛΟΓΩ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ
ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στους υποσταθμούς υψηλής τάσης

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των γενικών στοιχείων ενός υποσταθμού και των βασικού εξοπλισμού του. Επιπλέον γίνεται αναφορά στον σκοπό της εργασίας.

1.1 Γενικά στοιχεία

Στη συγκεκριμένη υποενότητα αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των υποσταθμών, η χρησιμότητά τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται.

Οι υποσταθμοί αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα τμήματα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που γίνεται σαφές εάν γίνει κατανοητός αρχικά ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας νοείται ένα πολύπλοκο σύστημα αποτελούμενο από μονάδες παραγωγής, γραμμές μεταφοράς, υποσταθμούς και πολλά επιπλέον στοιχεία συντάσσοντας ένα σύνολο προκειμένου να μεταφερθεί και να διανεμηθεί η ηλεκτρική ενέργεια σε όλη τη χώρα. Πρωταρχικός στόχος του δικτύου είναι η αξιόπιστη και αδιάλειπτη τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές με τον αποδοτικότερο και οικονομικότερο τρόπο. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη και λειτουργία των υποσταθμών. Μπορούν να χαρακτηριστούν ως κόμβοι καθώς συνδέουν ηλεκτρικά κυκλώματα μεταξύ τους, δίνουν χρήσιμες ιδιότητες όπως αλλαγή επιπέδου τάσης, διακοπτικούς χειρισμούς και επιτρέπουν την ασφαλή και αποτελεσματική διαχείριση, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βασική λειτουργία ενός υποσταθμού είναι ουσιαστικά η ανύψωση και ο υποβιβασμός του επιπέδου τάσης στο δίκτυο, όπως και η λειτουργία των διακοπτικών χειρισμών που είναι απαραίτητοι σε περιπτώσεις σφαλμάτων και συντήρησης του εξοπλισμού.

Το πρώτο στάδιο του κύκλου της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα δίκτυο είναι η παραγωγή της. Ακολουθεί η μεταφορά της από το σημείο παραγωγής στο σημείο κατανάλωσης. Σημαντικότεροι στόχοι για την βιωσιμότητα και απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου, είναι η οικονομική (κόστος) και αποδοτική (χωρίς απώλειες) μεταφορά της ενέργειας στην ολότητά του.

Ιστορικά, επανάσταση αποτέλεσε στην μεταφορά ενέργειας σε πολύπλοκα και μεγάλα δίκτυα η αλλαγή του επιπέδου τάσης με τους υποσταθμούς, κάνοντας εφικτή τη μεταφορά της, με χαμηλό κόστος και

ελάχιστες απώλειες. Για τη μεταφορά η τάση ανυψώνεται ενώ κατά τη διανομή υποβιβάζεται στο επίπεδο του καταναλωτή.

Εξίσου σημαντική παροχή των υποσταθμών είναι η διαχείριση της ενέργειας με τη βοήθεια διακοπτικών μέσων, απομονώνοντας κυκλώματα, με σκοπό προγραμματισμένες ή έκτακτες ενέργειες συντήρησης και προστασίας του εξοπλισμού.

Οι υποσταθμοί χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους. Οι υποσταθμοί σταθμών παραγωγής, πρώτοι κατά σειρά στο δίκτυο ανυψώνουν την τάση σε κατάλληλα επίπεδα υψηλής τάσης ώστε να μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Έπονται οι υποσταθμοί συστήματος, λειτουργούν ως συνδεδεμένοι υποσταθμοί μεταξύ των συστημάτων. Τέλος με κύριο χαρακτηριστικό τον υποβιβασμό της τάσης οι υποσταθμοί διανομής και υποσταθμοί καταναλωτή, που έχουν ως σκοπό την εξυπηρέτηση των καταναλωτών.

Άλλο βασικό κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι η μόνωση που χρησιμοποιείται για την προστασία του εξοπλισμού του υποσταθμού. Υποσταθμοί που η λειτουργία τους και ο σχεδιασμός τους βασίζεται στη μόνωση αέρα (Air Insulated Substations), οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι με κύρια χαρακτηριστικά το οικονομικό κόστος κατασκευής αλλά και τις μεγάλες απαιτήσεις σε χώρο για εγκατάσταση. Υποσταθμοί που χρησιμοποιούν μόνωση αερίου για την προστασία του εξοπλισμού τους (Gas Insulated Substations). Αυτοί επιλέγονται για εγκατάσταση σε περιοχές με ιδιαίτερες περιβαλλοντολογικές απαιτήσεις, λόγω της κλειστής τους δομής, διατηρώντας προστατευμένα τα ευάλωτα σε φθορά εξαρτήματά τους. Το πλεονέκτημά τους σε σύγκριση με τους προαναφερθέντες υποσταθμούς βρίσκεται στις μικρότερες σε χώρο απαιτήσεις εγκατάστασης. Μειονέκτημά τους το αυξημένο κόστος κατασκευής. Τέλος σπανιότερα επιλέγονται οι υποσταθμοί με μικτή μόνωση (Mixed Technology Substations). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους συνδυάζουν στοιχεία από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες απαιτώντας μικρότερο χώρο εγκατάστασης από τους υποσταθμούς AIS και μεγαλύτερο από τους υποσταθμούς GIS με χαμηλότερο κόστος κτήσης από τους υποσταθμούς GIS αλλά μεγαλύτερο από τους υποσταθμούς AIS.

Η επιλογή υποσταθμού είναι συνδυασμός πολλών παραγόντων και βρίσκεται στην κρίση του υπεύθυνου σχεδιαστή ανά περίπτωση.

1.2 Εξοπλισμός υποσταθμών υψηλής τάσης

Για να εμβαθύνουμε στον τρόπο λειτουργίας των υποσταθμών, είναι απαραίτητη η μελέτη του εξοπλισμού ενός υποσταθμού υψηλής τάσης. Στην παρούσα υποενότητα γίνεται σύντομη αναφορά στη λειτουργία και χρησιμότητα των στοιχείων αυτών.

Το σημαντικότερο στοιχείο ενός υποσταθμού είναι ο μετασχηματιστής ισχύος (Εικόνα 1.1). Μετασχηματιστής ισχύος είναι η ηλεκτρική συσκευή με την οποία γίνεται η ανύψωση και ο υποβιβασμός της τάσης της ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος. Κατασκευαστικά αποτελείται από δύο σπείρες χάλκινων τυλιγμάτων, το πρωτεύον και το δευτερεύον, τυλιγμένα γύρω από μια σιδερένια πλάκα, τον πυρήνα. Η λειτουργία του βασίζεται στην τάση από ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Όσο το πρωτεύον τύλιγμα διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο επάγει την τάση στο δευτερεύον τύλιγμα. Ρυθμίζοντας την αναλογία των τυλιγμάτων ανάμεσα στο πρωτεύον και το δευτερεύον πραγματοποιείται ανύψωση ή υποβιβασμός του επιπέδου τάσης στο επιθυμητό σημείο.

Το επόμενο στοιχείο του εξοπλισμού είναι οι διακόπτες ισχύος (Εικόνα 1.2). Αποτελούν τις βασικές προστατευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα στους υποσταθμούς. Ο ρόλος τους είναι η σύνδεση και η διακοπή των κυκλωμάτων ηλεκτρικού ρεύματος. Η ενεργοποίησή τους γίνεται με τη λήψη εντολής από τα συστήματα ανίχνευσης σφαλμάτων. Έχουν τη δυνατότητα διακοπής ρευμάτων ακόμα και των ισχυρών λόγω βραχυκυκλωμάτων, δηλαδή είναι σχεδιασμένοι για να παρέχουν προστασία έναντι υπερφορτώσεων και βραχυκυκλωμάτων. Εσωτερικά περιβάλλονται από μονωτικό αέριο, ενώ κατασκευαστικά αποτελούνται από ένα κινητό και ένα σταθερό μέρος. Το κινητό μέρος βρίσκεται



Εικόνα 1.1 Μετασχηματιστής ισχύος σε υποσταθμό υψηλής τάσης [1].



Εικόνα 1.2 Διακόπτες ισχύος τύπου περιβλήματος υπό τάση σε υποσταθμό AIS υψηλής τάσης [2].

στον θάλαμο όπου σβήνει το τόξο (arc) που έχει δημιουργηθεί με την απομάκρυνση των επαφών. Εκεί υπάρχει το μονωτικό αέριο ή έλαιο για τη σβέση του τόξου.

Το επόμενο διακοπτικό μέσο που συμπληρώνει τη σύνθεση των υποσταθμών είναι οι αποζεύκτες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.3, αποτελούνται από μεταλλικά μέρη (τα οποία φέρουν το ρεύμα), πορσελάνινους ή πολυμερείς μονωτήρες στήριξης, ένα μεταλλικό πλαίσιο (βάση στήριξης) και από δευτερεύοντες μηχανισμούς απαραίτητους για τη λειτουργία των αποζευκτών. Η βασική λειτουργία των αποζευκτών σχετίζεται με την απομόνωση δύο κυκλωμάτων, αυτού που βρίσκεται υπό τάση και αυτού πρέπει να απομονωθεί, όταν δεν φέρει το κύκλωμα ρεύμα. Προσφέρουν επομένως οπτική απόζευξη. Κατά τη λειτουργία τους βρίσκονται είτε σε θέση ανοικτή, όπου δημιουργείται ένα διάκενο ικανό να απομονώνει τα δύο κυκλώματα, είτε σε θέση κλειστή όπου λειτουργεί ως ένα κανονικό τμήμα της γραμμής μεταφοράς ή ζυγού. Η ιδιαιτερότητα των αποζευκτών βρίσκεται στην αδυναμία τους για διακοπή ρευμάτων και βραχυκυκλώσεων, για τον λόγο αυτό η ζεύξη και απόζευξη γίνεται όταν η γραμμή δεν βρίσκεται υπό τάση, μετά την χρήση των διακοπών ισχύος. Τελικά με την χρήση των αποζευκτών δημιουργείται μια δικλείδα για ασφαλείς συνθήκες εργασίας και αντιμετώπισης σφαλμάτων από το εξειδικευμένο προσωπικό.

Μετά από κάθε απόζευξη είναι πιθανή η ύπαρξη παραμενόντων φορτίων στο ζυγό, για τον λόγο αυτό προκειμένου να εκφορτιστούν ανεπιθύμητα ρεύματα χρησιμοποιούνται οι συσκευές προστασίας που ονομάζονται γειωτές. Με τον τρόπο αυτό ο υποσταθμός καθίσταται ασφαλές περιβάλλον επιτρέποντας στο ανθρώπινο δυναμικό να τελέσει εργασίες συντήρηση ή αντιμετώπισης σφαλμάτων σε γραμμές που έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας. Η σύνδεση τους γίνεται στο απομονωμένο τμήμα μετά το άνοιγμα των αποζευκτών και έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μην καταστρέφονται από ρεύμα βραχυκύκλωσης.



Εικόνα 1.3 Τυπικός αποζεύκτης σε υποσταθμό AIS υψηλής τάσης [2].

Σημαντικό ρόλο στην λειτουργία ενός υποσταθμού έχουν οι εκτροπείς υπέρτασης. Είναι προστατευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται κυρίως για την προστασία του εξοπλισμού των υποσταθμών έναντι κεραυνικών υπερτάσεων. Αποτελούν απαραίτητο στοιχείο του συντονισμού μονώσεων στους υποσταθμούς και χρησιμοποιούνται σε υποσταθμούς με μόνωση αέρα (AIS) ή στο αντίστοιχο τμήμα των υποσταθμών GIS που συνδέεται σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ή σε μετασχηματιστές ισχύος. Επιπλέον, υπάρχουν και εκτροπείς υπέρτασης GIS, οι οποίοι όμως δεν χρησιμοποιούνται τόσο συχνά και είναι κατά πολύ ακριβότεροι. Η λειτουργία των εκτροπέων υπέρτασης περιγράφεται αναλυτικά στην Υποενότητα 1.3.



Εικόνα 1.4 Εκτροπείς υπέρτασης σε υποσταθμό AIS υψηλής τάσης 330 kV [3].

Ένα ακόμα τμήμα των υποσταθμών υψηλής τάσης είναι οι μετασχηματιστές οργάνων. Συγκεκριμένα μετασχηματιστής τάσης και έντασης, είναι ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός που δίνει κάθε στιγμή τη δυνατότητα καταγραφής των μεγεθών της τάσης, της έντασης του ρεύματος αλλά και της ενεργού και άεργου ισχύος. Μέσω των συσκευών αυτών παρέχονται μετρήσεις στις συσκευές προστασίας προκειμένου να ανταποκρίνονται άμεσα σε ενδεχόμενα σφάλματα. Ορισμένες φορές συνδυάζονται και οι δύο συσκευές σε ένα κέλυφος όπως στην Εικόνα 1.5.

Τέλος η σύνθεση των υποσταθμών ολοκληρώνεται με τους ζυγούς. Είναι μεταλλικές μπάρες που κατασκευάζονται από αγωγίμα υλικά προκειμένου να μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια χωρίς σημαντική πτώση τάσης. Χρησιμοποιούνται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για τη διασύνδεση των γραμμών μεταφοράς. Οι ζυγοί χρησιμεύουν για την κοινή σύνδεση του εξοπλισμού και όλων των στοιχείων που αναφέρθηκαν νωρίτερα.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι οι πληροφορίες της παρούσας υποενότητας αντλήθηκαν κατά πολύ από τις αναφορές [2] και [5]. Στην προηγούμενη υποενότητα χρησιμοποιήθηκε επίσης η αναφορά [3].



Εικόνα 1.5 Μετασχηματιστής οργάνων που συνδυάζει μετασχηματιστή τάσης και έντασης σε υποσταθμό AIS υψηλής τάσης [4].

1.3 Προστασία έναντι υπερτάσεων

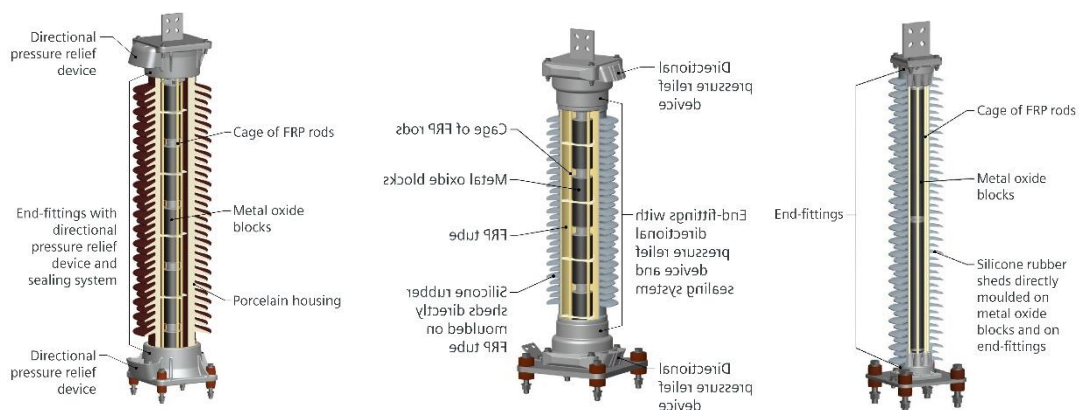
Στην υποενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος που επιτυγχάνεται η προστασία ενός υποσταθμού από τις υπερτάσεις [2], [3].

Οι πρώτες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την προστασία έναντι των υπερτάσεων είναι τα προστατευτικά διάκενα, πολύ απλός και οικονομικός εξοπλισμός αλλά όχι τόσο αποτελεσματικός με υψηλό επίπεδο προστασίας. Μειονέκτημά τους η ανεπαρκής προστασία έναντι απότομων κρουστικών κυμάτων.

Η επόμενη τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι οι εκτροπείς τύπου βαλβίδας. Αποτελούνται από πολλά διάκενα με μη γραμμικές αντιστάσεις φτιαγμένες από καρβίδιο του πυριτίου. Η σημαντική διαφορά τους έναντι των προστατευτικών διακένων βρίσκεται στο ότι έχουν τη δυνατότητα διακοπής του ρεύματος που τους διαρρέει ώστε να μη δημιουργείται σφάλμα γης μετά την υπέρταση.

Τους εκτροπείς με διάκενα από καρβίδιο του πυριτίου ήρθαν να αντικαταστήσουν οι σύγχρονοι εκτροπείς τύπου οξειδίου του μετάλλου. Είναι η παγκοσμίως αναγνωρισμένη τεχνολογία που τοποθετείται στις σημερινές εγκαταστάσεις, ενώ το υλικό κατασκευής τους συνήθως είναι οξείδιο του ψευδαργύρου. Σε έναν υποσταθμό υψηλής τάσης τοποθετούνται αμέσως πριν και μετά από το μετασχηματιστή ισχύος αλλά και στην είσοδο του υποσταθμού όπου συνδέονται οι εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Εκτροπέας υπέρτασης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60099-7 ορίζεται ως «Συσκευή για την προστασία εξοπλισμού έναντι μεταβατικών τάσεων και τον περιορισμό της διάρκειας και του εύρους ρεύματος (follow current) που ρέει διαμέσου του εκτροπέα λόγω της συνδεδεμένης πηγής ισχύος».



Εικόνα 1.6 Εκτροπείς υπέρτασης οξειδίου του ψευδαργύρου [6].

Κατά την κανονική τους λειτουργία οι εκτροπείς υπέρτασης δεν έχουν επίδραση στο σύστημα παρά μόνο σε περιπτώσεις που η τάση ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο επίπεδο προστασίας. Οι εκτροπείς υπέρτασης σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με συγκεκριμένες προδιαγραφές ώστε να αντέχουν σε διαφόρων τύπων υπερτάσεις. Τέτοιες περιπτώσεις είναι [2], [7]:

- Οι προσωρινές υπερτάσεις (TOV), μια κατάσταση που έχει σχετικά μεγάλη διάρκεια και καταπονεί ιδιαίτερα τον εξοπλισμό. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν μπορούν να περιοριστούν από τους εκτροπείς για τον λόγο αυτό σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν την καταπόνηση αυτού του τύπου.
- Οι υπερτάσεις μεγάλης διάρκειας μετώπου (SFO). Οφείλονται κυρίως σε διακοπτικούς χειρισμούς, είτε σε πιθανά σφάλματα που έχουν προκληθεί στο δίκτυο.
- Οι υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου (FFO), οφείλονται σε κεραυνικά πλήγματα που επιδρούν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περιοχές όπου επικρατούν συχνές και έντονες κακοκαιρίες, παρατηρείται αυξημένη καταπόνηση των εκτροπέων υπέρτασης.

Εν κατακλείδι, οι εκτροπείς υπέρτασης αποτελούν απαραίτητο στοιχείο του υποσταθμού για τον συντονισμό μονώσεων του καθώς προσδιορίζουν το επίπεδο προστασίας από κεραυνούς. Συντονισμός μονώσεων σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60071-1 ορίζεται «Η επιλογή της διηλεκτρικής αντοχής του εξοπλισμού σε σχέση με την τάση λειτουργίας και τις υπερτάσεις που ενδέχεται να εμφανιστούν στο σύστημα λαμβάνοντας υπόψη το περιβάλλον λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των διατάξεων προστασίας» [3].

1.4 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της στατιστικής διακύμανσης των παραμέτρων της κυματομορφής των επακόλουθων κεραυνικών ρευμάτων στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Το αντικείμενο αυτό σχετίζεται με τον συντονισμό μονώσεων των υποσταθμών. Θα διερευνηθούν υποσταθμοί υψηλής τάσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά ώστε να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα. Θα γίνουν προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP για επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τόσο για την περίπτωση πλήγματος σε αγωγό φάσης όσο και σε κάποιον πυλώνα των γραμμών.

Κεφάλαιο 2: Υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης λόγω κεραυνικών πληγμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις κατηγορίες και τις αιτίες ανάπτυξης υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης, παρουσιάζεται ο τρόπος προστασίας των υποσταθμών υψηλής τάσης έναντι άμεσων κεραυνικών πληγμάτων, όπως και η επίδρασή τους στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όσον αφορά την πρόκληση υπερτάσεων σε υποσταθμούς.

2.1 Αιτίες ανάπτυξης κεραυνικών υπερτάσεων

Οι υπερτάσεις αναπτυσσόμενες από κεραυνούς, είναι μεταβατικά φαινόμενα που δημιουργούνται από άμεσα ή έμμεσα κεραυνικά πλήγματα και επαγόμενες τάσεις.

Οι κατηγορίες των εμφανιζόμενων υπερτάσεων όπως αναφέρθηκαν και στην Υποενότητα 1.3 είναι οι:

- Προσωρινές Υπερτάσεις (Temporary Overvoltages), φαινόμενο που εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπως σφάλματα στο δίκτυο, σύνδεση και αποσύνδεση εξοπλισμού (ενεργοποίηση γραμμών, διακοπτικοί χειρισμοί). Οι κεραυνοί δεν αποτελούν αιτία πρόκλησης προσωρινών υπερτάσεων.
- Υπερτάσεις μεγάλης διάρκειας μετώπου (Slow Front Overvoltages), πρόκειται ουσιαστικά για αποσβεννύμενες ταλαντώσεις. Δημιουργούνται σε περιπτώσεις εμφανιζόμενων σφαλμάτων στο δίκτυο, κατά την ενεργοποίηση γραμμών μεταφοράς ή μετασχηματιστών και σε περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων που καταλήγουν σε αγωγούς αλλά σε μακρινή απόσταση από τον υποσταθμό.
- Υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου (Fast Front Overvoltages FFO), οφείλονται κυρίως σε άμεσα και έμμεσα κεραυνικά πλήγματα και είναι υπεύθυνες για την καταπόνηση του εξοπλισμού του υποσταθμού. Άλλες αιτίες πρόκλησης μπορούν να αποτελέσουν μεταγωγικοί χειρισμοί ή σφάλματα στις γραμμές μεταφοράς [8].

