



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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υπερτάσεις λόγω κεραυνών σε υποσταθμούς υψηλής
τάσης: Εκτίμηση της επίδρασης της κυματομορφής του
κεραυνικού ρεύματος

Νικόλαος Δ. Κόλιας

A.M.: 8250

Επιβλέπων: Ζαχαρίας Γ. Δάσιος, Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

(Υπογραφή)

.....

ΚΟΛΙΑΣ Δ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

© 2023 – All rights reserved

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κύριος σκοπός αυτής της πτυχιακής είναι να εκτιμηθούν υπερτάσεις που εισέρχονται σε υποσταθμούς AIS και GIS ως οδεύοντα κύματα σε περίπτωση που ένα κεραυνικό πλήγμα πλήξει κάποια γραμμή μεταφοράς κοντά στον υποσταθμό. Αυτός ο σκοπός επετεύχθη με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP. Αρχικά περιγράφεται η γενική δομή των υποσταθμών, αναλύονται κάποια βασικά στοιχεία και περιγράφεται το πώς μπορεί να εισέλθει μια υπέρταση από κεραυνικό πλήγμα στον υποσταθμό σαν οδεύον κύμα. Στη συνέχεια περιγράφεται η κυματομορφή της CIGRE αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών με την οποία πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Οι παράμετροι της κυματομορφής μεταβάλλονται βάσει των πιθανοτικών κατανομών τους. Οι περιπτώσεις προσομοίωσης που εξετάστηκαν είναι η διάσπαση μονωτήρων της γραμμής μεταφοράς και το απευθείας πλήγμα πάνω σε μια εκ των φάσεων της γραμμής. Μετά την παράθεση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης εξετάζοντας τις κυματομορφές οι όποιες προέκυψαν από τις προσομοιώσεις του ATP-EMTP, αναλύονται τα αποτελέσματα και εκφράζονται συμπεράσματα σχετικά με την αντοχή του εξοπλισμού του υποσταθμού και κατά πόσο αυτές οι υπερτάσεις θα επηρεάσουν τη λειτουργία του.

Λέξεις Κλειδιά: Υποσταθμοί AIS, Υποσταθμοί GIS, Κυματομορφή CIGRE, Κεραυνικό Πλήγμα

ABSTRACT

The main purpose of this thesis is to estimate the surges entering AIS and GIS substations as traveling waves in the event of a lightning strike at a transmission line near the substation. This purpose was achieved with the help of the ATP-EMTP software. At first, the general structure of substations is described analyzing some basic elements and describing how an overvoltage from a lightning strike can enter the substation as a traveling wave. Next, the CIGRE waveform of negative downward lightning is presented. The parameters of the latter were varied considering the statistical distributions. Then the simulation cases examined are given: breakdown of insulation of the transmission line due to strikes to towers and shield wires and a direct strike on one of the phases of the line. After the end of the simulations and the presentation of the results, by examining the waveforms produced by the ATP-EMTP simulations, results are analyzed and conclusions are derived regarding the stress on substation equipment and whether these stresses will affect its operation.

Key Words: AIS Substations, GIS Substations, CIGRE Waveform, Lightning Strike



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να αφιερώσω λίγο χώρο στην πτυχιακή μου για να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ζαχαρία Γ. Δάτσιο για την στήριξη και καθοδήγηση σε όλη την πορεία της πτυχιακής μου εργασίας και το συνολικό του ρόλο, τόσο στο κομμάτι των γνώσεων και του υλικού που προσκόμισα, όσο και για την ψυχολογική του στήριξη σαν άνθρωπο τον ευχαριστώ θερμά.

Ένα ακόμα ευχαριστώ θέλω να πω στην οικογένεια μου και σε φίλους-συμφοιτητές μου για την πολύτιμη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια προκειμένου να ολοκληρώσω τις σπουδές μου ως Ηλεκτρολόγος Μηχανικός για να φτάσω στο σημείο να γράφω την πτυχιακή μου εργασία και την κτήση του πτυχίου.

Σας ευχαριστώ όλους θερμά μέσα από την καρδιά μου για τη συνεισφορά σας.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	v
Πίνακας Περιεχομένων	vii
Πίνακας Εικόνων.....	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	x
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1: Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης και Εισερχόμενες Κεραύνικες Υπερτάσεις.....	3
1.1 Ρόλος και κατηγορίες υποσταθμών υψηλής τάσης	3
1.1.1 Κατηγορίες υποσταθμών.....	3
ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ AIS	4
ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ GIS	5
ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ MTS	6
1.2 Βασικά στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών υψηλής τάσης.....	7
1.2.1 Διακοπτικός εξοπλισμός.....	8
ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	9
Διακόπτες ισχύος ελαίου.....	11
Αποζεύκτες.....	12
1.3 Μηχανισμοί ανάπτυξης κεραυνικών υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης.....	13
1.3.1 Υπερτάσεις από οδεύοντα κύματα	14
1.3.2 Εισερχόμενες τάσεις στον υποσταθμό από οδεύοντα κύματα	16
1.4 Προστασία εξοπλισμού υποσταθμών υψηλής τάσης	18
1.4.1 Εκτροπείς υπέρτασης (Surge Arresters).....	18
1.4.2 Σημεία τοποθέτησης στον υποσταθμό.....	19
1.4.3 Αρχή λειτουργίας εκτροπέων υπέρτασης	20
1.4.4 Εκτροπέας υπέρτασης οξειδίου μετάλλου (MO).....	20
1.5 Στόχος της πτυχιακής εργασίας.....	20
Κεφάλαιο 2: Κυματομορφή του Κεραυνικού Ρευματος	21
2.1 Γενική μορφή	21
2.1.1 Κατηγορίες κεραυνικών πληγμάτων	21
2.1.2 Κυματομορφή αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών.....	22
2.2 Κυματομορφή της CIGRE.....	24
2.2.1 Ρεύμα ουράς	25
2.3 Παράμετροι κυματομορφής και κατανομές	25
Κεφάλαιο 3: Υποσταθμοί υπό Εξέταση	27
3.1 Τοπολογία και γενικά χαρακτηριστικά	27
3.1.1 Υποσταθμός HVSS GIS 400 kV	27
3.1.2 Υποσταθμός HVSS GIS 132 kV	27
3.1.3 Υποσταθμός HVSS AIS 400 kV	27
3.1.4 Υποσταθμός HVSS AIS 161 kV	28
3.2 Μοντελοποίηση.....	28
3.2.1 Εναέριες γραμμές	28
3.2.2 Πυλώνες & πύλες εισόδου.....	28
3.2.3 Διάσπαση της μόνωσης.....	29
3.2.4 Καλώδια ισχύος.....	29
3.2.5 Εκτροπείς υπέρτασης	29
3.2.6 Ζυγοί GIS & Ζυγοί AIS.....	29

3.2.7 Αυτομετασχηματιστές & Μετασχηματιστές	29
3.2.8 Πλήγμα κεραυνού.....	29
3.2.9 Ανάστροφη διάσπαση & Σφάλμα θωράκισης.....	30
3.3 Περιπτώσεις προσομοίωσης.....	30
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Συζήτηση	33
4.1 HVSS1 Υποσταθμός GIS 400 kV	33
4.1.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα (HVSS1).....	33
4.1.1.1 Ραβδογράμματα μέγιστων υπερτάσεων κόμβων GISI4A, GIS01A, TRHA (HVSS1)	35
4.1.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (HVSS1).....	37
4.1.2.1 Ραβδογράμματα μέγιστων υπερτάσεων κόμβων GISI4A, GIS01A, TRHA (HVSS1)	39
4.2 Υποσταθμός GIS 132 kV (HVSS2).....	41
4.2.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα (HVSS2).....	41
4.2.1.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων GISI4A, GIS01A, TRH1A (HVSS2).....	43
4.2.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (HVSS2).....	45
4.2.2.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων GISI4A, GIS01A, TRH1A (HVSS2).....	47
4.3 Υποσταθμός AIS 400 kV (HVSS3).....	49
4.3.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα (HVSS3).....	49
4.3.1.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων SINC, TRHC (HVSS3).....	51
4.3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (HVSS3).....	52
4.3.2.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων SINA, TRHA (HVSS3)	54
4.4 Υποσταθμός AIS 161 kV (HVSS4).....	55
4.4.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα (HVSS4).....	55
4.4.1.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων SINC, GSUTC (HVSS4)	57
4.4.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (HVSS4).....	59
4.4.2.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων SINA, GSUTA (HVSS4)	61
4.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	62
4.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων υποσταθμών GIS και AIS	62
4.5.2 Σύγκριση υποσταθμών GIS 400 kV και 132 kV	62
4.5.3 Σύγκριση υποσταθμών AIS 400 kV και 161 kV	62
4.5.4 Αντοχή εξοπλισμού	63
4.5.5 Επίδραση της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος.....	63
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	65
Βιβλιογραφία.....	67

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Υποσταθμός AIS [1].....	4
Εικόνα 2: Υποσταθμός GIS [2].....	5
Εικόνα 3: Χημική ένωση εξαφθοριούχου θείου (SF6) [3].....	5
Εικόνα 4: Υποσταθμός MTS [4].....	6
Εικόνα 5: Μέγεθος υποσταθμού AIS σε σχέση με MTS [5].....	6
Εικόνα 6: Βασική δομή υποσταθμού AIS [6].....	7
Εικόνα 7: Βασική δομή υποσταθμού GIS [7].....	8
Εικόνα 8: Ηλεκτρικό τόξο κατά την απόζευξη σε φάση που δεν έχει διακοπή από τον διακόπτη ισχύος [8].....	9
Εικόνα 9: Διακόπτης ισχύος SF6.....	9
Εικόνα 10: Διακόπτης ισχύος ελαίου.....	10
Εικόνα 11: Θάλαμος σβέσης τόξου [9].....	12
Εικόνα 12: Εσωτερική δομή διακόπτη ελαίου [10].....	12
Εικόνα 13: Αποζεύκτης υψηλής τάσης.....	12
Εικόνα 14: Αποζεύκτης μέσης τάσης.....	13
Εικόνα 15: Κεραυνικό πλήγμα σε υποσταθμό [11].....	14
Εικόνα 16: Αγωγοί γης με τους οποίους προστατεύεται ο υποσταθμός από άμεσο κεραυνικό πλήγμα [14].....	14
Εικόνα 17: Κεραυνικό πλήγμα πάνω σε φάση πυλώνα [12].....	15
Εικόνα 18: Εκτροπείς υπέρτασης.....	19
Εικόνα 19: Κατηγορίες κεραυνών μεταξύ νέφους και γης [13].....	21
Εικόνα 20: Γενική κυματομορφή κατερχόμενου αρνητικού κεραυνικού πλήγματος [13].....	22
Εικόνα 21: Απεικόνιση ενδιάμεσου κρουστικού ρεύματος [13].....	24
Εικόνα 22: Αναλυτική κυματομορφή που δείχνει τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος κατά CIGRE [13].....	25
Εικόνα 23: Μεταβολή t_{d30} και S_m με το ρεύμα κορυφής [14].....	26

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πίνακας κατανομής μεταβλητών πρώτου πλήγματος [13].....	23
Πίνακας 2: Πίνακας λογαριθμικών στατιστικών κατανομών ρεύματος κεραυνού [14].....	26
Πίνακας 3: Πίνακας λογαριθμικών σχετικά με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση [14].....	26

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή την πτυχιακή με θέμα την προσομοίωση στο λογισμικό ATP-EMTP υπερτάσεων λόγω κεραυνών σε υποσταθμούς υψηλής τάσης και την εκτίμηση της επίδρασης της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος στις υπερτάσεις, το κύριο αντικείμενο μελέτης ήταν η συμπεριφορά του υποσταθμού που προστατευόταν από εκτροπείς υπέρτασης σε κεραυνικό πλήγμα σε εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς κοντά στον υποσταθμό. Η υπέρταση εισχωρεί στον υποσταθμό σαν οδεύον κύμα είτε μετά από διάσπαση μόνωσης (κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα ή στον αγωγό προστασίας), είτε από σφάλμα θωράκισης, δηλαδή από απευθείας πλήγμα στον αγωγό φάσης. Στο πλαίσιο αυτό θα αναφερθούν συνοπτικά τα είδη των κεραυνών που μπορούν να πλήξουν μία γραμμή μεταφοράς, το πώς μπορεί να δημιουργηθεί υπέρταση στον υποσταθμό και πώς μπορεί αυτός να προστατευθεί.

Θα αναλυθούν και θα μοντελοποιηθούν οι υποσταθμοί υπό εξέταση, η διάσπαση μόνωσης, το σφάλμα θωράκισης και η πηγή κεραυνικού ρεύματος με την κυματομορφή της CIGRE. Στην πορεία θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής CIGRE και οι παράμετροι της.

Μετέπειτα αφού θα έχει γίνει η μοντελοποίηση με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP θα υπολογιστούν υπερτάσεις από κεραυνικά πλήγματα τροποποιώντας κάθε φορά μια από τις τρεις παραμέτρους της κυματομορφής CIGRE για να εξεταστούν τα αποτελέσματα στον κάθε υποσταθμό σε περίπτωση διάσπασης μόνωσης και σφάλματος θωράκισης με βολτόμετρα τα οποία τοποθετήθηκαν σε διάφορα σημεία στους υποσταθμούς.

Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα αποτελέσματα μέσω κάποιων κυματομορφών από κρίσιμα σημεία άλλα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αντίδραση του εξοπλισμού προστασίας σε κεραυνικά πλήγματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία θα πλήξουν τον υποσταθμό μέσω των εισερχόμενων γραμμών μεταφοράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΕΣ ΚΕΡΑΥΝΙΚΕΣ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ

1.1 Ρόλος και κατηγορίες υποσταθμών υψηλής τάσης

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν οι κατηγορίες των υποσταθμών υψηλής τάσης και ποιος είναι ο ρόλος τους στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Υποσταθμοί είναι κόμβοι του συστήματος οι οποίοι ανυψώνουν ή υποβιβάζουν τα επίπεδα τάσης και δίνουν τη δυνατότητα εκτέλεσης διατοπικών χειρισμών για διακοπή τροφοδότησης σε περίπτωση σφάλματος κυκλωμάτων ή για συντήρηση κυκλωμάτων και για τη διευκόλυνση της μεταφοράς ενέργειας από την παραγωγή στο δίκτυο καταναλωτών.

1.1.1 Κατηγορίες υποσταθμών

Οι κατηγορίες των υποσταθμών χωρίζονται ανάλογα με τη λειτουργία, τη μόνωση και τη θέση εγκατάστασης.

Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες υποσταθμών ανάλογα με τη λειτουργία:

- Υποσταθμοί σταθμού παραγωγής (Υποσταθμοί ανύψωσης)
- Υποσταθμοί συστήματος (Υποσταθμοί διασύνδεσης συστημάτων)
- Υποσταθμοί διανομής (Υποσταθμοί υποβιβασμού)
- Υποσταθμοί καταναλωτή (Υποσταθμοί υποβιβασμού).

Συγκεκριμένα οι υποσταθμοί που θα μελετηθούν είναι οι υποσταθμοί σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (υποσταθμοί ανύψωσης) και οι υποσταθμοί συστήματος (υποσταθμοί διασύνδεσης συστημάτων).

Με βάση τη μόνωση διαχωρίζονται σε:

- Υποσταθμούς με μόνωση αέρα AIS (Air Insulated Substation)
- Υποσταθμούς με μόνωση αερίου GIS (Gas Insulated Substation)
- Υποσταθμούς με μικτή μόνωση MTS (Mixed-Technology Substation).

Με βάση την εγκατάσταση κατατάσσονται σε:

- Υπαίθριους υποσταθμούς
- Στεγασμένους υποσταθμούς.

ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ AIS



Εικόνα 1: Υποσταθμός AIS [1]

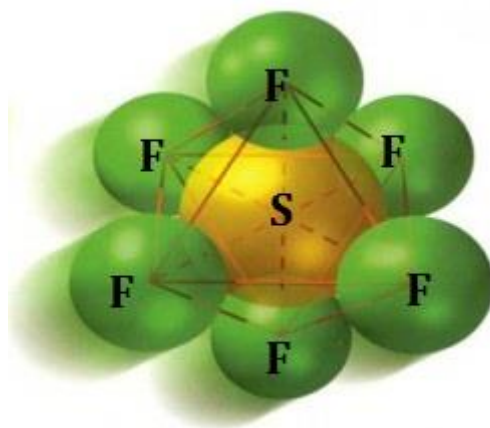
Οι υποσταθμοί AIS (Εικόνα 1) έχουν σαν μόνωση τον ατμοσφαιρικό αέρα μεταξύ των φάσεων και του εξοπλισμού ως προς τη γη και τα αγώγιμα στοιχεία δεν περιβάλλονται από γειωμένο περίβλημα. Είναι κυρίως εξωτερικού χώρου και ο εξοπλισμός είναι πάντα εκτεθειμένος σε εξωτερικές συνθήκες όπως κεραυνοί, βροχή κ.ά. Είναι εύκολα επεκτάσιμοι εφόσον υπάρχει αρκετός εξωτερικός χώρος καθώς αυτού του τύπου οι υποσταθμοί είναι ογκώδεις και είναι πιο κοινοί υποσταθμοί, επειδή έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής. Απαιτούν συχνότερη συντήρηση αλλά έχουν ταχύτερη αποκατάσταση ενδεχομένων βλαβών.

ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ GIS



Εικόνα 2: Υποσταθμός GIS [2]

Οι υποσταθμοί GIS (Εικόνα 2) έχουν σαν μόνωση εξαφθοριούχο θείο SF_6 (Εικόνα 3) ή μείγμα με αλλά αέριο όπως άζωτο N_2 . Τα αγώγιμα στοιχεία του βρίσκονται μέσα σε γειωμένο περίβλημα όπου μέσα σε αυτό παρέχεται η μόνωση αερίου. Έχουν εφαρμογές και σε εσωτερικού άλλα και εξωτερικούς χώρους καταλαμβάνοντας πολύ μικρότερο χώρο από τους υποσταθμούς AIS έχοντας σαν αποτέλεσμα λιγότερη οπτική όχληση και δεν επηρεάζεται από της περιβαλλοντικές συνθήκες.



Εικόνα 3: Χημική ένωση εξαφθοριούχου θείου (SF_6) [3]

Το κόστος κατασκευής τέτοιου είδους υποσταθμών είναι πολύ μεγαλύτερο και ο χρόνος αποκατάστασης κάποιας βλάβης είναι μεγαλύτερος αλλά, έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, απαιτεί λιγότερη συντήρηση, έχει αξιόπιστη λειτουργία, μικρότερο ηλεκτρικό πεδίο και πιο ασφαλή λειτουργία καθώς δεν υπάρχουν πολλά αγωγίμα μέρη του εκτεθειμένα.

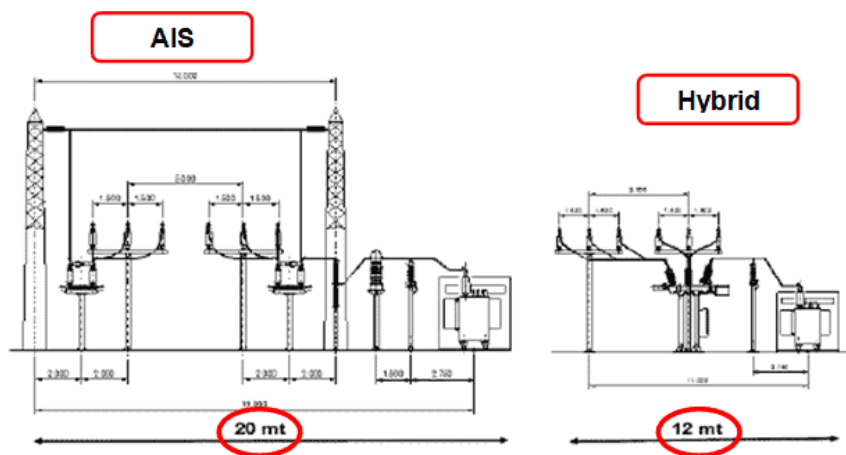
ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ MTS



Εικόνα 4: Υποσταθμός MTS [4]

Οι υποσταθμοί MTS (Εικόνα 4) είναι συνδυασμός των δύο παραπάνω κατηγοριών, στην ουσία είναι ένα υβριδικό σύστημα για τη μόνωση των αγωγίμων μερών του υποσταθμού. Είναι μικρότεροι σε έκταση από τους AIS και συνεπώς έχει μικρότερη οπτική όχληση και είναι η εύκολη επέκταση ενός ειδή υπάρχοντος AIS υποσταθμού. Έχουν χαμηλότερο κόστος κτήσης από τους GIS αλλά λόγω του ότι είναι εκτεθειμένοι σε εξωτερικές συνθήκες είναι αναγκαία πιο τακτική συντήρηση.

Κλείνοντας σημειώνεται ότι το είδος του υποσταθμού που θα κατασκευαστεί επιλέγεται κατά περίπτωση από τις ανάγκες, τον χώρο (Εικόνα 5) και την οικονομική δυνατότητα στο ποια τεχνολογία θα εφαρμοστεί.



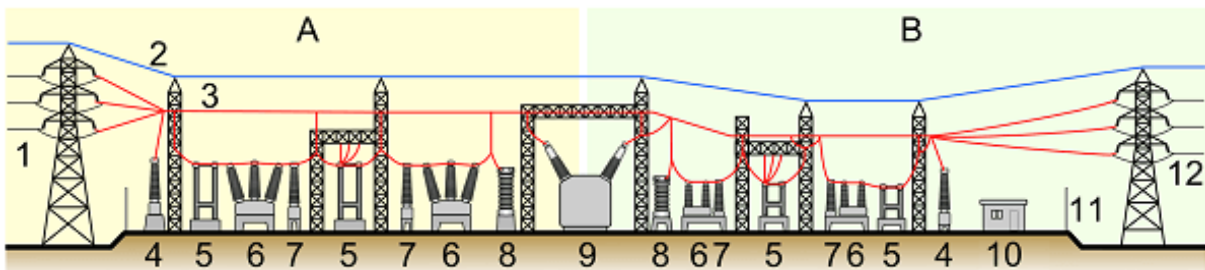
Εικόνα 5: Μέγεθος υποσταθμού AIS σε σχέση με MTS [5]

1.2 Βασικά στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών υψηλής τάσης

Τα βασικά στοιχεία ενός υποσταθμού είτε AIS, είτε GIS, είτε MTS είναι περίπου τα ίδια.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το σχέδιο ενός υποσταθμού AIS ο οποίος αποτελείται από:

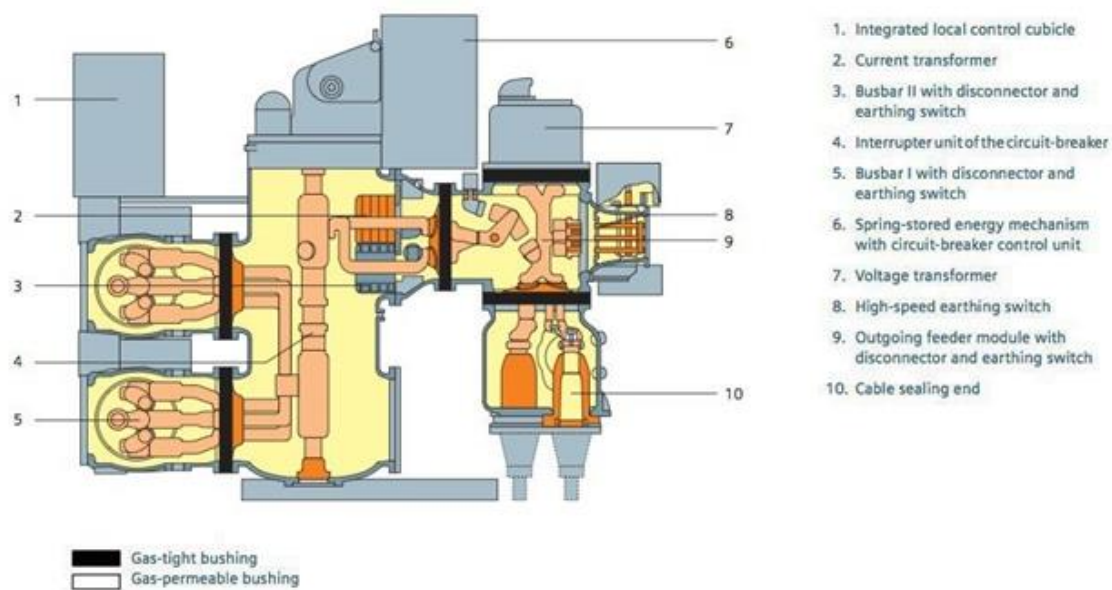
- Γραμμές μεταφοράς (1)
- Αγωγός προστασίας έναντι κεραυνικών πληγμάτων (2)
- Ζυγούς (3)
- Μετασχηματιστές τάσης (4)
- Αποζεύκτες (5)
- Διακόπτες ισχύος (6)
- Μετασχηματιστές έντασης (7)
- Εκτροπείς υπέρτασης (8)
- Μετασχηματιστής ισχύος (9)
- Συστήματα μετρήσεων, προστασίας και ελέγχου (10)
- Περίφραξη υποσταθμού (11).



Εικόνα 6: Βασική δομή υποσταθμού AIS [6]

Στην Εικόνα 7 φαίνεται ο σχεδιασμός ενός υποσταθμού GIS ο οποίος αποτελείται από:

- Σύστημα ελέγχου (1)
- Μετασχηματιστής έντασης (2)
- Ζυγός II με αποζεύκτη και γειωτή (3)
- Διακόπτης ισχύος (4)
- Ζυγός I με αποζεύκτη και γειωτή (5)
- Μετασχηματιστής τάσης (7).



Εικόνα 7: Βασική δομή υποσταθμού GIS [7]

1.2.1 Διακοπτικός εξοπλισμός

Ο βασικός διακοπτικός εξοπλισμός αποτελείται από:

- Διακόπτες ισχύος
- Αποζεύκτες
- Γειωτές.

Αυτοί οι διακόπτες επιτρέπουν την εκτέλεση χειρισμών είτε για να διακοπεί, είτε για να επιτραπεί η ροή ρεύματος μεταβάλλοντας την τοπολογία του συστήματος. Οι μεταβατικές αυτές καταστάσεις ζεύξης και απόζευξης μεταξύ αυτών των δυο καταστάσεων λειτουργίας ενδέχεται να συνοδεύονται από υπερτάσεις και από υπερρεύματα δημιουργώντας ηλεκτρικά τόξα (arc) καταπονώντας έτσι τον εξοπλισμό (Εικόνα 8). Π.χ. σε χειρισμό ζεύξης μπορούν να προκληθούν υπερτάσεις και υπερρεύματα. Και σε χειρισμό απόζευξης μπορούν να προκληθούν υπερτάσεις.



Εικόνα 8: Ηλεκτρικό τόξο κατά την απόξευση σε φάση που δεν έχει διακοπεί από τον διακόπτη ισχύος [8]

ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ



Εικόνα 9: Διακόπτης ισχύος SF6



Εικόνα 10: Διακόπτης ισχύος ελαίου

Ο διακόπτης ισχύος (Εικόνες 9 και 10) είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία προστασίας του υποσταθμού καθώς είναι υπεύθυνος για την προστασία του συστήματος γενικότερα.

Ο διακόπτης ισχύος πρέπει να μπορεί να διακόπτει ρεύματα όπως:

- Ρεύμα σφάλματός
- Ρεύμα φορτίου
- Χωρητικό ρεύμα
- Επαγωγικό ρεύμα.

Οι περισσότεροι διακόπτες ισχύος είναι με μηχανικές επαφές και πιο σπανία χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος.