Η εκτίμηση υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της προστασίας του υποσταθμού και γίνεται με την χρήση εξειδικευμένου λογισμικού προσομοίωσης. Τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα αποτελούν τον

σημαντικότερο κίνδυνο για τον εξοπλισμό του υποσταθμού όσον αφορά τις υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου και έτσι απαιτούν σωστό σχεδιασμό προστασίας.

Τα έμμεσα κεραυνικά πλήγματα αντίθετα προκαλούν επαγόμενες υπερτάσεις που δεν αποτελούν κίνδυνο για τους υποσταθμούς υψηλής τάσης καθώς το μέγεθός τους δεν είναι σημαντικό σε σύγκριση με το βασικό επίπεδο μόνωσης (Basic Insulation Level, BIL) του εξοπλισμού [7].

2.2 Προστασία υποσταθμών υψηλής τάσης έναντι άμεσων κεραυνικών πληγμάτων

Για τον σχεδιασμό της προστασίας ενός υποσταθμού υψηλής τάσης τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα στα ενεργά μέρη του υποσταθμού αποτελούν μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει ο μηχανικός σχεδιαστής. Οι παράγοντες:

- ο της απρόβλεπτης συμπεριφοράς του φαινόμενου του κεραυνού,
- ο των ελλιπών δεδομένων συχνότητας πληγμάτων σε υποσταθμούς,
- ο η πολυπλοκότητα των συστημάτων αλλά και
- ο η οικονομική παράμετρος,

καθιστούν δύσκολη τη διαδικασία επιλογής προστασίας έναντι των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων. Ο μόνος τρόπος πλήρους προστασίας θα αποτελούσαν ένα μεταλλικό περίβλημα γύρω από τον εξοπλισμό, δηλαδή θα γινόταν μέσω ενός κλωβού Faraday. Αυτό όμως δεν μπορεί να αποτελέσει οικονομικά ρεαλιστική επιλογή για την προστασία όλων των υποσταθμών του δικτύου.

Ο σχεδιασμός της αντικεραυνικής προστασίας ενός υποσταθμού υψηλής τάσης μπορεί να γίνει αρκετά αποδοτικά ακολουθώντας ορισμένα βήματα.

- κοστολογώντας την υπό σχεδίαση εγκατάσταση,
- μελετώντας τη συχνότητα των κεραυνικών φαινομένων στην περιοχή
- αναλύοντας την αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού του υποσταθμού σε σχέση με το κόστος του (cost and benefit analysis),

Τελικά ο σχεδιαστής προσπαθεί να δημιουργήσει ασφαλείς συνθήκες για τον εξοπλισμό του υποσταθμού με οικονομικά βιώσιμες επιλογές.

Η προστασία των υπαίθριων υποσταθμών AIS υψηλών τάσεων από άμεσα κεραυνικά πλήγματα γίνεται με την μελέτη αντικεραυνικής προστασίας. Η λειτουργία της βασίζεται στη σύλληψη του κεραυνού από ηλεκτρόδια και έπειτα στην διοχέτευση του κεραυνικού ρεύματος

μέσω εναέριων αγωγών και αγωγών καθόδου στη γη μέσω του συστήματος γείωσης. Μειονέκτημα της διαδικασίας διοχέτευσης του ρεύματος στη γη (κατά την διάρκεια της διάχυσης του κεραυνικού ρεύματος μέσω του συστήματος γείωσης), αποτελεί η πιθανή ανάπτυξη επαγωγικών υπερτάσεων [9]. Τέλος για την προστασία των υποσταθμών απαιτείται εγκατάσταση εκτροπέων υπέρτασης στις εισόδους και εξόδους των γραμμών, αλλά και θωράκιση των γραμμών για τουλάχιστον 2 με 3 χιλιόμετρα από τον υποσταθμό υψηλής τάσης. Βέβαια συνήθως οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι θωρακισμένες σε όλο το μήκος τους.

2.3 Ανάπτυξη υπερτάσεων λόγω κεραυνικών πληγμάτων στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η προστασία των υποσταθμών υψηλής τάσης έναντι κεραυνικών πληγμάτων αποτελεί πρόκληση, κυρίως γιατί οι υψηλότεροι πυλώνες των γραμμών υψηλής τάσης σε σύγκριση με τους πυλώνες γραμμών που συνδέονται σε υποσταθμούς χαμηλότερης τάσης, τείνουν να ευνοούν την αύξηση πιθανότητας εμφάνισης κεραυνικών φαινομένων [10]. Οι περισσότεροι κεραυνοί που πλήττουν θωρακισμένες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πλήττουν είτε τους πυλώνες είτε τους αγωγούς προστασίας (θωράκισης). Όταν ένας κεραυνός καταλήξει στον πυλώνα ή τον αγωγό προστασίας, αν η υπέρταση που θα προκαλέσει είναι μεγαλύτερη από τη διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης της γραμμής, προκαλεί διάσπαση της μόνωσης. Συγκεκριμένα δημιουργείται ένα κύμα ρεύματος κατευθυνόμενο από τον πυλώνα προς τον αγωγό φάσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανάστροφη διάσπαση (Back Flashover) (Εικόνα 2.1) και οδηγεί στην εμφάνιση ανεπιθύμητων και επικίνδυνων υπερτάσεων στον εξοπλισμό των υποσταθμών που συνδέονται στη γραμμή μεταφοράς, αν είναι αρκετά κοντά στο σημείο πλήγματος. Στην περίπτωση που δεν προκληθεί διάσπαση, το κεραυνικό ρεύμα καταλήγει στη γη αβλαβώς μέσω του συστήματος γείωσης του εγγύτερου πυλώνα και των γειτονικών.

Όταν ένας κεραυνός καταλήξει σε αγωγό φάσης προκαλεί σφάλμα θωράκισης (Shielding Failure) (Εικόνα 2.1), δηλαδή τη δημιουργία οδευόντων κυμάτων προς τις δύο κατευθύνσεις του ίδιου αγωγού, προκαλώντας επαγόμενα κύματα στους άλλους αγωγούς και τον αγωγό προστασίας. Τα κύματα των υπερτάσεων ταξιδεύουν μέχρι την απόσβεσή τους ή την είσοδό τους στους διασυνδεδεμένους υποσταθμούς. Επιπλέον, στην περίπτωση του σφάλματος θωράκισης η καταπόνηση επιβαρύνει τους εγγύτερους μονωτήρες, με την έντασή της να αυξάνεται όσο πλησιέστερα βρίσκεται το πλήγμα σε κάποιον πυλώνα. Η απόσβεση των υπερτάσεων, πέραν της σταδιακής μείωσης κατά τη διαδρομή τους, βασίζεται και στο φαινόμενο κορώνα που συμβαίνει



Εικόνα 2.1 Οδεύοντα και επαγόμενα κύματα λόγω άμεσου πλήγματος σε αγωγό προστασίας, περίπτωση ανάστροφης διάσπασης [8].



Εικόνα 2.2 Οδεύοντα κύματα λόγω άμεσου πλήγματος σε αγωγό φάσης, περίπτωση σφάλματος θωράκισης [8].

στις γραμμές μεταφοράς. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ηλεκτρικές εκκενώσεις όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπεράσει ένα ορισμένο επίπεδο [7].

Για τον περιορισμό των σφαλμάτων θωράκισης είναι σημαντικός ο κατάλληλος σχεδιασμός της θωράκισης της γραμμής, δηλαδή ο ορισμός της θέσης των αγωγών προστασίας, ενώ για τον περιορισμό των ανάστροφων διασπάσεων, είναι απαραίτητη η μείωση της αντίστασης γείωσης του πυλώνα [10]. Σημειώνεται ότι για κάθε γεωμετρία γραμμής μεταφοράς, ανάλογα με τη θέση των αγωγών προστασίας και φάσης ορίζεται ένα μέγιστο πιθανό κεραυνικό ρεύμα που μπορεί να παρακάμψει τον αγωγό προστασίας και να καταλήξει σε κάποια φάση της γραμμής. Το μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης, όπως λέγεται, χρησιμοποιείται ως χειρότερη περίπτωση για τις προσομοιώσεις υπερτάσεων σε υποσταθμούς λόγω κεραυνικών πληγμάτων στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς, όπως θα γίνει και στην εργασία αυτή.

Επομένως, για τον συντονισμό μονώσεων και την προστασία έναντι υπερτάσεων υποσταθμών υψηλής τάσης πρέπει να εξεταστούν και οι δύο κατηγορίες αιτιών πρόκλησης κεραυνικών υπερτάσεων σε υποσταθμούς, δηλαδή η ανάστροφη διάσπαση και το σφάλμα θωράκισης στις συνδεδεμένες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 3: Επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών των πρώτων και των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων. Αναλύονται οι παράμετροι της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος και παρουσιάζεται η κυματομορφή CIGRE.

3.1 Γενικές πληροφορίες για τα πρώτα και τα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα

Κεραυνός είναι η εμφάνιση μιας φυσικής ηλεκτρικής εκκένωσης πολύ μικρής διάρκειας και υψηλής έντασης μεταξύ ενός σύννεφου και του εδάφους [11]. Οι κεραυνοί χαρακτηρίζονται ανάλογα με το φορτίο που έχουν τα σύννεφα από όπου προέρχονται, ως αρνητικοί ή θετικοί και ανάλογα με την κατεύθυνση της διαδρομής που ακολουθούν, ως κατερχόμενοι ή ανερχόμενοι. Το 90% των κεραυνών είναι αρνητικοί κατερχόμενοι [12], για τον λόγο αυτόν η μελέτη επικεντρώνεται κυρίως σε αυτούς. Αυτοί είναι ηλεκτρικές εκκενώσεις που έχουν ως αρχή σύννεφα φορτίου αρνητικής πολικότητας και καταλήγουν σε έδαφος με φορτίο θετικής πολικότητας. Αντίθετα οι κατερχόμενοι θετικοί έχουν μεγαλύτερο πλάτος κεραυνικού ρεύματος και θεωρούνται οι χειρότερες περιπτώσεις κεραυνικού φαινομένου όσον αφορά την ενέργεια που καταπονεί εξοπλισμό όπως οι εκτροπείς υπέρτασης [13].

Ένας κεραυνός αποτελείται είτε από έναν μόνο κεραυνικό πλήγμα, είτε από πλήγμα ακολουθούμενο από πολλά επακόλουθα πλήγματα.

Το πλήγμα που προπορεύεται έναντι των υπολοίπων (στην περίπτωση που υπάρχουν επακόλουθα πλήγματα) δημιουργείται από έναν λήντερ (Leader), δηλαδή μία κατερχόμενη εκκένωση που δεν γίνεται αντιληπτή με το ανθρώπινο μάτι και ανάλογα με τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά της προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά του πρώτου κεραυνικού πλήγματος [14], [15].

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην επίδραση του κεραυνικού ρεύματος λόγω επακόλουθων πληγμάτων.

3.2 Γενική μορφή καταγεγραμμένων ρευμάτων – Κυματομορφή CIGRE

Έρευνες και παρατηρήσεις επί των κεραυνικών εκκενώσεων [12], έθεσαν τα θεμέλια για τη μελέτη των κεραυνικών φαινομένων και την κατανόηση της επίδρασης που έχει το εισερχόμενο κεραυνικό ρεύμα στους υποσταθμούς.

Ένα κεραυνικό πλήγμα αναπαρίσταται ως μια ιδανική πηγή ρεύματος, άπειρης αντίστασης πηγής, που περιγράφεται από μια κυματομορφή. Η κυματομορφή χαρακτηρίζεται από παραμέτρους, που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση της επίδρασης στις παραγόμενες υπερτάσεις αλλά και στην απόκριση των γραμμών μεταφοράς και των υποσταθμών.

Οι σημαντικότεροι παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος ενός κεραυνού είναι (Πίνακας 3.1):

- Το πλάτος του ρεύματος κορυφής (Peak/Crest Current)
- Ο χρόνος μέχρι την τιμή κορυφής
- Η κλίση μετώπου (Steepness)
- Η διάρκεια μετώπου (Front time)
- Η πολικότητα
- Διάρκεια ουράς (Tail time).

Η ανάλυση της στατιστικής διακύμανσης των παραπάνω παραμέτρων της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος, οδηγεί στα παρακάτω χρήσιμα συμπεράσματα για τα πρώτα και τα επακόλουθα πλήγματα.

- Η διάρκεια μετώπου της κυματομορφής των επακόλουθων πληγμάτων είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με αυτή των πρώτων πληγμάτων.
- Για την μέγιστη κλίση της κυματομορφής παρατηρείται ότι, ενώ το πλάτος των επακόλουθων πληγμάτων είναι μικρότερο έναντι των πρώτων χτυπημάτων, η μέγιστη κλίση τους είναι σημαντικά πιο απότομη.
- Τα καταγεγραμμένα δεδομένα για τον χρόνο ημίσεος εύρους (ουράς) θεωρούνται χρήσιμα για εφαρμογή σε μελέτες που αφορούν ενεργειακή καταπόνηση εξοπλισμού καθώς στις μέγιστες τιμές των υπερτάσεων δίνεται προτεραιότητα στο μέτωπο της κυματομορφής. Η ουρά των επακόλουθων πληγμάτων είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή των πρώτων πληγμάτων.

Προκειμένου να αξιοποιηθούν οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιείται μια λογαριθμική κανονική κατανομή που χαρακτηρίζεται από τη διάμεσο και την τυπική απόκλιση κάθε μιας από τις παραπάνω παραμέτρους.

Η κατανομή αυτή υπολογίζεται όπως παρακάτω [14]:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2n} \cdot \beta x} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (1) \quad \mu\epsilon, \quad z = \frac{\ln\left(\frac{x}{M}\right)}{\beta} \quad (2)$$

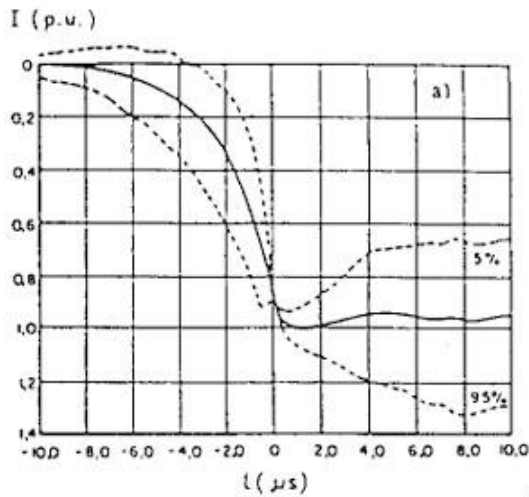
Όπου M , η ενδιάμεση τιμή κάθε παραμέτρου, και όπου β η λογαριθμική τυπική απόκλιση. Ενώ η μέση τιμή για κάθε παράμετρο υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\mu = M \cdot e^{\frac{\beta^2}{2}} \quad (3)$$

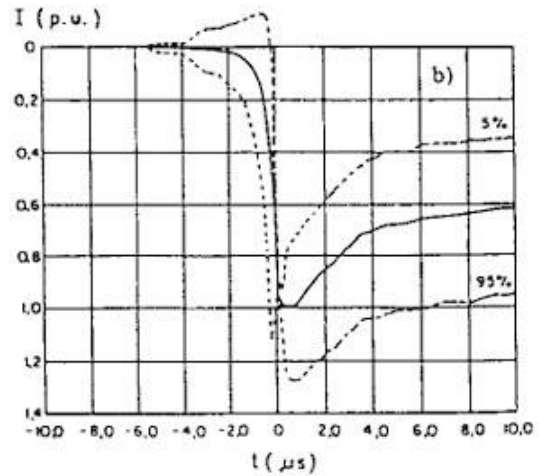
Από την στατιστική ανάλυση των πρώτων και των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων προκύπτουν οι ενδιάμεσες τιμές των καταγεγραμμένων κυματομορφών των ρευμάτων, που φαίνονται στις Εικόνες 3.1 και 3.2, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1 Παράμετροι της λογαριθμικής κανονικής κατανομής για κατερχόμενους αρνητικούς κεραυνούς [14].

Parameter	First stroke		Subsequent stroke	
	M	β	M	β
Front, μs				
$t_{d10} = t_{10}/0.8$	5.63	0.576	0.75	0.921
$t_{d30} = t_{30}/0.6$	3.83	0.553	0.67	1.013
Steepness, kA/μs				
S_m , Maximum	24.3	0.599	39.9	0.852
S_{10} , at 10%	2.6	0.921	18.9	1.404
$S_{10/90}$, 10-90%	5.0	0.645	15.4	0.944
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.622	20.1	0.967
Crest Current, kA				
I_i , Initial	27.7	0.461	11.8	0.530
I_f , Final	31.1	0.484	12.3	0.530
Initial/Final	0.9	0.230	0.9	0.207
Tail, t_h, μs	77.5	0.0577	30.2	0.933
Charge, Q_i, C	4.65	0.882	0.938	0.882
$\int i^2 dt$, (kA) ^2s	0.057	1.373	0.0055	1.366
Inter stroke interval, ms			35	1.066

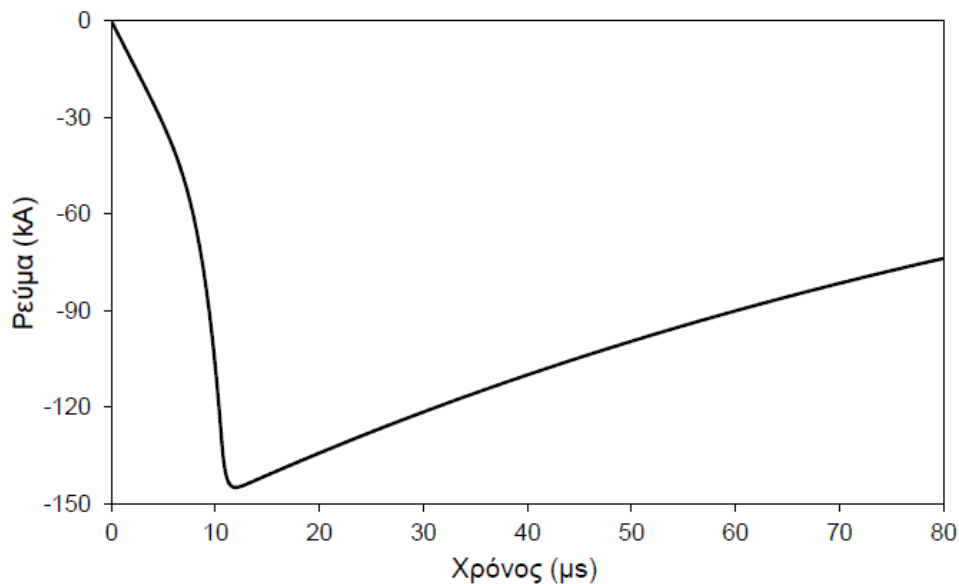


Εικόνα 3.1 Ενδιάμεση τιμή κεραυνικού ρεύματος πρώτων πληγμάτων [14].



Εικόνα 3.2 Ενδιάμεση τιμή κεραυνικού ρεύματος των επακόλουθων πληγμάτων [14].

Το Διεθνές Συμβούλιο Μεγάλων Ηλεκτρικών Δικτύων - CIGRE ανέπτυξε την κυματομορφή CIGRE (παράδειγμα στην Εικόνα 3.3) που αναπαριστά τη γενική μορφή των κεραυνικών ρευμάτων που φαίνονται στις Εικόνες 3.1 και 3.2 με είσοδο ορισμένες παραμέτρους που αναλύονται στην Υποενότητα 3.3. Η κυματομορφή αυτή θα χρησιμοποιηθεί και στη διερεύνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 3.3 Παράδειγμα κυματομορφής CIGRE για κατερχόμενο αρνητικό κεραυνό (πρώτο πλήγμα) [7].

3.3 Παράμετροι κυματομορφής-Πιθανοτικές κατανομές

Στην εργασία θα διερευνηθεί η επίδραση των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις λόγω των επακόλουθων κεραυνικών πλήγμάτων. Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι για την κυματομορφή CIGRE είναι [13]:

1. Το ρεύμα κορυφής, I (kA)
2. Η διάρκεια μετώπου, t_f (ή t_{d30}) (μs)
3. Η μέγιστη κλίση μετώπου στο 90%, S_m (kA/ μs)
4. Διάρκεια ημίσεος εύρους, t_h (μs).

Το ρεύμα κορυφής είναι η μέγιστη τιμή που παίρνει το κεραυνικό ρεύμα του επακόλουθου κεραυνικού πλήγματος. Η διάρκεια μετώπου ορίζεται ως το διάστημα από τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο 30% του πλάτους του ρεύματος έως τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο 90% του πλάτους του ρεύματος διά 0.6. Η μέγιστη κλίση προσδιορίζει την κλίση του μετώπου της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος. Τέλος η διάρκεια ημίσεος εύρους ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που πρέπει να περάσει έως τη στιγμή που το πλάτος του ρεύματος θα γίνει ίσο με το 50% της μέγιστης τιμής του στην ουρά.

Στη διερεύνηση αυτής της εργασίας θα ληφθεί υπόψη η στατιστική διακύμανση των παραμέτρων t_f , S_m και t_h . Συγκεκριμένα, θα γίνουν προσομοιώσεις για τα εξής ποσοστά περιπτώσεων που ξεπερνούν μία συγκεκριμένη τιμή: 95%, 75%, 50%, 25%, 5%. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για κεραυνικό ρεύμα 46 kA. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος επηρεάζει την παράμετρο S_m ενώ οι άλλες δύο παράμετροι είναι ανεξάρτητες του μέγιστου κεραυνικού ρεύματος.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι με την μείωση του ποσοστού των περιπτώσεων η διάρκεια μετώπου, η μέγιστη κλίση και η διάρκεια ημίσεος εύρους αυξάνονται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2. Επίσης στους συνδυασμούς που διερευνήθηκαν μεταβαλλόταν πάντα μία παράμετρος με τις άλλες δύο στο 50%.

Πίνακας 3.2 Πίνακας που απεικονίζει παράδειγμα παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στην κυματομορφή CIGRE για τα επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα.