Τα επιθήματα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει:

- Κλειστός: μικρή αντίσταση
- Ανοιχτός: επαρκής μόνωση για την αποφυγή διάσπασης λόγω υπερτάσεων
- Διακοπή του κυκλώματος χωρίς τη δημιουργία υπερτάσεων
- Ηλέκτριση του κυκλώματος χωρίς να καταστρέφει τις επαφές του
- Γρήγορη μετάβαση από ανοιχτή σε κλειστή κατάσταση και το αντίστροφο.

Κατά το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος υπάρχει δυσκολία του οριστικού σβήσιματος τόξου, στο σβήσιμο του τόξου βοηθούν οι μηδενισμοί του AC ρεύματος, ενώ στο DC ρεύμα δεν υπάρχει μηδενισμός και αυτό αποτελεί πρόβλημα για το σβήσιμο του τόξου.

Η βασική δομή ενός διακόπτη ισχύος αποτελείται από τα εξής:

- Τις κύριες επαφές οι οποίες είναι αυτές που φέρουν το ρεύμα κατά τη στάσιμη κατάσταση όπου ο διακόπτης είναι σε ζεύξη.
- Τις επαφές τόξου οι οποίες κατά την απόξευση και τη διακοπή του ρεύματος διευκολύνουν σβέση του τόξου.
- Τον θάλαμο σβέσης του τόξου.
- Τον μηχανισμό λειτουργίας ο οποίος μετακινεί τις επαφές.
- Μονώσεις και περίβλημα.
- Αντιστάσεις πρό-παρεμβολής (pre-insertion resistor) για τον περιορισμό του ρεύματος κατά τη ζεύξη και την μεταβατική τάση αποκατάστασης (TRV) κατά την απόξευση.

Οι κατηγορίες των διακοπών ισχύος διαμορφώνονται κύριως με βάση το μέσο που πληροί τον θάλαμο σβέσης εντός του οποίου αναπτύσσεται το τόξο οι κατηγορίες είναι ως εξής:

- Διακόπτες ισχύος αέρα και πεπιεσμένου αέρα.
- Διακόπτες ισχύος ελαίου.
- Διακόπτες ισχύος πεπιεσμένου εξαφθοριούχου θείου SF₆
- Διακόπτες ισχύος κενού.

Σε επίπεδα υψηλής τάσης το ηλεκτρικό τόξο είναι υψηλής πίεσης και αναπτύσσεται σε αέρα, σε έλαιο και σε εξαφθοριούχο θείο. Σε επίπεδα μέσης τάσης το ηλεκτρικό τόξο είναι χαμηλής πίεσης όποτε συχνά χρησιμοποιείται κενό. Και στις τέσσερις περιπτώσεις το τόξο που δημιουργείται στις επαφές του διακόπτη ισχύος κατά την απόξευση ψύχεται και στη συνέχεια σβήνει.

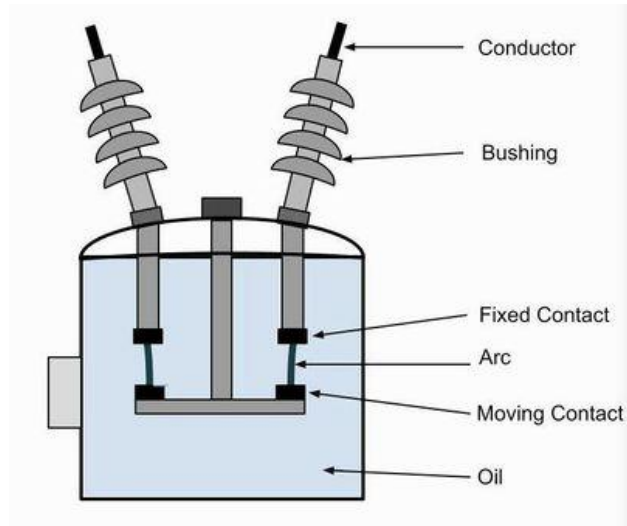
Διακόπτες ισχύος ελαίου

Οι διακόπτες ισχύος ελαίου (Εικόνες 11 και 12) αποτελούνται από δύο κατηγορίες:

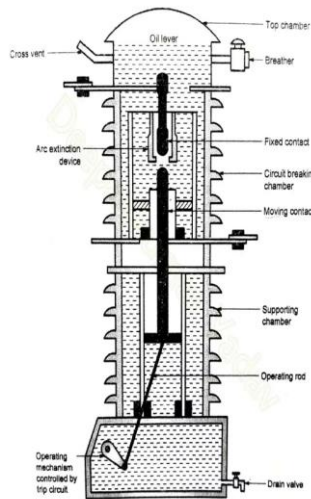
- Ελαίου με γειωμένο δοχείο (Bulk oil, Dead tank)
- Πτωχού ελαίου με δοχείο υπό τάση (Minimum oil, Live tank).

Και η βασική δομή και των δύο είναι:

- Θάλαμος σβέσης του τόξου ο οποίος περιέχει το έλαιο
- Βεβιασμένη ροή ελαίου για ψύξη του τόξου.



Εικόνα 11: Θάλαμος σβέσης τόξου [9]



Εικόνα 12: Εσωτερική δομή διακόπτη ελαίου [10]

ΑΠΟΖΕΥΚΤΕΣ



Εικόνα 13: Αποζεύκτης υψηλής τάσης



Εικόνα 14: Αποζεύκτης μέσης τάσης

Οι αποζεύκτες (Εικόνες 13 και 14) συνδέονται σε σειρά πριν και μετά από τον διακόπτη ισχύος και προσφέρουν προστασία με φυσική απόξευση. Οι αποζεύκτες διακόπτουν μόνο μικρά ρεύματα λόγω χωρητικής ή επαγωγικής σύζευξης με άλλα κυκλώματα που έχουν τάση.

1.3 Μηχανισμοί ανάπτυξης κεραυνικών υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης

Σε αυτή την ενότητα θα συζητηθεί το πώς μπορούν να προκληθούν υπερτάσεις από κεραυνικό πλήγμα σε ένα υποσταθμό (Εικόνα 15). Οι υποσταθμοί διαθέτουν σύστημα αντικεραυνικής προστασίας από άμεσα πλήγματα το οποίο δεν αφήνει τον κεραυνό να πλήξει τους ζυγούς του συστήματος ή τον μετασχηματιστή συλλέγοντας τον κεραυνό μοιράζοντάς τον σε όλες τις κατευθύνσεις του αγωγού και οδηγώντας τον στη γη. Το σύστημα αποτελείται από οριζόντιους αγωγούς (γειωμένους), όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, και ράβδους.



Εικόνα 15: Κεραυνικό πλήγμα σε υποσταθμό [11]



Εικόνα 16: Αγωγοί γης με τους οποίους προστατεύεται ο υποσταθμός από άμεσο κεραυνικό πλήγμα

Ο υποσταθμός προστατεύεται και από έμμεσα κεραυνικά πλήγματα σε κοντινή απόσταση όπου μπορεί να προκληθούν ανάστροφες υπερτάσεις μέσω την γης που ανυψώνεται το δυναμικό της. Σε αυτό βοηθά το σύστημα γείωσης του υποσταθμού το οποίο έχει χαμηλή κρουστική αντίσταση.

1.3.1 Υπερτάσεις από οδεύοντα κύματα

Σε έναν υποσταθμό υπερτάσεις δημιουργούνται κυρίως από οδεύοντα κύματα τα οποία δημιουργούνται από κεραυνικά πλήγματα σε γραμμές μεταφοράς (Εικόνα 17) πλησίον του υποσταθμού.



Εικόνα 17: Κεραυνικό πλήγμα πάνω σε φάση πυλώνα [12]

Στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τα άμεσα και τα έμμεσα κεραυνικά πλήγματα είναι οι κυριότερες αιτίες σφαλμάτων, γιατί το κεραυνικό ρεύμα προκαλεί υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου (fast-front overvoltages) οι οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν βλάβες στον εξοπλισμό και διακοπή στο σύστημα ηλεκτροδότησης όπου και τα δύο έχουν ως συνέπεια οικονομικές ζημιές. Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πλήττονται από άμεσα κεραυνικά πλήγματα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν:

- **Ανάστροφη διάσπαση (Backflashover)**

Όταν ένας πυλώνας είναι θωρακισμένος (έχει αγωγό προστασίας) τότε εάν ένας κεραυνός πλήξει τον αγωγό προστασίας το ρεύμα τότε διαμερίζεται δεξιά και αριστερά εκατέρωθεν του σημείου του οποίου έπληξε και μέσω της γείωσης των πυλώνων ρέει στο έδαφος.

Αν η κρουστική αντίσταση γείωσης του πυλώνα είναι υψηλή τότε ένα πλήγμα στον αγωγό προστασίας ή και πάνω στον πυλώνα μπορεί να ανυψώσει το δυναμικό του πυλώνα περισσότερο από του αγωγούς φάσης ανάλογα με την ένταση ρεύματος του πλήγματος, μπορεί να προκύψει ανάστροφη διάσπαση (backflashover) ανάμεσα στον πυλώνα και τον αγωγό της φάσης θα δημιουργήσει ένα ρεύμα σφάλματος γείωσης συχνότητας του συστήματος. Επίσης, θα έχει ως συνέπεια να ακολουθήσει μια διαδρομή προς τους συνδεδεμένους υποσταθμούς ένα κύμα υπέρτασης εξαιρετικά υψηλής κλίσης στο μέτωπο το οποίο θα εισέλθει μέσα στους υποσταθμούς.

- **Σφάλμα θωράκισης (Direct stroke to phase conductor)**

Όταν μία γραμμή μεταφοράς δεν είναι θωρακισμένη τότε σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος πλήττεται άμεσα ο αγωγός φάσης αυτό θα προκαλέσει διαμερισμό του ρεύματος δεξιά και αριστερά εκατέρωθεν του σημείου δημιουργώντας οδεύοντα κύματα στον αγωγό και επαγόμενα στου άλλους αγωγούς φάσεων, τα κύματα αυτά αποσβένονται σταδιακά κατά μήκος του αγωγού σταδιακά από το σημείο στο οποίο έχει χτυπηθεί λόγω των απωλειών που υπάρχουν στην γραμμή και των εκκενώσεων κορώνων. Ωστόσο οι υπερτάσεις που θα δημιουργηθούν καταπονούν την μόνωση των πυλώνων κυρίως σε αυτούς που είναι πιο κοντά στο σημείο του πλήγματος. Αν το σημείο πλήγματος είναι κοντά σε υποσταθμό η υπέρταση θα εισέλθει και στον υποσταθμό. Σε μία θωρακισμένη γραμμή πάλι μπορεί να συμβεί πλήγμα σε αγωγό φάσης από κεραυνούς μικρότερης έντασης ρεύματος αυτό ονομάζεται σφάλμα θωράκισης. Ο μηχανισμός με τον οποίο προκαλείται η υπέρταση στους υποσταθμούς είναι ίδιος με αυτόν των μη θωρακισμένων γραμμών μεταφοράς. Γενικά αυτό είναι πιο σπάνιο να συμβεί διότι, οι περισσότεροι κεραυνοί είναι μεγάλης έντασης και πλήττουν τον αγωγό προστασίας.

- **Επαγόμενες υπερτάσεις (Inducted overvoltages)**

Όταν οι κεραυνοί συμβαίνουν εντός 1 km από τη γραμμή μεταφοράς ή όταν οδηγούνται στη γη μέσω των γειώσεων των πυλώνων χωρίς ανάστροφη διάσπαση θα προκαλέσουν επαγόμενες υπερτάσεις στους αγωγούς φάσης. Οι υπερτάσεις που θα δημιουργηθούν θα ταξιδεύουν σαν οδεύοντα κύματα πάνω στη γραμμή και το πλάτος τους εξαρτάται από τα κεραυνικά ρεύματα. Αυτού του είδους οι υπερτάσεις αντιπροσωπεύουν μεγάλο ποσοστό των κεραυνικών πληγμάτων που οδηγούν σε σφάλματα στα δίκτυα διανομής έχοντας μικρή σημασία στα συστήματα μεταφοράς καθώς οι μονώσεις είναι μεγάλου μήκους και αντοχής. Επιπλέον έχουν ομαλό μέτωπο.

1.3.2 Εισερχόμενες τάσεις στον υποσταθμό από οδεύοντα κύματα

Οι υπερτάσεις που πλήττουν τους υποσταθμούς είναι από οδεύοντα κύματα κεραυνικών υπερτάσεων που πλήττουν τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως κοντά στον υποσταθμό. Όταν ένας κεραυνός καταλήξει στη γραμμή δημιουργεί ένα κύμα υπέρτασης το οποίο θα ταξιδέψει στη γραμμή και στις δύο κατευθύνσεις από το σημείο του πλήγματος και με αυτό τον τρόπο η κρουστική αντίσταση να είναι η μίση από του αγωγού. Το κύμα

αποσβένεται καθώς κινείται. Η ταχύτητά του 3×10^8 m/s η οποία είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός.

Τα οδεύοντα κύματα που προκύπτουν από άμεσα πλήγματα κεραυνού σε αγωγό προστασίας έχουν πολύ απότομα μέτωπα λόγω της διάσπασης της μόνωσης της γραμμής. Συνήθως όταν ένα κύμα υπέρτασης λόγω πλήγματος σε φάσεις μίας γραμμής μεταφοράς εκτονωθεί στην γείωση του πυλώνα δεν αποτελεί απειλή για τον εξοπλισμό του υποσταθμού. Αυτό όμως γίνεται μόνο σε περίπτωση που συμβεί διάσπαση στη μόνωση της γραμμής άρα σφάλμα φάσης γης.

Τα οδεύοντα κύματα υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω των ωμικών απωλειών της γραμμής, σε περίπτωση που η τιμή της υπέρτασης ξεπερνάει το επίπεδο έναυσης της κορώνα θα προκύψει περισσότερη εξασθένηση με αποτέλεσμα τον περιορισμό απότομης κλίσης του απότομου μετώπου.

Στην περίπτωση λόγω προβλημάτων ρύπανσης των μονωτήρων το επίπεδο μόνωσης της γραμμής είναι πολύ πιο υψηλό από το επίπεδο μόνωσης του υποσταθμού, σε αυτή την περίπτωση αυτή το κεραυνικό πλήγμα μπορεί να εισέλθει στον υποσταθμό με πλήρες φορτίο και ενέργεια γιατί δεν γίνεται διάσπαση στη γραμμή μεταφοράς. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου πρέπει να υπάρχουν εκτροπείς υπέρτασης στην είσοδο του υποσταθμού κοντά στην γραμμή ακόμη και στην περίπτωση που η γραμμή είναι θωρακισμένη.

Τα οδεύοντα κύματα ανακλώνται πολλές φορές σε ηλεκτρικές ασυνέχειες προκαλώντας ηλεκτρική διάσπαση και κατόπιν ηλεκτρικό τόξο (arc) σε ανοιχτά κυκλώματα, όπως διακόπτες, αποζεύκτες, κόμβους εναέριων γραμμών με υπόγεια καλώδια και σε μετασχηματιστές ή GIS. Τέτοιου είδους ανακλάσεις οδηγούν σε διπλασιασμό της τάσης στον ακροδέκτη με αποτέλεσμα να κινδυνεύει σοβαρά ο εξοπλισμός.

Για παράδειγμα αν μια βηματική υπέρταση με πλάτος U εισέλθει στον υποσταθμό σαν οδεύον κύμα και έστω ότι: Z_1 : κρουστική αντίσταση γραμμής και Z_2 : κρουστική αντίσταση τερματικού εξοπλισμού.

Η τάση στο Z_2 θα είναι:

$$2U \left[\frac{Z_2}{(Z_2 + Z_1)} \right]$$

Το πλάτος του ανακλώμενου κύματος θα είναι:

$$U \left[\frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \right]$$

Στην περίπτωση που το $Z_2=\infty$, π.χ. όταν ο διακόπτης ισχύος είναι ανοιχτός, το πλάτος της υπέρτασης U στον ακροδέκτη θα διπλασιαστεί. Σε περίπτωση που η γραμμή τερματίζει σε μετασχηματιστή το πλάτος της υπέρτασης U θα είναι διπλάσιο λόγω της χωρητικότητας του μετασχηματιστή.

Σε άλλη περίπτωση όπου υπάρχει αριθμός γραμμών συνδεδεμένες σε έναν ζυγό του υποσταθμού το πλάτος την υπέρτασης πάνω στον ζυγό υπολογίζεται πολύ προσεγγιστικά από τον τύπο:

$$\frac{2U}{N}$$

όπου N είναι ο αριθμός των γραμμών πάνω στον ζυγό και έχοντας τρεις και παραπάνω γραμμές συνδεδεμένες στο ζυγό θα γίνει εφικτό να περιοριστεί το πλάτος της υπέρτασης από το οδεύον κύμα.

1.4 Προστασία εξοπλισμού υποσταθμών υψηλής τάσης

1.4.1 Εκτροπείς υπέρτασης (Surge Arresters)

Οι εκτροπείς υπέρτασης είναι η βασικότερη συσκευή για την προστασία του εξοπλισμού από πιθανές υπερτάσεις από οδεύοντα κύματα που μπορούν να εισέρθουν στον υποσταθμό όπως αναλύθηκε παραπάνω. Με βάση το πρότυπο IEC 60099-7 η συσκευή προσφέρει προστασία έναντι των μεταβατικών τάσεων, περιορίζει τις υπερτάσεις σύμφωνα με τις προδιαγραφές του επιπέδου προστασίας (protective level) και περιορίζει το εύρος του ρεύματος (follow current) που ρέει μέσα από τον εκτροπέα λόγω του ότι είναι συνδεδεμένος σε πηγή ισχύος αφού το μεταβατικό ρεύμα διαρρέει τον εκτροπέα (discharge current).

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά ενός ιδανικού εκτροπέα, δεν άγει υπό την τάση λειτουργίας, αρχίζει να άγει όταν $V > a \cdot V_{\text{rated}}$, δηλαδή όταν εμφανιστεί υπέρταση διατηρώντας σταθερή την τάση στα άκρα του και δεν άγει πλέον όταν $V \approx V_{\text{rated}}$.



Εικόνα 18: Εκτροπείς υπέρτασης

1.4.2 Σημεία τοποθέτησης στον υποσταθμό

Οι εκτροπείς υπέρτασης τοποθετούνται κατά κόρον πλησίον των μετασχηματιστών ισχύος και στις εισόδους των εναέριων γραμμών σε GIS και σε AIS. Με την εγκατάσταση των εκτροπέων υπέρτασης προστατεύεται ο εξοπλισμός και η εγκατάσταση από οδεύοντα κύματα που θα δημιουργηθούν, είτε από κεραυνικό πλήγμα είτε, από κάποιο χειρισμό.

Παλιότερα χρησιμοποιούσαν προστατευτικά διάκενα ράβδων για την προστασία από τις κεραυνικές υπερτάσεις καθώς ήταν μια φτηνή λύση για την αντιμετώπιση φαινομένων υπέρτασης που δεν απαιτούσε παρεμβάσεις και συντήρηση. Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι οδηγούσε συχνά σε σφάλματα γης κατά τη λειτουργία της και το κύκλωμα μπορούσε να βγει εκτός λειτουργίας (tripping) και δεν ήταν αξιόπιστα σε πολύ απότομα οδεύοντα κύματα. Με την έλευση των εκτροπέων υπέρτασης οξειδίου μετάλλου τα προστατευτικά διάκενα ράβδων έπαψαν να υπάρχουν καθώς οι εκτροπείς ήταν φθηνοί και πολύ πιο αξιόπιστοι και αυτές οι δύο τεχνολογίες δεν μπορούν να δουλέψουν σε συνδυασμό, καθώς απαιτείται συντονισμός τους που είναι δύσκολος.

Αν οι εκτροπείς τοποθετηθούν σε μεγαλύτερη απόσταση από τον εξοπλισμό που πρέπει να προστατευτεί η υπέρτασης που θα κληθεί να αντιμετωπίσει ο εξοπλισμός θα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτό που θα αντιμετώπιζε αν ο εκτροπέας βρισκόταν πιο κοντά.

Γνωρίζοντας το επίπεδο προστασίας του εκτροπέα και το επίπεδο αντοχής της μόνωσης του εξοπλισμού που πρέπει να προστατευτεί μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση προστασίας, η οποία αντιπροσωπεύει την πιο απομακρυσμένη απόσταση στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί ο εκτροπέας παρέχοντας επαρκές επίπεδο ασφαλείας.

1.4.3 Αρχή λειτουργίας εκτροπέων υπέρτασης

Διεθνώς οι εκτροπείς υπέρτασης είναι αναγνωρισμένοι ως η πιο αποτελεσματική προστασία έναντι υπερτάσεων σε υποσταθμούς με ευαίσθητο εξοπλισμό. Λειτουργούν ως μία μη γραμμική αντίσταση η οποία είναι πολύ αγωγή σε επίπεδα υπερτάσεων και μη αγωγή σε κανονική λειτουργία αντλώντας μόνο ένα μικρό ρεύμα διαρροής κατά την κανονική λειτουργία σε φυσιολογικά επίπεδα τάσης.

Το ρεύμα υπέρτασης που περνάει από τη μη γραμμική αντίσταση προκαλεί πτώση τάσης κατά μήκος της αντίστασης της πηγής περιορίζοντας σημαντικά την πτώση τάσης κατά μήκος του εξοπλισμού τον οποίο προστατεύει και έτσι η υπέρταση εκτρέπεται στη γη μέσω του εκτροπέα χωρίς να διακόψει το κύκλωμα.

1.4.4 Εκτροπέας υπέρτασης οξειδίου μετάλλου (MO)

Γνωστός και ως εκτροπέας οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) έχει αντικαταστήσει τους εκτροπείς με διάκενο καρβιδίου του πυριτίου (SiC) οι οποίοι για να σβήσουν το τόξο έκαναν αναγκαστική χρήση σπινθηριστών, είναι περίπλοκη κατασκευή με πολλά στοιχεία (σπινθηριστές, πηνία, πυκνωτές, και άλλες αντιστάσεις πέραν των μη γραμμικών SiC), είχαν υψηλό κόστος, χαμηλή αξιοπιστία και μικρή διάρκεια ζωής και για αυτό αντικαταστάθηκαν.

Ο εκτροπέας MO είναι ο καλύτερος σε τέτοιου είδους εφαρμογές καθότι παρέχει υψηλή προστασία έναντι υπερτάσεων ενώ ταυτόχρονα παρέχει αντοχή στη συνεχόμενη λειτουργία και αντοχή στις προσωρινές υπέρτασης (TOV).

1.5 Στόχος της πτυχιακής εργασίας

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία θα προσομοιώσουμε με τη βοήθεια του ATP-EMTP κεραυνικές υπερτάσεις σε υποσταθμούς AIS και GIS. Οι υπερτάσεις εισέρχονται στον υποσταθμό από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς όπου συμβαίνουν τα κεραυνικά πλήγματα. Λαμβάνονται υπόψη κεραυνικά πλήγματα είτε στον πυλώνα και τον αγωγό προστασίας είτε σε αγωγούς φάσης (σφάλμα θωράκισης). Θα μελετηθεί η επίδραση του κεραυνικού ρεύματος. Συγκεκριμένα θα μεταβληθεί η διάρκεια μετώπου, ημίσεος εύρους και η μέγιστη κλίση χρησιμοποιώντας τις πιθανοτικές κατανομές που έχουν μετρηθεί στην πράξη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

2.1 Γενική μορφή

2.1.1 Κατηγορίες κεραυνικών πληγμάτων

Το κεραυνικό πλήγμα ορίζεται ως η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ σύννεφων και γης και κατατάσσεται σε κατηγορίες με βάση την κατεύθυνση του οδηγού προεκκένωσης (λήντερ) του κεραυνού (leader) και την πολικότητα του νέφους (Εικόνα 19).

Χωρίζονται δηλαδή σε:

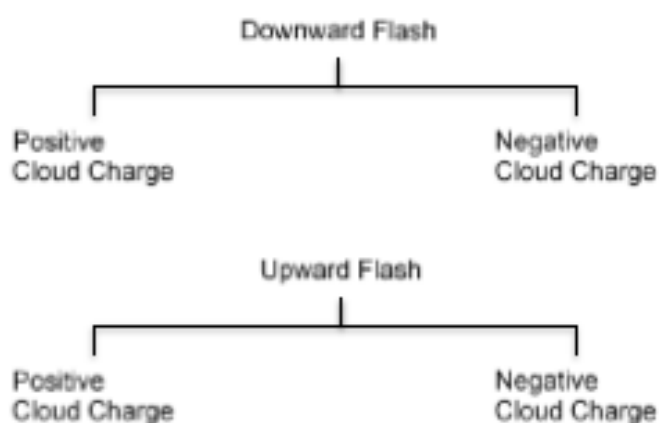
- Ανερχόμενους (Upward flash)
- Κατερχομένους (Downward flash)

με βάση την κατεύθυνση του leader και σε:

- Αρνητικής πολικότητας (Negative cloud charge)
- Θετικής πολικότητας (Positive cloud charge)

με βάση την πολικότητα του νέφους.

Σε αυτές οι κατηγορίες κεραυνών που πλήττουν το έδαφος, ο οδηγός του κεραυνού ακολουθείται συνήθως από ένα κρουστικό ρεύμα επιστροφής.



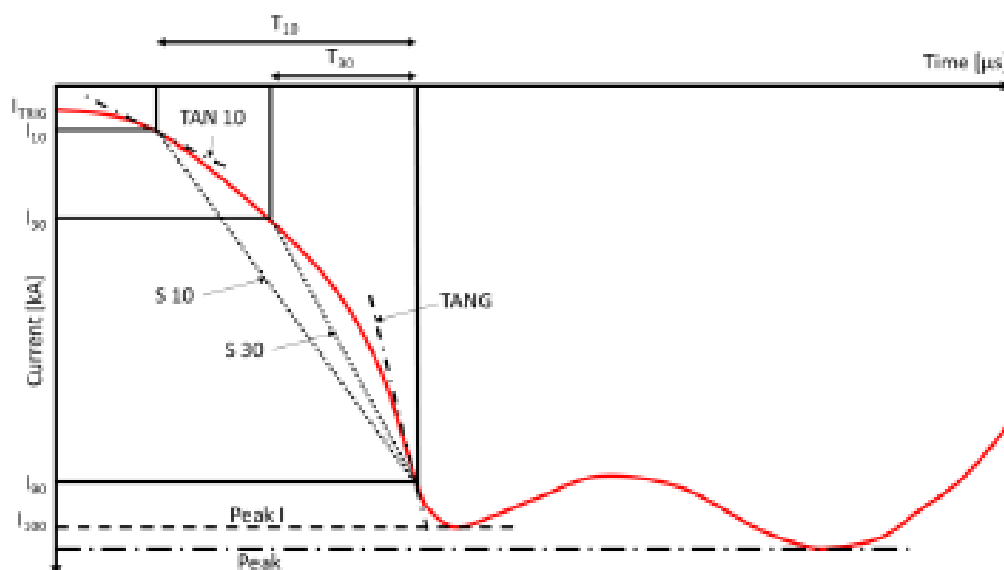
Εικόνα 19: Κατηγορίες κεραυνών μεταξύ νέφους και γης [13]

Κατά μέσο όρο οι πλειονότητα των κατερχόμενων κεραυνών είναι αρνητικής πολικότητας σε ποσοστό 90% με περίπου το 45-55% αυτών να περιλαμβάνουν μόνο ένα πλήγμα.

Τα ανερχόμενα κεραυνικά πλήγματα εμφανίζονται κυρίως σε πολύ ψηλές κατασκευές και εγκαταστάσεις στην κορυφή ενός βουνού ή ενός λόφου συνεπώς οι γραμμές μεταφοράς σπάνια υπόκεινται σε τέτοιου είδους πλήγμα, διότι η πλειονότητα των πυλώνων είναι μετρίου ύψους 60 έως 100 μέτρα το πολύ, επομένως πλήττονται κυρίως από κατερχόμενους κεραυνούς.