Peak current (kA):	Subsequent strokes														
	Log-normal		% exceeding tabulated value					Conditional for a given peak current							
	Median	β	95	75	50	25	5	Median	β	95	75	50	25	5	
46															
Peak current, I_f (kA)	12,3	0,53	5,1	8,6	12,3	17,6	29,4								
Front time t_{d30} (μs)	0,67	1,013	0,13	0,34	0,67	1,33	3,55								
Time to half value, t_h (μs)	30,2	0,933	6,5	16,1	30,2	56,7	140,1								
Maximum steepness, S_m (kA/ μs)	39,9	0,852	9,83	22,46	39,90	70,88	162,03	130,80	0,706	40,95	81,25	130,80	210,58	417,79	

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΛΟΓΩ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 4: Υποσταθμοί που προσομοιώθηκαν

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται οι υποσταθμοί και οι διαφορετικές περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν μέσω του λογισμικού ATP-EMTP [16], [17]. Περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος μοντελοποίησης και τα μοντέλα/μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν.

4.1 Γενική περιγραφή

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης από άμεσα κεραυνικά πλήγματα στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα μελετάται η επίδραση των παραμέτρων της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος που οφείλεται στα επακόλουθα πλήγματα.

Οι υποσταθμοί που προσομοιώθηκαν είναι δύο υποσταθμοί υψηλής τάσης (400 kV και 161 kV) μόνωσης αέρα (AIS), και δύο υποσταθμοί υψηλής τάσης (400 kV και 132 kV) μόνωσης αερίου (GIS). Στους υποσταθμούς αυτούς προσομοιώθηκαν τοπολογίες στις οποίες υπήρχε μόνο μία γραμμή μεταφοράς συνδεδεμένη τη στιγμή του κεραυνικού πλήγματος και ένας μετασχηματιστής ισχύος. Ακολουθούν κάποιες επιπλέον πληροφορίες:

- Υποσταθμός 400 kV GIS (HVSS1): Προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης στην είσοδό της γραμμής και στον μετασχηματιστή ισχύος. Για τη σύνδεση του μετασχηματιστή με το GIS χρησιμοποιούνται καλώδια ισχύος.
- Υποσταθμός 132 kV GIS (HVSS2): Αντίστοιχα με τον HVSS1.
- Υποσταθμός 400 kV AIS (HVSS3): Προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης στην είσοδό της γραμμής, στον μετασχηματιστή ισχύος αλλά και στους ζυγούς.
- Υποσταθμός 161 kV AIS (HVSS4): Προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης στην είσοδό της γραμμής και στον μετασχηματιστή ισχύος.

Η επιλογή των συγκεκριμένων υποσταθμών και τοπολογιών έγινε για να βγουν γενικά συμπεράσματα από τη διερεύνηση μελετώντας συστήματα με διαφορετικά επίπεδα τάσης και είδη μόνωσης.

Στις προσομοιώσεις έγινε αναπαράσταση σφάλματος θωράκισης (Shielding Failure), με προσομοίωση άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε

αγωγούς φάσης και αναπαράσταση ανάστροφης διάσπασης (Back flashover), με προσομοίωση άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε αγωγούς προστασίας. Μεταβλήθηκαν οι παράμετροι εισόδου της κυματομορφής CIGRE του κεραυνικού ρεύματος ώστε να παρατηρηθεί η επίδραση της κάθε μιας στην παραγόμενη υπέρταση ως εξής:

1. Ενδιάμεσες τιμές 50%
2. Η διάρκεια μετώπου, t_f (ή t_{d30}) (μs): 95%, 75%, 25%, 5%
3. Η μέγιστη κλίση, S_m ($kA/\mu s$): 95%, 75%, 25%, 5%
4. Διάρκεια ημίσεος εύρους, t_h (μs): 95%, 75%, 25%, 5%.

Τα ποσοστά, όπως αναφέρθηκε και στην Υποενότητα 3.3 αφορούν τις περιπτώσεις που ξεπερνούν τη συγκεκριμένη τιμή της παραμέτρου.

Στις προσομοιώσεις μελετήθηκαν οι εξής τιμές κεραυνικών ρευμάτων κορυφής: για την περίπτωση ανάστροφης διάσπασης 80 kA και για την περίπτωση σφάλματος θωράκισης 80 kA (χειρότερη περίπτωση) και 46 kA (πιο ρεαλιστική περίπτωση). Σημειώνεται ότι οι μεγάλες τιμές ρεύματος που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν σε πολύ χαμηλές πιθανότητες εμφάνισης (κάτω από 1%) καθώς η ενδιάμεση τιμή είναι μόλις 12.3 kA.

4.2 Μοντελοποίηση

Για τις προσομοιώσεις και την αναπαράσταση των υπό προσομοίωση υποσταθμών χρησιμοποιήθηκε ο γραφικός προεπεξεργαστής ATPDraw του λογισμικού ATP-EMTP. Τα μοντέλα και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στην παρούσα υποενότητα. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στην αναφορά [7].

- Η προσομοίωση των ρευμάτων των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων έγινε με χρήση της πηγής ρεύματος CIGRE εισάγοντας ως παραμέτρους τις τιμές των κατανομών που περιγράφηκαν παραπάνω και στην Υποενότητα 3.3.

- Στην περίπτωση πρόκλησης ανάστροφης διάσπασης το κεραυνικό πλήγμα αναπαρίσταται από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια αντίσταση 400 Ω , ενώ στην περίπτωση του σφάλματος θωράκισης με πηγή ρεύματος παράλληλα με μια αντίσταση 1000 Ω .

- Για τις ανάστροφες διασπάσεις το κεραυνικό ρεύμα επιλέχθηκε 80 kA, ενώ για τα σφάλματα θωράκισης μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις, η χειρότερη περίπτωση 80 kA και η πιο ρεαλιστική περίπτωση 46 kA.

- Για την αναπαράσταση των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα JMarti με παραμέτρους εξαρτώμενες από τη συχνότητα με χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα στη γεωμετρία των πυλώνων και τις αποστάσεις των αγωγών. Επιπλέον ο υπολογισμός των παραμέτρων των

γραμμών έγινε σύμφωνα με την ειδική αντίσταση του εδάφους της περιοχής.

- Οι πυλώνες αναπαρίστανται από κατακόρυφες μονοφασικές γραμμές κατανομημένων παραμέτρων, χωρίς απώλειες, ανεξάρτητες από τη συχνότητα. Κάθε τμήμα του πυλώνα αναπαρίστανται με γραμμή μεταφοράς μήκους ίσο με το ύψος του τμήματος αυτού. Η επιλεγμένη ταχύτητα διάδοσης κύματος είναι ίση με το 85% της ταχύτητας του φωτός, καθώς οι πυλώνες διαθέτουν και μη κατακόρυφα τμήματα που καθυστερούν την όδευση.

- Για τη προσομοίωση της διάσπασης μόνωσης των γραμμών έγινε χρήση του κυκλωματικού στοιχείου LDM type-94, το οποίο υλοποιεί μοντέλα προόδου του λήντερ.

- Τα μονοπολικά καλώδια ισχύος αναπαρίστανται με τη βοήθεια του μοντέλου Bergeron σε συχνότητα 50 kHz, που κρίνεται επαρκής για τη μελέτη των φαινομένων αυτών.

- Η αναπαράσταση των εκτροπών υπέρτασης έγινε με τη χρήση του μοντέλου Pinceti και Giannettoni, το οποίο έχει εξάρτηση από τη συχνότητα, άρα είναι κατάλληλο για τα γρήγορα φαινόμενα που μελετώνται. Με βάση τα χαρακτηριστικά των εκτροπών που έχουν εγκατασταθεί στους υποσταθμούς υπολογίστηκαν οι παράμετροι του μοντέλου.

- Η αναπαράσταση των ζυγών των υποσταθμών GIS έγινε με χρήση γραμμών μεταφοράς χωρίς απώλειες με κυματική αντίσταση 75 Ω.

- Η προσομοίωση των συνδέσεων στους AIS στην περίπτωση αγωγών με μήκη μεγαλύτερα των 3 m, έγινε από γραμμές χωρίς απώλειες και κυματική αντίσταση ίση με 400 Ω. Στην περίπτωση γραμμών μήκους μικρότερου των 3 m έγινε χρήση αυτεπαγωγών 1 μH/m.

- Οι μετασχηματιστές μοντελοποιήθηκαν από το συνδυασμό ενός Π-ισοδύναμου κυκλώματος χωρητικότητας και ενός μοντέλου BCTRAN, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

4.3 Σύνοψη περιπτώσεων προσομοίωσης

Ως σύνοψη των παραπάνω Υποενοτήτων χρησιμοποιήθηκε ο γραφικός προεπεξεργαστής ATPDraw του λογισμικού ATP-EMTP, στις προσομοιώσεις αναπαρίστανται:

1. Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό προστασίας (κορυφή πυλώνα) με έλεγχο για ανάστροφη διάσπαση
2. Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης) με έλεγχο για διάσπαση των μονωτήρων της γραμμής μεταφοράς.

Καταγράφηκαν οι τιμές των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων μεταβάλλοντας τις παραμέτρους (διάρκεια μετώπου t_f , μέγιστη κλίση S_m , διάρκεια ημίσεος εύρους t_h) της κυματομορφής (CIGRE) του κεραυνικού ρεύματος των επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων. Για κάθε μία παράμετρο προσομοιώθηκε το 95%, 75%, 50%, 25% και 5% των τιμών τους (Υποενοότητα 3.3).

Οι προσομοιώσεις έγιναν στους υποσταθμούς:

- Υποσταθμός HVSS1 υψηλής τάσης 400 kV μόνωσης αερίου (GIS)
- Υποσταθμός HVSS2 υψηλής τάσης 132 kV μόνωσης αερίου (GIS)
- Υποσταθμός HVSS3 υψηλής τάσης 400 kV μόνωσης αέρα (AIS)
- Υποσταθμός HVSS4 υψηλής τάσης 161 kV μόνωσης αέρα (AIS),

για κεραυνικά ρεύματα επακόλουθων πληγμάτων με τιμές κορυφής 80 kA για τις περιπτώσεις 1 και 2 και 46 kA για την περίπτωση 2 μόνο. Στις προσομοιώσεις θεωρείται ότι κατά το πρώτο κεραυνικό πλήγμα που προηγήθηκε του επακόλουθου δεν συνέβη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αλλά ούτε και της μόνωσης του εξοπλισμού του υποσταθμού.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συζήτηση

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των υποσταθμών υψηλής τάσης που περιγράφηκαν στον προηγούμενο κεφάλαιο. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι κυματομορφές και τα ραβδογράμματα των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων. Στο τέλος γίνεται σύγκριση και συζήτηση των αποτελεσμάτων.

5.1 Υποσταθμός GIS 400 kV

Ο υποσταθμός GIS 400 kV, είναι ο ένας εκ των δύο υποσταθμών που χρησιμοποιούν μονωτικό αέριο ως μονωτικό μέσο. Μοντελοποιήθηκε κατάλληλα ώστε να γίνει αναπαράσταση κεραυνικού πλήγματος σε πυλώνα και αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Κεφάλαιο 4). Στόχος της προσομοίωσης, η παρατήρηση της επίδρασης των παραμέτρων της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος επακόλουθου πλήγματος, στις υπερτάσεις στον υποσταθμό υψηλής τάσης.

Στις υποενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συγκεκριμένα μετρούμενες υπερτάσεις για την περίπτωση άμεσου κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα γραμμών μεταφοράς και υπερτάσεις για την περίπτωση άμεσου κεραυνικού πλήγματος σε αγωγό φάσης.

5.1.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Ένα κεραυνικό πλήγμα που καταλήγει σε πυλώνα ή αγωγό προστασίας μπορεί να οδηγήσει σε ανάστροφη διάσπαση (BackFlashover). Στην προσομοίωση καταγράφονται αναπτυσσόμενες υπερτάσεις και παρατηρούνται οι περιπτώσεις που προκαλούν διάσπαση. Αν δεν συμβεί ανάστροφη διάσπαση, τότε δεν δημιουργούνται υπερτάσεις στον υποσταθμό, καθώς δεν ρέει κεραυνικό ρεύμα στους αγωγούς φάσης της εναέριας γραμμής μεταφοράς.

Παρά τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις από πλήγματα στον πυλώνα, το μέγεθός τους δεν οδήγησε σε καμία περίπτωση σε διάσπαση μόνωσης. Οι τιμές που έλαβαν οι λήντερ του μοντέλου προόδου του λήντερ φαίνονται στον Πίνακα 5.1.1.1. Σημειώνεται ότι για να γίνει διάσπαση πρέπει ο λήντερ να γίνει ίσος με το μήκος της μόνωσης, δηλαδή 2.55 ή 3.4 m για την περίπτωση που εξετάζεται.

Πίνακας 5.1.1.1 Μετρημένες τιμές μήκους λήντερ στους μονωτήρες των φάσεων (A,B,C) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

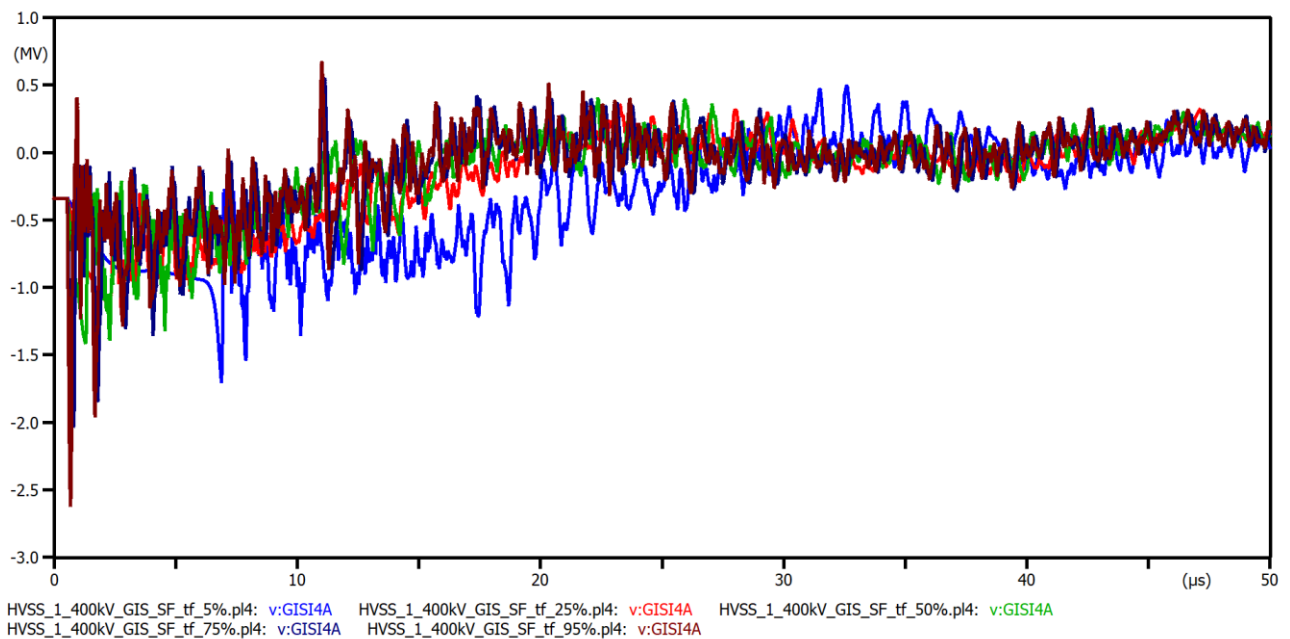
	50% (Median)	tf, 95%	tf, 75%	tf, 50%	tf, 25%	tf, 5%	Sm, 95%	Sm, 75%	Sm, 50%	Sm, 25%	Sm, 5%	th, 95%	th, 75%	th, 50%	th, 25%	th, 5%
LA		1.408	0.61247	0.2191	0.1342	0.08516	0.2340	0.2211	0.2191	0.2592	0.3318	0.2184	0.2191	0.2191	0.2189	0.2186
LB		0.01320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LC		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.1.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

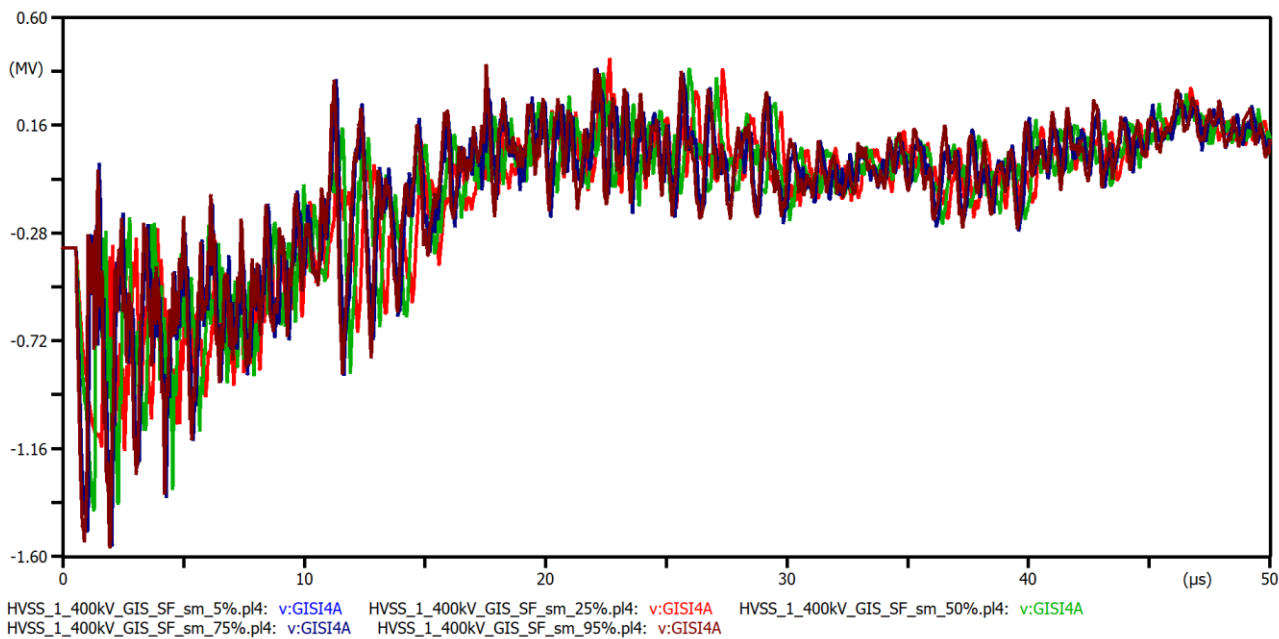
Το πλήγμα σε αγωγό φάσης μελετήθηκε σε δύο επιμέρους περιπτώσεις, τη χειρότερη με μέγιστη τιμή ρεύματος 80 kA και τη ρεαλιστική με μέγιστη τιμή ρεύματος 46 kA.

Στα γραφήματα 5.1.2.1–5.1.2.8 Παρουσιάζονται τα γραφήματα των κυματομορφών των υπερτάσεων στον πρώτο κόμβο (GISI4A) του υποσταθμού και παρατηρείται η επίδραση των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος σε αυτές.

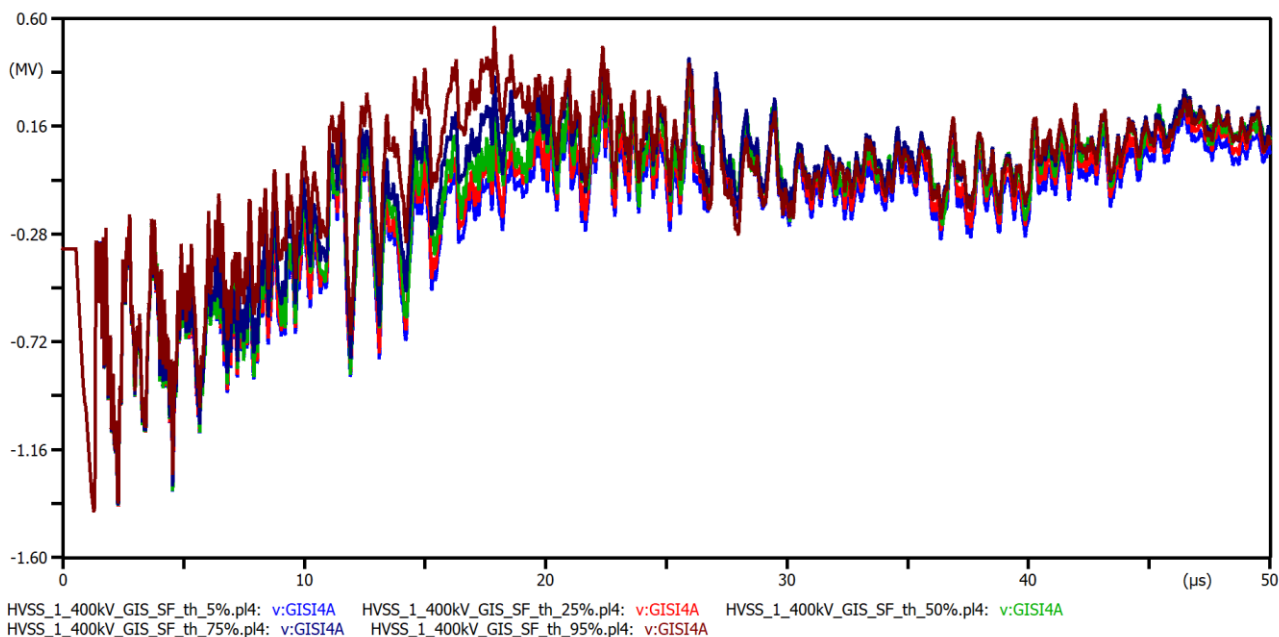
1. Σφάλμα θωράκισης με κεραυνικό ρεύμα 80 kA



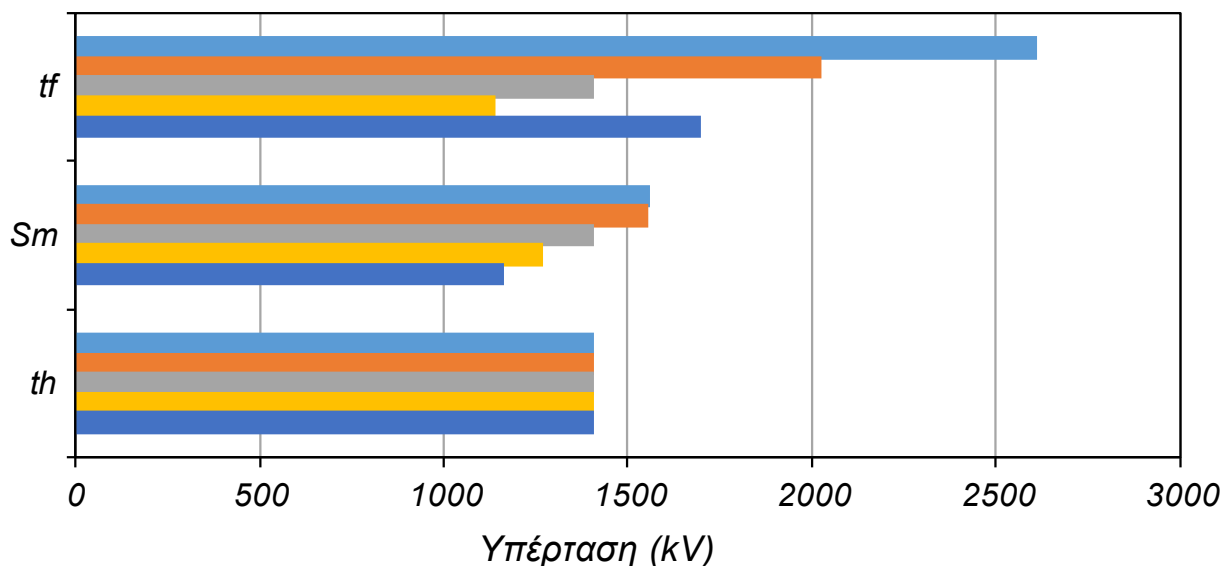
Γράφημα 5.1.2.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων για διάφορες τιμές της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .



Γράφημα 5.1.2.2 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .

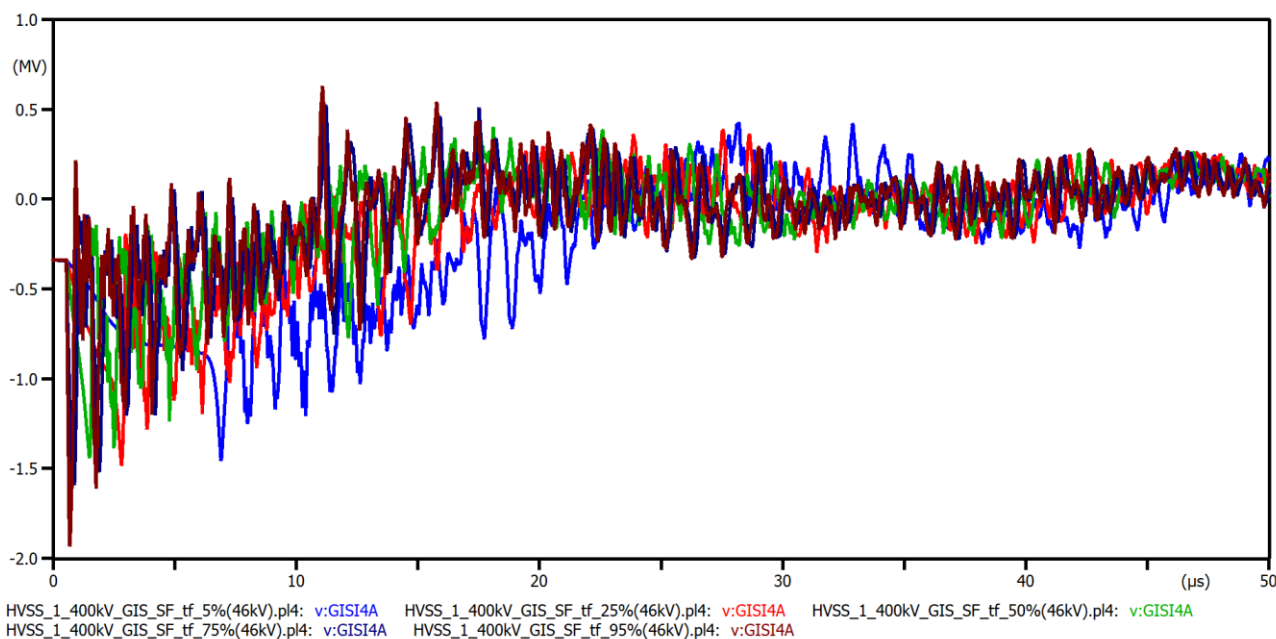


Γράφημα 5.1.2.3 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .

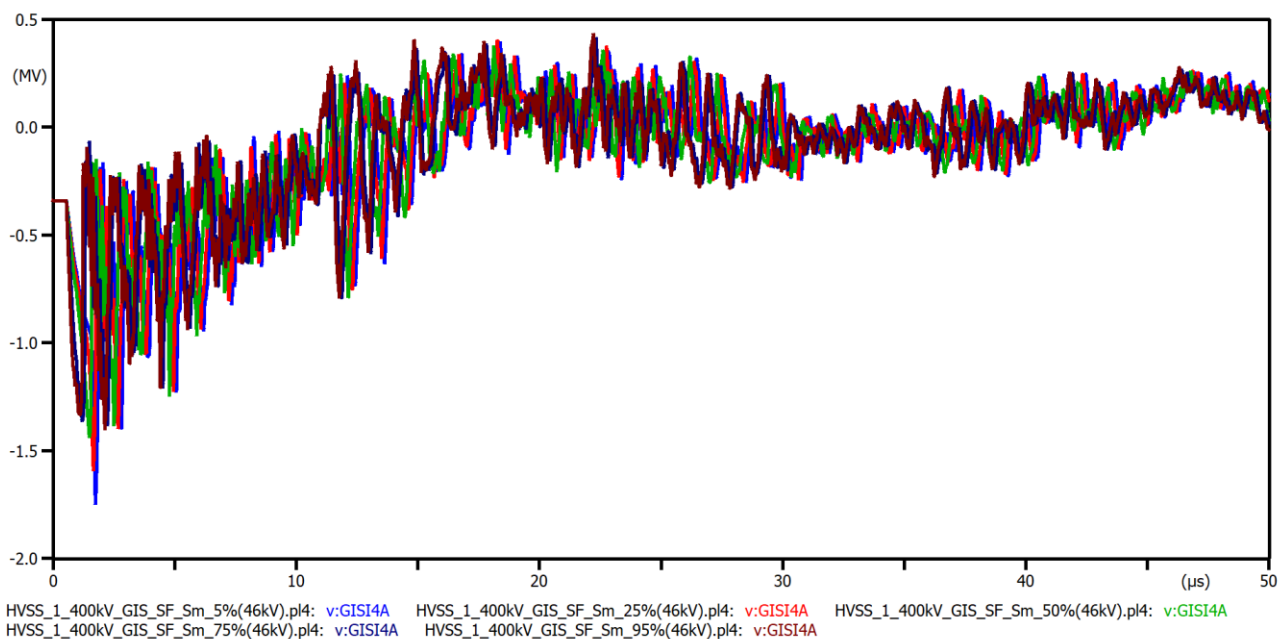


Γράφημα 5.1.2.4 Ραβδόγραμμα που απεικονίζει μέγιστες αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

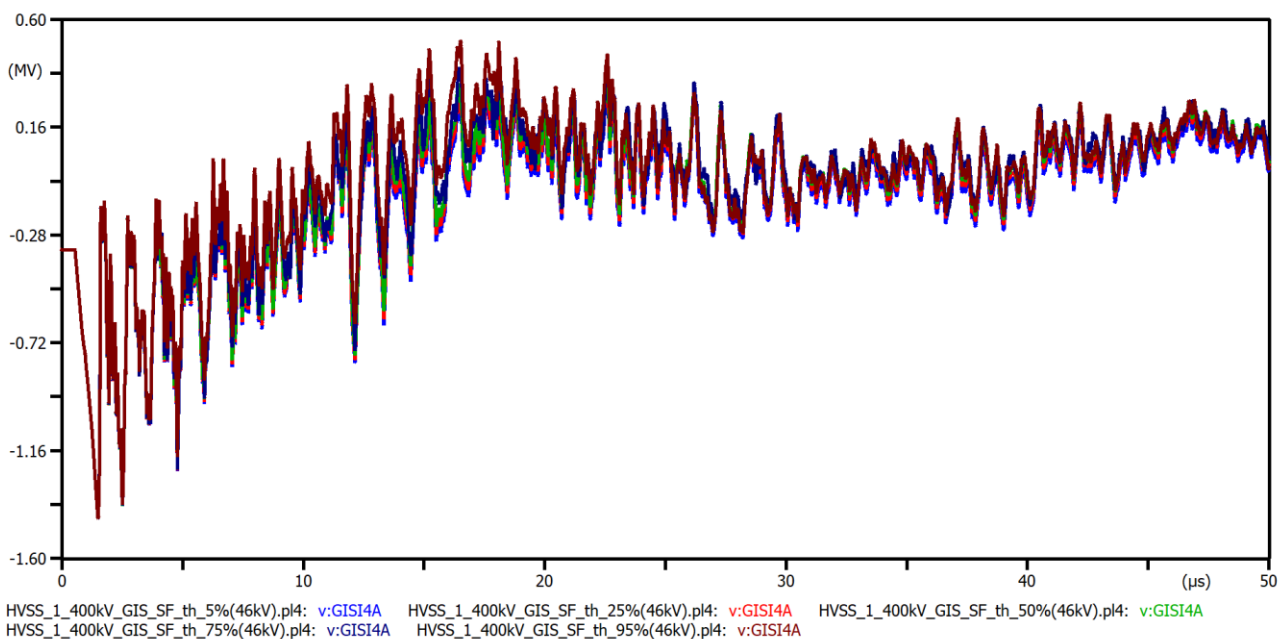
2. Σφάλμα θωράκισης με κεραυνικό ρεύμα 46 kA



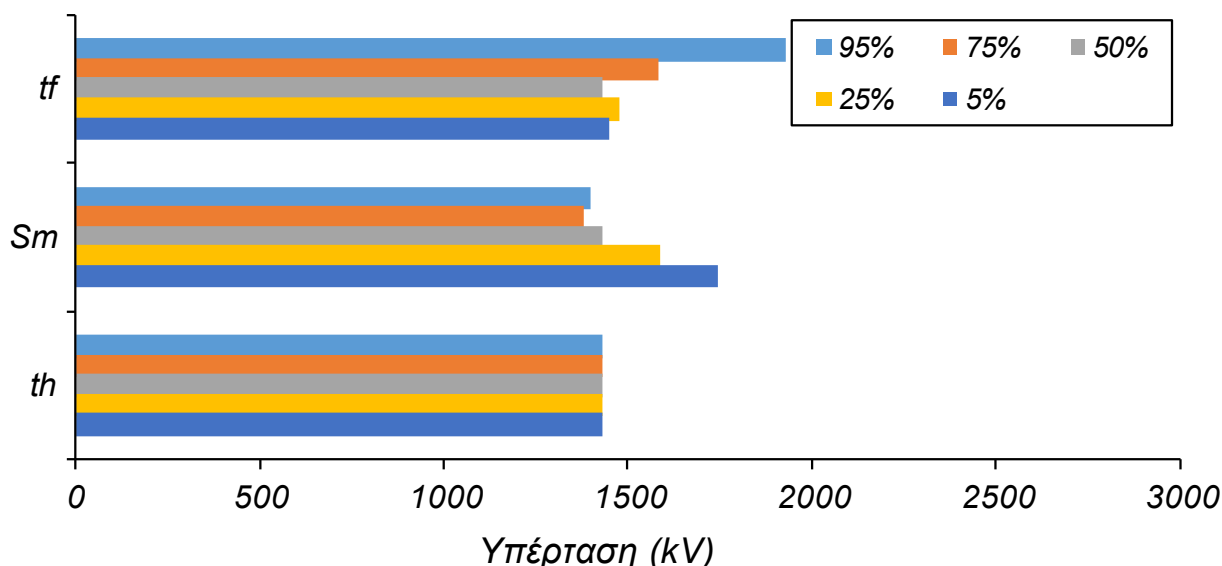
Γράφημα 5.1.2.5 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .



Γράφημα 5.1.2.6 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .



Γράφημα 5.1.2.7 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσειας εύρους t_h .



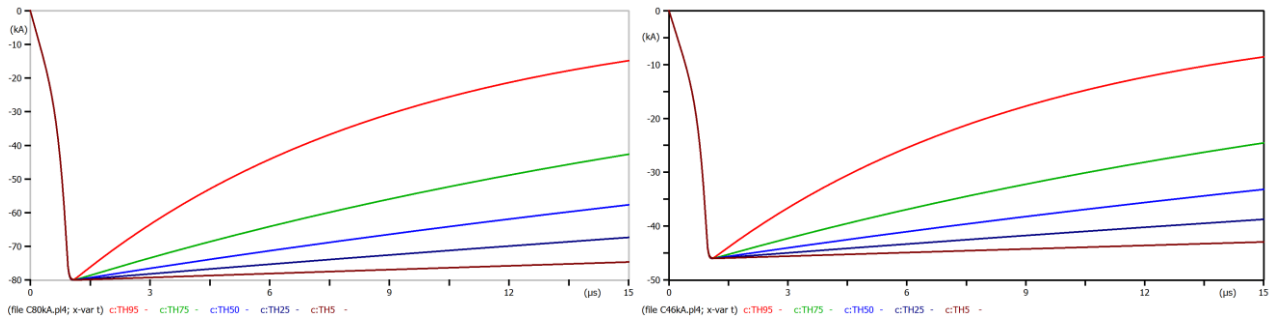
Γράφημα 5.1.2.8 Ραβδόγραμμα που απεικονίζει μέγιστες αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

Από τις παραπάνω κυματομορφές παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Αυτό οφείλεται στη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς λόγω του πλήγματος του κεραυνού. Ένα μέρος του ρεύματος οδηγείται στη γη μέσω του πυλώνα μετά τη διάσπαση. Το αν η μορφή των υπερτάσεων διαφέρει ή όχι εξαρτάται από τη χρονική στιγμή που συμβαίνει η διάσπαση αυτή. Αν μεταξύ δύο περιπτώσεων διαφέρουν έντονα οι στιγμές της διάσπασης τότε διαφέρουν και οι κυματομορφές.

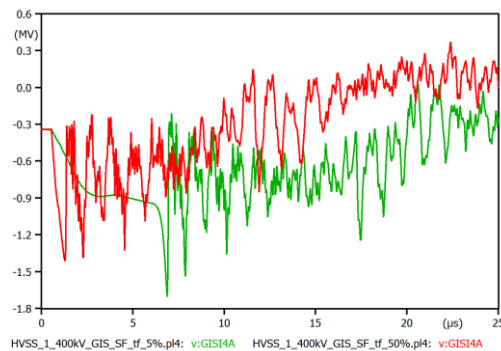
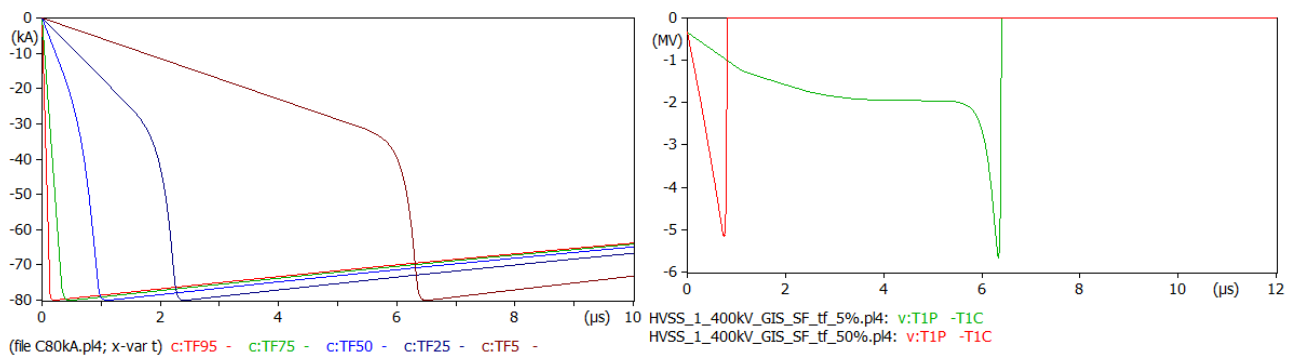
Από τα ραβδογράμματα (Γραφήματα 5.1.2.4 και 5.1.2.8), παρατηρήθηκαν γενικά μεγαλύτερες υπερτάσεις στη χειρότερη περίπτωση της προσομοίωσης (80 kA) σε σύγκριση με τη ρεαλιστική περίπτωση (46 kA). Η μεταβολή της διάρκειας ημίσεος εύρους (t_h) και στις δύο περιπτώσεις δεν επηρεάζει τις υπερτάσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί η διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς συμβαίνει στο μέτωπο της κυματομορφής όπου όλες οι εξεταζόμενες κυματομορφές ταυτίζονται (Γράφημα 5.1.2.10).

Οι εντονότερες επιδράσεις παρατηρούνται κατά τη μεταβολή της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου (t_f). Σε γενικές γραμμές τα μικρότερα μέτωπα, δηλαδή τα μεγαλύτερα ποσοστά οδηγούν σε μεγαλύτερες υπερτάσεις. Αυτό, όμως, εξαρτάται από τη στιγμιαία τάση διάσπασης της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς, καθώς μεγαλύτερες τάσεις διάσπασης δημιουργούν μεγαλύτερες υπερτάσεις, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο Γράφημα

Όσον αφορά τη μέγιστη κλίση (S_m) παρουσιάζει αύξηση υπερτάσεων στα 46 kA και μείωση στα 80 kA με την αύξηση της τιμής του S_m (μείωση του ποσοστού). Αυτή η συμπεριφορά και πάλι οφείλεται στις στιγμιαίες τάσεις διάσπασης, που με τη σειρά τους προκαλούνται από τη μορφή των κεραυνικών ρευμάτων που καθορίζεται από τις παραμέτρους της πηγής της CIGRE.



Γράφημα 5.1.2.9 Κεραυνικά ρεύματα (80 kA) για μεταβλητό t_f στιγμιαίες τάσεις διάσπασης και αντίστοιχες υπερτάσεις για τις περιπτώσεις 50% και 5%.



Γράφημα 5.1.2.10 Κεραυνικά ρεύματα (80 kA) για μεταβλητό t_f στιγμιαίες τάσεις διάσπασης και αντίστοιχες υπερτάσεις για τις περιπτώσεις 50% και 5%.

5.2 Υποσταθμός GIS 132 kV

Ο υποσταθμός GIS 132 kV, επίσης χρησιμοποιεί για την μόνωση του εξοπλισμού μονωτικό αέριο. Μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό ATP-EMTP και εφαρμόστηκε η ίδια διαδικασία με αναπαράσταση κεραυνικού πλήγματος ώστε να παρατηρηθεί η επίδραση των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος.

Στις υποενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις στο συγκεκριμένο υποσταθμό υψηλής τάσης, ειδικότερα οι περιπτώσεις άμεσου πλήγματος στον πυλώνα γραμμών μεταφοράς και άμεσου πλήγματος σε αγωγό φάσης.

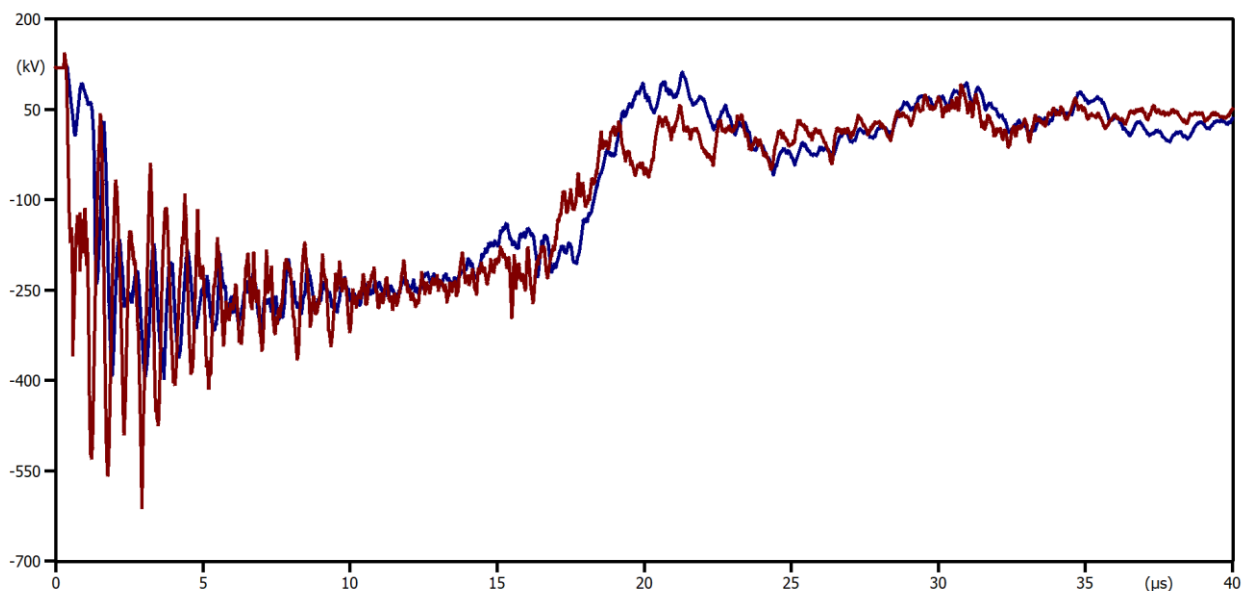
5.2.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Στην προσομοίωση της ανάστροφης διάσπασης μόνο οι περιπτώσεις των 95% και 75% της διάρκειας μετώπου (t_f) προκάλεσαν διάσπαση μόνωσης, ενώ οι τιμές των λήντερ σε κάθε φάση φαίνονται στον Πίνακα 5.2.1.1 (μήκος μόνωσης: 1.8 m). Στα Γραφήματα 5.2.1.1 και 5.2.1.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις που έγινε ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης της γραμμή μεταφοράς. Είναι εμφανές ότι η μορφή της υπέρτασης διαφέρει από αυτή της περίπτωσης πλήγματος στον αγωγό φάσης που θα μελετηθεί παρακάτω. Επίσης φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της υπέρτασης αντιστοιχεί στο κεραυνικό ρεύμα με το μικρότερο μέτωπο.