2.1.2 Κυματομορφή αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών

Η κυματομορφή των αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών μετρήθηκε στο όρος San Salvatore εκτενώς και τα χαρακτηριστικά του πρώτου πλήγματος οριστήκαν ως προς τον μέγιστο ρυθμό ανόδου του ρεύματος. Τα χαρακτηριστικά του μετώπου του κεραυνού μελετήθηκαν διεξοδικά και εισήχθησαν αρκετές πρόσθετες παράμετροι όπως ορίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 20: Γενική κυματομορφή κατερχόμενου αρνητικού κεραυνικού πλήγματος [13]

Οι παράμετροι που βασίζονται στα σημεία 10% είναι λιγότερο αξιόπιστες από τις τιμές στο 30% για τον λόγο πως το επίπεδο αναφοράς είναι 2 kA. Επομένως χρησιμοποιούνται οι παράμετροι στο 30%, επίσης φαίνεται στο σχήμα ότι ο κεραυνός έχει δυο μέγιστα (peak) και ότι το I_{TRIG} ξεκινάει από το επίπεδο αναφοράς.

Η γενική κατανομή των παραμέτρων της κυματομορφής συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα υποθέτοντας μια λογαριθμική κανονική κατανομή μεταβλητών (log normal distribution).

Πίνακας 1: Πίνακας κατανομής μεταβλητών πρώτου πλήγματος [13]

Parameter	First stroke	
	M	β
<u>Front, μs</u>		
$t_{d10} = t_{10}/0.8$	5.63	0.576
$t_{d30} = t_{30}/0.6$	3.83	0.553
<u>Steepness, kA/μs</u>		
S_m , Maximum	24.3	0.599
S_{10} , at 10%	2.6	0.921
$S_{10/90}$, 10-90%	5.0	0.645
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.622
<u>Crest Current, kA</u>		
I_i , Initial	27.7	0.461
I_f , Final	31.1	0.484
Initial/Final	0.9	0.230
<u>Tail, t_h, μs</u>	77.5	0.0577
<u>Charge, Q_i, C</u>	4.65	0.882
<u>$\int i^2 dt$, (kA)^2s</u>	0.057	1.373
<u>Inter stroke interval, ms</u>		

Η γενική εξίσωση για την πυκνότητα πιθανότητας εκφράζεται από τον τύπο [13]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \beta x} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

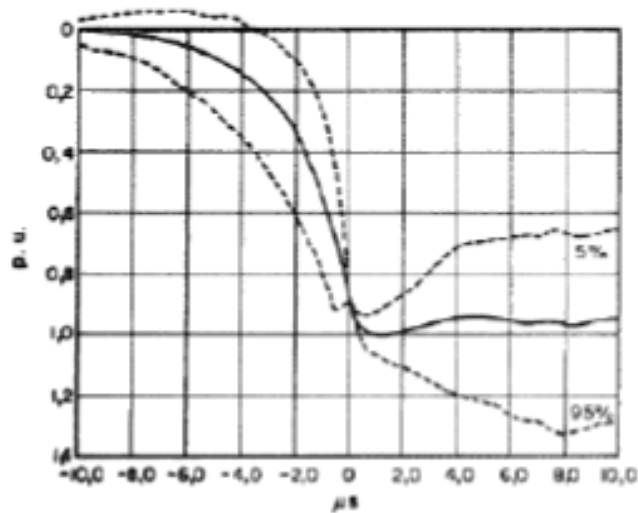
όπου το z [13]:

$$z = \frac{\ln\left(\frac{x}{M}\right)}{\beta}$$

M είναι η ενδιάμεση τιμή της παραμέτρου, β η παράμετρος κλίσης (λογαριθμική τυπική απόκλιση με βάση e). Η μέση τιμή εκφράζεται ως εξής [13]:

$$\mu = M \cdot e^{\left(\frac{\beta^2}{2}\right)}$$

Η καταγραφή του κεραυνικού ρεύματος σε βάθος χρόνου μάς έχει δώσει τα χαρακτηριστικά ενδιάμεσου κρουστικού ρεύματος (Εικόνα 21). Η ενδιάμεση τιμή της διάρκειας ημίσεως εύρους είναι 77,5 μs για το πρώτο πλήγμα.



Εικόνα 21: Απεικόνιση ενδιάμεσου κρουστικού ρεύματος [13]

Να σημειώσουμε ότι τα θετικά ρεύματα κεραυνού είναι μεγαλύτερα από τα αρνητικά, ωστόσο ο χρόνος μετώπου είναι πιο αργός σε σχέση με τα αρνητικά.

2.2 Κυματομορφή της CIGRE

Η κυματομορφή της CIGRE είναι χρήσιμη σε ακριβείς υπολογισμούς και προσομοιώσεις της επίδρασης κεραυνικών πλήγμάτων στον εξοπλισμό που υπάρχει σε υποσταθμούς και είναι απαραίτητο να προσομοιωθεί το κοίλο μέτωπο για τη σωστή αναπαράσταση του κεραυνικού ρεύματος.

Η βασική απαίτηση για να γίνει μια τέτοιου είδους προσομοίωση πρέπει να περιέχει:

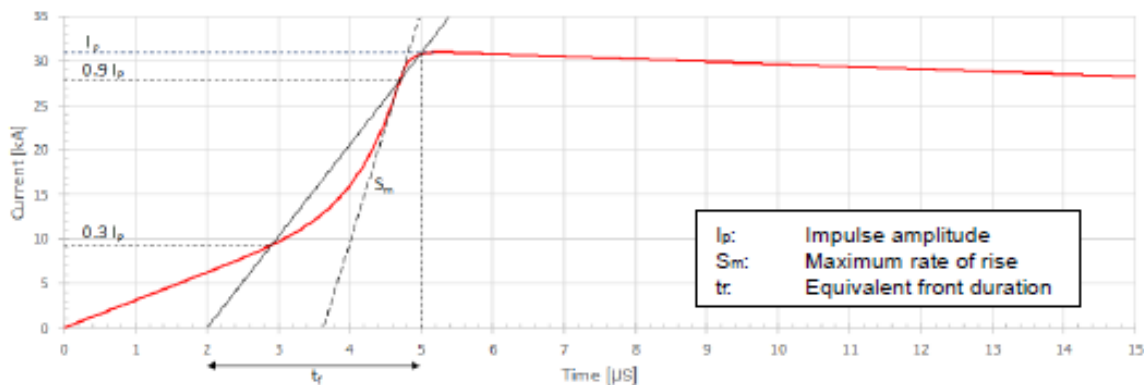
- Το σωστό πλάτος του κεραυνού I (kA) (μέγιστη τιμή).
- Την μέγιστη κλίση S_m (kA/μs) κοντά στο μέγιστο και συγκεκριμένα στο I_{90} .
- Για τα πρώτα πλήγματα η διάρκεια μετώπου εκφράζεται από τον χρόνο t_{d30} που ορίζεται από τις τιμές 30% και 90% του μέγιστου κεραυνικού ρεύματος διαιρούμενο με το 0,6.

Το μειονέκτημα της κυματομορφής της CIGRE είναι ότι το μέτωπο και η ουρά δεν περιγράφονται με μόνο μια έκφραση, αλλά χωρίζονται σε δύο μέρη (εξισώσεις) το ένα εκ των οποίων περιγράφει το μέτωπο έως το 90% του πλάτους.

2.2.1 Ρεύμα ουράς

Οι κύριες απαιτήσεις για την ουρά (Εικόνα 22) είναι οι εξής:

- Να έχει τη μέγιστη κλίση στην αρχή του παρέχοντας έτσι μια σταθερή μετάβαση από το ένα μέρος στο άλλο (από το μέτωπο στην ουρά).
- Να φτάσει στη σωστή τιμή πλάτους.
- Να αποφευχθούν οι επαναληπτικές διαδικασίες.
- Τον χρόνο έως τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h (μs).



Εικόνα 22: Αναλυτική κυματομορφή που δείχνει τις παραμέτρους του κεραυνικού ρεύματος κατά CIGRE [13]

2.3 Παράμετροι κυματομορφής και κατανομές

Οι παράμετροι t_{d30} , S_m , t_h (διάρκεια μετώπου (αλλιώς t_f), μέγιστη κλίση, διάρκεια ημίσεος εύρους) διαφοροποιούνται βάσει τις στατιστικές κατανομές τους. Οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία αυτή είναι 95%, 75%, 50%, 25% και 5%. Δηλαδή αντιστοιχούν στο ποσοστό των περιπτώσεων που ξεπερνούν την τρέχουσα τιμή. Για να διερευνηθούν οι επιδράσεις μίας μεμονωμένης παραμέτρου κυματομορφής στις υπολογισμένες υπερτάσεις υιοθετήθηκαν ενδιάμεσες τιμές (50%) για τις υπόλοιπες δυο παραμέτρους, όσον αναφορά το ρεύμα κορυφής ελήφθησαν ρεαλιστικές τιμές έως 200 kA για τα αρνητικά πρώτα πλήγματα κεραυνού.

Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι κανονικές λογαριθμικές προσεγγίσεις των στατιστικών κατανομών των παραμέτρων του κρουστικού ρεύματος (t_{d30} , S_m και t_h) για τα πρώτα πλήγματα των αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών που θα χρησιμοποιηθούν.

Πίνακας 2: Πίνακας λογαριθμικών στατιστικών κατανομών ρεύματος κεραυνού [14]

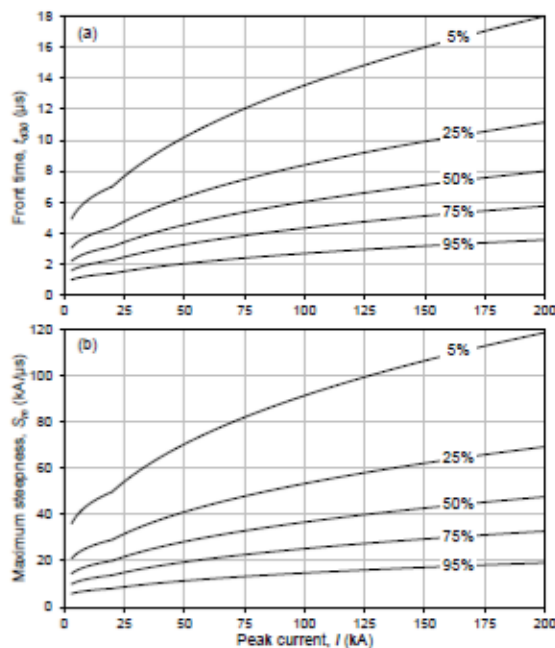
Waveform parameter	Median value, M	Logarithmic standard deviation, β	Range of peak current, I
$t_{d50} I$ (μs)	$1.77 \cdot I^{0.188}$ $0.906 \cdot I^{0.411}$	0.494	$3 \leq I \leq 20 \text{ kA}$ $I > 20 \text{ kA}$
$S_m I$ (kA/ μs)	$12 \cdot I^{0.171}$ $6.5 \cdot I^{0.376}$	0.554	$3 \leq I \leq 20 \text{ kA}$ $I > 20 \text{ kA}$
t_b (μs)	77.5	0.577	–

Οι παραπάνω κατανομές των t_{d50} και S_m είναι για δεδομένο ρεύμα αιχμής κεραυνού I (kA). Οι τιμές του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) αντιστοιχούν σε αυτές που υπερβαίνουν κατά 95%, 75%, 50%, 25%, 5% των περιπτώσεων και χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις με την κυματομορφή κεραυνού της CIGRE.

Πίνακας 3: Πίνακας λογαριθμικών σχετικά με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση [14]

Waveform parameter	95%	75%	50%	25%	5%	Range of peak current, I
t_{d50} (μs)	$0.785 \cdot I^{0.188}$ $0.402 \cdot I^{0.411}$	$1.268 \cdot I^{0.188}$ $0.649 \cdot I^{0.411}$	$1.770 \cdot I^{0.188}$ $0.906 \cdot I^{0.411}$	$2.470 \cdot I^{0.188}$ $1.265 \cdot I^{0.411}$	$3.989 \cdot I^{0.188}$ $2.042 \cdot I^{0.411}$	$3 \leq I \leq 20 \text{ kA}$ $I > 20 \text{ kA}$
S_m (kA/ μs)	$4.824 \cdot I^{0.171}$ $2.613 \cdot I^{0.376}$	$8.259 \cdot I^{0.171}$ $4.473 \cdot I^{0.376}$	$12 \cdot I^{0.171}$ $6.5 \cdot I^{0.376}$	$17.437 \cdot I^{0.171}$ $9.445 \cdot I^{0.376}$	$29.849 \cdot I^{0.171}$ $16.168 \cdot I^{0.376}$	$3 \leq I \leq 20 \text{ kA}$ $I > 20 \text{ kA}$
t_b (μs)	30	52.5	77.5	114.4	200.2	–

Τα t_{d50} και S_m είναι συναρτήσεις του ρεύματος κορυφής I (kA), για κάθε ποσοστό. Στην Εικόνα 23 φαίνεται η διακύμανση τους με το ρεύμα κορυφής σύμφωνα με τον Πίνακα 3.



Εικόνα 23: Μεταβολή t_{d50} και S_m με το ρεύμα κορυφής [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν οι υποσταθμοί που εξετάστηκαν και θα αναλυθεί η τοπολογία τους, θα αναφερθεί η μοντελοποίηση στο ATP-EMTP και ποιες περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων εξετάστηκαν. Εξετάστηκαν λοιπόν τέσσερεις υποσταθμοί, δύο με μόνωση SF₆ (GIS) και δύο με μόνωση αέρα (AIS). Από κάθε κατηγορία υπήρχε ένας υποσταθμός συστήματος και ένας υποσταθμός σταθμού παραγωγής.

3.1 Τοπολογία και γενικά χαρακτηριστικά

3.1.1 Υποσταθμός HVSS GIS 400 kV

Ο συγκεκριμένος υποσταθμός είναι σταθμού παραγωγής. Σε αυτόν θεωρήθηκε μία εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς με ένα κύκλωμα (τρεις φάσεις) συνδεδεμένη. Στην είσοδο του υποσταθμού έχει τοποθετηθεί εκτροπείς υπέρτασης για να προστατέψει από κάποια εισερχόμενη υπέρταση και να την αποτρέψει να εισέλθει στον υποσταθμό. Έπειτα το επόμενο στοιχείο που προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης είναι ο Μ/Σ ισχύος που συνδέεται με καλώδιο ισχύος με τους ζυγούς. Στη μεριά της μέσης τάσης του Μ/Σ στα 15 kV καταλήγουν δύο κυκλώματα ένα από κάθε γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο κάθε κύκλωμα υπάρχουν δύο σετ εκτροπέων υπέρτασης, ένα για την προστασία του διακόπτη ισχύος της μέσης τάσης και ένα για τη γεννήτρια.

3.1.2 Υποσταθμός HVSS GIS 132 kV

Σε αυτό τον υποσταθμό (συστήματος) υπάρχουν πυλώνες διπλού κυκλώματος στην εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς, στο κάθε κύκλωμα υπάρχουν εκτροπείς υπέρτασης στην είσοδο του υποσταθμού από την μεριά της υψηλής τάσης 132 kV για να αποτραπούν υπερτάσεις που μπορεί να εισέρθουν στον υποσταθμό. Στη συνέχεια μετά τους ζυγούς και τον εξοπλισμό GIS, υπάρχει καλώδιο ισχύος το οποίο συνδέει τον Μ/Σ ισχύος με τους ζυγούς. Έπειτα κοντά στον Μ/Σ και από την μεριά της υψηλής 132 kV και από τη μεριά της μέσης τάσης 6.9 kV υπάρχουν εκτροπείς υπέρτασης για την προστασία του Μ/Σ.

3.1.3 Υποσταθμός HVSS AIS 400 kV

Ο υποσταθμός αυτός είναι υποσταθμός συστήματος. Σε αυτόν θεωρήθηκε μία εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς με ένα κύκλωμα (τρεις φάσεις) συνδεδεμένη. Στην είσοδο της υψηλής του υποσταθμού στα 400 kV έχουν τοποθετηθεί εκτροπείς υπέρτασης για την προστασία του υποσταθμού, στους ζυγούς των 400 kV έχουν τοποθετηθεί επιπλέον εκτροπείς υπέρτασης για μεγαλύτερη προστασία. Στον Μ/Σ ισχύος έχουν τοποθετηθεί εκτροπείς και στα τρία επίπεδα

τάσεων που υπάρχουν, δηλαδή στην υψηλή στα 400 kV και στα άλλα δύο επίπεδα στα 220 kV και στα 35 kV αντίστοιχα.

3.1.4 Υποσταθμός HVSS AIS 161 kV

Αυτός ο υποσταθμός είναι σταθμού παραγωγής και αποτελείται μία εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς μονού κυκλώματος, στην είσοδο του υπάρχουν εκτροπείς υπέρτασης ώστε να προστατέψουν τον υποσταθμό. Δίπλα στον Μ/Σ από την μεριά της υψηλής 161 kV και της μέσης τάσης 11 kV έχουν τοποθετηθεί εκτροπείς υπέρτασης για τη διασφάλιση προστασίας του Μ/Σ και επίσης εκτροπείς έχουν τοποθετηθεί κοντά στη γεννήτρια του σταθμού για να αποτραπούν υπερτάσεις.

3.2 Μοντελοποίηση

Στο κομμάτι της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα μοντέλων για όλα τα βασικά στοιχεία που αποτελούν τον εκάστοτε υποσταθμό, ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά τα μοντέλα στο ATP-EMTP σε σχέση με τον πραγματικό υποσταθμό. Αυτό έγινε για να προκύψουν όσο το δυνατόν πιο κοντινά αποτελέσματα προσομοίωσης στα αναμενόμενα πραγματικά φαινόμενα υπέρτασης από κεραυνικό πλήγμα.

3.2.1 Εναέριες γραμμές

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς αντιπροσωπεύονται από μια ακολουθία μοντέλων JMarti [15] που εξαρτώνται από τη συχνότητα, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία των πυλώνων και της γραμμής γενικότερα. Οι ηλεκτρικές παράμετροι των γραμμών μεταφοράς υπολογίστηκαν για την ειδική αντίσταση του εδάφους της περιοχή εγκατάστασης, η οποία άλλαζε ανάλογα με τον υποσταθμό.

Στο τμήμα των προσομοιωμένων γραμμών περιλαμβανόταν πολλά ανοίγματα ανάμεσα σε πυλώνες της γραμμής και το τελικό άνοιγμα προς τον υποσταθμό. Οι γραμμές τερματίστηκαν κατάλληλα με μακριές γραμμές ώστε να εξαλειφθούν οι αντανάκλασεις που δεν υπάρχουν στην πράξη.

3.2.2 Πυλώνες & πύλες εισόδου

Οι πυλώνες μοντελοποιήθηκαν ως κατακόρυφες μονοφασικές γραμμές κατανεμημένων παραμέτρων ανεξάρτητες από τη συχνότητα και χωρίς απώλειες. Στο μοντέλο αυτό η ταχύτητα διάδοσης του κύματος λήφθηκε ίση με το 85% της ταχύτητας του φωτός [16] και η κυματική αντίσταση [16], [17] προσεγγίζοντας τους πυλώνες διπλού κυκλώματος ως κώνους και του μονού κυκλώματος ως κυλίνδρους.

Οι πύλες εισόδου των υποσταθμών μοντελοποιήθηκαν ως γραμμές κατανεμημένων παραμέτρων χωρίς απώλειες, μονοφασικές και ανεξάρτητες από τη συχνότητα. Η ταχύτητα διάδοσης της υπέρτασης λήφθηκε ίση με το 85% [16] της ταχύτητας του φωτός και η κυματική αντίσταση σύμφωνα με το [16]. Οι πυλώνες τερματιστήκαν από την αντίσταση γείωσης χαμηλής συχνότητας [18], [19].

3.2.3 Διάσπαση της μόνωσης

Η διάσπαση της μόνωσης των αλυσοειδών μονωτήρων γραμμής μεταφοράς μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το στοιχείο LDM type-94 [20], [21] με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να αναπαρασταθεί με βάση πολλά μοντέλα λήντερ της βιβλιογραφίας λαμβάνοντας υπόψη το ρεύμα προεκκένωσης που ρέει στο διάκενο κατά τη φάση ανάπτυξης λήντερ.

Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ανάπτυξης του λήντερ που υιοθετήθηκε από τη CIGRE [13] με παραμέτρους για αρνητική διάσπαση.

3.2.4 Καλώδια ισχύος

Τα καλώδια ισχύος προσομοιώθηκαν από το μοντέλο Bergeron [22] με παραμέτρους που υπολογίζονται στα 50 kHz.

3.2.5 Εκτροπείς υπέρτασης

Οι εκτροπείς υπερτάσεων προσομοιώθηκαν από το μοντέλο Pinceti και Giannettoni [23], [24] που εξαρτάται από τη συχνότητα.

3.2.6 Ζυγοί GIS & Ζυγοί AIS

Οι ζυγοί GIS προσομοιώθηκαν ως γραμμές κατανεμημένων παραμέτρων χωρίς απώλειες με κυματική αντίσταση 75 Ω [25]. Ζυγοί AIS, αγωγοί και μήκη μεγαλύτερα από 3 m μοντελοποιήθηκαν ως γραμμές χωρίς απώλειες με κυματική αντίσταση 400 Ω, ενώ για μήκη μικρότερα από 3 m χρησιμοποιήθηκαν αυτεπαγωγές 1 μH/m [25].

3.2.7 Αυτομετασχηματιστές & Μετασχηματιστές

Οι αυτομετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές ισχύος μοντελοποιήθηκαν από ένα κύκλωμα Π που αποτελείται από χωρητικότητες μαζί με ένα μοντέλο BCTRAN [26].

3.2.8 Πλήγμα κεραυνού

Το πλήγμα κεραυνού προσομοιώθηκε από μια πηγή ρεύματος παράλληλη με μια αντίσταση 400 Ω για αναστροφή διάσπασή μόνωσης και 1000 Ω για σφάλμα θωράκισης. Έτσι προσομοιώνεται και η αντίσταση του καναλιού του κεραυνού [27].

Για τις κυματομορφές CIGRE [13] χρησιμοποιήθηκε μια πηγή ρεύματος τύπου CIGRE 15, που παράγει ρεύμα με προς τα πάνω κοίλο μέτωπο.

3.2.9 Ανάστροφη διάσπαση & Σφάλμα θωράκισης

Σε προσομοιώσεις ανάστροφης διάσπασης χρησιμοποιήθηκαν 200 kA ως μέγιστο ρεύμα κεραυνού, ενώ το μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης χρησιμοποιήθηκε για πλήγματα σε αγωγούς φάσης. Αυτό το μέγιστο ρεύμα υπολογίστηκε για κάθε γραμμή μεταφοράς με βάση το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο του IEEE 1243 [28].

3.3 Περιπτώσεις προσομοίωσης

Σε αυτή την πτυχιακή προσομοιώθηκαν κεραυνικά πλήγματα με βάση την κυματομορφή της CIGRE για να ελεγχθεί τι υπερτάσεις προκύπτουν από οδεύοντα κύματα μέσα στον εκάστοτε υποσταθμό και κατά πόσο οι εκτροπείς υπέρτασης μπορούν να προστατέψουν τον εξοπλισμό ώστε αυτές οι υπερτάσεις να μην προκαλέσουν ζημία και διακοπές τροφοδοσίας.

Στους υποσταθμούς GIS και AIS που εξετάστηκαν, προσομοιώθηκαν περιπτώσεις για ανάστροφη διάσπαση μόνωσης λόγω πλήγματος στον πυλώνα ή τον αγωγό προστασίας (backflashover) με ρεύμα 200 kA και για τους τέσσερις υποσταθμούς που εξετάστηκαν. Για το σφάλμα θωράκισης (shielding failure), το μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης είναι διαφορετικό ρεύμα για κάθε υποσταθμό αφού διαφέρει η γεωμετρία των εισερχόμενων γραμμών μεταφοράς:

- HVSS 1 400 kV GIS με ρεύμα 10.3 kA
- HVSS 2 132 kV GIS με ρεύμα 20.9 kA
- HVSS 3 400 kV AIS με ρεύμα 15.2 kA
- HVSS 4 161 kV AIS με ρεύμα 4.9 kA.

Τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής κεραυνού CIGRE όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι τα εξής:

- Χρόνος μετώπου t_{d30} (ή αλλιώς t_f)
- Μέγιστη κλίση S_m
- Χρόνος ουράς t_h .

Τροποποιώντας αυτές τις παραμέτρους για τα ποσοστά που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (Πίνακες 2 και 3, 95%, 75%, 50%, 25%, 5%) παρατηρήθηκε διαφορετική μεταβολή με τον χρόνο στο κεραυνικό ρεύμα. Τροποποιήθηκε η κάθε παράμετρος μεμονωμένα με τις υπόλοιπες δύο να διατηρούνται σταθερές. Για παράδειγμα τροποποιήθηκε η παράμετρος t_{d30} στο 5% οι παράμετροι S_m και t_h ήταν σταθερές στο 50% και το t_{d30} μεταβαλλόταν χωρίς να

αλλάξουν οι άλλες δυο. Αυτό έγινε αντίστοιχα και για το S_m κρατώντας παράλληλα τις άλλες δυο παραμέτρους στο 50% και κατόπιν και για το t_h σε αντιστοιχία.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 HVSS1 Υποσταθμός GIS 400 kV

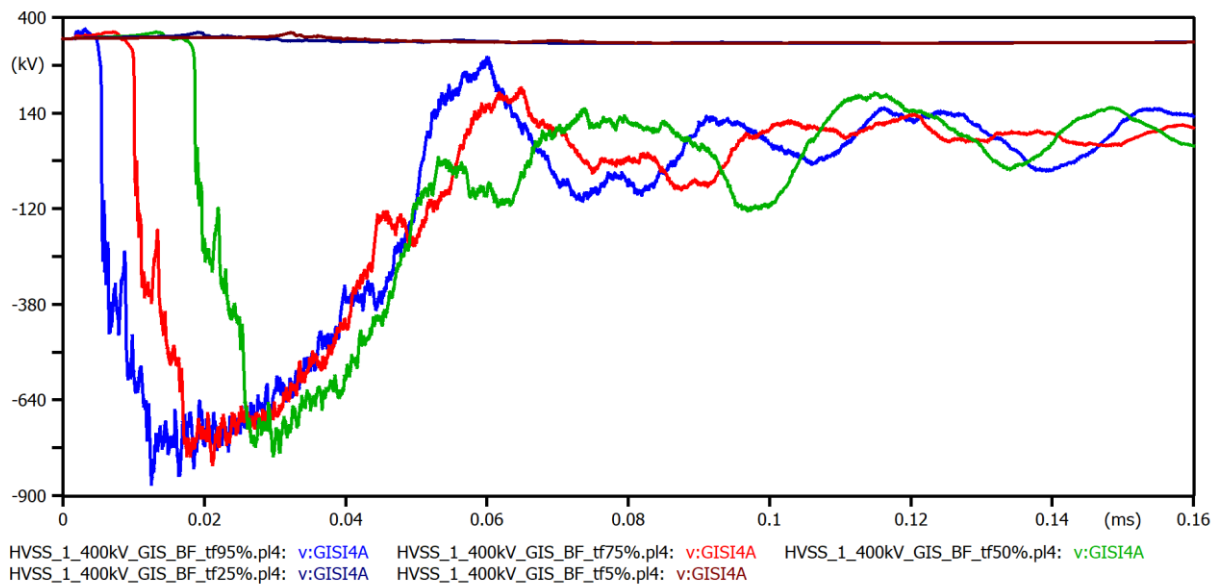
4.1.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα (HVSS1)

Προσομοιώνοντας κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα έντασης 200 kA αποθηκεύτηκαν κάποιες κυματομορφές στη φάση A από τις τρεις φάσεις του συστήματος για κάθε ποσοστό του t_f , S_m και t_h στον πρώτο κόμβο στην είσοδο του υποσταθμού για να ελεγχθεί η κυματομορφή της υπέρτασης που εισέρχεται στον υποσταθμό αλλάζοντας το ποσοστό από 95% σε 5% σε βήματα. Σε περίπτωση που δεν γίνει διάσπαση μόνωσης της γραμμής μεταφοράς δεν υπάρχει κάποια υπέρταση και η τάση λειτουργία στον κόμβο είναι η ονομαστική στην περίπτωση αυτή (φασική τάση με κάποιες μικρές επαγόμενες τάσεις να υπερτίθενται λόγω του κεραυνού).