Σημειώνεται ότι στο Γράφημα 5.2.1.2 δεν εμφανίζονται τιμές στις περιπτώσεις όπου δεν έγινε ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς.

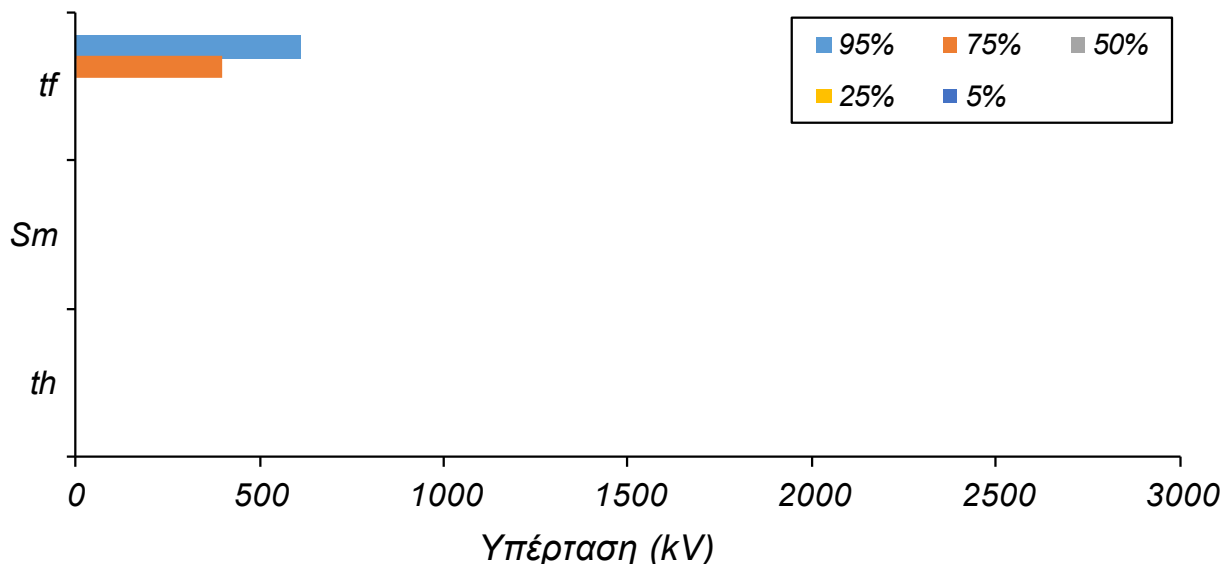
Πίνακας 5.2.1.1 Μετρημένες τιμές μήκους λήντερ στους μονωτήρες των φάσεων (A,B,C) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

	50% (Median)	tf, 95%	tf, 75%	tf, 50%	tf, 25%	tf, 5%	Sm, 95%	Sm, 75%	Sm, 50%	Sm, 25%	Sm, 5%	th, 95%	th, 75%	th, 50%	th, 25%	th, 5%
LA	0.3794	1.8	1.8	0.3794	0.2607	0.2182	0.4175	0.3560	0.3794	0.4806	0.6083	0.3809	0.3801	0.3794	0.3788	0.3782
LB	0.1757	1.003	0.5445	0.1757	0.1179	0.0974	0.1183	0.1025	0.1757	0.2497	0.3478	0.1776	0.1764	0.1757	0.1753	0.1749
LC	0.1162	0.7138	0.3361	0.1162	0.0778	0.06271	0.0521	0.0498	0.1162	0.1731	0.2597	0.1178	0.1167	0.1162	0.1159	0.1156



HVSS_2_132kV_GIS_BF_tf_75%.pl4: v:GISI4A HVSS_2_132kV_GIS_BF_tf_95%.pl4: v:GISI4A

Γράφημα 5.2.1.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων που προκάλεσαν διάσπαση, με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .

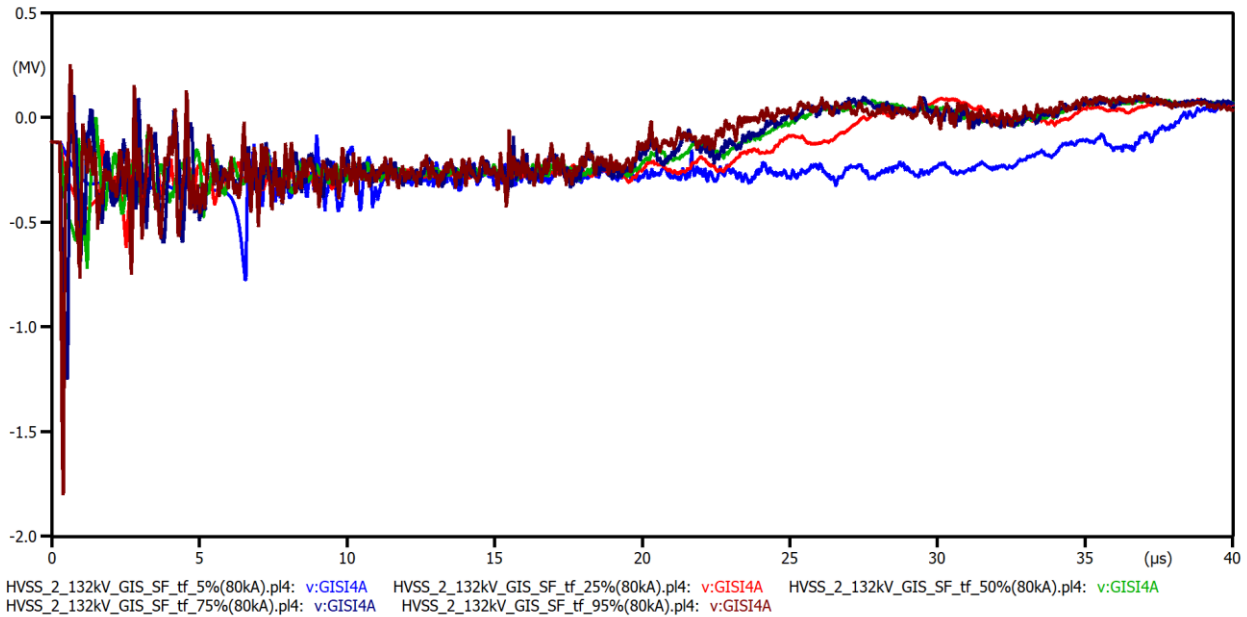


Γράφημα 5.2.1.2 Ραβδόγραμμα που απεικονίζει αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

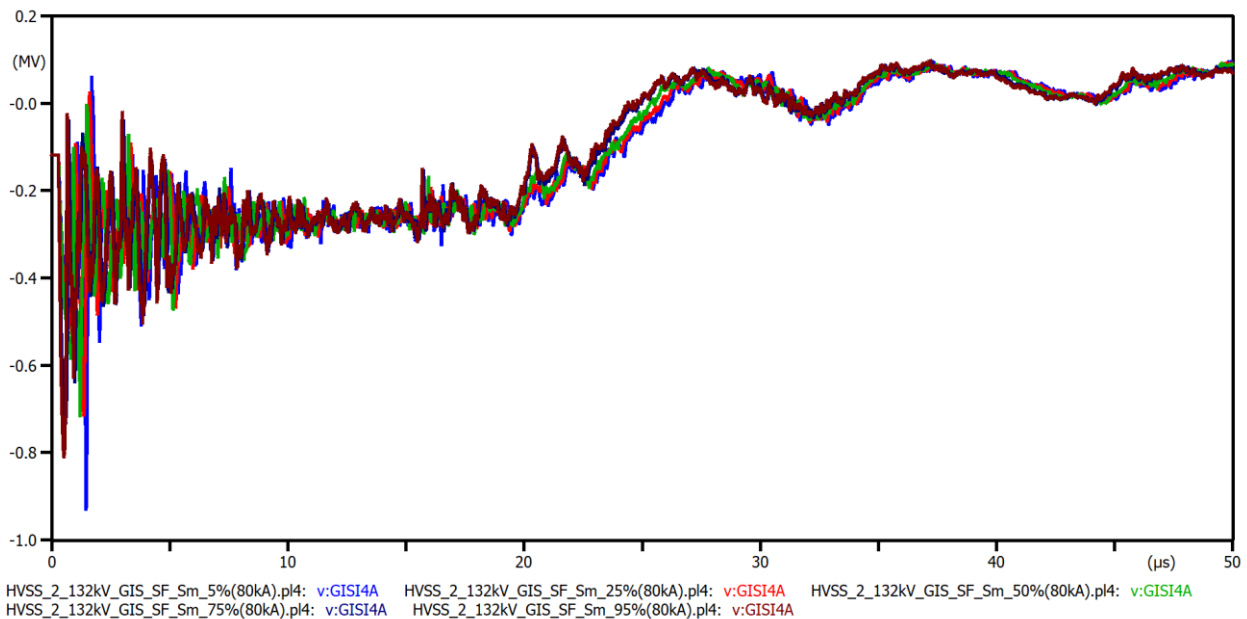
5.2.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

Στην Υποενότητα 5.2.2 παρουσιάζονται οι κυματομορφές και τα ραβδογράμματα των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων στον πρώτο κόμβο (GISI4A) του υποσταθμού GIS 132 kV. Από τις κυματομορφές παρατηρείται η επίδραση των παραμέτρων διάρκειας μετώπου (t_f), μέγιστης κλίσης (S_m) και διάρκειας ημίσεος εύρους (t_h).

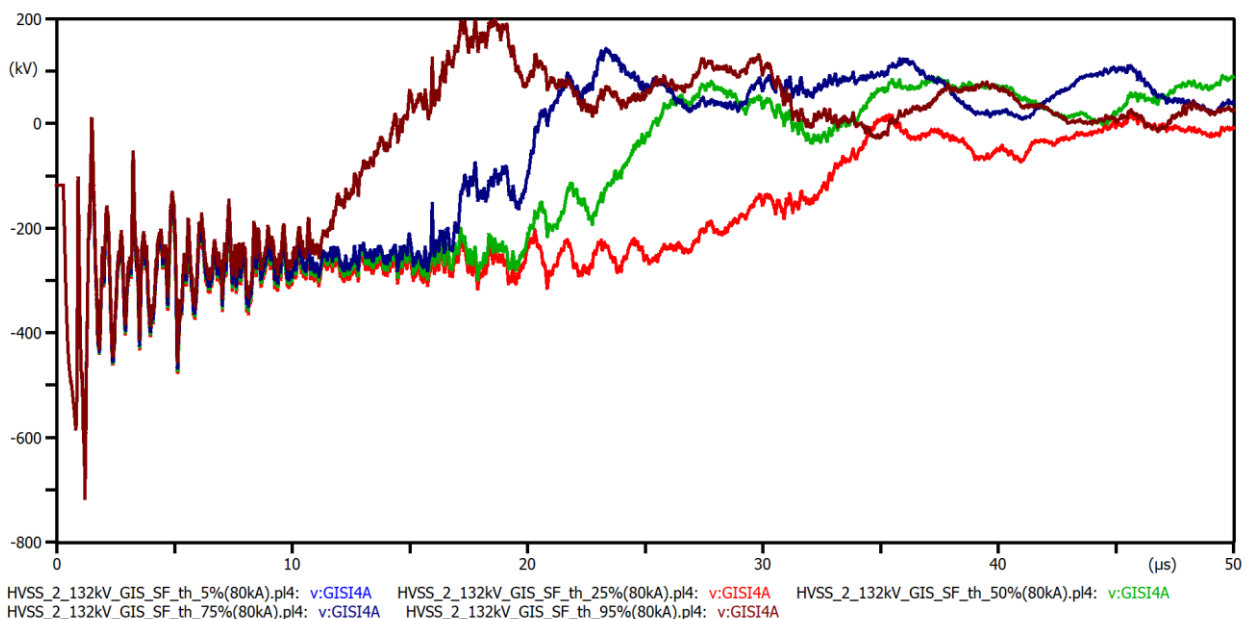
1. Σφάλμα θωράκισης με κεραυνικό ρεύμα 80 kA



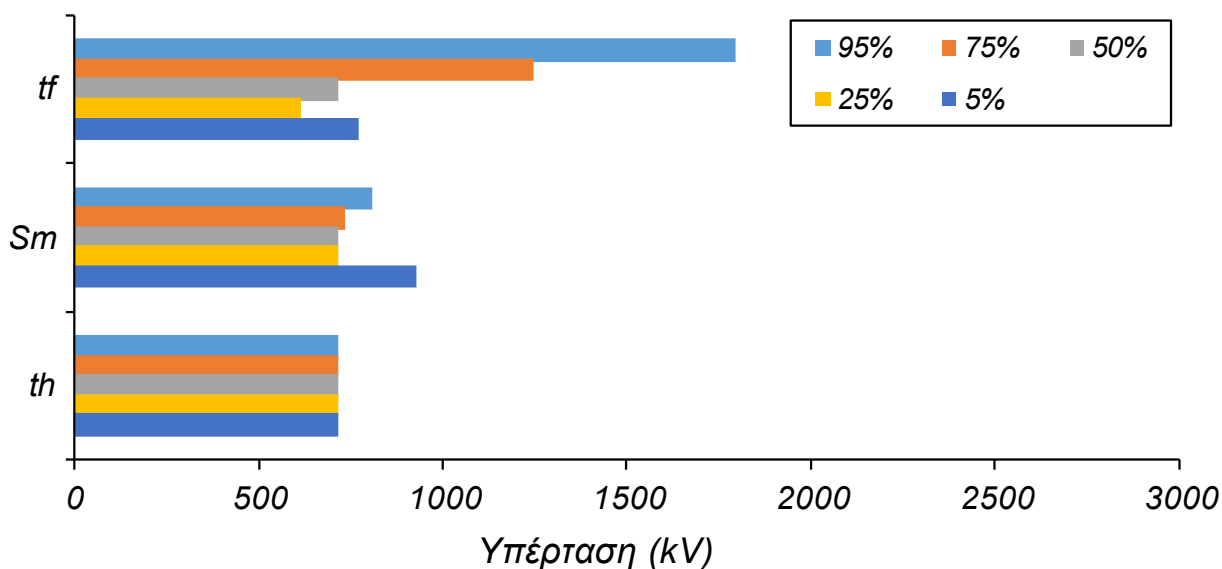
Γράφημα 5.2.2.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .



Γράφημα 5.2.2.2 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .

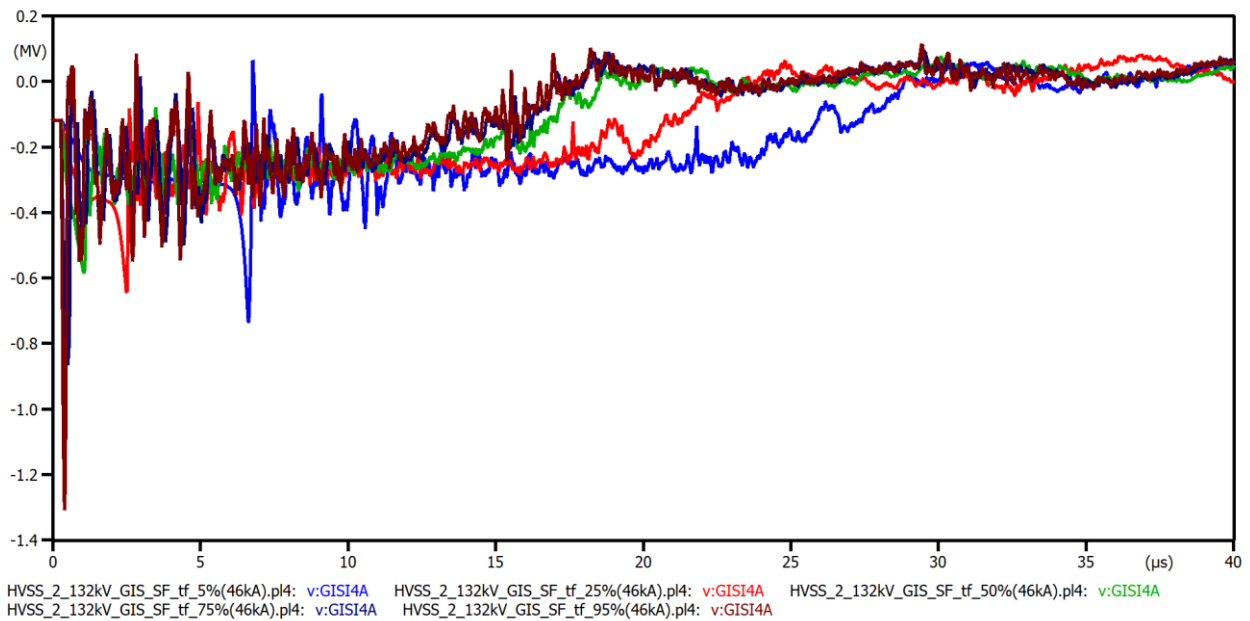


Γράφημα 5.2.2.3 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεως εύρους t_h .

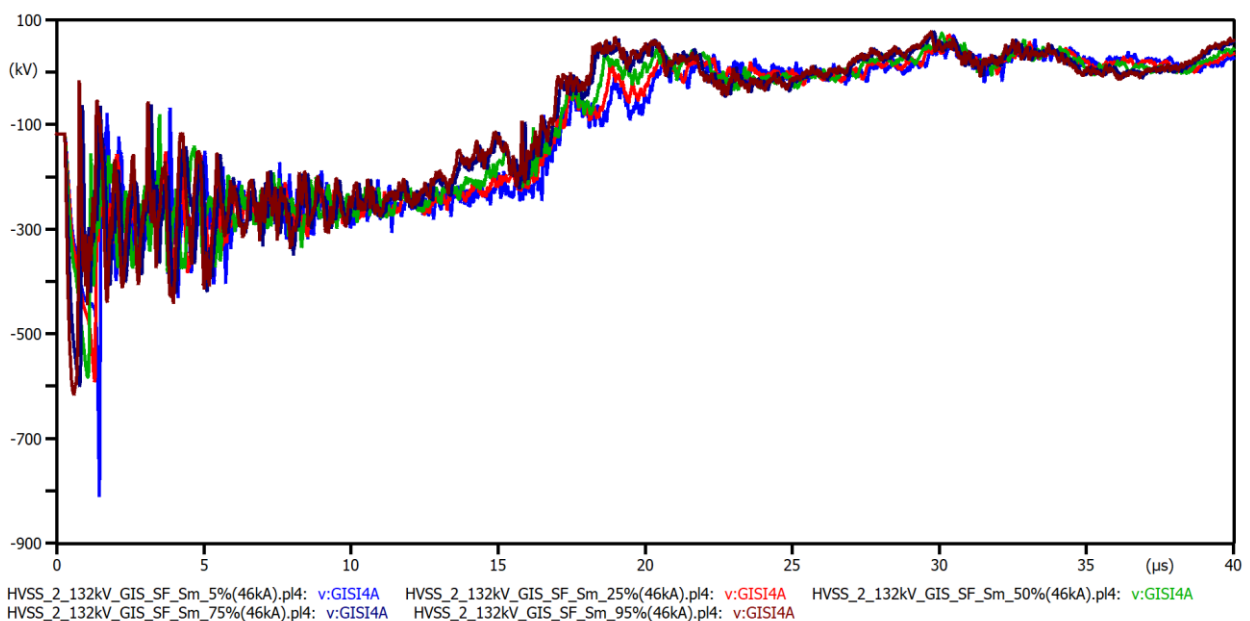


Γράφημα 5.2.2.4 Ραβδόγραμμα που απεικονίζει αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

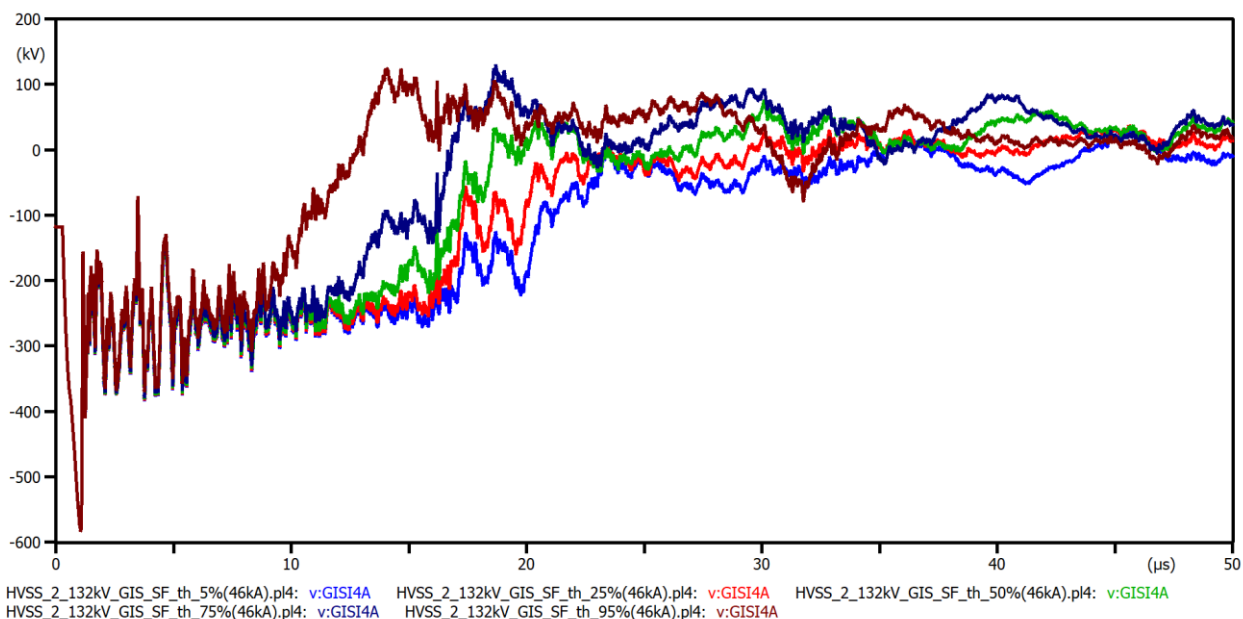
2. Σφάλμα θωράκισης με κεραυνικό ρεύμα 46 kA



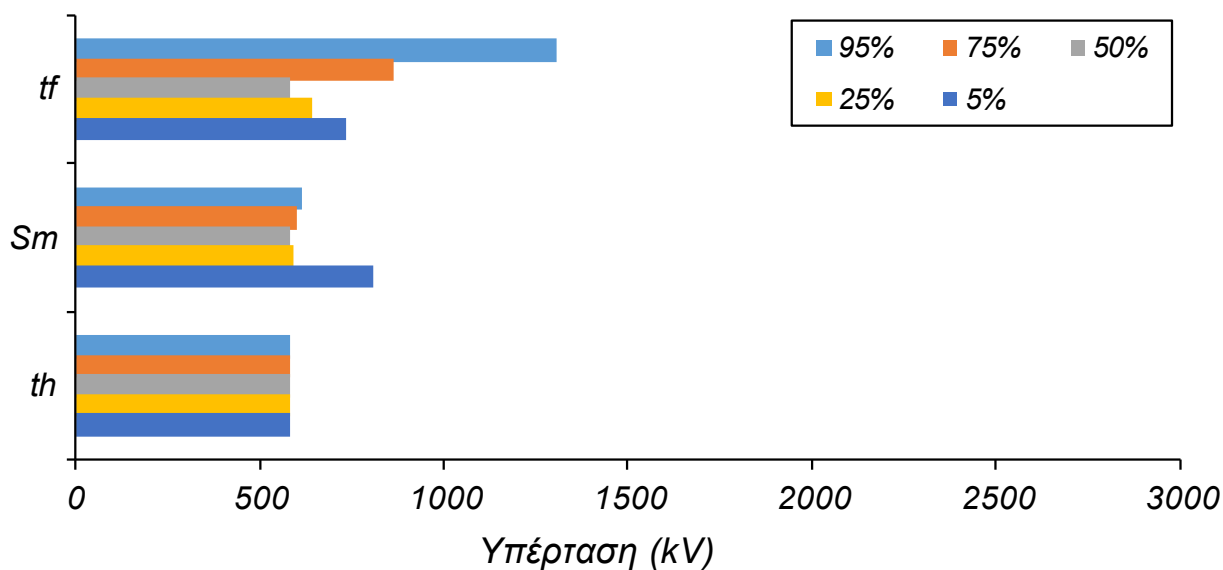
Γράφημα 5.2.2.5 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .