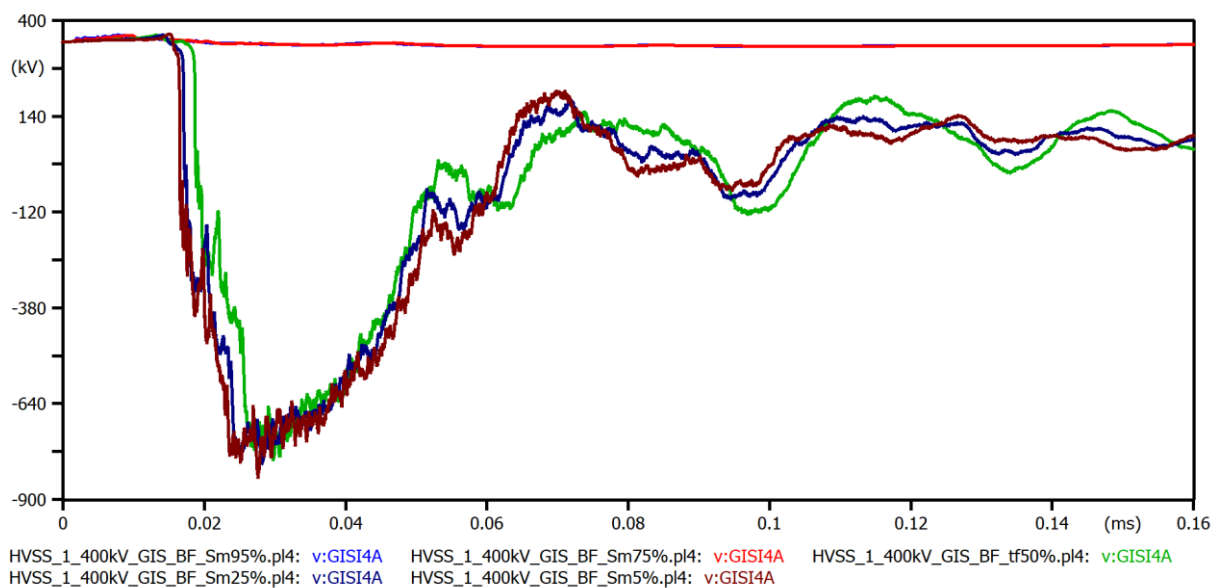
Στην Κυματομορφή 1 φαίνεται πως αυξάνοντας τον χρόνο μετώπου t_f , ο χρόνος μετώπου της υπέρτασης είναι περίπου ο ίδιος σε όλες τις περιπτώσεις γιατί εξαρτάται από την ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς που γίνεται ακαριαία. Στο 95% (γρηγορότερη κυματομορφή) η υπέρταση γίνεται μέγιστη και γίνεται η διάσπαση πιο γρήγορα. Στα ποσοστά 25% και 5% η μόνωση δεν διασπάται άρα δεν υπάρχει υπέρταση.

Στην Κυματομορφή 2 που περιγράφει τη μέγιστη κλίση S_m φαίνεται ότι κατά την αύξηση του S_m εμφανίζεται μεγαλύτερο μέγιστο αλλά σε κοντινό χρόνο το ένα με το άλλο. Η διάσπαση γίνεται την ίδια περίπου χρονική στιγμή. Στα ποσοστά 95% και 75% (μικρές κλίσεις) δεν γίνεται διάσπαση μόνωσης.

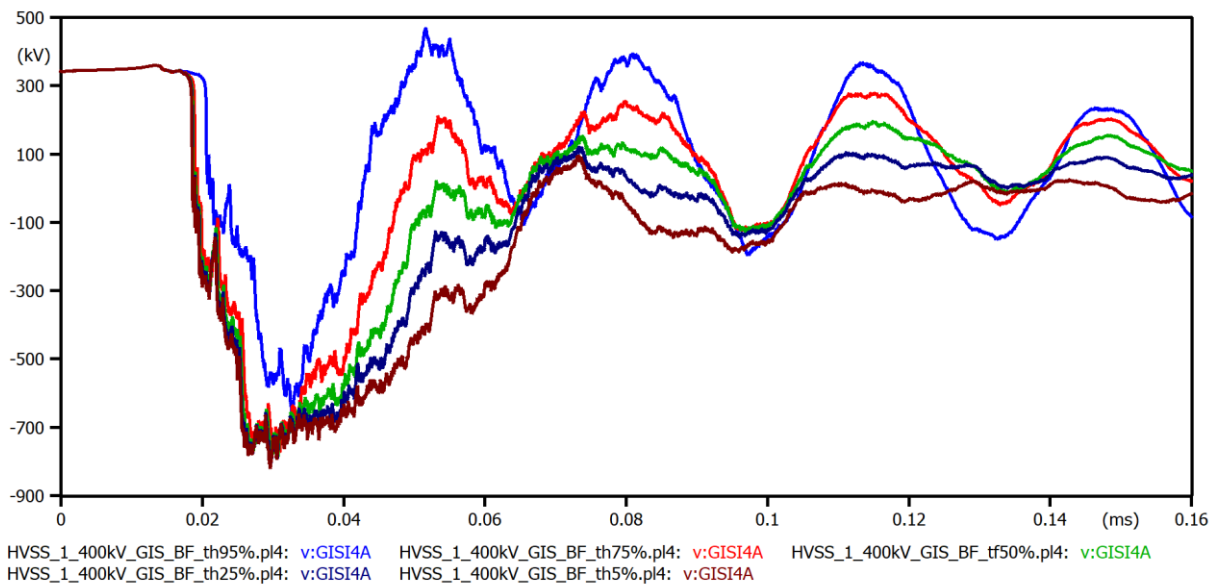
Όσον αναφορά την Κυματομορφή 3 που δείχνει τον χρόνο ουράς t_h φαίνεται ότι στο ποσοστό 95% έχει μία αποσβεννύμενη ταλάντωση η οποία εξομαλύνεται αυξάνοντας τον χρόνο της ουράς. Όλα τα ποσοστά έχουν ίδιο χρόνο μετώπου εκτός από το 95% το οποίο παρουσιάζει και την μεγαλύτερη ταλάντωση. Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ουρά.



Κυματομορφή 1: HVSS1 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τον χρόνο μετώπου t_f – Πλήγμα στον πυλώνα



Κυματομορφή 2: HVSS1 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη μέγιστη κλίση S_m – Πλήγμα στον πυλώνα

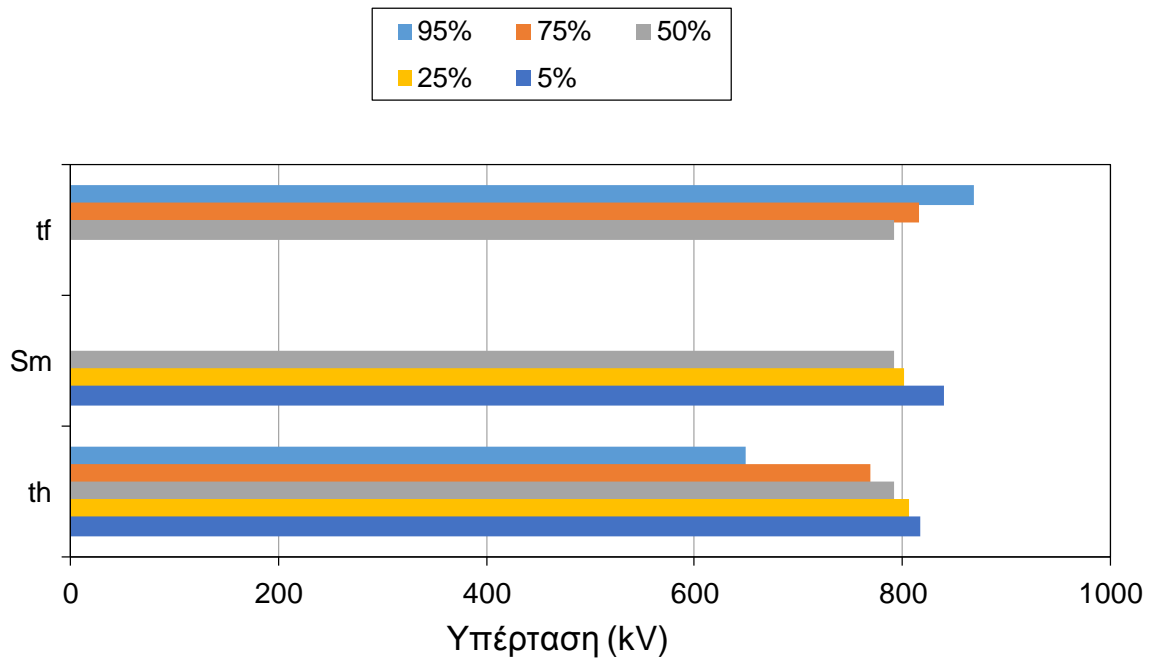


Κυματομορφή 3: HVSS1 Υπερτάσεις προτού κόμβου για τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h – Πλήγμα στον πυλώνα

4.1.1.1 Ραβδογράμματα μέγιστων υπερτάσεων κόμβων GISI4A, GIS01A, TRHA (HVSS1)

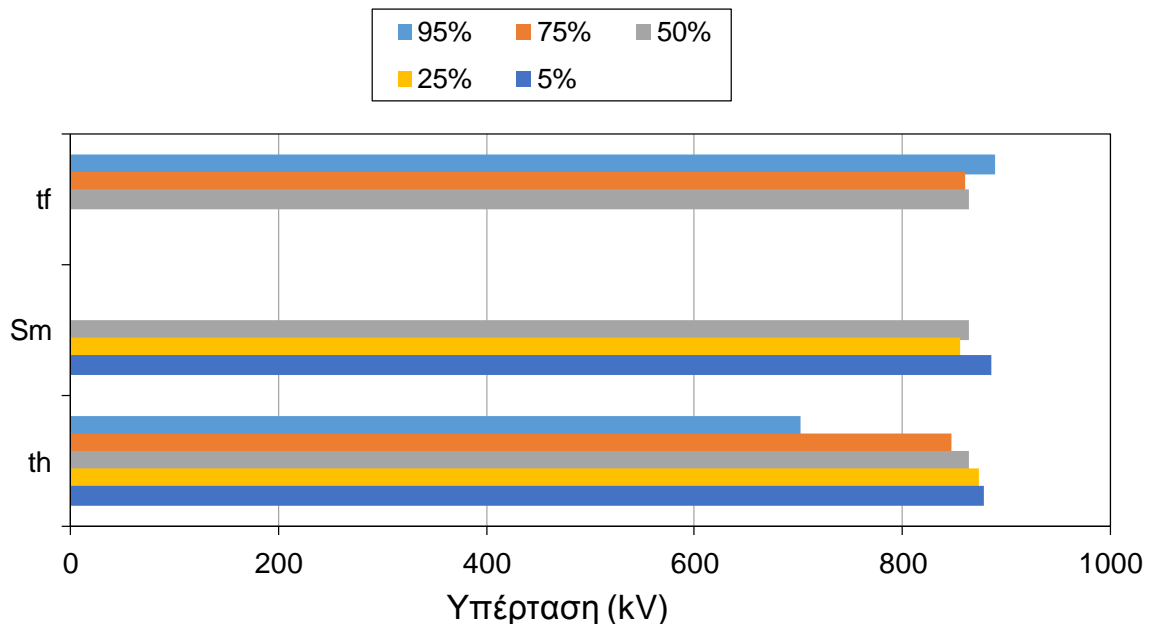
Στα παρακάτω ραβδογράμματα (1 έως 3) απεικονίζεται η μέγιστη τιμή υπέρτασης σε τρία σημεία του υποσταθμού στην υψηλή τάση. Αρχικά θα παρουσιαστούν οι τιμές στον πρώτο κόμβο στην είσοδο του υποσταθμού GISI4A, έπειτα στον κόμβο του καλωδίου σύνδεσης του υποσταθμού GIS01A και ακριβώς πριν τον μετασχηματιστή TRHA.

Αρχικά όπως φαίνεται για τον κόμβο εισόδου GISI4A του υποσταθμού για τον χρόνο μετώπου η μέγιστη υπέρταση είναι στο 95% και όσο αυξάνεται το ποσοστό η τιμή μειώνεται μέχρι εκεί που δεν γίνεται διάσπαση (25% και 5%). Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει για τη μέγιστη κλίση και τον χρόνο ουράς, η υπέρταση στον υποσταθμό αυξάνεται καθώς τα S_m και t_h αυξάνονται.



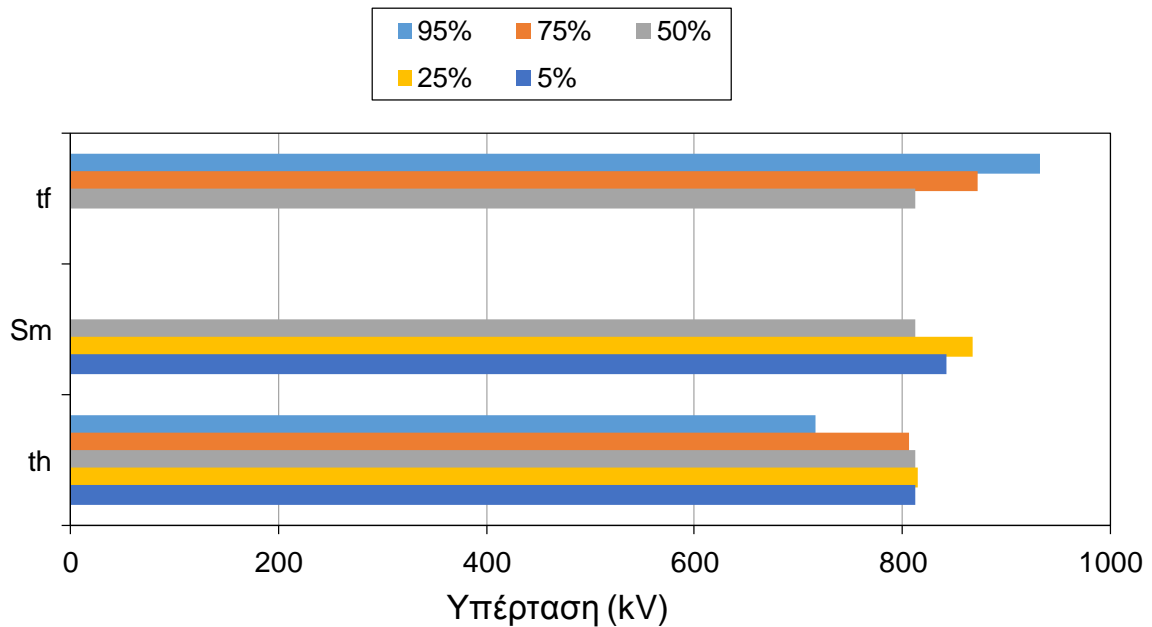
Ραβδόγραμμα 1: Είσοδος HVSS1, κόμβος GIS14A – Πλήγμα στον πυλώνα

Στον κόμβο του καλωδίου σύνδεσης GIS01A φαίνεται ότι για τον χρόνο μετώπου t_f παρουσιάζει η υπέρταση μέγιστη τιμή στο 95%, ελάχιστη στο 75% χωρίς να φθίνει μονότονα όπως στον προηγούμενο κόμβο, η μέγιστη κλίση παρουσιάζει και πάλι μέγιστη τιμή στο 5%, αλλά ελάχιστη στο 25%, ενώ για με τον χρόνο ουράς φαίνεται ότι η τιμή της υπέρτασης αυξάνεται καθώς η ουρά αυξάνεται.



Ραβδόγραμμα 2: HVSS1 Τιμές κόμβου καλωδίου GIS01A – Πλήγμα στον πυλώνα

Στον κόμβο πριν τον μετασχηματιστή TRHA φαίνεται για τον χρόνο μετώπου ότι και στον κόμβο GISI4A. Δηλαδή, αυξάνοντας τη διάρκεια μετώπου η υπέρταση μειώνεται. Στη μέγιστη κλίση εδώ μπορεί να παρατηρηθεί ότι τη μεγαλύτερη υπέρταση την παρουσίασε στο 25% όπως και στον χρόνο ουράς με τις τιμές της υπέρτασης από 75% έως 5% να είναι πολύ κοντά ως τιμές.



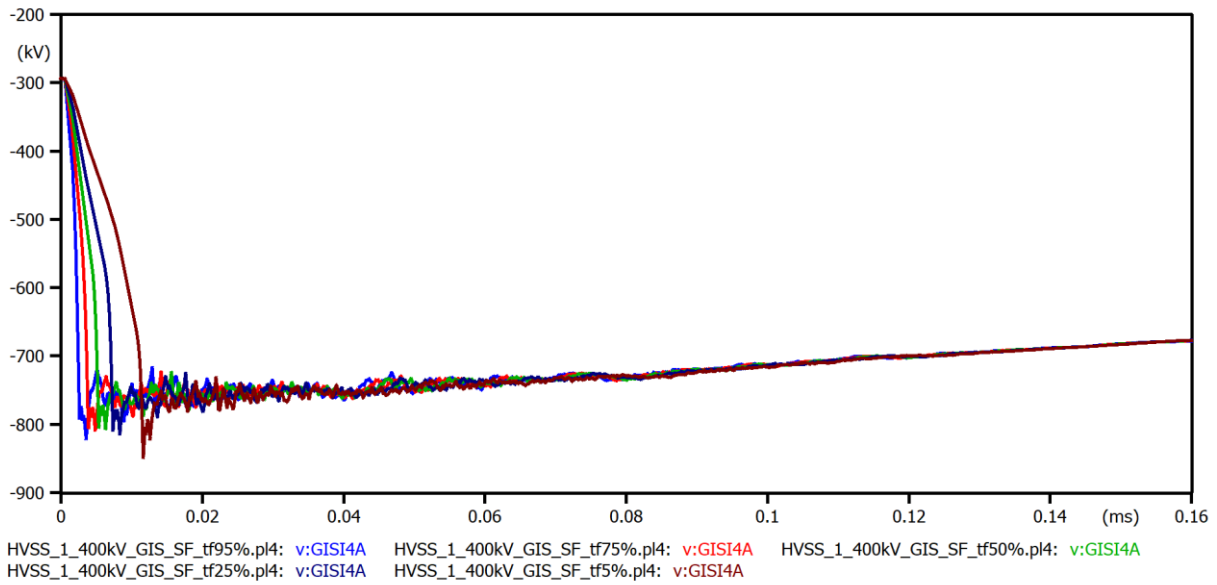
Ραβδόγραμμα 3: HVSS1 Τιμές κόμβου μετασχηματιστή TRHA – Πλήγμα στον πυλώνα

4.1.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (HVSS1)

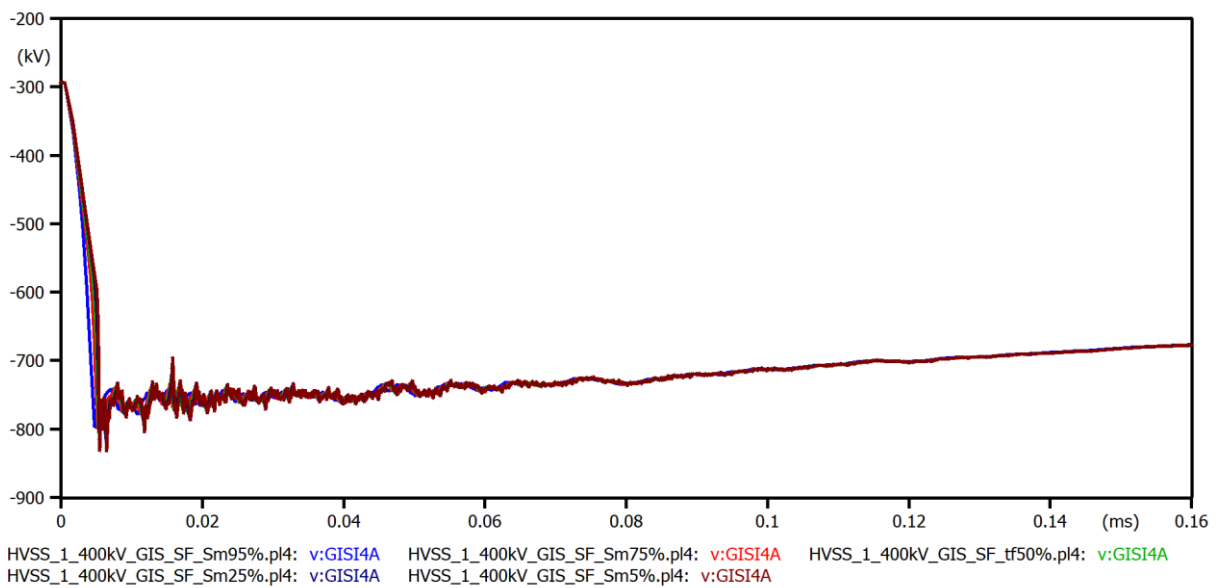
Τώρα θα προσομοιωθεί στον ίδιο υποσταθμό κεραυνικό πλήγμα 10.296 kA αυτή τη φορά απευθείας στον αγωγό φάσης το οποίο μπορεί να προκληθεί από σφάλμα θωράκισης στον πυλώνα αν η ένταση του κεραυνού είναι μικρή.

Στην Κυματομορφή 4 για τον χρόνο μετώπου t_f φαίνεται ότι οι υπερτάσεις είναι παρόμοιες σε μορφή για όλες τις τιμές του χρόνου t_f . Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στον μεγάλο χρόνο μετώπου.

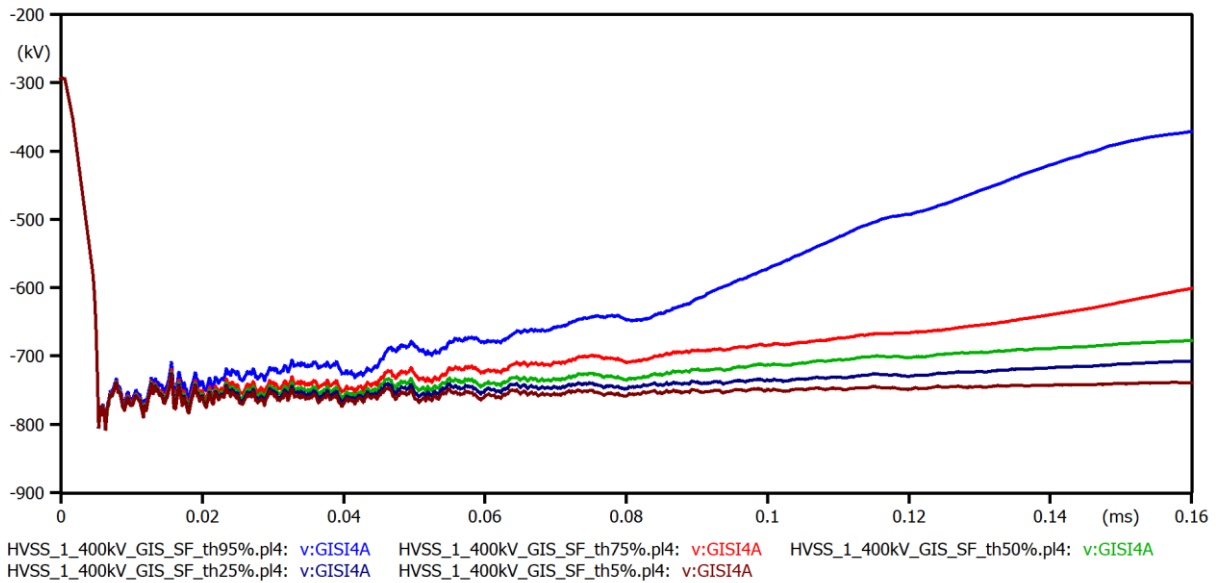
Στην Κυματομορφή 5 για τη μέγιστη κλίση S_m φαίνεται ότι και πάλι οι υπερτάσεις είναι παρόμοιες σε μορφή, ενώ στην Κυματομορφή 6 οι υπερτάσεις διαφέρουν στην ουρά. Στις Κυματομορφές 4 έως 6 φαίνεται ότι η ουρά τείνει να φθίνει χωρίς ταλαντώσεις (σε αντίθεση με το κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα) και μάλιστα φθίνει σχεδόν γραμμικά στις περισσότερες περιπτώσεις.



Κυματομορφή 4: HVSS1 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τον χρόνο μετώπου t_r – Σφάλμα θωράκισης



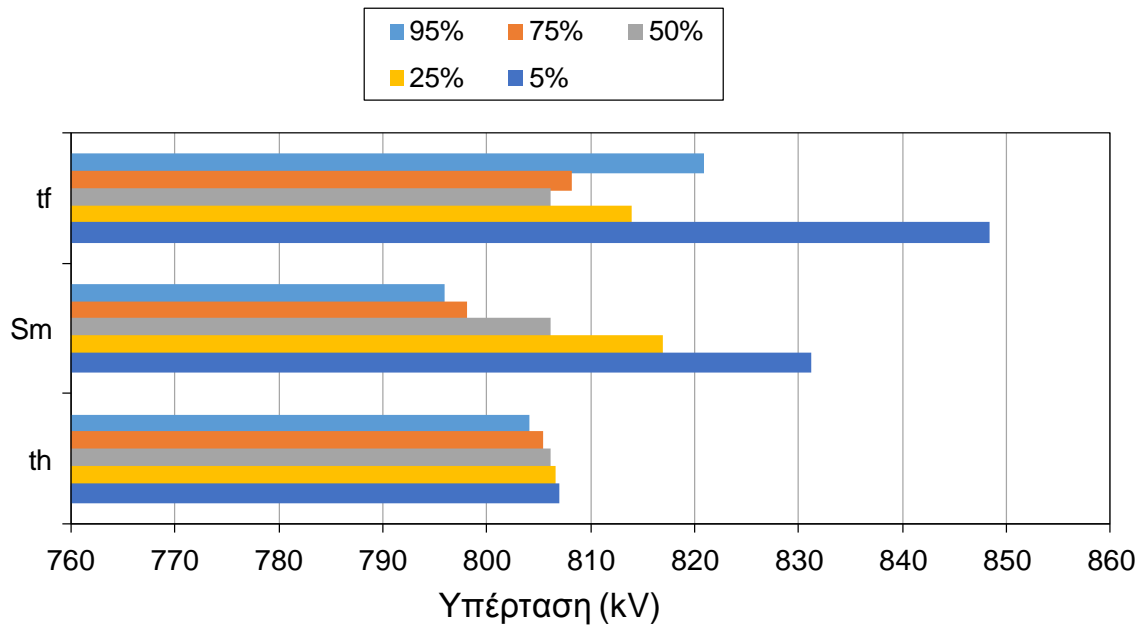
Κυματομορφή 5: HVSS1 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη μέγιστη κλίση S_m – Σφάλμα θωράκισης



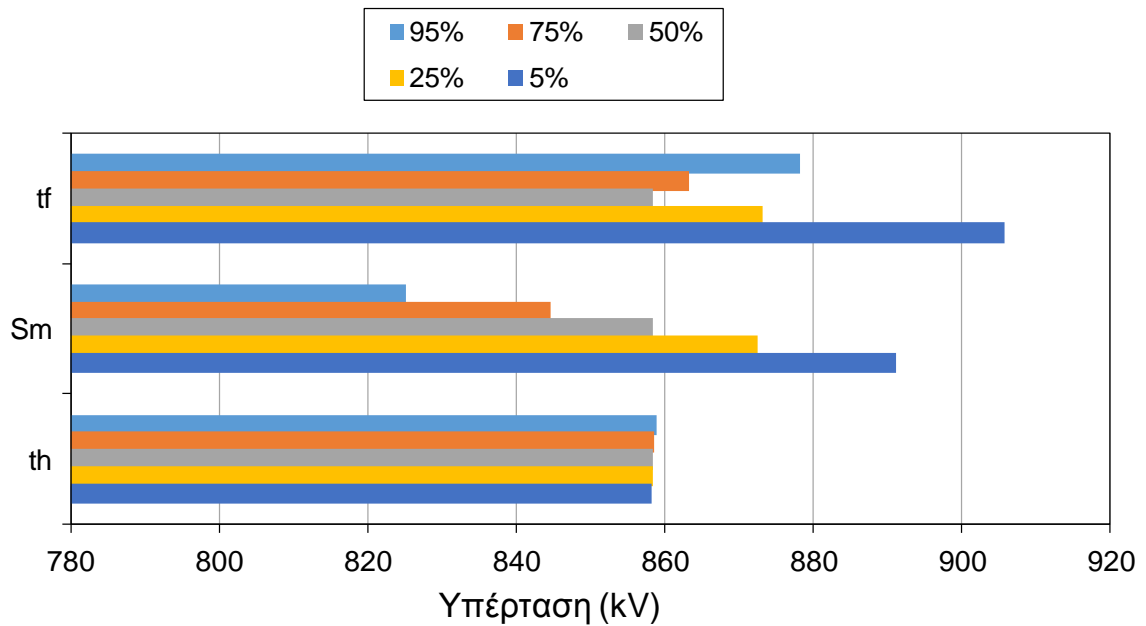
Κυματομορφή 6: HVSS1 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h – Σφάλμα θωράκισης

4.1.2.1 Ραβδογράμματα μέγιστων υπερτάσεων κόμβων GISI4A, GIS01A, TRHA (HVSS1)

Στον πρώτο κόμβο GISI4A φαίνεται ότι για τον χρόνο μετώπου η μέγιστη τιμή υπέρτασης δεν φθίνει όπως στη διάσπαση μόνωσης με την αύξηση του χρόνου αλλά αντίθετα παρουσιάζει μέγιστη τιμή στο 5%, την αμέσως επόμενη στο 95%, στο 25% και 75% με ελάχιστη τιμή στο 50% και στον κόμβο GISI4A αλλά και στον κόμβο του καλωδίου σύνδεσης GIS01A. Στη μέγιστη κλίση είναι εμφανές ότι αυξάνοντας την κλίση η τιμή αυξάνεται και αυτό συμβαίνει και στους τρεις κόμβους. Ο χρόνος ουράς από την άλλη παρουσιάζει αύξηση της μέγιστης τιμής κατά την αύξησή του στον κόμβο GISI4A και στον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA. Στον κόμβο του καλωδίου συμπεριφέρεται αντίθετα, ωστόσο οι διαφορές για τον t_h είναι γενικά μικρές.

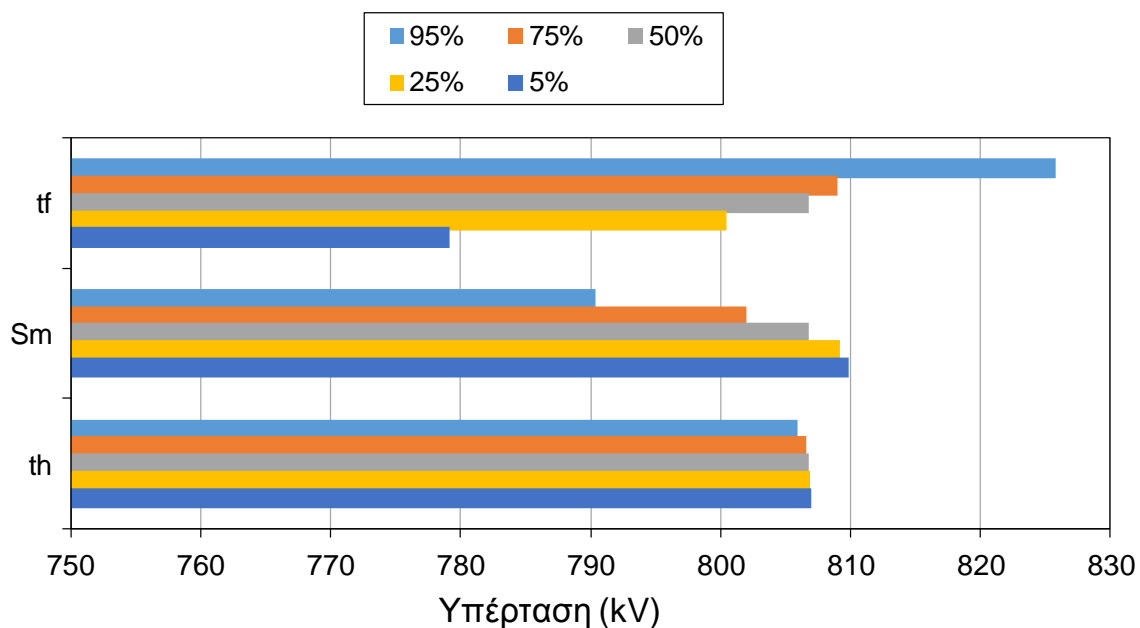


Ραβδόγραμμα 4: HVSS1 Τιμές κόμβου εισόδου υποσταθμού GIS14A – Σφάλμα θωράκισης



Ραβδόγραμμα 5: HVSS1 Τιμές κόμβου καλωδίου σύνδεσης GIS01A – Σφάλμα θωράκισης

Επιπλέον στον κόμβο του μετασχηματιστή φαίνεται σε σχέση με τους προηγούμενους δυο κόμβους ότι ο χρόνος μετώπου t_f κατά την αύξησή του, οδηγεί σε μέγιστη υπέρταση στο 95% και η υπέρταση φθίνει κατά την αύξηση αυτή.



Ραβδόγραμμα 6: HVSS1 Τιμές κόμβου μετασχηματιστή TRHA – Σφάλμα θωράκισης

4.2 Υποσταθμός GIS 132 kV (HVSS2)

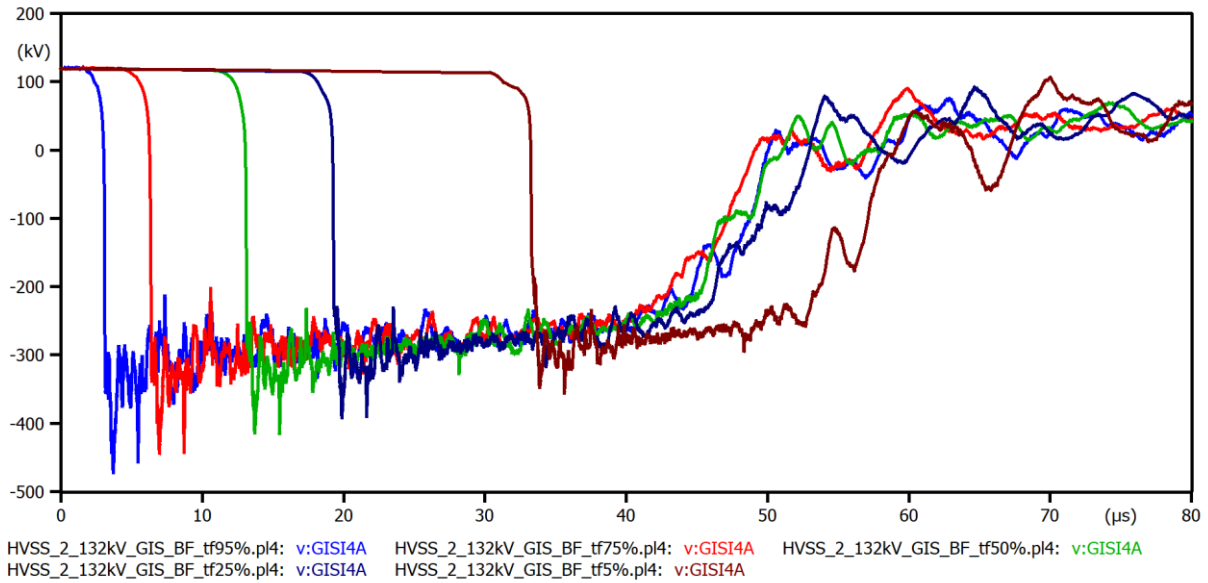
4.2.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα (HVSS2)

Σε αυτή την προσομοίωση για την περίπτωση ανάστροφης διάσπασης της μόνωσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με κεραυνικό πλήγμα 200 kA στον υποσταθμό GIS HVSS2, δηλαδή αυτή τη φορά διαφορετικού επιπέδου τάσης, ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση αλλαγής του ποσοστού καταγράφηκαν κυματομορφές του πρώτου κόμβου στην είσοδο του υποσταθμού για να διερευνηθεί σε όλες τις περιπτώσεις πώς διαμορφώνονται οι υπερτάσεις.

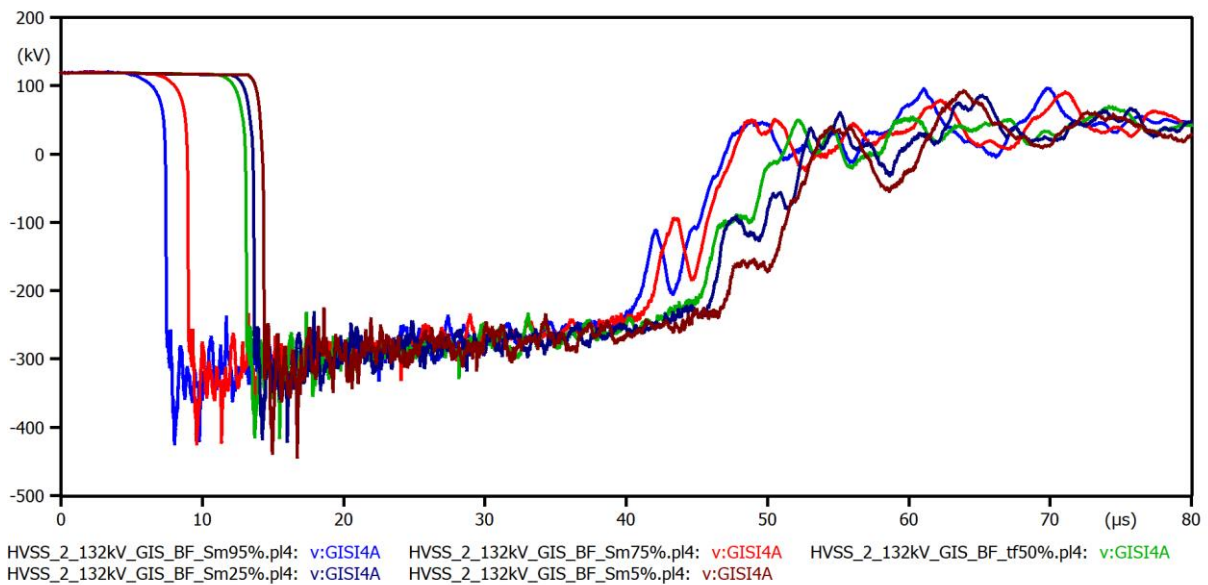
Για αύξηση του χρόνου μετώπου t_f στην Κυματομορφή 7, αργεί να γίνει διάσπαση της μόνωσης για την εμφάνιση υπέρτασης. Ο χρόνος μετώπου της υπέρτασης είναι περίπου ο ίδιος, παρουσιάζει δύο μέγιστα και ο χρόνος ουράς όπως φαίνεται μειώνεται κατά την αύξηση του ποσοστού παρουσιάζοντας ταλαντώσεις. Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στο μικρότερο t_f .

Για τη μέγιστη κλίση S_m στην Κυματομορφή 8 φαίνεται ότι με την αύξησή της, αυξάνεται ο χρόνος διάσπασης της μόνωσης, υπάρχουν πάλι δύο μέγιστα περίπου ίδιο χρόνο ουράς παρουσιάζοντας μια ταλάντωση. Η μέγιστη υπέρταση αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή κλίσης.

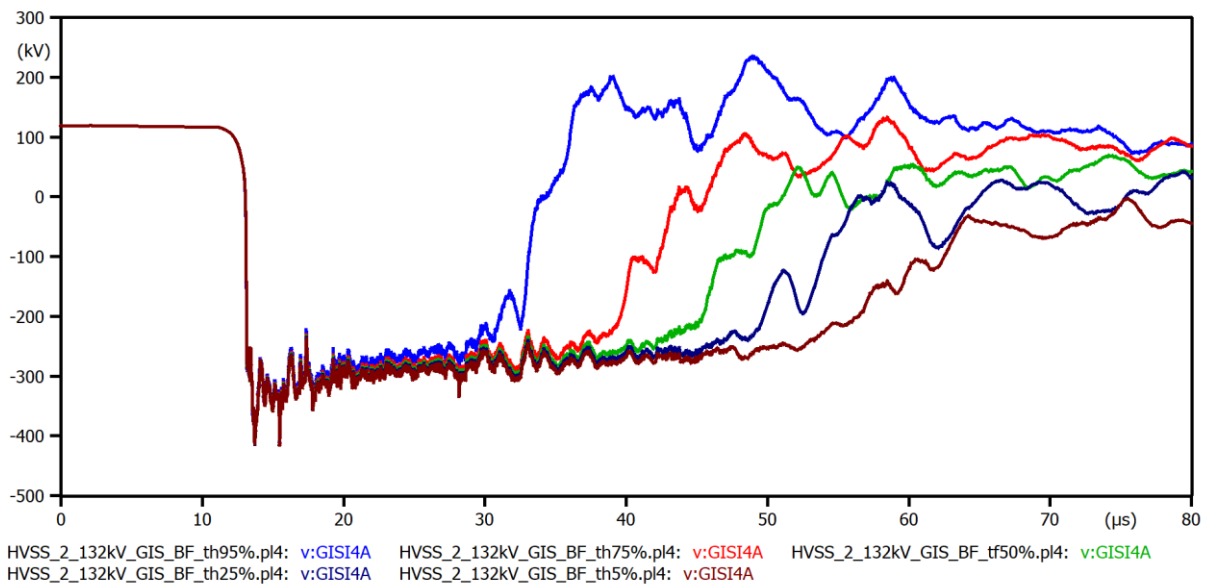
Όσον αναφορά το χρόνο ουράς t_h στην Κυματομορφή 9 φαίνεται ότι ο χρόνος μετώπου είναι ο ίδιος, παρουσιάζει διπλό μέγιστο και αυξάνοντας τη διάρκεια της ουράς λαμβάνεται μια πιο μεγάλη υπέρταση στο 5% σε διάρκεια από ότι στο 95%.



Κυματομορφή 7: HVSS2 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τον χρόνο μετώπου t_r – Πλήγμα στον πυλώνα



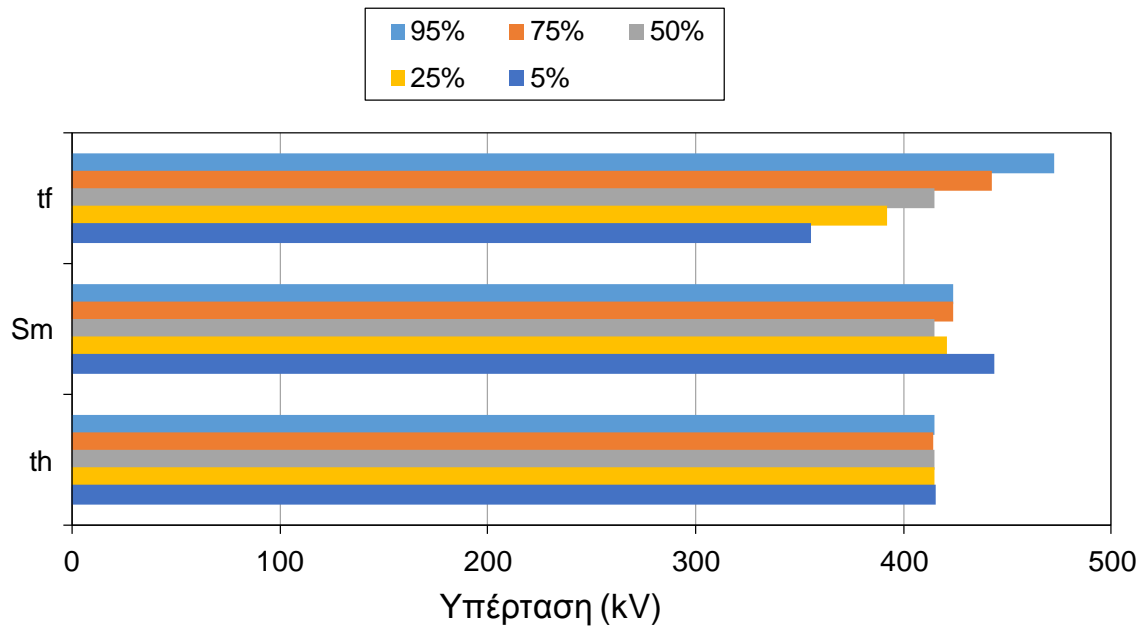
Κυματομορφή 8: HVSS2 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη μέγιστη κλίση S_m – Πλήγμα στον πυλώνα



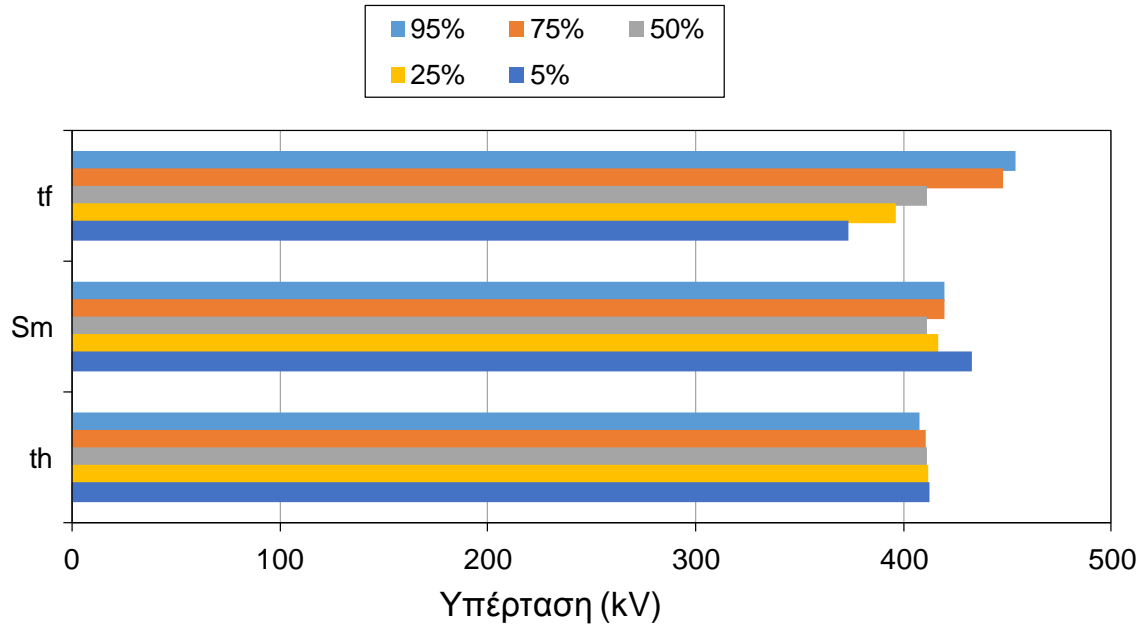
Κυματομορφή 9: HVSS2 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h – Πλήγμα στον πυλώνα

4.2.1.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων GISI4A, GIS01A, TRH1A (HVSS2)

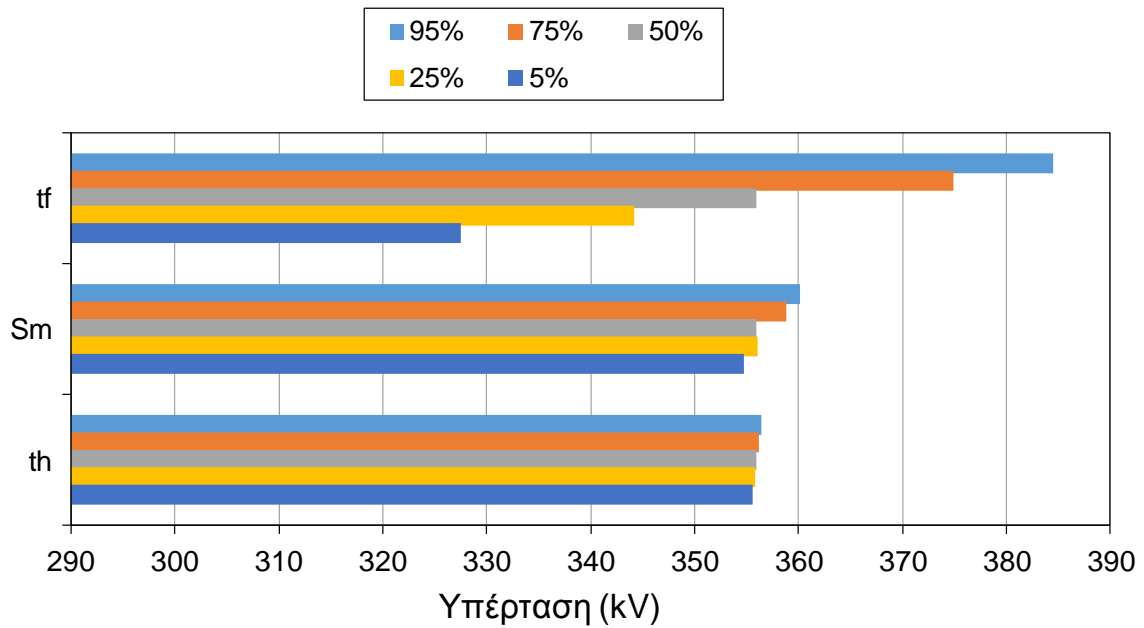
Στα ραβδογράμματα των κόμβων εισόδου GISI4A, καλωδίου σύνδεσης GIS01A και μετασχηματιστή TRH1A φαίνεται ότι και στους τρεις κόμβους αυξάνοντας τον χρόνο μετώπου t_f η μέγιστη τιμή υπέρτασης μειώνεται. Πιο έντονη μείωση υπάρχει στον Μ/Σ. Στη μέγιστη κλίση S_m φαίνεται ότι στον κόμβο GISI4A και GIS01A, στο 95% και 75% έχει περίπου ίδια τιμή υπέρτασης, στο 50% ελάχιστη και όσο προσεγγισθεί το 5% αυξάνεται η τιμή με μέγιστη στο 5%, στον κόμβο του μετασχηματιστή TRH1A μόνο παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά αφού κατά την αύξηση του S_m η τιμή μειώνεται. Όσον αφορά τον χρόνο ουράς t_h φαίνεται ότι στον κόμβο GISI4A όσο αυξάνεται το ποσοστό η μέγιστη τιμή δεν αλλάζει αισθητά. Στον κόμβο του καλωδίου σύνδεσης GIS01A φαίνεται μια αυξητική τάση στην τιμή κατά την αύξηση του t_h , ενώ στον κόμβο του μετασχηματιστή TRH1A φαίνεται ότι κατά την αύξηση του t_h η τιμή της υπέρτασης μειώνεται.



Ραβδόγραμμα 7: HVSS2 Τιμές κόμβου εισόδου του υποσταθμού GIS14A – Πλήγμα στον πυλώνα



Ραβδόγραμμα 8: HVSS2 Τιμές κόμβου καλωδίου σύνδεσης GIS01A – Πλήγμα στον πυλώνα



Ραβδόγραμμα 9: HVSS2 Τιμές κόμβου μετασχηματιστή TRH1A – Πλήγμα στον πυλώνα

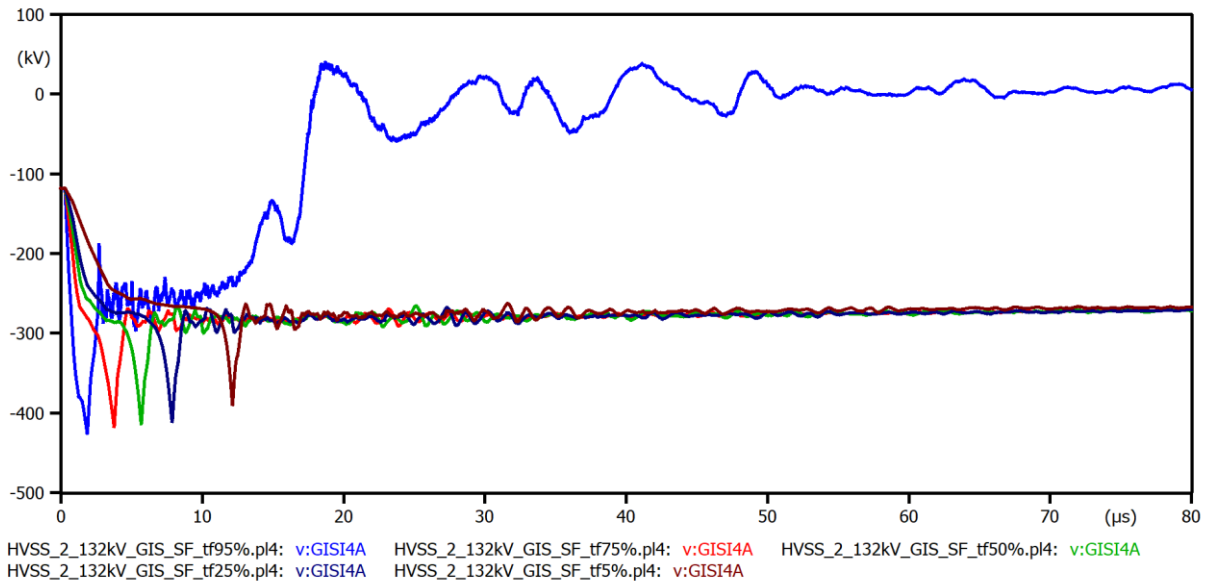
4.2.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (HVSS2)

Εξετάζεται αυτή τη φορά στον ίδιο υποσταθμό την περίπτωση σφάλματος θωράκισης και κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης με ένταση 20.872 kA .