Γράφημα 5.2.2.6 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .



Γράφημα 5.2.2.7 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .



Γράφημα 5.2.2.8 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

Από τα παραπάνω γραφήματα πρώτη παρατήρηση είναι ότι διαφέρει η μορφή τους από αυτά του υποσταθμού 400 kV GIS διότι διαφέρει η τοπολογία τους και το επίπεδο τάσης. Επίσης φαίνεται ότι η μεγαλύτερες επιδράσεις στις κυματομορφές (γενικά, όχι μόνο στο μέγιστο) αντιστοιχούν στη διάρκεια ημίσεος εύρους και μετά

ακολουθεί το μέτωπο. Όσον αφορά τη μέγιστη τιμή της υπέρτασης που απεικονίζεται στα ραβδογράμματα φαίνεται και πάλι ότι για η διάρκειας ημίσεος εύρους (t_h) και στις δύο περιπτώσεις δεν επηρεάζει τις υπερτάσεις διατηρώντας σταθερή την τιμή τους για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Το ίδιο ισχύει και για τη μεταβολή της διάρκειας μετώπου (t_f). Ωστόσο, για τη μέγιστη κλίση (S_m) αρχικά οι υπερτάσεις μειώνονται με τη μείωση του ποσοστού και μετά αυξάνονται ξανά. Αυτό ερμηνεύεται και πάλι με τις στιγμιαίες τάσης διάσπασης της μόνωσης παρά την αύξηση της μέγιστης κλίσης με τη μείωση του ποσοστού.

5.3 Υποσταθμός AIS 400 kV

Ο υποσταθμός AIS 400 kV, είναι υπαίθρια εγκατάσταση με μονωτικό μέσο τον αέρα. Έγινε μοντελοποίηση της εγκατάστασης και αναπαράσταση κεραυνικών πληγμάτων ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τους προηγούμενους υποσταθμούς.

Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι κυματομορφές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για τις περιπτώσεις άμεσου πλήγματος στον πυλώνα γραμμών μεταφοράς και άμεσου πλήγματος σε αγωγό φάσης.

5.3.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις κατά την προσομοίωση ανάστροφης διάσπασης δεν οδήγησαν σε διάσπαση μόνωσης της εισερχόμενης εναέρια γραμμής μεταφοράς, επομένως ούτε σε υπερτάσεις στον υποσταθμό. Οι τιμές των λήντερ σε κάθε φάση μετρήθηκαν (μήκος μόνωσης: 3.2 m):

Πίνακας 5.3.1.1 Μετρημένες τιμές μήκους λήντερ στους μονωτήρες των φάσεων (A, B, C) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

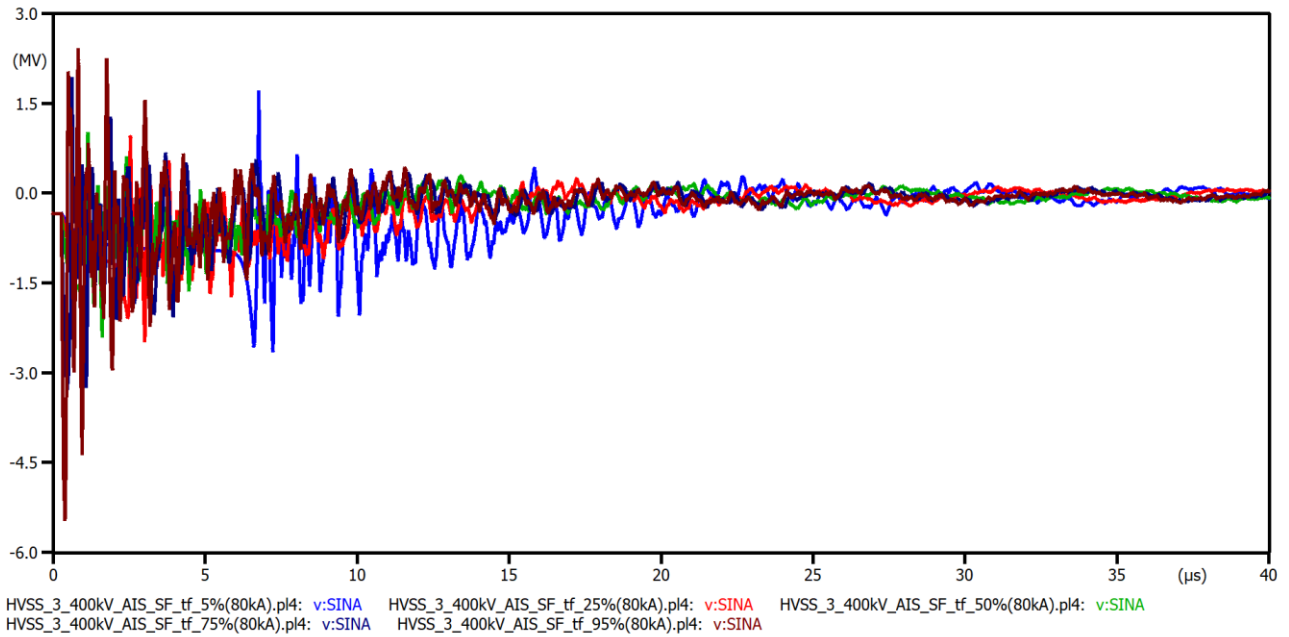
	50% (Median)	tf, 95%	tf, 75%	tf, 50%	tf, 25%	tf, 5%	Sm, 95%	Sm, 75%	Sm, 50%	Sm, 25%	Sm, 5%	th, 95%	th, 75%	th, 50%	th, 25%	th, 5%
LA	0.009599	0.27480	0.13117	0.009599	0	0	0.0005839	0.001435	0.009599	0.020325	0.039921	0.010205	0.0097863	0.009599	0.0094751	0.0093689
LB	0.01928	0.31204	0.13845	0.01928	0.0005419	0	0.004094	0.005739	0.01928	0.036219	0.066806	0.020053	0.019525	0.01928	0.019119	0.018976
LC	0.14717	0.71691	0.40409	0.14717	0.08137	0.04326	0.15843	0.15369	0.14717	0.16514	0.21117	0.14755	0.14745	0.14717	0.14690	0.14660

5.3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

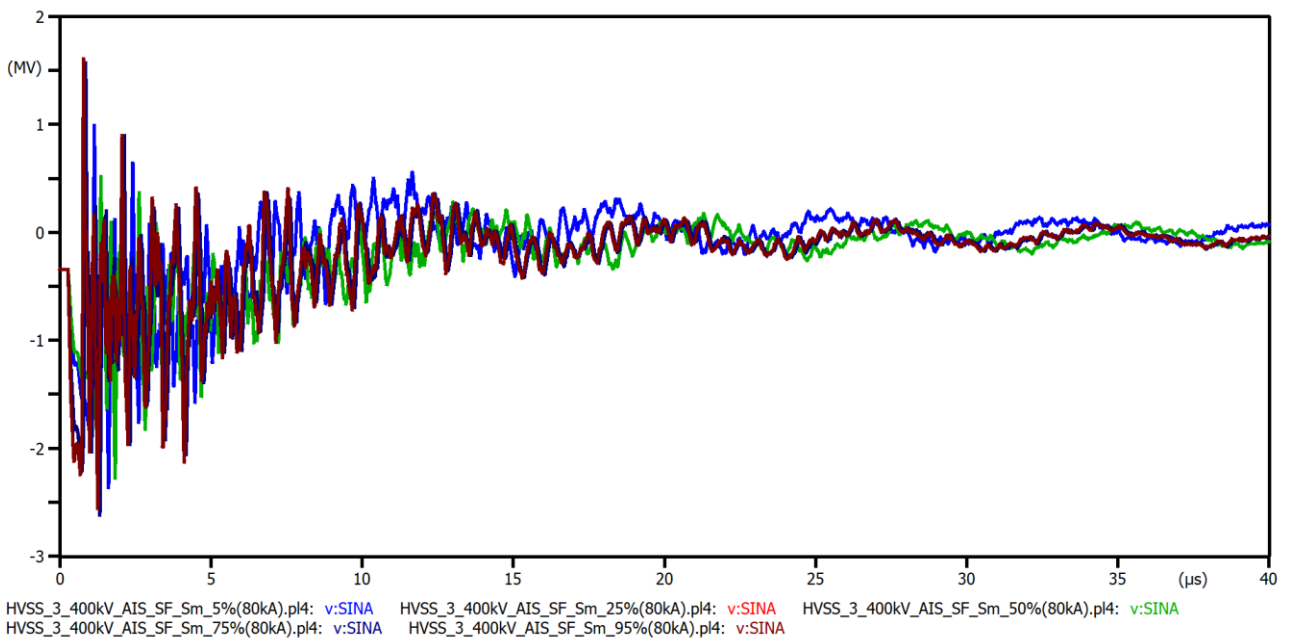
Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυματομορφές και τα ραβδογράμματα των υπερτάσεων στον πρώτο κόμβο (SINA) του υποσταθμού.

ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΛΟΓΩ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ

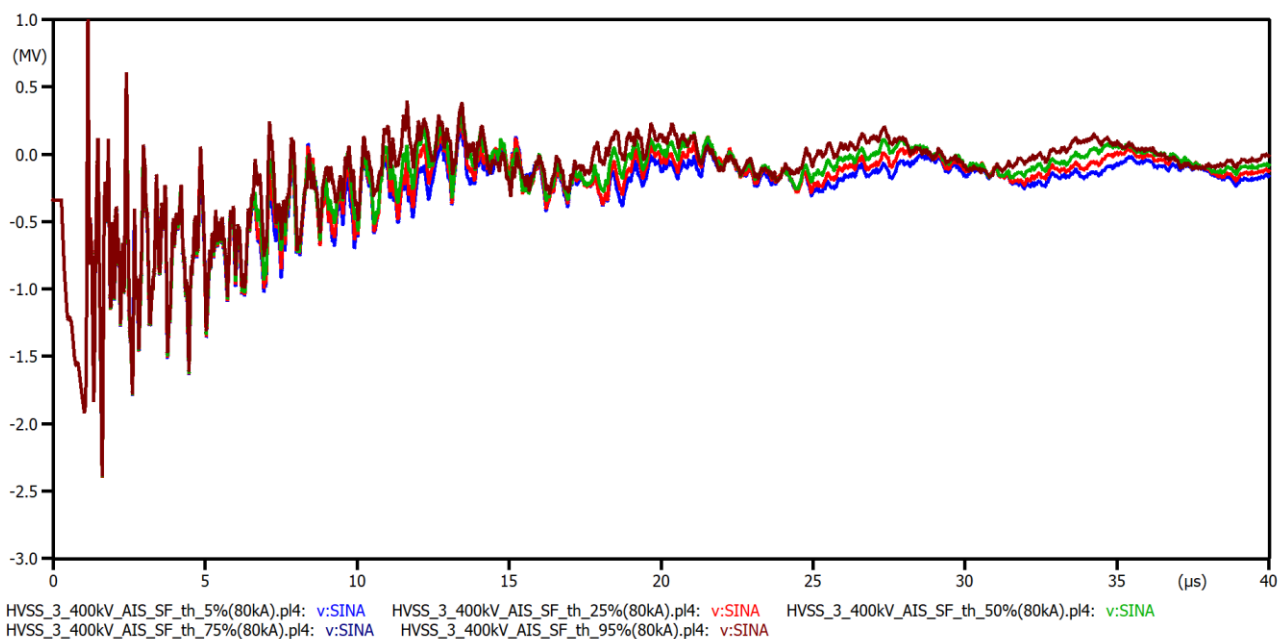
1. Σφάλμα θωράκισης μρ κεραυνικό ρεύμα 80 kA



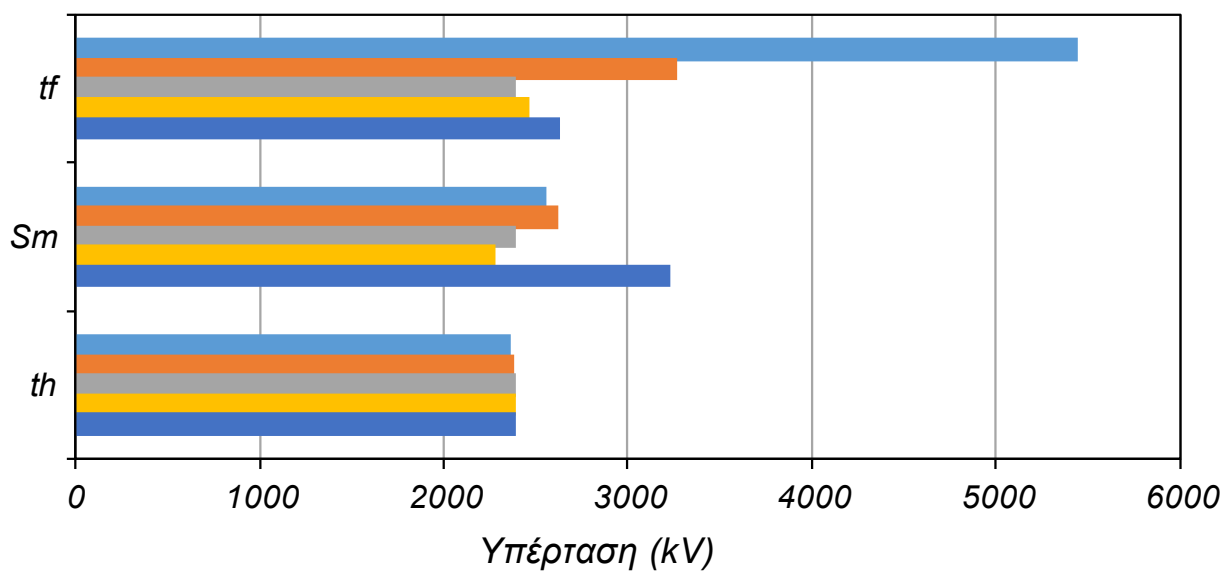
Γράφημα 5.3.2.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .



Γράφημα 5.3.2.2 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .

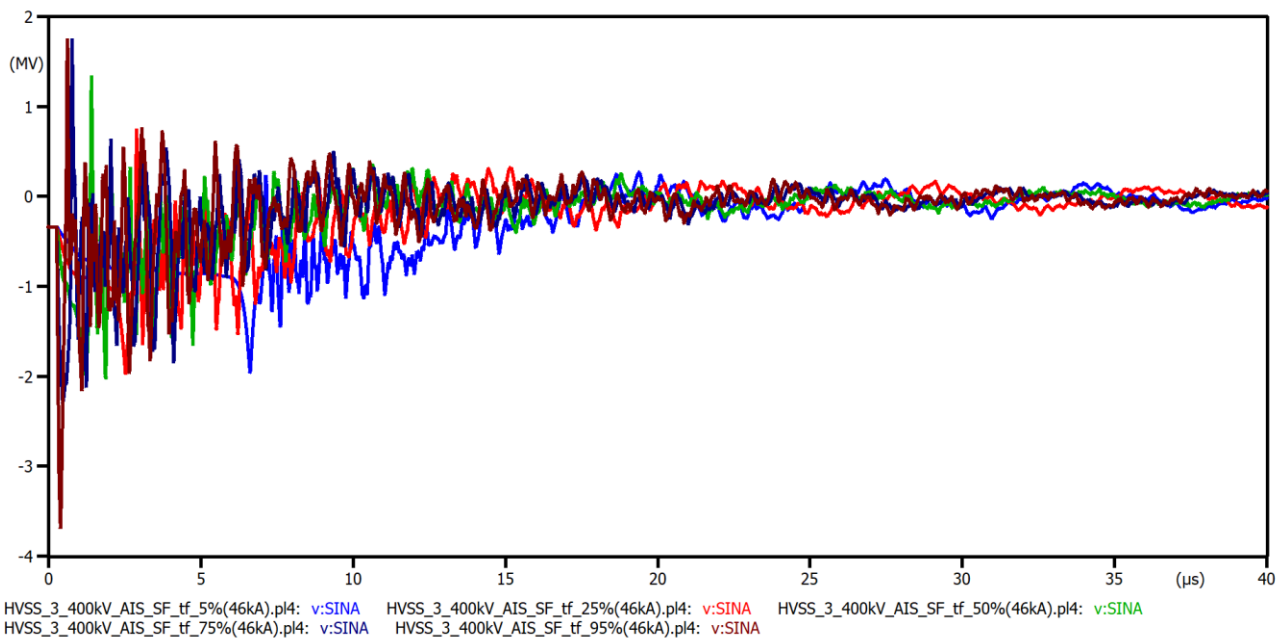


Γράφημα 5.3.2.3 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .

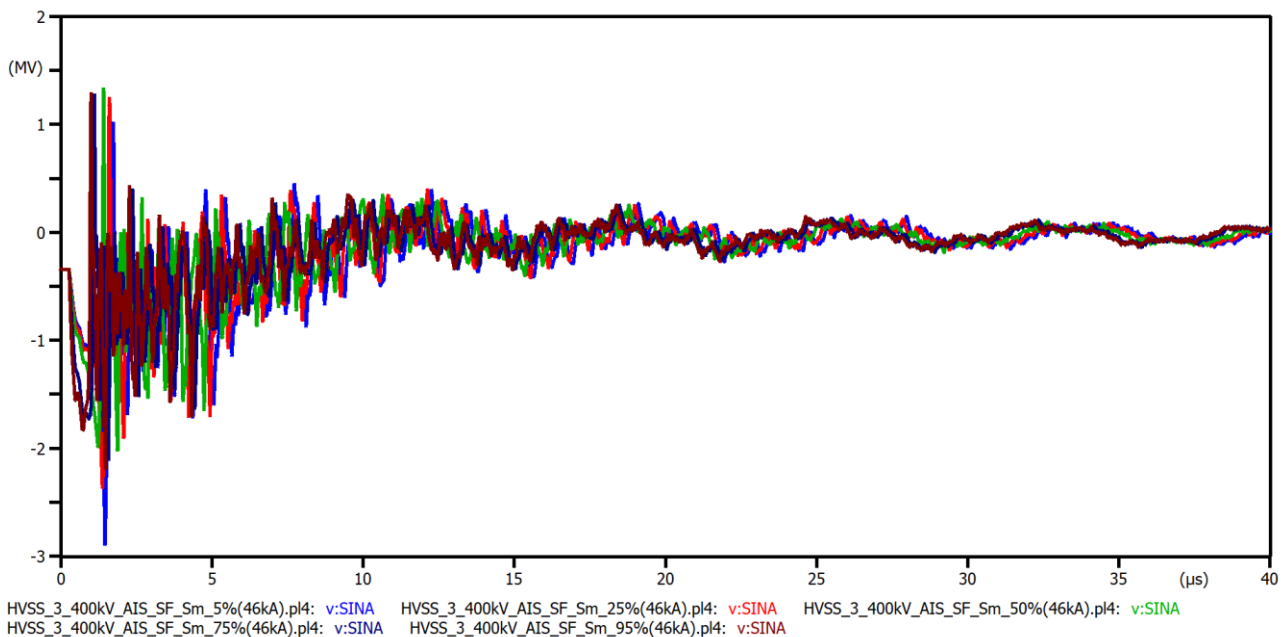


Γράφημα 5.3.2.4 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

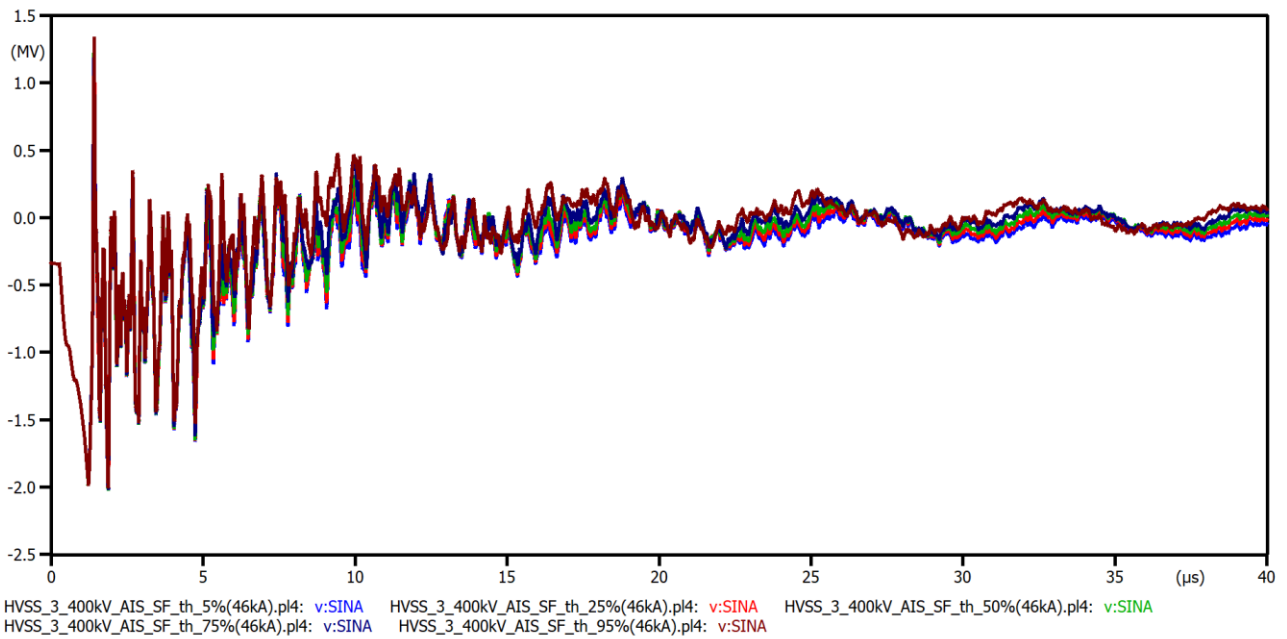
2. Σφάλμα θωράκισης με κεραυνικό ρεύμα 46 kA



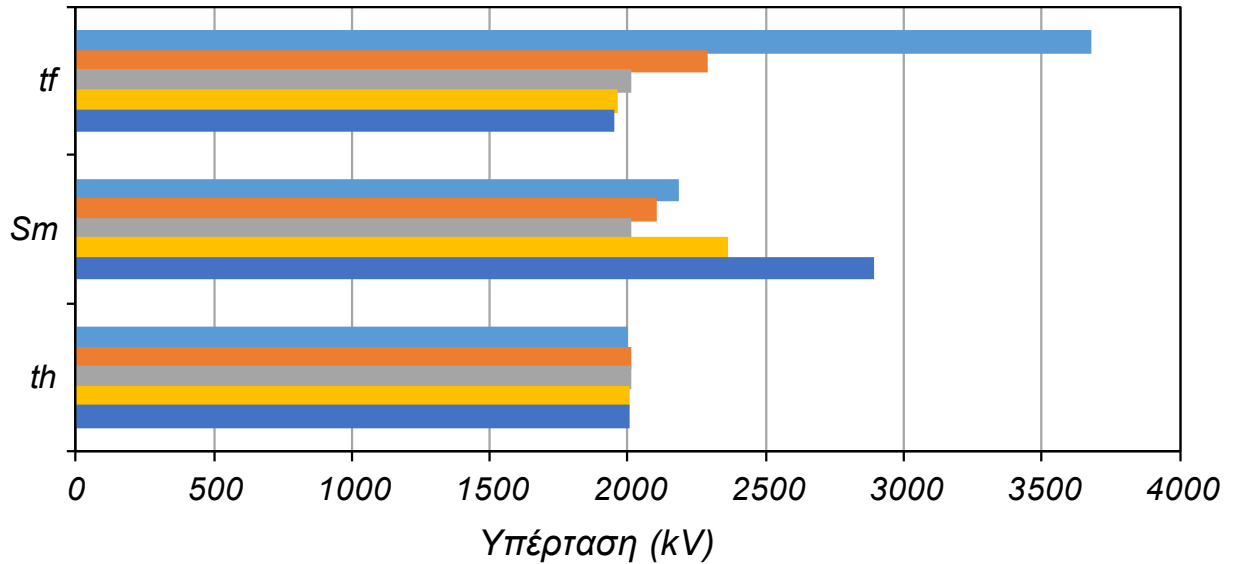
Γράφημα 5.3.2.5 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου τ_f .



Γράφημα 5.3.2.6 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .



Γράφημα 5.3.2.7 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεος εύρους t_h .



Γράφημα 5.3.2.8 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

Είναι σημαντικό ότι σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις σημειώθηκε διάσπαση της μόνωσης της γραμμής. Γι' αυτό και οι υπερτάσεις έχουν υψηλές ταλαντώσεις, οι οποίες όμως δεν καταπονούν έντονα τη μόνωση του εξοπλισμού. Σε σχέση με τον υποσταθμό 132 kV GIS της προηγούμενης υποενότητας παρατηρούμε ότι οι μορφές των υπερτάσεων είναι πιο κοντά η μία με την άλλη στην περίπτωση αυτή.

Στον υποσταθμό AIS 400 kV, για τη διάρκεια μετώπου (t_f) παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες υπερτάσεις για το 95% (μικρότερη τιμή) συγκριτικά με τις υπόλοιπες μετρήσεις της παραμέτρου. Επιπλέον, οι τιμές των υπερτάσεων έχουν μικρότερα πλάτη για μικρότερο κεραυνικό ρεύμα (46 kA). Οι μέγιστες υπερτάσεις σε συνάρτηση με την παράμετρο της μέγιστης κλίσης S_m εμφανίζονται στο 5% (μέγιστη τιμή κλίσης) της παραμέτρου, όπως φαίνεται στα ραβδογράμματα. Και πάλι τα αποτελέσματα ερμηνεύονται με τη στιγμιαία τάση διάσπασης. Τέλος, οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις δεν επηρεάζονται κατά τη μεταβολή της διάρκειας ημίσεως εύρους t_h .

5.4 Υποσταθμός AIS 161 kV

Ο υποσταθμός AIS 161 kV είναι επίσης υποσταθμός με μόνωση αέρα με διαφορά το χαμηλότερο επίπεδο τάσης λειτουργίας. Η διαδικασία της προσομοίωσης είναι ίδια καταγράφοντας τις μετρούμενες υπερτάσεις από κεραυνικά πλήγματα σε πυλώνα και αγωγό φάσης της εισερχόμενης εναέριας γραμμής μεταφοράς.

Στις υποενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κυματομορφές και τα ραβδογράμματα των υπερτάσεων.

5.4.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

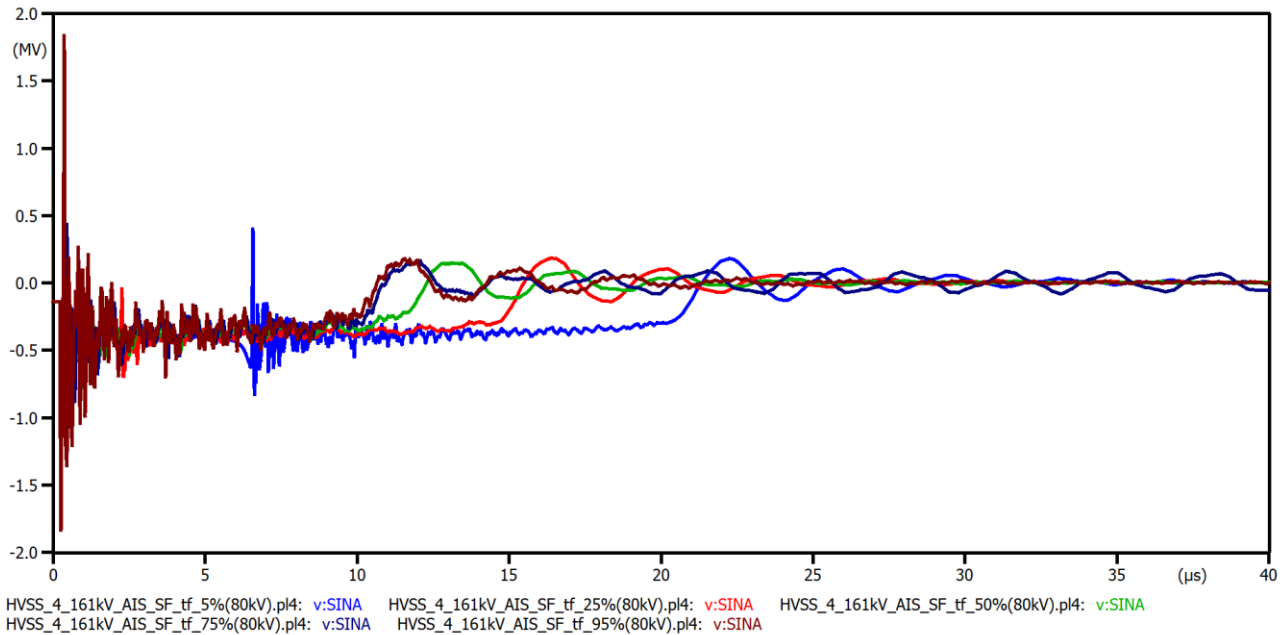
Οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις κατά την προσομοίωση πλήγματος κεραυνού στον πυλώνα δεν οδήγησαν σε διάσπαση μόνωσης, επομένως ούτε σε υπερτάσεις στον υποσταθμό. Ο Πίνακας 5.4.1.1 απεικονίζει τις τιμές του μήκους του λήντερ (μήκος μόνωσης: 1.8 m).

Πίνακας 5.4.1.1 Μετρημένες τιμές μήκους λήντερ στους μονωτήρες των φάσεων (A,B,C) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

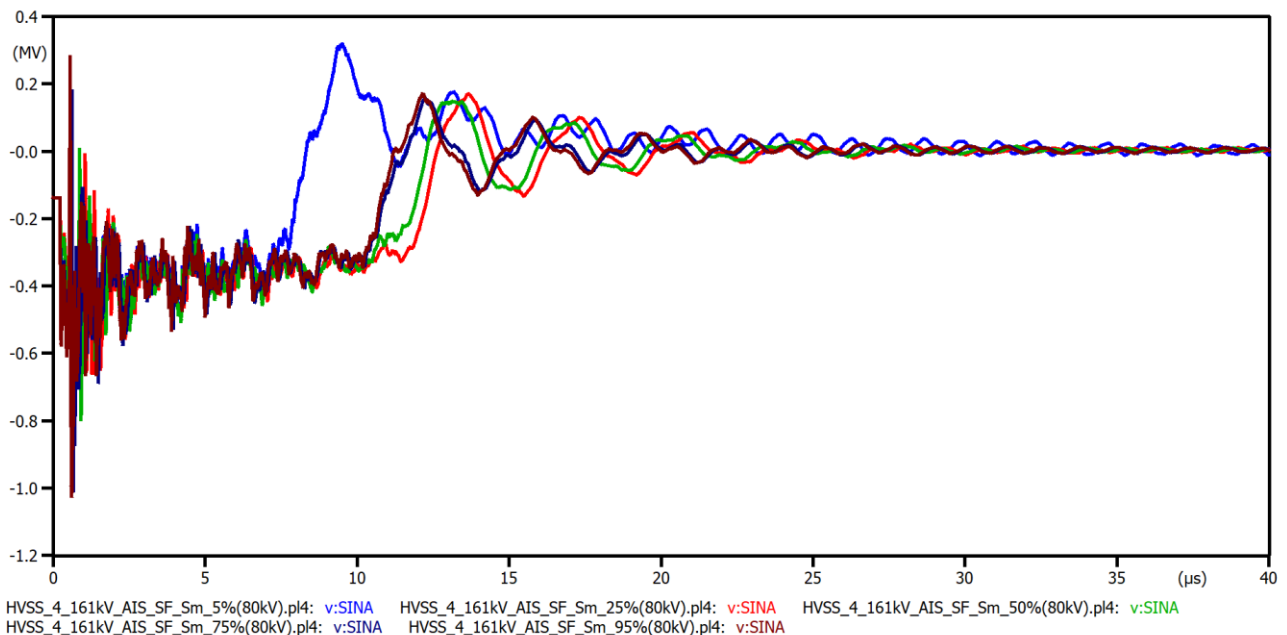
	50% (Median)	tf, 95%	tf, 75%	tf, 50%	tf, 25%	tf, 5%	Sm, 95%	Sm, 75%	Sm, 50%	Sm, 25%	Sm, 5%	th, 95%	th, 75%	th, 50%	th, 25%	th, 5%
LA	0.068163	0.61942	0.24772	0.068163	0.030552	0.025388	0.029671	0.034932	0.068163	0.11234	0.18261	0.069309	0.068514	0.068163	0.067925	0.067726
LB	0.049780	0.50154	0.19404	0.049780	0.020657	0.016930	0.014453	0.019844	0.049780	0.088767	0.15075	0.050720	0.050065	0.049780	0.049590	0.049431
LC	0.14583	1.177	0.42393	0.14583	0.077699	0.067594	0.13028	0.12430	0.14583	0.19128	0.27001	0.14718	0.14630	0.14583	0.14548	0.14516

5.4.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

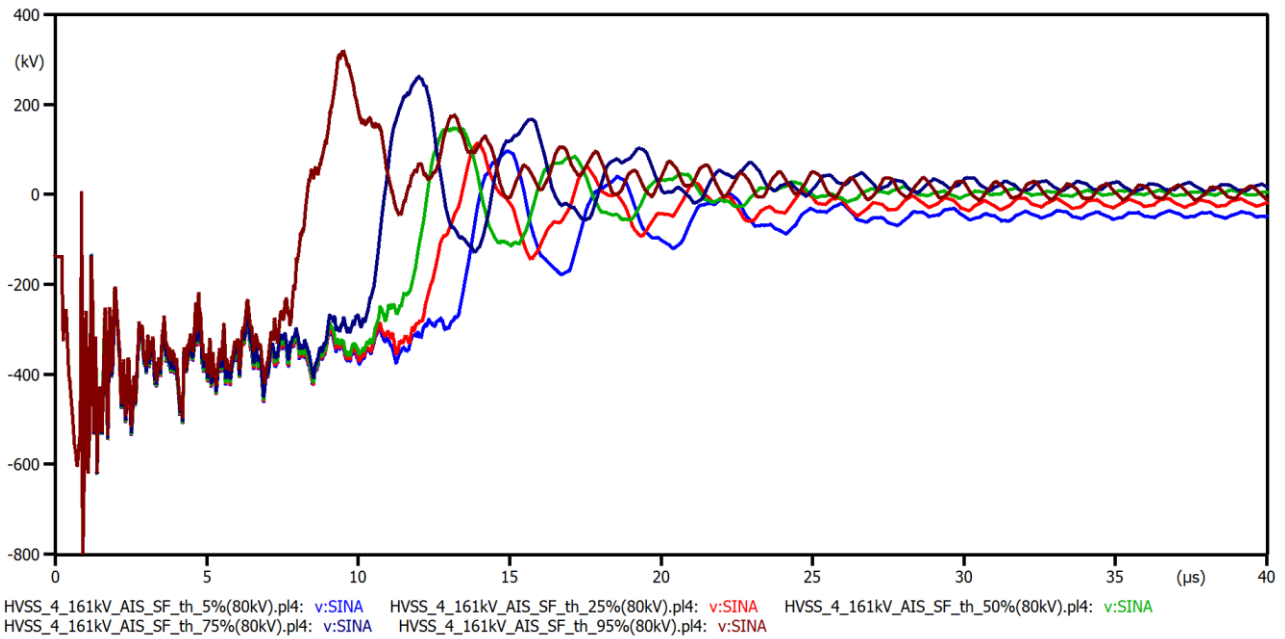
1. Σφάλμα θωράκισης με κεραυνικό ρεύμα 80 kA



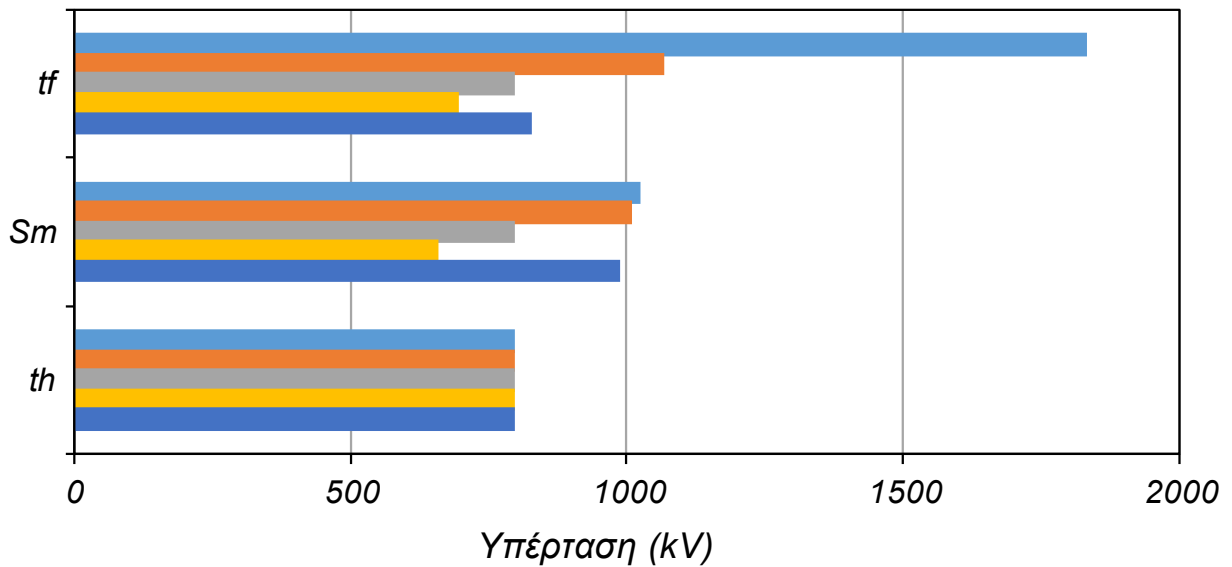
Γράφημα 5.4.2.1 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .



Γράφημα 5.4.2.2 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .

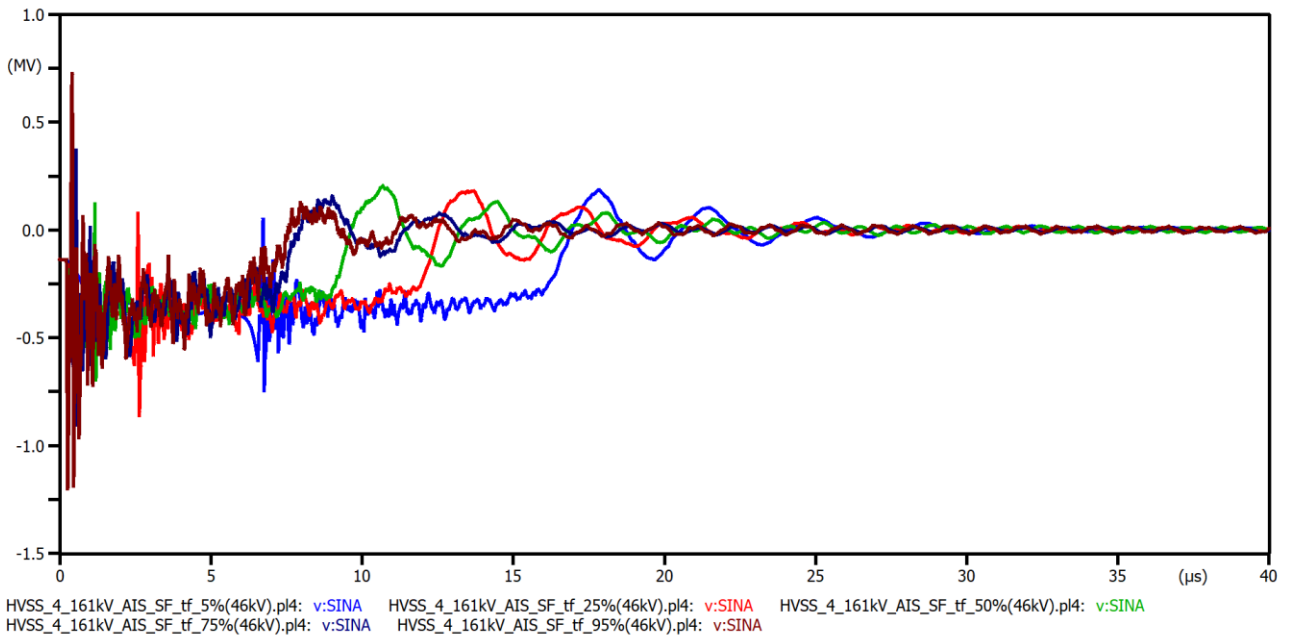


Γράφημα 5.4.2.3 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεως εύρους t_h .