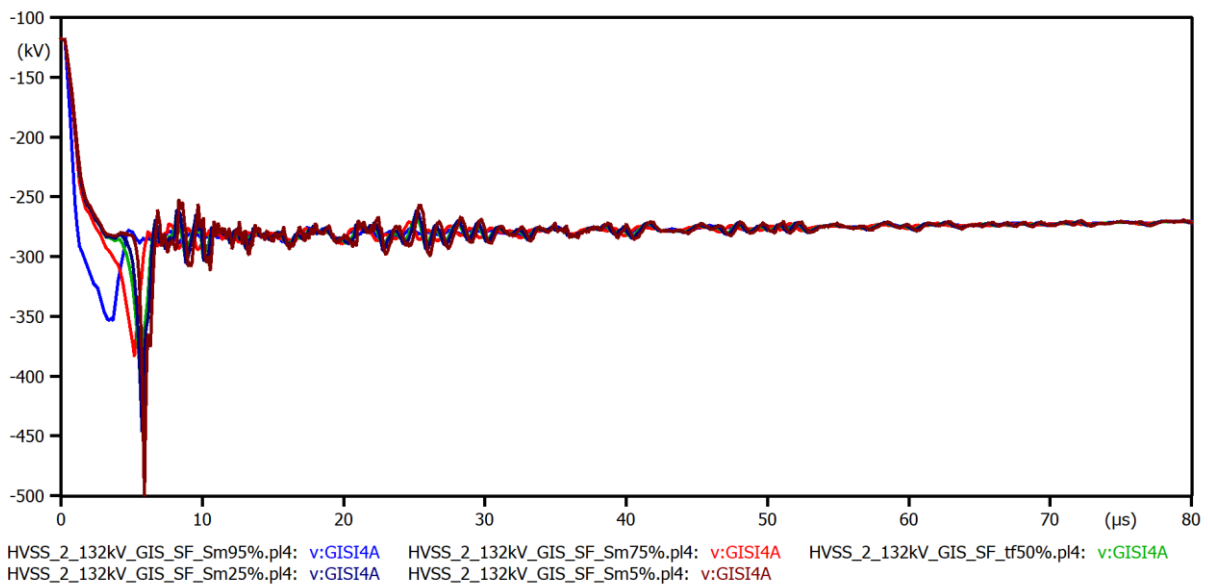
Στην Κυματομορφή 10 φαίνεται ότι αυξάνοντας τον χρόνο μετώπου t_f του κεραυνικού ρεύματος λαμβάνεται ο ίδιος χρόνος μετώπου και μικρότερη υπέρταση. Όσον αναφορά την ουρά της υπέρτασης φαίνεται στο 95% ότι μετά το μέτωπο παρουσιάζει μια μικρή αυξομείωση γύρω από μια μέση τιμή υπέρτασης και μια εξασθενούσα ταλάντωση στην ουρά, ενώ στα υπόλοιπα εμφανίζεται μεγαλύτερη τάση και χρόνο ουράς. Αυτό συμβαίνει γιατί στο 95% διασπάστηκε η μόνωση της γραμμής και μέρος του κεραυνικού ρεύματος ρέει προς τη γείωση μέσω του πυλώνα.

Στην Κυματομορφή 11 αυξάνοντας τη μέγιστη κλίση S_m φαίνεται ότι η ουρά είναι ίδιας μορφής, τιμής και χρόνου και περίπου ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Στην περίπτωση του μετώπου της υπέρτασης φαίνεται ότι στο 5% η υπέρταση παρουσιάζει το μεγαλύτερο και πιο απότομο μέτωπο σε σχέση με τα υπόλοιπα.

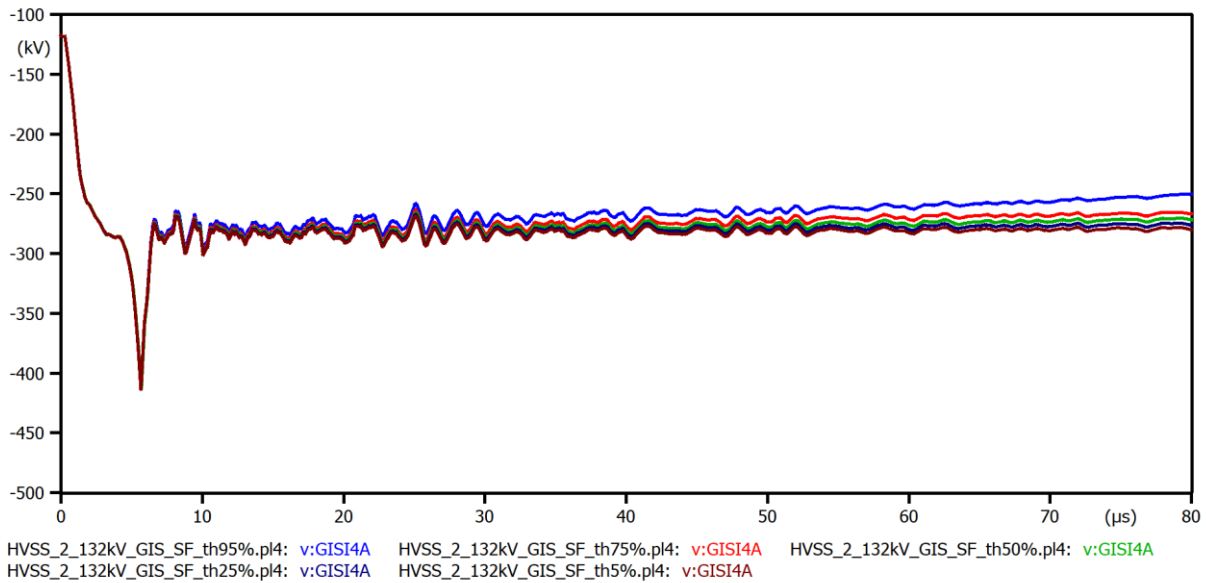
Στην Κυματομορφή 12 φαίνεται ότι για κάθε αύξηση στον χρόνο ουράς t_h βρέθηκε ίδιος χρόνος και τιμή μετώπου και μία αυξητική τάση στην ένταση και στο χρόνο ουράς χωρίς να παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη ταλάντωση.



Κυματομορφή 10: HVSS2 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τον χρόνο μετώπου t_f – Σφάλμα θωράκισης



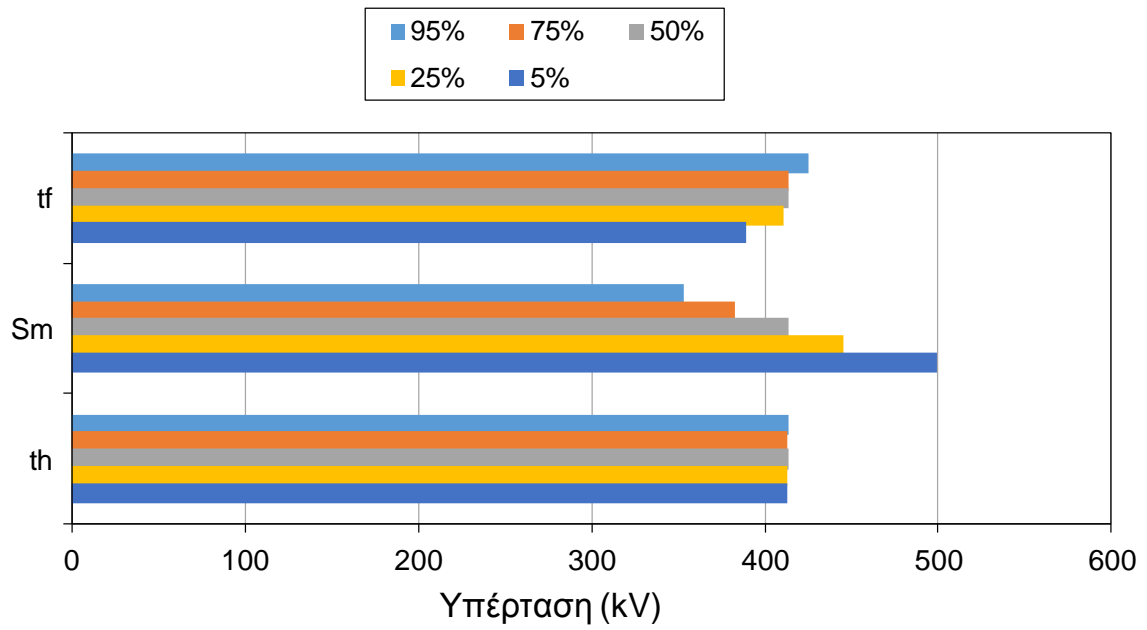
Κυματομορφή 11: HVSS2 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη μέγιστη κλίση S_m – Σφάλμα θωράκισης



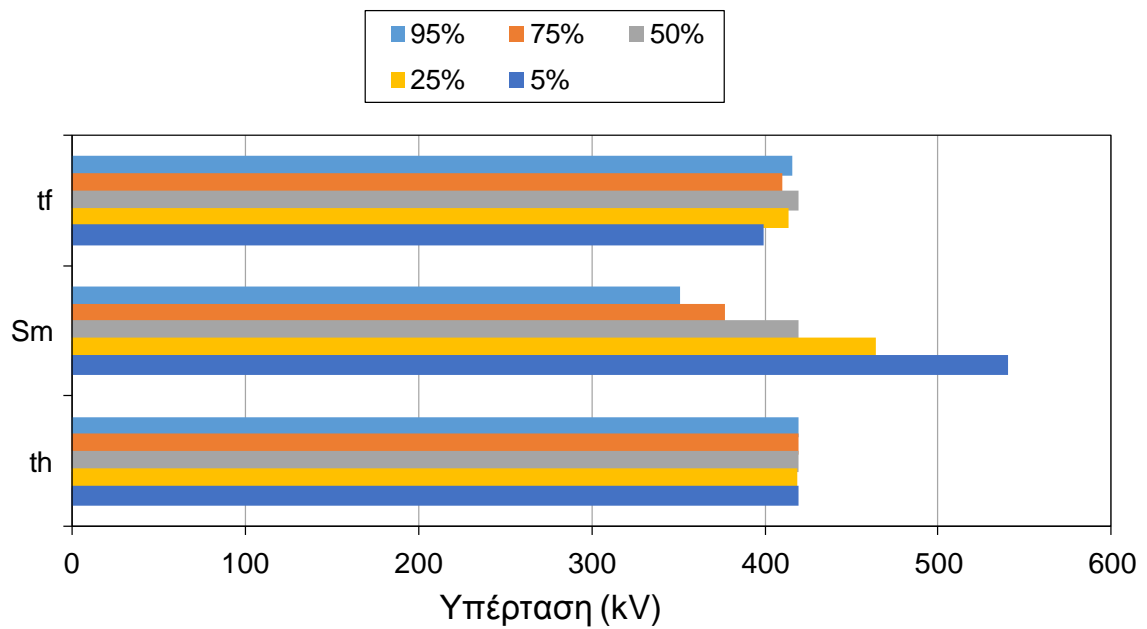
Κυματομορφή 12: HVSS2 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h – Σφάλμα θωράκισης

4.2.2.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων GIS I4A, GIS 01A, TRH1A (HVSS2)

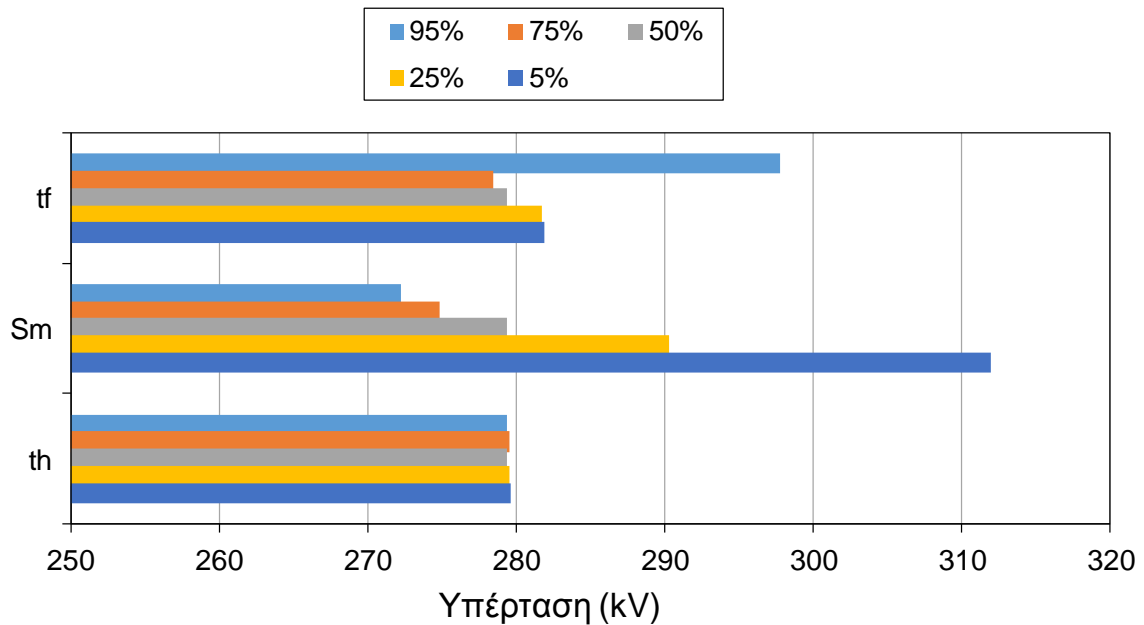
Στα παρακάτω ραβδογράμματα τιμών φαίνεται αρχικά ότι και στους τρεις κόμβους όσο αυξάνεται η μέγιστη κλίση S_m αυξάνεται και η τιμή της υπέρτασης, στον χρόνο ουράς t_h φαίνεται η τιμή της υπέρτασης να μην μεταβάλλεται αισθητά. Όσον αφορά τον χρόνο μετώπου t_f στον πρώτου κόμβο εισόδου GIS I4A φαίνεται ότι κατά την αύξησή του η τιμή μειώνεται, στον κόμβο του καλωδίου μεταφοράς GIS 01A φαίνεται ότι από 95% σε 75% μειώνεται η τιμή της υπέρτασης, αυξάνεται στο 50% και μετά αρχίζει να μειώνεται ξανά, στο κόμβο του μετασχηματιστή THR1A φαίνεται ότι στο 95% έχει την μεγαλύτερη τιμή, έπειτα η τιμή αυτή στο 75% πέφτει και κατά την αύξηση του ποσοστού φαίνεται αύξηση της τιμής της υπέρτασης.



Ραβδόγραμμα 10: HVSS2 Τιμές κόμβου εισόδου υποσταθμού GIS14A – Σφάλμα θωράκισης



Ραβδόγραμμα 11: HVSS2 Τιμές κόμβου καλωδίου σύνδεσης GIS01A – Σφάλμα θωράκισης



Ραβδόγραμμα 12: HVSS2 Τιμές κόμβου μετασχηματιστή TRH1A – Σφάλμα θωράκισης

4.3 Υποσταθμός AIS 400 kV (HVSS3)

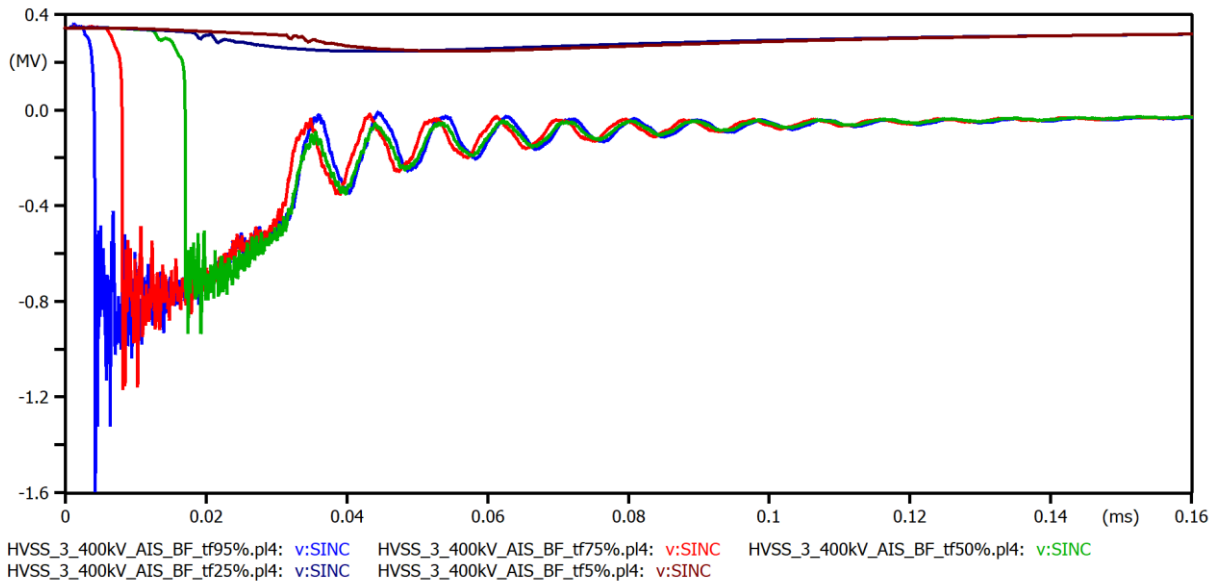
4.3.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα (HVSS3)

Προσομοιώνοντας κεραυνικό πλήγμα εντάσεως 200 kA σε πυλώνα για να ελεγχθεί αν θα γίνει διάσπαση μόνωσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς στον υποσταθμό AIS 400 kV HVSS3 φαίνονται τα εξής.

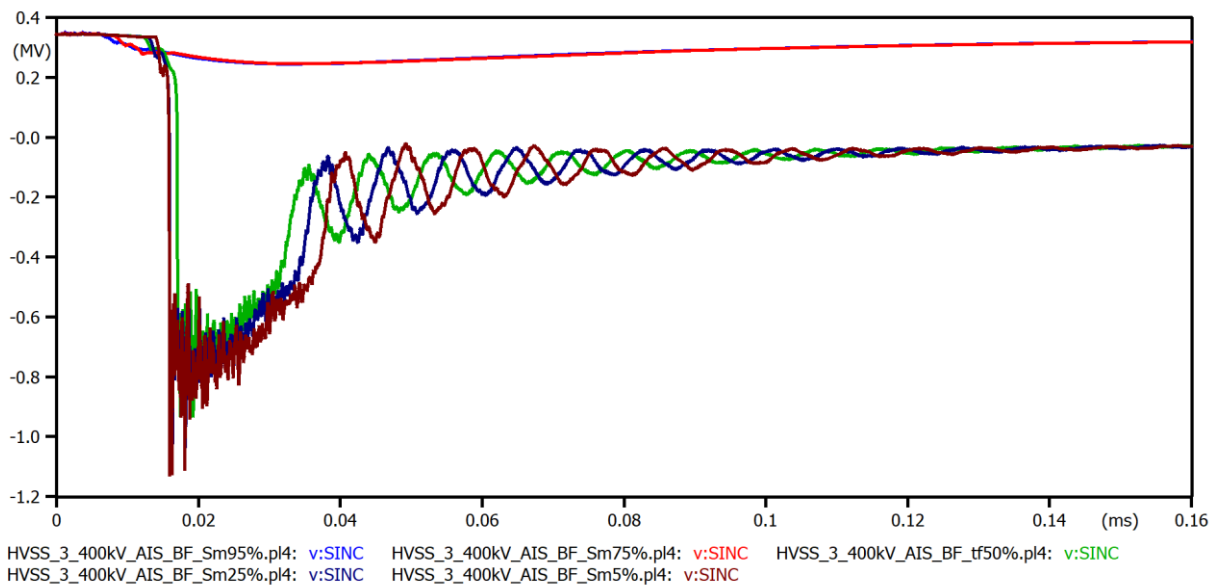
Στην Κυματομορφή 13 αυξάνοντας τον χρόνο μετώπου t_f φαίνεται ότι ο κεραυνός στην περίπτωση που γίνει διάσπαση μόνωσης έχει δυο μέγιστα και αυξάνοντας το t_f έχει πιο μικρά και πιο αργά μέτωπα με την ουρά να παρουσιάζει μία ταλάντωση η οποία σταδιακά εξομαλύνεται, στην περίπτωση που δεν γίνει διάσπαση η τάση είναι περίπου ίση με την τάση λειτουργίας. Μέγιστη υπέρταση φαίνεται στο μικρό μέτωπο του κεραυνικού ρεύματος (95%).

Στην Κυματομορφή 14 αυξάνοντας τη μέγιστη κλίση S_m φαίνεται ότι στο 95% και 75% δεν γίνεται διάσπαση μόνωσης και η τάση είναι η τάση λειτουργίας, στις περιπτώσεις διάσπασης φαίνεται ότι η ουρά παρουσιάζει μια ταλάντωση η οποία εξομαλύνεται.

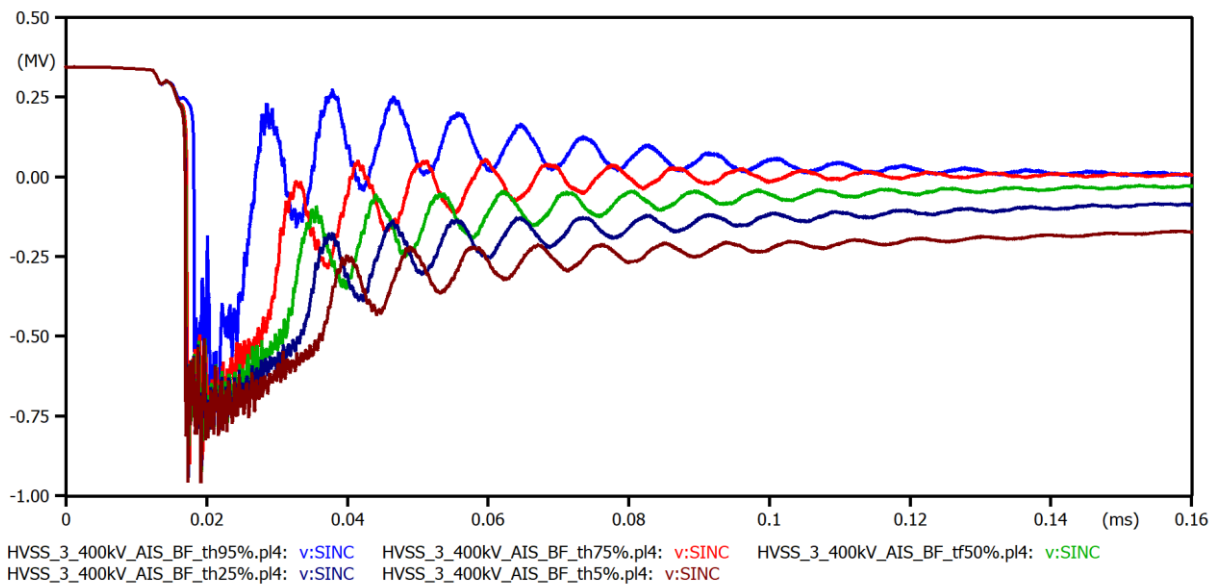
Στην Κυματομορφή 15 αυξάνοντας τον χρόνο ουράς t_h φαίνονται δυο μέγιστα με ίδιο χρόνο μετώπου, ενώ στην ούρα φαίνεται μια ταλάντωση η οποία γίνεται μικρότερη κατά την αύξηση του t_h . Μεγαλύτερη υπέρταση αντιστοιχεί στο μέγιστο t_h .



Κυματομορφή 13: HVSS3 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τον χρόνο μετώπου t_f – Πλήγμα στον πυλώνα



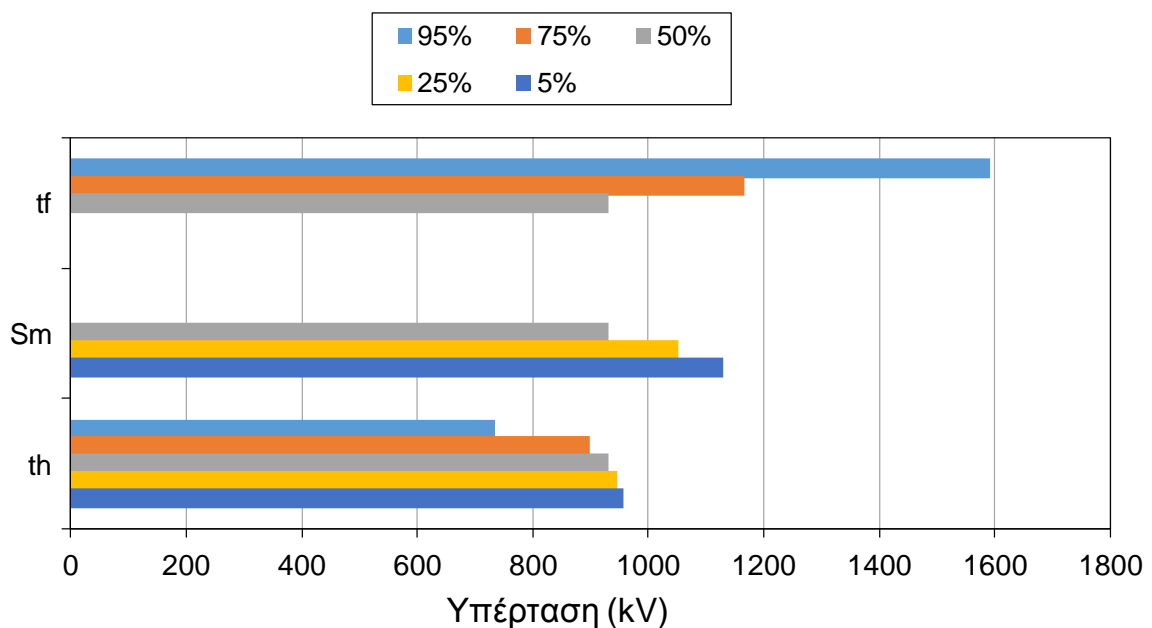
Κυματομορφή 14: HVSS3 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη μέγιστη κλίση S_m – Πλήγμα στον πυλώνα



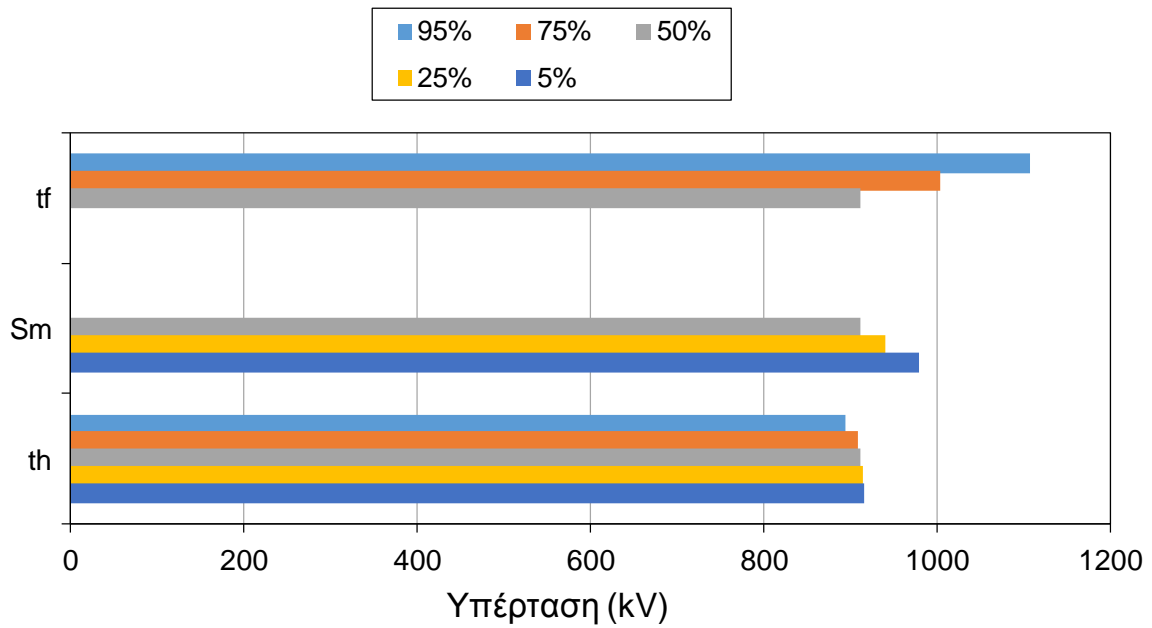
Κυματομορφή 15: HVSS3 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h – Πλήγμα στον πυλώνα

4.3.1.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων SINC, TRHC (HVSS3)

Στα ραβδογράμματα τιμών στον κόμβο εισόδου του υποσταθμού SINC και στον κόμβο του μετασχηματιστή TRHC φαίνεται ότι αυξάνοντας τον χρόνο μετώπου t_f μειώνεται η υπέρταση. Στη μέγιστη κλίση S_m η τιμή της υπέρτασης αυξάνεται με την αύξηση του S_m , το ίδιο συμβαίνει και στον χρόνο ουράς t_h .