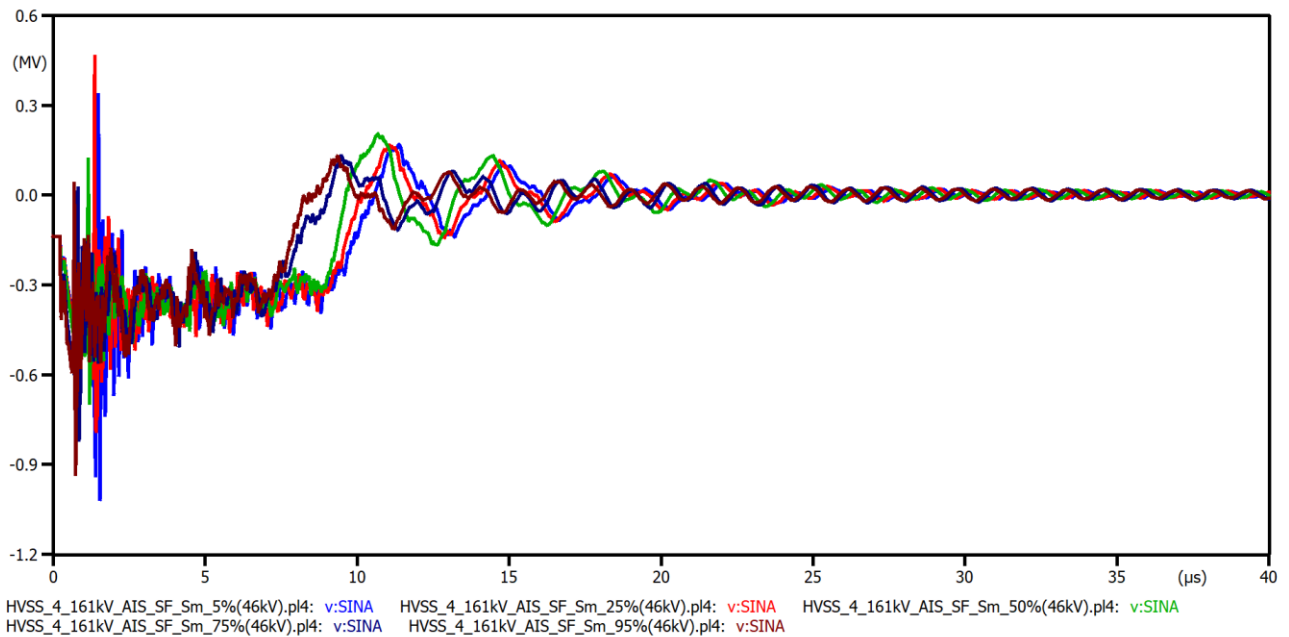


Γράφημα 5.4.2.4 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

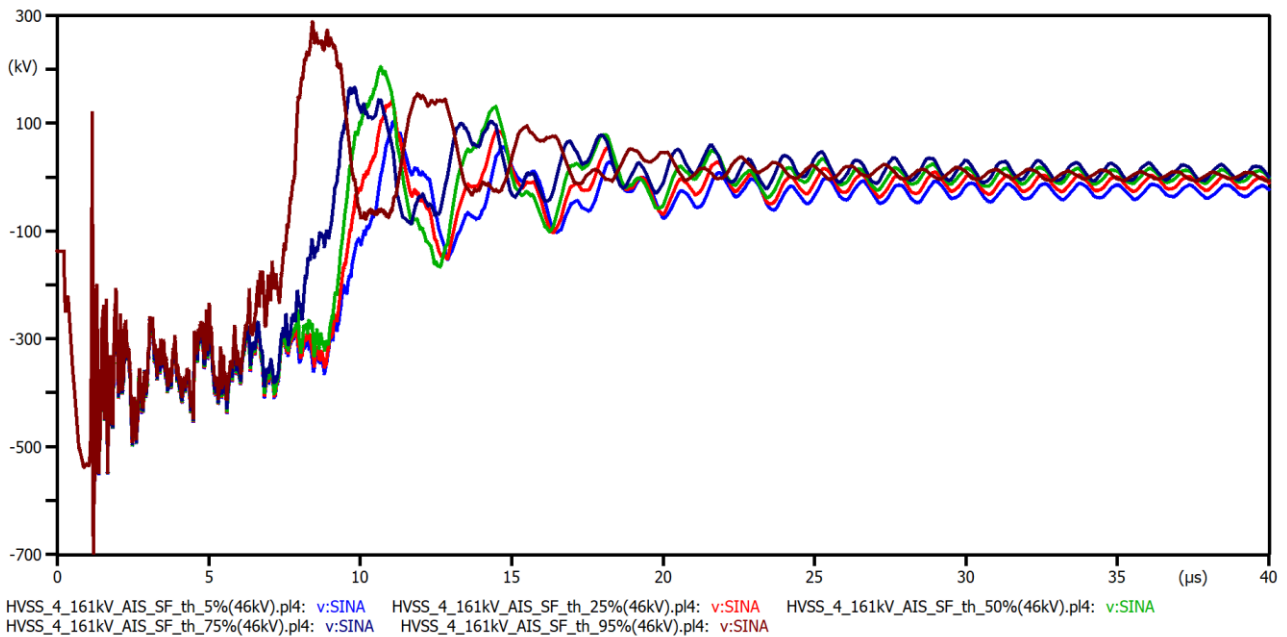
2. Σφάλμα θωράκισης με κεραυνικό ρεύμα 46 kA



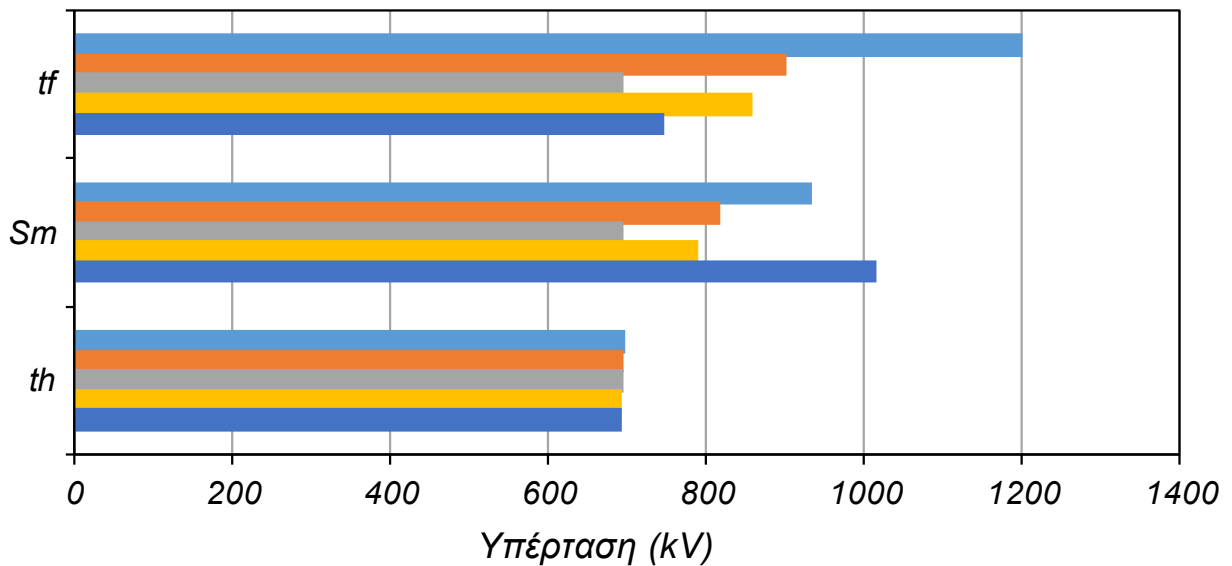
Γράφημα 5.4.2.5 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας μετώπου t_f .



Γράφημα 5.4.2.6 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της μέγιστης κλίσης S_m .



Γράφημα 5.4.2.7 Απεικόνιση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων με επίδραση της παραμέτρου της διάρκειας ημίσεως εύρους t_h .



Γράφημα 5.4.2.8 Ραβδόγραμμα αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε συνάρτηση με τις παραμέτρους (t_f , S_m , t_h).

Στον υποσταθμό AIS 161 kV, παρατηρήθηκε αντίστοιχη συμπεριφορά με τους προηγούμενους υποσταθμούς, η οποία ερμηνεύεται βάσει της μορφής των κυματομορφών του ρεύματος του επακόλουθου κεραυνικού πλήγματος και της στιγμιαίας τάσης διάσπασης της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς.

Οι υπερτάσεις του υποσταθμού 161 kV λαμβάνουν χαμηλότερες τιμές από το επίπεδο τάσης των 400 kV. Αυτό έχει να κάνει με το χαμηλότερο επίπεδο προστασίας των εκτροπέων υπέρτασης στο χαμηλότερο επίπεδο τάσης ώστε να μπορεί να προστατεύει τον εξοπλισμό του υποσταθμού.

Η μέγιστη τιμή υπέρτασης που εμφανίζεται σε συνάρτηση με τη διάρκεια μετώπου (t_f) είναι η τιμή με το 95% της παραμέτρου. Αντίστοιχα οι τιμές των υπερτάσεων έχουν μικρότερα πλάτη για μικρότερο ρεύμα (46 kA) αλλά φαίνεται να μην επηρεάζεται ιδιαίτερα από το πλάτος του κεραυνικού ρεύματος, καθώς η βασική επίδραση προκαλείται από τη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής. Οι μέγιστες υπερτάσεις σε συνάρτηση με την παράμετρο της μέγιστης κλίσης (S_m) εμφανίζονται στο 5% της παραμέτρου, όπως φαίνεται στα ραβδογράμματα. Οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις όπως και στους προηγούμενους υποσταθμούς δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της διάρκειας ημίσεος εύρους (t_h).

Αντίστοιχη ποιοτική συμπεριφορά με τις παραπάνω παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές και οι άλλοι κόμβοι των υποσταθμών που μελετήθηκαν. Οι κυματομορφές όμως ενδέχεται να διαφέρουν αρκετά σε μορφή ανάλογα με την θέση του κάθε κόμβου σε σχέση με το σημείο του κεραυνικού πλήγματος και τα στοιχεία που συνδέονται σε αυτούς τους κόμβους.

5.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα υποενότητα συζητούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των τεσσάρων υποσταθμών. Επιπλέον γίνεται σύγκριση και ανάλυση των καταγεγραμμένων υπερτάσεων συναρτήσει των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος. Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων γίνονται βάσει του τύπου των υποσταθμών (GIS, AIS) και του επιπέδου τάσης (400 kV, 161 kV και 132 kV).

Η πρώτη παρατήρηση σχετίζεται με τη σύγκριση των δύο τύπων υποσταθμών. Οι μέγιστες αναπτυσσόμενες υπερτάσεις στον AIS 400 kV έλαβαν έως και διπλάσια τιμή από αυτές των GIS 400 kV στην περίπτωση που το κεραυνικό ρεύμα είναι 80 kA. Αντίστοιχα μεγαλύτερες υπερτάσεις παρατηρήθηκαν και στην περίπτωση του ρεύματος 46 kA. Για τα δύο χαμηλότερα επίπεδα τάσης ισχύει αντίστοιχο συμπέρασμα αλλά όχι με τόσο μεγάλες διαφορές.

Συμπεραίνεται ότι ο τύπος των υποσταθμών (AIS ή GIS) ενδέχεται να επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, όπως στο επίπεδο των 400 kV, καθώς εκεί αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες υπερτάσεις σε σύγκριση με τους GIS 400 kV. Οι διαφορές αυτές μειώνονται για τους άλλου δύο υποσταθμούς (161 kV, 132 kV).

Το άλλο χαρακτηριστικό σύγκρισης είναι το επίπεδο τάσης λειτουργίας. Όπως αναμενόταν επηρεάζει τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις, αφού οι μέγιστες υπερτάσεις που παρατηρήθηκαν είναι υψηλότερες στους υποσταθμούς ίδιου τύπου για το μεγαλύτερο επίπεδο τάσης (και τους GIS και τους AIS). Αυτό οφείλεται στο επίπεδο προστασίας των εκτροπέων υπέρτασης που είναι μικρότερο σε μικρότερα επίπεδα τάσης για να προστατευτεί ο εξοπλισμός.

Είναι απαραίτητο να γίνει επίσης σύγκριση των αποτελεσμάτων με το βασικό επίπεδο μόνωσης (Basic Insulation Level - BIL) του εξοπλισμού. Η διαδικασία αυτή αποτελεί έλεγχο, για το αν ο εξοπλισμός είναι σε θέση να αντέξει την υπέρταση που τον καταπονεί ή όχι και καταστρέφεται. Βέβαια να σημειωθεί ότι το BIL αναφέρεται σε κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις που εφαρμόζονται σε εργαστήρια υψηλών τάσεων και έχουν κυματομορφή 1.2/50 μs. Σε υψίσυχνες κυματομορφές, όπως αυτού του κεφαλαίου, η αντοχή αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από το BIL.

Από τον πίνακα 5.5.1 είναι φανερό ότι οι μέγιστες τιμές των υπερτάσεων ξεπερνούν το βασικό επίπεδο μόνωσης και οδηγούν σε καταστροφή του εξοπλισμού. Οι μέσες τιμές των εμφανιζόμενων υπερτάσεων δείχνουν ότι οι σε πολλές περιπτώσεις οι υπερτάσεις βρίσκονται εντός ορίων του BIL του υποσταθμού. Αυτό σημαίνει ότι η προστασία και η μόνωση των υποσταθμών που προσομοιώθηκαν είναι ικανοποιητική για τις περισσότερες περιπτώσεις, ειδικότερα για τις προσομοιώσεις ρεαλιστικής περίπτωσης (46 kA) και για ακόμα μακρότερα ρεύματα. Η εκτίμηση της σημασίας ακραίων περιπτώσεων απαιτεί στατιστική ανάλυση.

Πίνακας 5.5.1 Μέγιστες υπερτάσεις στους υποσταθμούς υψηλής τάσης σε σύγκριση με το βασικό επίπεδο μόνωσής τους. Περίπτωση σφάλματος θωράκισης.

Υποσταθμός	BIL (kV)	Μέγιστη υπέρταση στα 80 kA (kV)	Μέγιστη υπέρταση στα 46 kA (kV)	Μέση τιμή υπερτάσεων 80 kA (kV)	Μέση τιμή υπερτάσεων 46 kA (kV)
GIS 400 kV	1425 ΜΣ: 1550	2613	1927	1409	1433
GIS 132 kV	650	1796	1305	716	582,1
AIS 400 kV	1425	5446	3678	2388	2014
AIS 161 kV	750	1834	1201	796,8	694,9

ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΛΟΓΩ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΛΟΓΩ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ
ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλει στην κατανόηση της επίδρασης των παραμέτρων της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Χρησιμοποιώντας τον γραφικό προεπεξεργαστή ATP-Draw του λογισμικού ATP-EMTP, έγινε μοντελοποίηση των υποσταθμών GIS 400 kV, GIS 132 kV, AIS 400 kV και AIS 161 kV. Ακολούθησε η διαδικασία προσομοιώσεων άμεσων κεραυνικών πλήγμάτων σε πυλώνα γραμμών μεταφοράς και αγωγό φάσης των εισερχόμενων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε υποσταθμό. Σκοπός η καταγραφή των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε σημαντικούς κόμβους. Οι προσομοιώσεις άμεσου κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα έδειξαν ότι το 97% των περιπτώσεων δεν οδηγεί σε διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς (ανάστροφη διάσπαση). Επομένως τα συμπεράσματα προκύπτουν για τις μετρούμενες υπερτάσεις που καταγράφηκαν από άμεσα πλήγματα στον αγωγό φάσης και προκάλεσαν διάσπαση μόνωσης σδιάσπαση λόγω σφάλματος θωράκισης).

Η διαδικασία επαναλήφθηκε μεταβάλλοντας τις τιμές των τριών παραμέτρων (t_f , S_m , t_h) της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος που προτάθηκε από τη CIGRE. Η μεταβολή έγινε για τιμές που ξεπερνιούνται για το 95% των περιπτώσεων έως και το 5%. Σε κάθε προσομοίωση καταγράφηκαν οι κυματομορφές των υπερτάσεων σε διάφορους κόμβους των υποσταθμών, από όπου αντλήθηκαν απαραίτητες πληροφορίες για την έρευνα και έκανε εμφανή την επιρροή της κάθε παραμέτρου. Τα συμπεράσματα της μελέτης σχετίζονται άμεσα με την κυματομορφή, καθώς έγινε παρατήρηση κυρίως της κυματομορφής και των μέγιστων υπερτάσεων, οι οποίες στη συνέχεια συγκρίθηκαν με το βασικό επίπεδο μόνωσης (BIL) του εξοπλισμού του υποσταθμού.

Έπειτα από τη συλλογή των δεδομένων των προσομοιώσεων, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των υποσταθμών. Οι μεγαλύτερες υπερτάσεις εμφανίστηκαν στον υποσταθμό AIS 400 kV. Αυτό σημαίνει ότι ο συνδυασμός υποσταθμού υψηλότερης τάσης (400 kV) και του συγκεκριμένου τύπου (AIS), φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις. Αυτό ενισχύεται διότι δεν παρατηρήθηκαν αντίστοιχα υψηλές υπερτάσεις ούτε στις προσομοιώσεις στον υποσταθμό 400 kV GIS, ούτε στον υποσταθμό AIS 161 kV μεμονωμένα. Στους υποσταθμούς χαμηλότερης τάσης λειτουργίας (GIS 132 kV και AIS 161 kV), ο διαφορετικός τύπος κατασκευής (GIS, AIS) φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά αφού οι μέγιστες υπερτάσεις που καταγράφηκαν είχαν σχετικά μικρή απόκλιση από 0 έως 14% μεταξύ των δύο υποσταθμών.

Για τις παραμέτρους των κεραυνικών κυματομορφών των επακόλουθων πλήγμάτων, οι μεγαλύτερες υπερτάσεις σε κάθε υποσταθμό εμφανίστηκαν για το 95% της τιμής της διάρκειας μετώπου (t_f). Αυτό

αντιστοιχεί στο πιο γρήγορο μέτωπο (μικρή τιμή). Αντίθετα η μεταβολή της διάρκειας ημίσεος εύρους (t_h) έχει τη μικρότερη επίδραση στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις, καθώς τα μέτωπα των κυματομορφών ρεύματος ταυτίζονται όταν αλλάζει το t_h . Σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι δεν υπήρχε σαφής και γενικευμένη αύξηση των υπερτάσεων με την αύξηση της μέγιστης κλίσης του κεραυνικού ρεύματος και τη μείωση του χρόνου μετώπου. Βρέθηκε ότι αυτό έχει να κάνει με τη στιγμιαία τάση διάσπασης της μόνωσης της εναέριας γραμμής μεταφοράς που πλήττει ο κεραυνός. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση αυτή τόσο πιο μεγάλες θα είναι και οι υπερτάσεις.

Οι μετρήσεις όπου αναπαραστάθηκε η χειρότερη περίπτωση (80 kA) κεραυνικού πλήγματος, εμφάνισε σε όλους τους υποσταθμούς υψηλότερες υπερτάσεις από την ρεαλιστική περίπτωση (46 kA), αλλά σε κάποιες προσομοιώσεις οι τιμές ήταν σχετικά κοντά. Τέλος βρέθηκε ότι σε πολλές περιπτώσεις κυματομορφών οι κεραυνικές υπερτάσεις ξεπερνάνε το BIL και ο εξοπλισμός ενδέχεται να καταστραφεί. Έτσι συνιστάται να λαμβάνονται τα επακόλουθα πλήγματα υπόψη στον συντονισμό μονώσεων των υποσταθμών στις προσομοιώσεις σφάλματος θωράκισης, διότι, έχοντας δυνητικά ρεύμα μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης των πρώτων πληγμάτων, τα επακόλουθα πλήγματα ενδέχεται να οδηγούν σε αποτελέσματα στην ασφαλή πλευρά.

Βιβλιογραφία

- [1] The Electricity Forum, *High Voltage Explained*, Σύνδεσμος, Τελευταία πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2023.
- [2] International Council on Large Electric Systems (CIGRE), *Substations*, 2019. Ενότητες 12.2–12.5.
- [3] Ζ. Δάτσιος, *Υψηλές Τάσεις Ι, 4^η Διάλεξη Θεωρίας Μεταβατικά Φαινόμενα, Υπερτάσεις και Συντονισμός Μονώσεων Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (γ)*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη (2022).
- [4] Electrical Engineering Materials, *Combined Current and Voltage Transformer*, Σύνδεσμος, Τελευταία πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2023.
- [5] Ζ. Δάτσιος, *Υψηλές Τάσεις ΙΙ, 3^η Διάλεξη Θεωρίας, Εφαρμογές των Υψηλών Τάσεων*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη (2021).
- [6] Siemens Energy, *High Voltage Station Arresters*, Σύνδεσμος, Τελευταία πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2023.
- [7] Ζ. Δάτσιος, *ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας (2017).
- [8] Ζ. Δάτσιος, *Υψηλές Τάσεις Ι, 2^η Διάλεξη Θεωρίας Μεταβατικά Φαινόμενα, Υπερτάσεις και Συντονισμός Μονώσεων Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (α)*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη (2022).
- [9] M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*, 2008. Κεφάλαιο 13.2.
- [10] Alexander Piantini, *Lightning Interaction with Power Systems*, Volume 2: Applications, London, 2020, Κεφάλαιο 2.
- [11] Oxford University Press, 1876, *Oxford Dictionary of English*, 2010.
- [12] K. Berger, *Novel Observations on Lightning Discharges: Results of Research on Mount San Salvatore*, 1967.
- [13] Z.G. Datsios, D.G. Patsalis, P.N. Mikropoulos, and T.E. Tsovilis, *Effects of Lightning Current Waveform on the Fast-Front Overvoltages and Critical Currents Causing Insulation Flashover to*

a 150 kV Overhead Transmission Line, in Proc. ICLP, Cape Town, South Africa, 2022.

[14] CIGRE Technical Brochure 63, *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, 2021, Κεφάλαιο 3.1.

[15] Ζ. Δάτσιος, *Υψηλές Τάσεις ΙΙ, 4^η και 5^η Διάλεξη Θεωρίας Κεραυνός, Αντικεραυνική Προστασία, Προστασία Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη (2022).

[16] Canadian-American EMTP Users Group, *ATP Rule Book*, 1997.

[17] H. W. Dommel, *Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*, Bonneville Power Administration (B.P.A.), 1986.