Ραβδογράμμα 13: HVSS3 Τιμές κόμβου εισόδου του υποσταθμού SINC – Πλήγμα στον πυλώνα

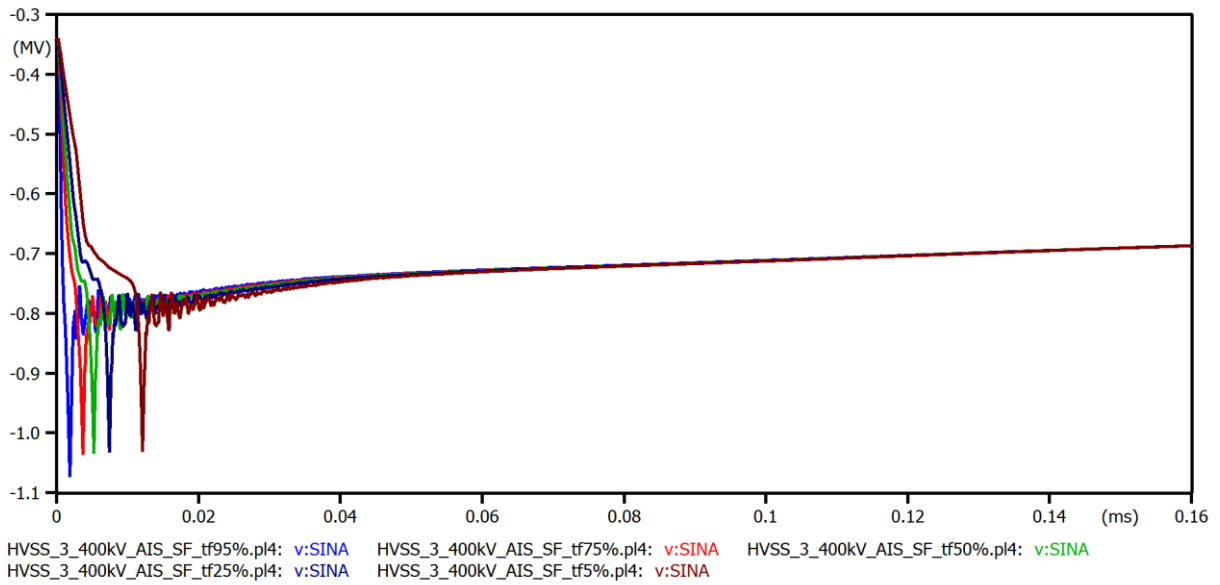


Ραβδόγραμμα 14: HVSS3 Τιμές κόμβου μετασχηματιστή TRHC – Πλήγμα στον πυλώνα

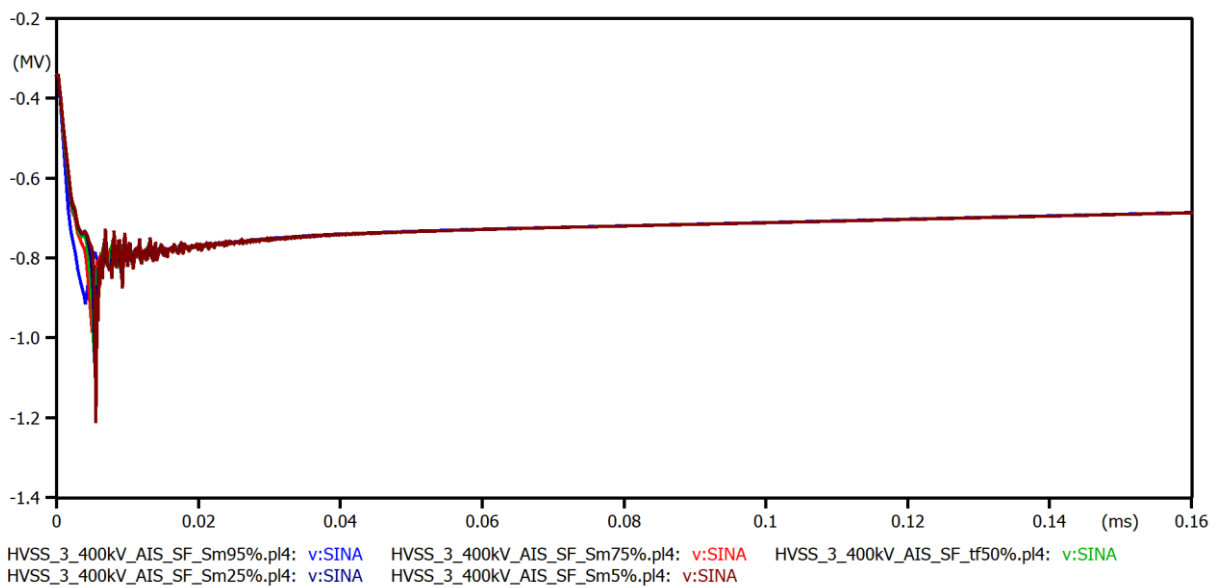
4.3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (HVSS3)

Εξετάζοντας στον ίδιο υποσταθμό το ενδεχόμενο να συμβεί σφάλμα θωράκισης και να υπάρξει απευθείας κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης εντάσεως 15.2 kA προκύπτουν τα παρακάτω.

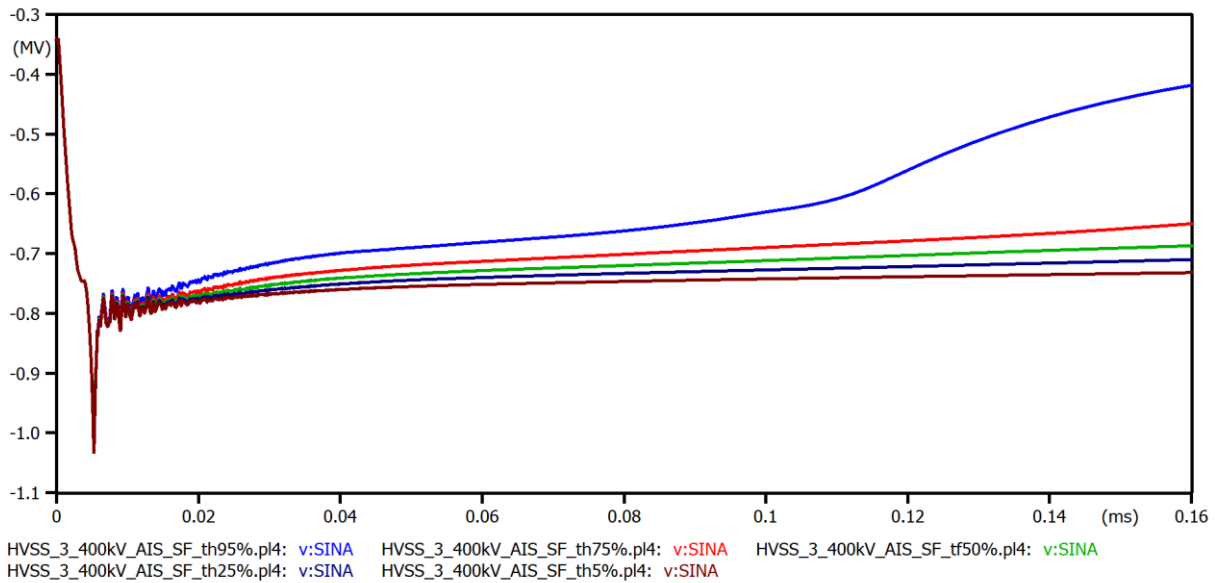
Στην Κυματομορφή 16 αυξάνοντας το τον χρόνο μετώπου t_f μειώνεται η υπέρταση γενικά. Όλες οι κυματομορφές έχουν μόνο μια κορυφή με μία ομαλή ουρά. Στην Κυματομορφή 17 κάνοντας το ίδιο για τη μέγιστη κλίση S_m βρέθηκε ίδιος χρόνος μετώπου στην υπέρταση και ομαλή ουρά σε όλες τις περιπτώσεις. Στην Κυματομορφή 18 για τον χρόνο ουράς t_h είναι εμφανής μια αύξηση στον χρόνο και την τάση της ουράς του κεραυνού έχοντας ίδιο χρόνο μετώπου με μία κορυφή.



Κυματομορφή 16: HVSS3 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τον χρόνο μετώπου t_f – Σφάλμα θωράκισης



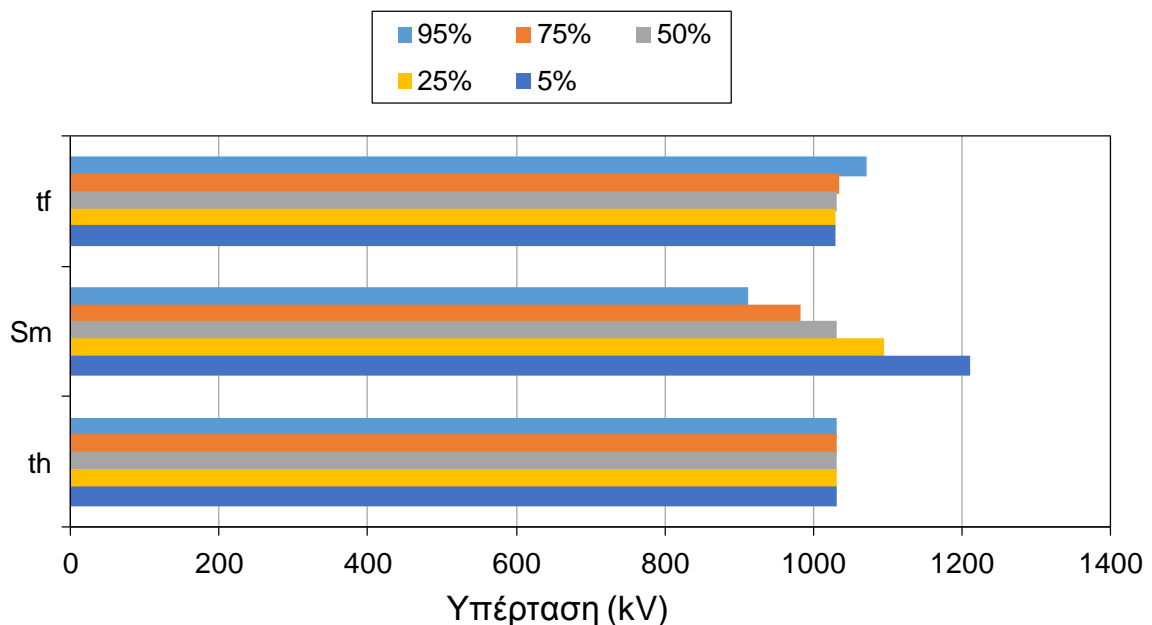
Κυματομορφή 17: HVSS3 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη μέγιστη κλίση S_m – Σφάλμα θωράκισης



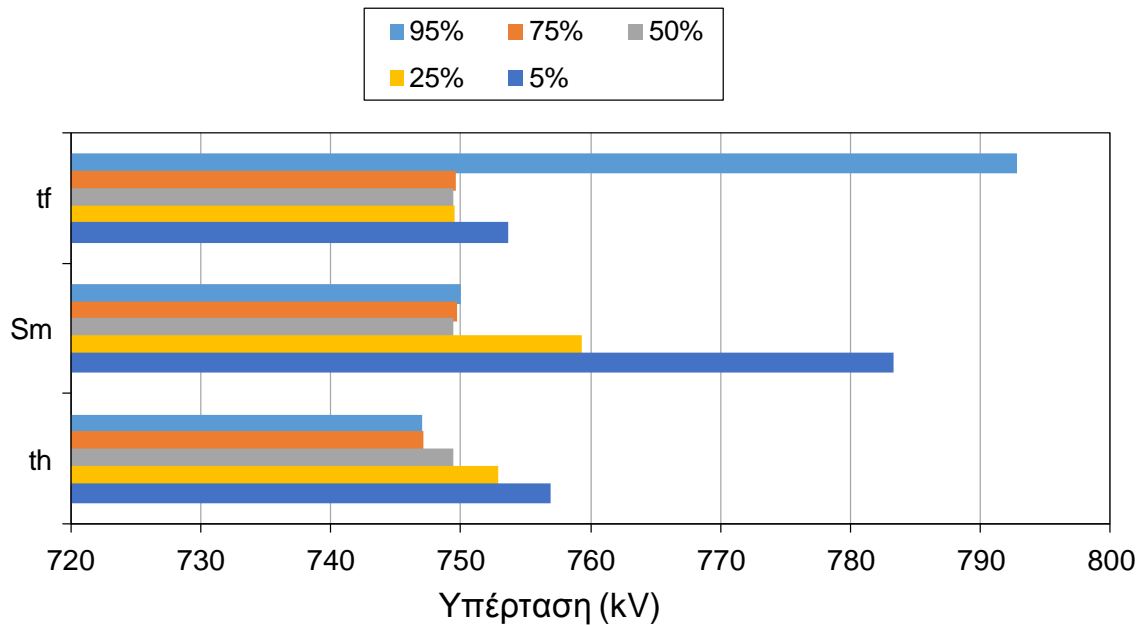
Κυματομορφή 18: HVSS3 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h – Σφάλμα θωράκισης

4.3.2.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων SINA, TRHA (HVSS3)

Στα ραβδογράμματα τιμών του πρώτου κόμβου του υποσταθμού SINA φαίνεται ότι κατά την αύξηση του χρόνου μετώπου t_f η τιμή της υπέρτασης μειώνεται, για τη μέγιστη κλίση S_m αυξάνεται, ενώ για τον χρόνο ουράς μένει σταθερή. Στο κόμβο του μετασχηματιστή TRHA για τον χρόνο μετώπου παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή στο 95% και αυξάνοντας το t_f η τιμή μειώνεται και στο 5% αυξάνεται ξανά, στη μέγιστη κλίση S_m από 95% έως 50% φαίνεται μείωση της τιμής και κατόπιν αύξηση με μεγαλύτερη τιμή υπέρτασης στο 5%, ενώ για τον χρόνο ουράς t_h αυξάνεται η τιμή κατά την αύξησή του.



Ραβδόγραμμα 15: HVSS3 Τιμές κόμβου εισόδου υποσταθμού SINA – Σφάλμα θωράκισης



Ραβδόγραμμα 16: HVSS3 Τιμές κόμβου μετασχηματιστή TRHA – Σφάλμα θωράκισης

4.4 Υποσταθμός AIS 161 kV (HVSS4)

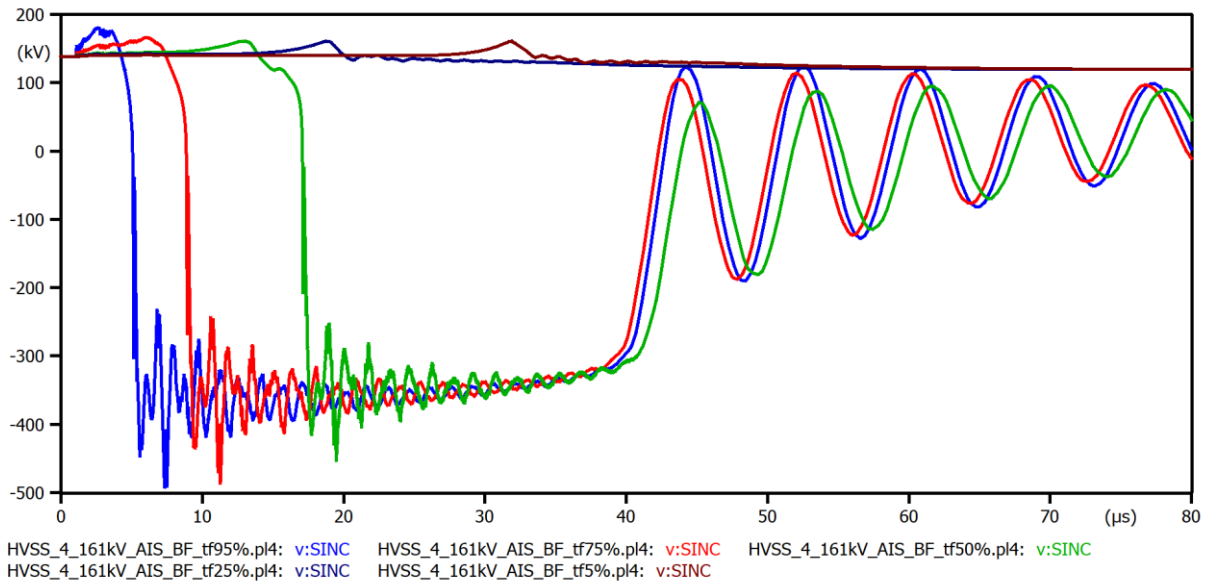
4.4.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα (HVSS4)

Προσομοιώνοντας κεραυνικό πλήγμα σε πυλώνα 200 kA σε υποσταθμό διαφορικού επιπέδου τάσης με μόνωση AIS θα παρατηρήσουμε τα εξής.

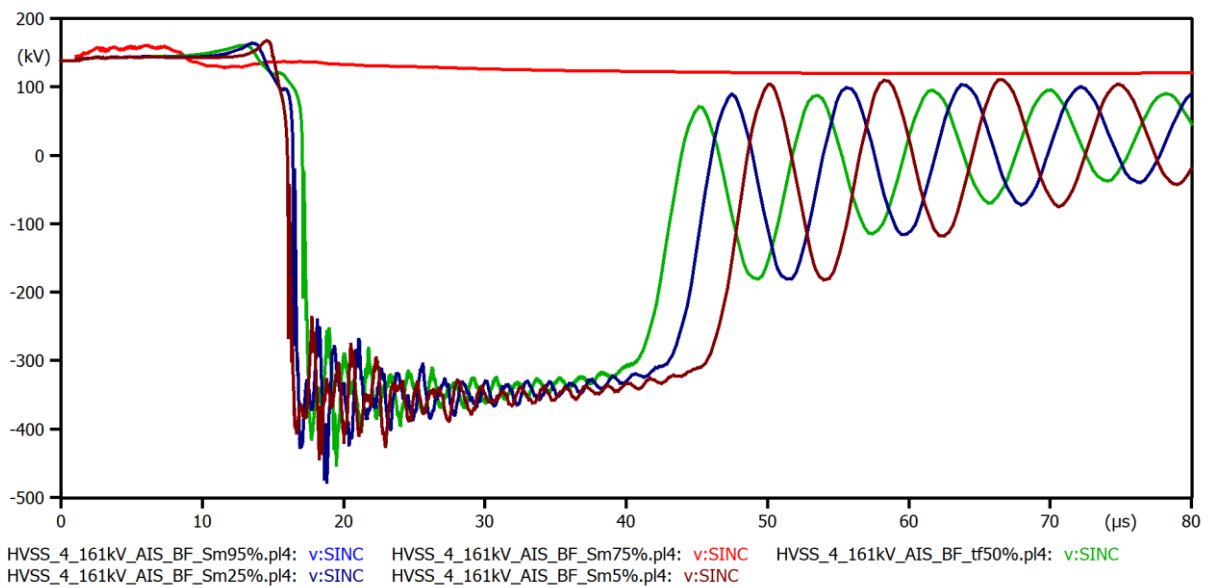
Στην Κυματομορφή 19 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το t_f αργεί να γίνει η διάσπαση σε κάποιο μονωτήρα και μπορεί να μην γίνει και καθόλου. Οι χρόνοι μετώπου των υπερτάσεων είναι παρόμοιοι και οι υπερτάσεις έχουν δύο μέτωπα και έπειτα μια μικρή αυξομείωση γύρω από μια μέση τιμή. Αυτό εμφανίζεται λόγω του εκτροπέα γιατί προσπαθεί να κρατάει την τάση στα άκρα του σταθερή και μετά φαίνεται ότι εμφανίζει μία αποσβεννύμενη ταλάντωση στην ουρά.

Στην Κυματομορφή 20 θα παρατηρήσουμε ότι αυξάνοντας τη μέγιστη κλίση S_m γίνεται διάσπαση και εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με την κυματομορφή 19 όσον αναφορά στον χρόνο μετώπου και την ουρά.

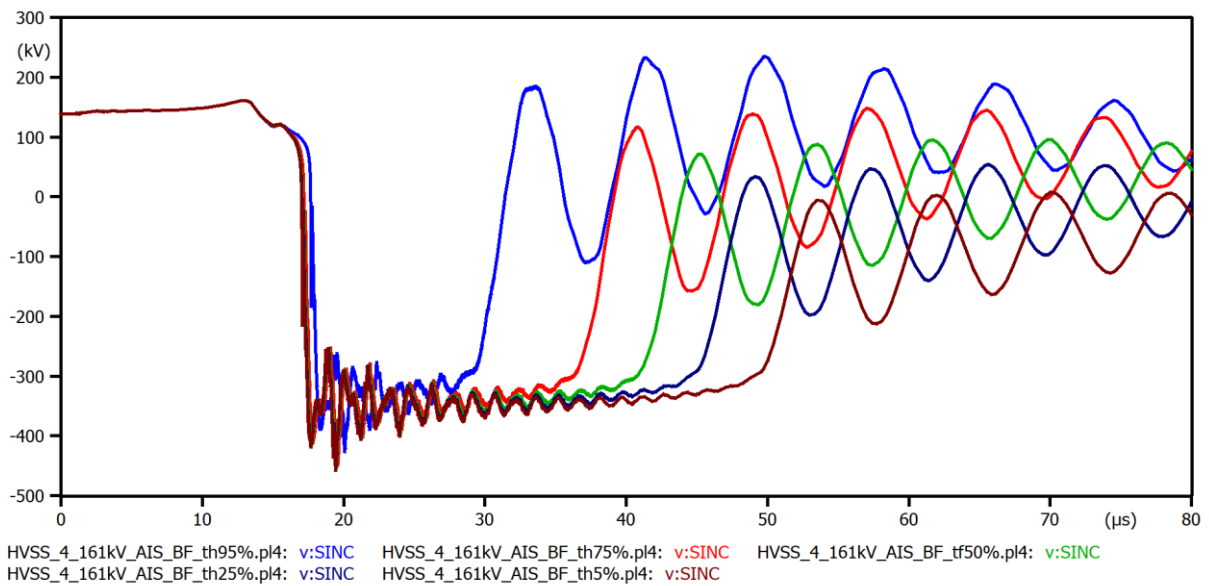
Στην Κυματομορφή 21 για το χρόνο ουράς t_h φαίνεται ότι προκύπτει ίδιος χρόνος μετώπου και διάσπασης της μόνωσης της εισερχόμενη γραμμής. Όσο αυξάνεται το t_h φαίνεται αύξηση χρόνου αυξομείωσης μέχρι να φτάσει στο σημείο να κάνει εξασθενούσα ταλάντωση στην ουρά η όποια κατά την αύξηση του t_h ταλαντώνεται λιγότερο.



Κυματομορφή 19: HVSS4 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τον χρόνο μετώπου t_f – Πλήγμα στον πυλώνα



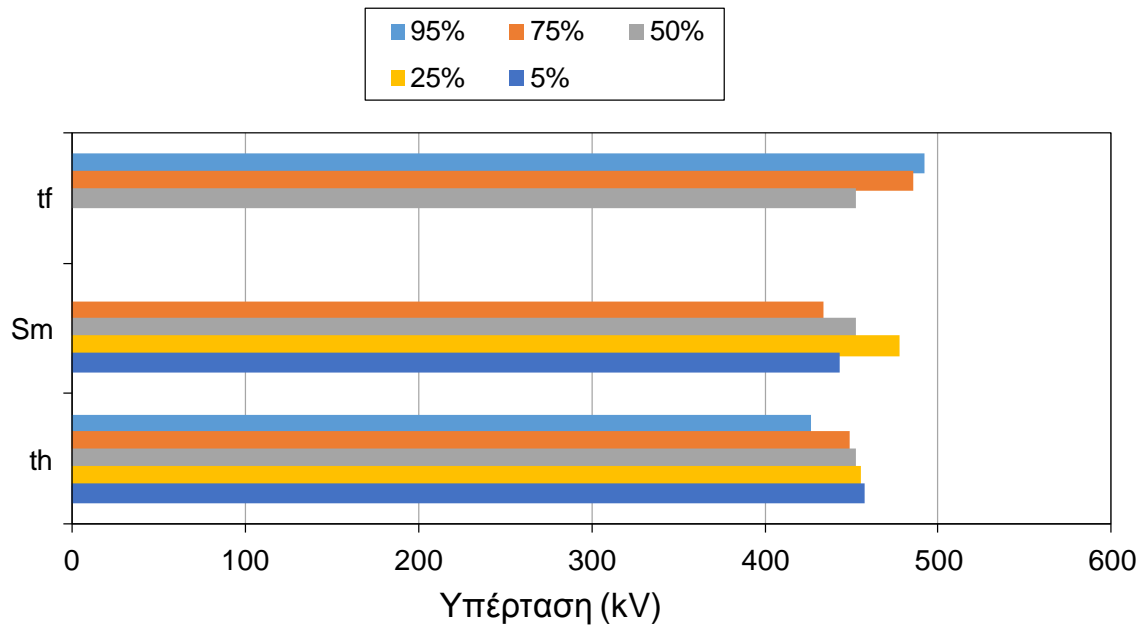
Κυματομορφή 20: HVSS4 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη μέγιστη κλίση S_m – Πλήγμα στον πυλώνα



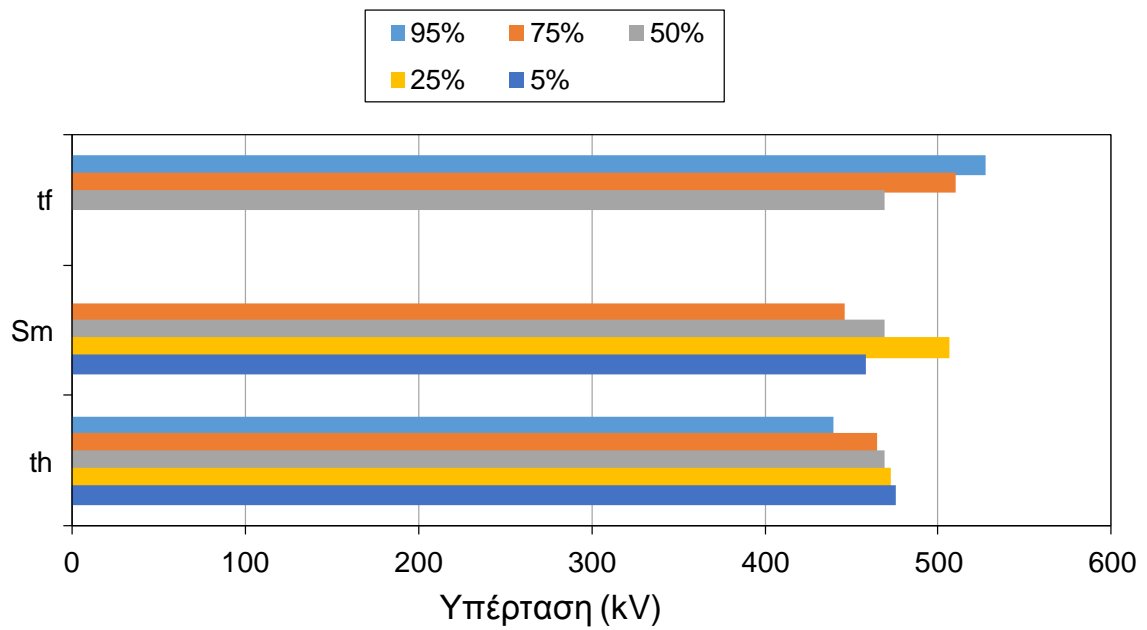
Κυματομορφή 21: HVSS4 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη διάρκεια ημίσειος εύρους t_h – Πλήγμα στον πυλώνα

4.4.1.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων SINC, GSUTC (HVSS4)

Στα ραβδογράμματα τιμών φαίνεται στον κόμβο εισόδου SINC και του μετασχηματιστή GUSTC ότι η τιμή της υπέρτασης αυξάνοντας τον χρόνο μετώπου t_f μειώνεται. Για την μέγιστη κλίση S_m φαίνεται ότι η τιμή κατά την αύξηση του S_m αυξάνει με μέγιστη στο 25% και στο 5% φαίνεται να ξανά μειώνεται, όσο για την ούρα φαίνεται η τιμή να αυξάνεται κατά την αύξηση της διάρκειάς της.



Ραβδόγραμμα 17: HVSS4 Τιμές κόμβου εισόδου του υποσταθμού SINC – Πλήγμα στον πυλώνα



Ραβδόγραμμα 18: HVSS4 Τιμές κόμβου μετασχηματιστή GUSTC – Πλήγμα στον πυλώνα

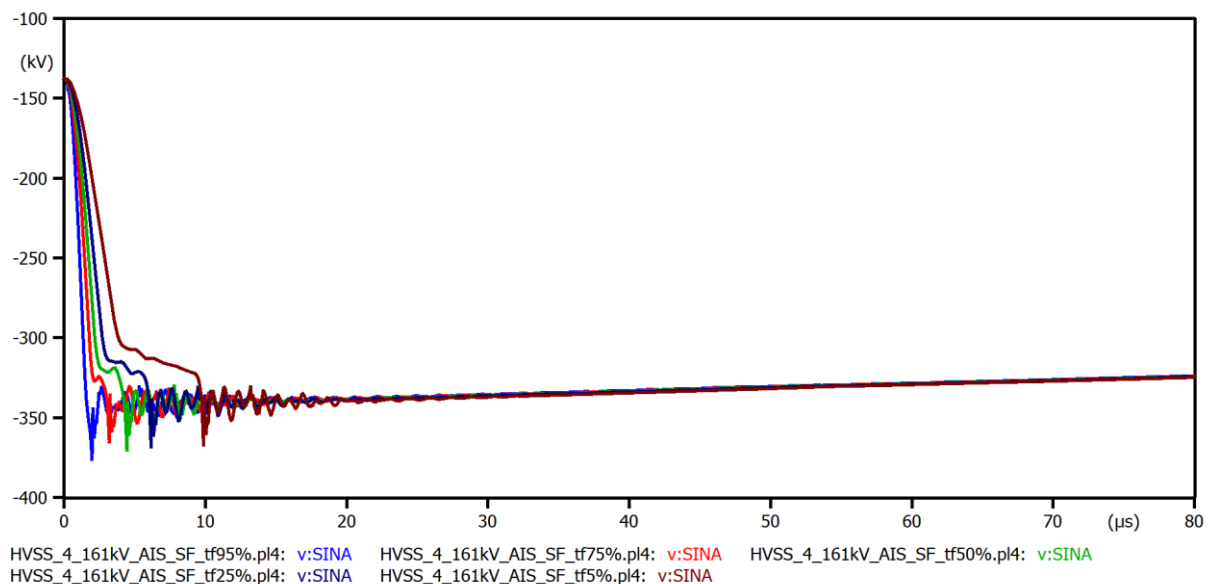
4.4.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης (HVSS4)

Προσομοιώνοντας στον ίδιο υποσταθμό κεραυνικό πλήγμα εντάσεως 4.9 kA αυτή τη φορά πάνω σε φάση προκύπτουν τα εξής.

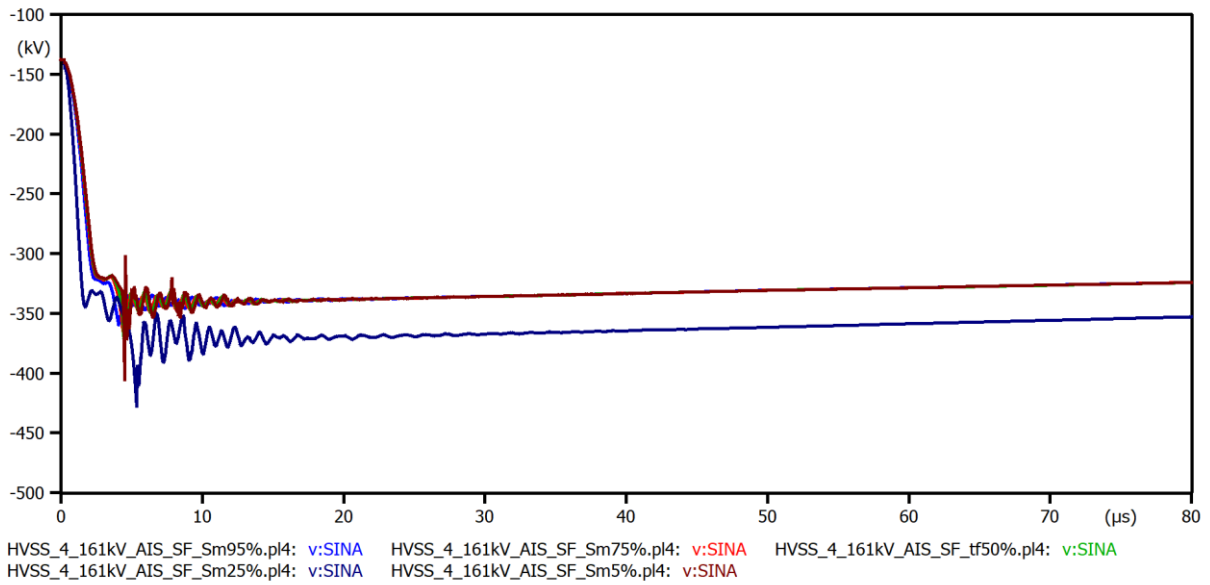
Στην Κυματομορφή 22 για αύξηση χρόνου μετώπου t_f φαίνεται ότι καθυστερεί να εμφανιστεί το μέγιστο και παρουσιάζεται μία αυξομείωση και μια ομαλή ουρά χωρίς ταλαντώσεις. Μέγιστη υπέρταση αντιστοιχεί στον μικρό χρόνο μετώπου.

Στην Κυματομορφή 23 για αύξηση της μέγιστης κλίσης S_m φαίνεται ότι στο 25% ο χρόνος μετώπου είναι πιο αργός και παρουσιάζει μια αυξομείωση, στα υπόλοιπα είναι περίπου ίδιος και όσον αναφορά την ουρά σε όλα είναι ομαλή.

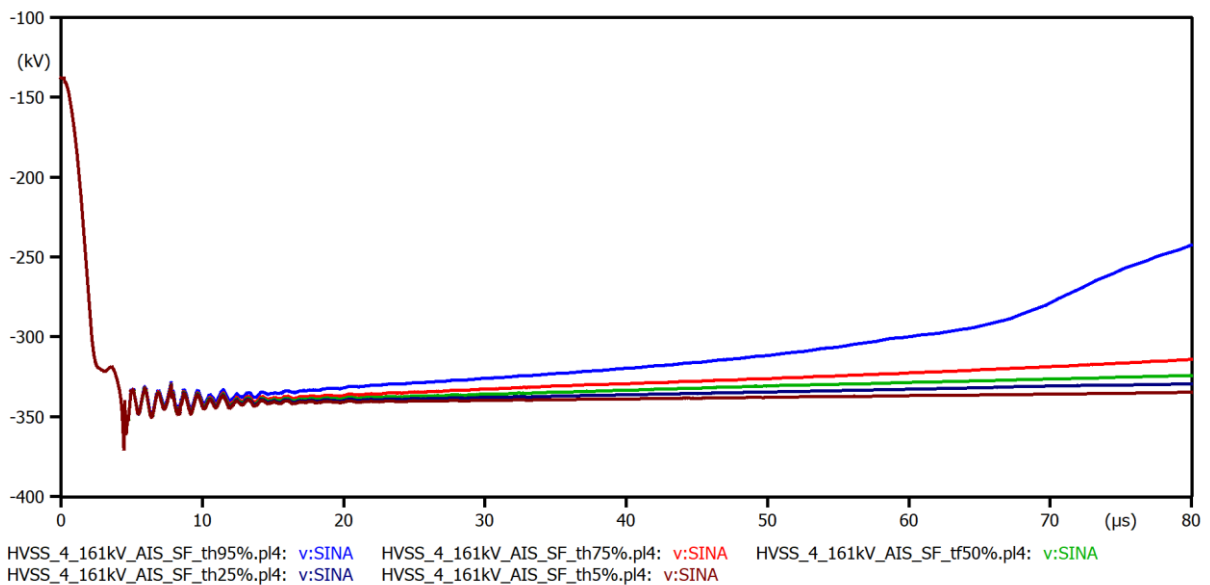
Στην Κυματομορφή 24 για αύξηση του χρόνου ουράς t_h φαίνεται ότι ο χρόνος μετώπου της υπέρτασης είναι ίδιος με μια μικρή αυξομείωση και το μόνο που αλλάζει είναι ότι με την αύξηση του ποσοστού αυξάνεται ο χρόνος και η τάση ουράς.



Κυματομορφή 22: HVSS4 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τον χρόνο μετώπου t_f – Σφάλμα θωράκισης



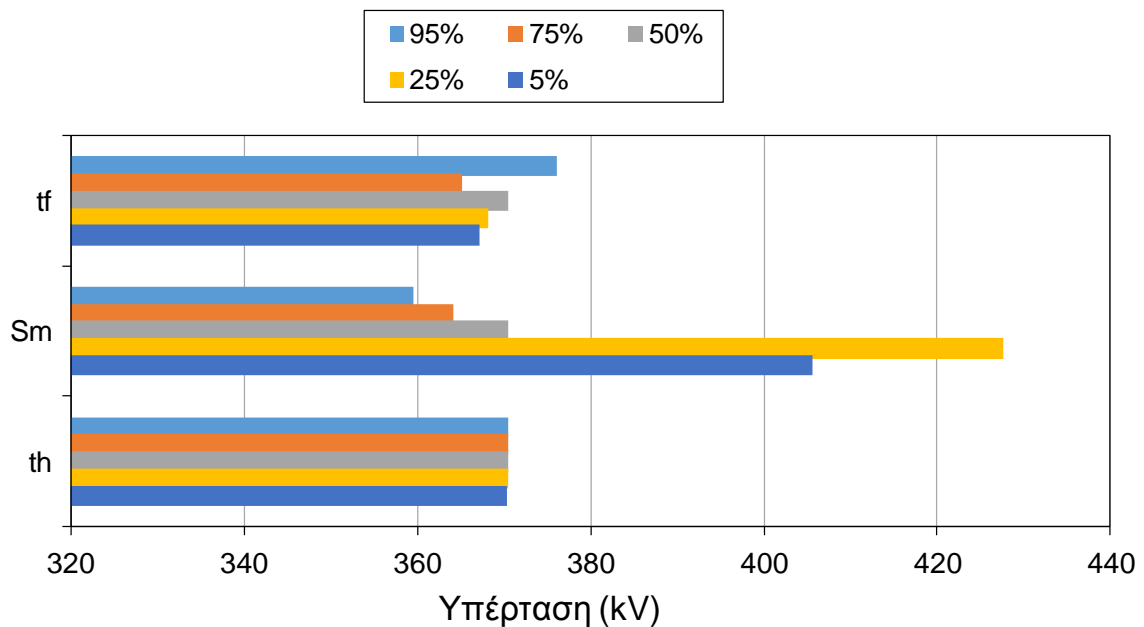
Κυματομορφή 23: HVSS4 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη μέγιστη κλίση S_m – Σφάλμα θωράκισης



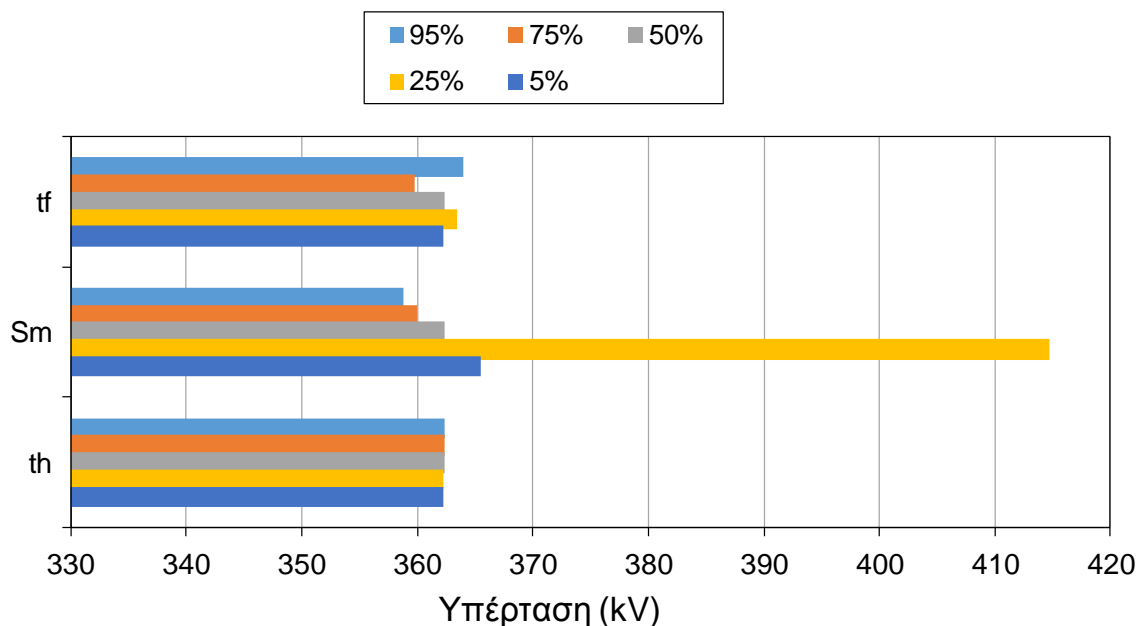
Κυματομορφή 24: HVSS4 Υπερτάσεις πρώτου κόμβου για τη διάρκεια ημίσεως εύρους t_h – Σφάλμα θωράκισης

4.4.2.1 Ραβδογράμματα μέγιστων τιμών κόμβων SINA, GSUTA (HVSS4)

Στα ραβδογράμματα μέγιστων τιμών φαίνεται ότι στον κόμβο εισόδου SINA ο χρόνος μετώπου t_f παρουσιάζει μέγιστη τιμή υπέρτασης στα 95% έπειτα στο 75% μειώνεται ξανά αυξάνεται στο 50% και έπειτα μειώνεται ξανά, στον κόμβο του μετασχηματιστή GSUTA παρουσιάζει μια αυξομείωση τιμών κατά την αύξηση του t_f . Για τη μέγιστη κλίση S_m και στους δύο κόμβους φαίνεται με την αύξηση του ποσοστού μία αύξηση της τιμής με την μεγαλύτερη να είναι στο 25% ενώ στο 5% ξαναενώνεται και στον χρόνο ουράς t_h φαίνεται σταθερή τιμή σε όλες τις περιπτώσεις και στους δύο κόμβους.



Ραβδόγραμμα 19 HVSS4 Τιμές κόμβου εισόδου υποσταθμού SINA – Σφάλμα θωράκισης



Ραβδόγραμμα 20: HVSS4 Τιμές κόμβου μετασχηματιστή GSUTA – Σφάλμα θωράκισης

4.5 Σύζηση αποτελεσμάτων

4.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων υποσταθμών GIS και AIS

Με βάση τις κυματομορφές που έχουν αποθηκευθεί από τις προσομοιώσεις που έχουν λάβει χώρα φαίνεται ότι στην περίπτωση ανάστροφης διάσπασης της μόνωσης των εισερχόμενων γραμμών μεταφοράς στους υποσταθμούς GIS υφίστανται κυματομορφές οι οποίες παρουσιάζουν μικρές αυξομειώσεις γύρω από το μέγιστο αλλά στην ουρά, ενώ στους AIS η αυξομείωση συμβαίνει σε μικρότερο βαθμό και παρατηρείται μια αποσβεννύμενη ταλάντωση στην ουρά (χωρίς τις μικρές αυξομειώσεις). Επίσης στους AIS παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές υπέρτασης σε σχέση με τους GIS.

Στην περίπτωση σφάλματος θωράκισης βρέθηκε ότι και στα δύο είδη υποσταθμών δεν υπήρχε ταλάντωση στην ουρά και μόνο ένα μέγιστο χωρίς πολλές αυξομειώσεις. Καθώς σε κάθε υποσταθμό η ένταση του κεραυνού δεν ήταν η ίδια, δεν υπάρχει ξεκάθαρη σύγκριση για τις τιμές των υπερτάσεων.

Εν κατακλείδι, βρέθηκε ότι στους υποσταθμούς GIS οι ουρές των υπερτάσεων για πλήγμα στον πυλώνα είναι γενικά πιο μικρές σε σχέση με τους AIS αλλά με περισσότερες αυξομειώσεις.

4.5.2 Σύγκριση υποσταθμών GIS 400 kV και 132 kV

Η επίδραση του κεραυνού και στα δύο επίπεδα τάσης δεν είναι η ίδια για παράδειγμα στον υποσταθμό των 400 kV δεν έγινε ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ στο επίπεδο των 132 kV έγινε διάσπαση σε όλες τις περιπτώσεις έχοντας τιμή υπέρτασης περίπου την τριπλάσια της ονομαστικής τάσης λειτουργίας. Επίσης φαίνεται ότι και στην περίπτωση ανάστροφης διάσπασης αλλά και στο σφάλμα θωράκισης στα 400 kV η τιμή της υπέρτασης ήταν περίπου η ίδια σε όλους τους κόμβους ενώ στο επίπεδο των 132 kV η υπέρταση στον κόμβο του μετασχηματιστή είναι τα 2/3 σε σχέση με την υπέρταση στον κόμβο εισόδου. Αυτό έχει να κάνει με την τοπολογία του κάθε υποσταθμού.

4.5.3 Σύγκριση υποσταθμών AIS 400 kV και 161 kV

Η επίδραση του κεραυνού είναι περίπου η ίδια και στα δύο επίπεδα τάσης χωρίς να υπάρχει διάσπαση μόνωσης σε περίπου ίδιες περιπτώσεις. Και στα δυο επίπεδα τάσης η τιμή της υπέρτασης ήταν τριπλάσια, σε κάποιες περιπτώσεις και τετραπλάσια της ονομαστικής τάσης. Στα 161 kV βρέθηκε μόνο στην περίπτωση διάσπασης ότι υπάρχει μεγαλύτερη υπέρταση στον κόμβο του μετασχηματιστή από ότι στον κόμβο εισόδου, πιθανόν λόγω ανακλάσεων.

4.5.4 Αντοχή εξοπλισμού

Ο κύριος σκοπός είναι, εκτός από την επίδραση του κεραυνού στον κάθε υποσταθμό, να ελεγχθεί αν το επίπεδο μόνωσης του εξοπλισμού είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από τις υπερτάσεις, δηλαδή αν θα αντέξει τις κεραυνικές υπερτάσεις ο εξοπλισμός. Γνωρίζοντας ότι το BIL για κάθε υποσταθμό είναι:

- HVSS1 GIS 400 kV BIL 1425 kV
- HVSS 2 GIS 132 kV BIL 650 kV
- HVSS 3 AIS 400 kV BIL 1425 kV
- HVSS 4 AIS 161 kV BIL 750 kV.

Για τον υποσταθμό HVSS1 συγκρίνοντας όλα τα αποτελέσματα και για ανάστροφη διάσπαση μόνωσης αλλά και για σφάλμα θωράκισης φαίνεται ότι το επίπεδο μόνωσης επαρκεί μη έχοντας μεγαλύτερη υπέρταση από 932,41 kV.

Για τον υποσταθμό HVSS2 συγκρίνοντας όλα τα αποτελέσματα και για ανάστροφη διάσπαση μόνωσης αλλά και για σφάλμα θωράκισης φαίνεται ότι το επίπεδο μόνωσης επαρκεί μη έχοντας μεγαλύτερη υπέρταση από 461,63 kV.

Για τον υποσταθμό HVSS3 συγκρίνοντας όλα τα αποτελέσματα και για ανάστροφη διάσπαση μόνωσης αλλά και για σφάλμα θωράκισης φαίνεται ότι σε κάποιες περιπτώσεις στην ανάστροφη διάσπαση μόνωσης έχουμε τιμές υπερτάσεων μεγαλύτερες από το επίπεδο μόνωσης, αυτές οι περιπτώσεις είναι για t_f 95% όπου υπολογίστηκε τιμή υπέρτασης στην είσοδο 1592,2 kV και μέγιστη υπέρταση σε κόμβο εντός του υποσταθμού 2132,6 kV, στην περίπτωση t_f 75% όπου εκεί βρέθηκε μια τιμή στον ίδιο κόμβο 1609,5 kV και στην περίπτωση S_m 5% όπου εκεί προέκυψε μια τιμή 1535,8 kV. Σε αυτές τις περιπτώσεις η τιμή της υπέρτασης ξεπερνάει πολύ την τιμή αντοχής του εξοπλισμού με αποτέλεσμα ο εξοπλισμός να κινδυνεύει να καταστραφεί. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις ο εξοπλισμός είναι επαρκώς προστατευμένος.

Για τον υποσταθμό HVSS4 συγκρίνοντας όλα τα αποτελέσματα και για ανάστροφη διάσπαση μόνωσης αλλά και για σφάλμα θωράκισης φαίνεται ότι το επίπεδο μόνωσης επαρκεί μη έχοντας μεγαλύτερη υπέρταση από 527,01 kV.

4.5.5 Επίδραση της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος

Γενικά, μπορεί να λεχθεί ότι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα είναι η τοπολογία του κάθε υποσταθμού, τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού του και τα

χαρακτηριστικά των μέσω προστασίας (εκτροπείς υπέρτασης). Έτσι σε κάποιες περιπτώσεις τα συμπεράσματα μπορεί να αλλάζουν από κόμβο σε κόμβο και μέσα στον ίδιο υποσταθμό.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ισχύουν τα παρακάτω για τη μέγιστη τιμή της υπέρτασης:

- Αύξηση της διάρκειας μετώπου t_f προκαλεί μείωση των υπερτάσεων
- Αύξηση της μέγιστης κλίσης S_m προκαλεί αύξηση των υπερτάσεων
- Αύξηση της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουρά) t_h προκαλεί αύξηση των υπερτάσεων.

Η επίδραση είναι πιο έντονη για τη διάρκεια μετώπου και τη μέγιστη κλίση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία με τη βοήθεια του ATP-EMTP προσομοιώθηκαν κεραυνικά πλήγματα με την κυματομορφή ρεύματος της CIGRE σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κοντά σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις ανάστροφης διάσπασης της μόνωσης της γραμμής (πλήγμα στον πυλώνα) και σφάλματος θωράκισης (πλήγμα στον αγωγό φάσης) που προκαλούν υπερτάσεις από οδεύοντα κύματα που θα εισέρθουν στον υποσταθμό για να ελεγχθεί η αντοχή του εξοπλισμού σε κάποια ενδεχόμενη υπέρταση από κάποιο κεραυνικό πλήγμα και το πώς επιδρά η κυματομορφή του κεραυνικού ρεύματος στον εκάστοτε υποσταθμό. Οι κυματομορφές μεταβλήθηκαν χρησιμοποιώντας τις πιθανοτικές κατανομές των παραμέτρων τους.

Διερευνήθηκαν υποσταθμοί με μόνωση αερίου (GIS) δύο επιπέδων τάσης 400 kV και 132 kV και με μόνωση αέρα (AIS) δύο επιπέδων τάσης 400 kV και 161 kV. Υπολογίστηκαν οι υπερτάσεις που μπορούν να εμφανιστούν από κεραυνικά πλήγματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως προαναφέρθηκε.

Στις περισσότερες περιπτώσεις βρέθηκε ότι η αύξηση της διάρκειας μετώπου t_f προκαλεί μείωση των υπερτάσεων στους υποσταθμούς. Αντίθετα η αύξηση της μέγιστης κλίσης S_m και της διάρκειας ημίσεος εύρους (ουρά) t_h προκαλεί αύξηση των υπερτάσεων στους υποσταθμούς. Η επίδραση είναι γενικά έντονη για τη διάρκεια μετώπου και τη μέγιστη κλίση. Είναι σημαντικό ότι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα είναι η τοπολογία του κάθε υποσταθμού, τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού του και τα χαρακτηριστικά των μέσω προστασίας (εκτροπείς υπέρτασης). Έτσι σε κάποιες περιπτώσεις τα συμπεράσματα μπορεί να αλλάζουν από κόμβο σε κόμβο ακόμα και μέσα στον ίδιο υποσταθμό.

Το βασικό επίπεδο μόνωσης για τον κάθε υποσταθμό βρέθηκε να είναι επαρκές εκτός από κάποιες περιπτώσεις σε κάποιους κόμβους στον υποσταθμό AIS 400 kV. Ωστόσο, στις ενδιάμεσες τιμές (50%) των παραμέτρων του κεραυνού για τις οποίες γίνεται συνήθως η σχεδίαση και αυτός ο υποσταθμός προστατεύεται επαρκώς. Επίσης βρέθηκε ότι στις περιπτώσεις διάσπασης μόνωσης σε όλους τους υποσταθμούς έχουμε δύο μέγιστα στην κυματομορφή της υπέρτασης, αυξομειώσεις γύρω από μία μέση τιμή υπέρτασης και μετά στην ουρά μια αποσβεννύμενη ταλάντωση, ενώ στο σφάλμα θωράκισης εμφανίζεται ένα μέγιστο και πιο γραμμική ουρά χωρίς να παρουσιάζει ταλαντώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Energypac engineering, 132/11 kV air insulated switchgear (AIS), [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Ιανουάριος 2023.
- [2] 400-kV GIS, [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [3] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [4] AIS, GIS & Hybrid Substation, [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [5] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [6] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [7] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [8] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [9] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [10] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [11] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [12] [Σύνδεσμος](#), Τελευταία πρόσβαση: Φεβρουάριος 2023.
- [13] CIGRE WG 33.01, “Guide to procedures for estimating lightning performance of transmission lines,” Technical Brochure 63, 1991.
- [14] 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. 36th ICLP, Cape Town, South Africa, October 2022, pp. 521-526.
- [15] J. R. Marti, “Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, no. 1, pp. 147-157, 1982.
- [16] IEEE WG on Lightning Performance of Transmission Lines, “A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines,” IEEE Trans. Power Del., vol. 104, no. 4, pp. 919-932, 1985.
- [17] M. A. Sargent and M. Darveniza, “Tower surge impedance,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, no. 5, pp. 680-687, 1969.
- [18] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, Z. G. Datsios, and N. C. Mavrikakis, “Effects of simulation models of overhead transmission line basic components on backflashover surges impinging on GIS substations,” in Proc. 45th UPEC, Cardiff, Wales, August 2010.
- [19] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, “Impulse resistance of concentrated

tower grounding systems simulated by an ATPDraw object”, in Proc. IPST, Delft, The Netherlands, 2011.

[20] Z. G. Datsios and P. N. Mikropoulos, “Implementation of leader development models in ATP-EMTP using a type-94 circuit component,” in Proc. 32nd ICLP, Shanghai, China, 2014, pp. 735-741.

[21] Z. G. Datsios and P. N. Mikropoulos, “Modeling of lightning impulse behavior of long air gaps and insulators including predischage current: Implications on insulation coordination of overhead transmission lines and substations,” *Electr. Power Sys. Res.*, vol. 139, pp. 37-46, 2016.

[22] L. Bergeron, “Etude des variation de régime dans les conduits d’ eau: Solution graphique générale,” *Revue Générale de l’Hydraulique*, vol. 1, pp. 12 and 69, 1935. (in French)

[23] P. Pinceti and M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 2, pp. 393-398, 1999.

[24] M. Caserza Magro, M. Giannettoni, and P. Pinceti, “Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 4, pp. 1692-1695, 2004.

[25] IEEE Fast Front Transients TF, “Modeling guidelines for fast front transients,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 493-506, 1996.

[26] A. Borghetti, A. Morched, F. Napolitano, C. A. Nucci, and M. Paolone, “Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 1, pp. 360-372, 2009.

[27] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, “Effects of lightning channel equivalent impedance on lightning performance of overhead transmission lines,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 3, pp. 623-630, 2019.

[28] IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines, *IEEE Std 1243-1997*, 1997.
