



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

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΣΤΙΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΟΥΣΚΕΜΕΝΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

Επιβλέπων: Δάτριος Ζαχαρίας

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

EFFECTS OF LIGHTNING CHANNEL EQUIVALENT IMPEDANCE ON THE OVERVOLTAGES ARISING AT HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS

THESIS

MOUSKEMENOS 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 ΠΡΟΣ ΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο "Διερεύνηση της επίδρασης της κυματικής αντίστασης του κεραυνικού καναλιού στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης" καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του έκτακτου εκπαιδευτικού προσωπικού του Τμήματος κ. Ζαχαρία Δάτσιου αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή & Επιβλέποντα, Έτος, Πόλη

Copyright (C) Μουσκεμένος Απόστολος, Δάτσιος Ζαχαρίας, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Μουσκεμένος Απόστολος

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την επίδραση της κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Η διερεύνηση γίνεται μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ATP-EMTP. Μελετήθηκαν 4 υποσταθμοί 132 kV, 161 kV και 2 των 400 kV. Οι δύο έχουν μόνωση αερίου (GIS) και οι άλλοι δύο μόνωση αέρα (AIS). Προσομοιώσεις έγιναν για πλήγματα κεραυνού σε πυλώνα και αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης) των εισερχόμενων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υπερτάσεις απεικονίστηκαν και τα αποτελέσματα διαφορετικών τιμών της κυματικής αντίστασης, από 200 Ω έως και την άπειρη αντίσταση, αναλύθηκαν και προέκυψαν γενικά συμπεράσματα. Σε όλες τις περιπτώσεις βρέθηκε ότι οι υποσταθμοί που μελετήθηκαν είναι προστατευμένοι από εισερχόμενες κεραυνικές υπερτάσεις ανεξάρτητα από την κυματική αντίσταση του καναλιού του κεραυνού.

Λέξεις Κλειδιά

Ανάστροφη Διάσπαση

Κεραυνικές Υπερτάσεις

Συντονισμός Μονώσεων

Σφάλμα Θωράκισης

Υποσταθμοί

Abstract

The influence of the surge impedance of the lightning channel on the fast-front overvoltages at high voltage substations is studied. ATP-EMTP simulations are performed for 4 substations: 132 kV, 161 kV and 2x 400 kV. Two of those are GIS and two AIS. Simulations were performed for lightning strikes at towers and phase conductors (shielding failure) of the overhead transmission lines connected to the substations. The overvoltages computed through simulations were presented and the results for different values of lightning channel impedance were discussed. These values range from 200 Ω up to the infinite impedance. This analysis yielded generalized conclusions. All cases studied resulted in overvoltages lower than the basic insulation level of the substations for all lightning channel impedance values.

Keywords

Backflashover

Insulation Coordination

Lightning Overvoltages

Shielding Failure

Substations

Ευχαριστίες

Με την εκτέλεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, φέρω εις πέρας την ολοκλήρωση των σπουδών μου στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Εφόσον μου έχει δοθεί η ευκαιρία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Ζαχαρία Γ. Δάτσιο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, για τις πολύτιμες υποδείξεις του και τον απaráμιλλο ζήλο του που με έκαναν να φτάσω σε ένα άρτιο αποτέλεσμα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και συμφοιτητές μου για όλα όσα μου χάρισαν και που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Εύχομαι σε όλους τα καλύτερα!

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια μου, που δεν έπαψαν στιγμή να πιστεύουν σε εμένα και που με στήριξαν ανελλιπώς σε όλο το εύρος των σπουδών μου.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος εικόνων και πινάκων	13
Πρόλογος	17
Κεφάλαιο 1: Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης	19
1.1: Χρησιμότητα και κατηγορίες υποσταθμών υψηλής τάσης	19
1.2: Στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών υψηλής τάσης	22
1.3: Αντοχή στοιχείων εξοπλισμού και προστασία έναντι υπερτάσεων	24
1.3.1: Εκτροπείς Υπέρτασης	25
1.4: Στόχος της διπλωματικής εργασίας	28
Κεφάλαιο 2: Υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης	29
2.1: Αιτίες ανάπτυξης υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης	29
2.2: Εισερχόμενες κεραυνικές υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης	30
2.2.1: Οδεύοντα κύματα στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς	31
2.2.2: Επίπτωση οδευόντων κυμάτων που εισέρχονται σε υποσταθμούς και προστασία από αυτά	32
2.2.3: Απόδοση προστασίας εκτροπέων υπέρτασης	33
2.2.4: Προστασία υποσταθμού από άμεσα κεραυνικά πλήγματα	35
Κεφάλαιο 3: Κυματική αντίσταση του κεραυνικού καναλιού	37
3.1: Μορφή καταγεγραμμένων κεραυνικών ρευμάτων και προσομοίωσή τους	37
3.2: Προσομοίωση άμεσων κεραυνικών πληγμάτων [13]	38
3.3: Κυματική αντίσταση του κεραυνικού καναλιού	40
3.4: Περιπτώσεις προς διερεύνηση	41
Κεφάλαιο 4: Υποσταθμοί υπό εξέταση	43
4.1: Περιγραφή	43
4.2: Μοντελοποίηση	44
4.3 Περιπτώσεις Προσομοίωσης	48
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συζήτηση	49
5.1 Υποσταθμός GIS 400 kV (HVSS1)	49
5.1.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα	49
5.1.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης	52
5.2 Υποσταθμός GIS 132 kV	55

5.2.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα	55
5.2.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης	57
5.3 Υποσταθμός AIS 400 kV	59
5.3.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα	59
5.3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης	61
5.4 Υποσταθμός AIS 161 kV	63
5.4.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα	63
5.4.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης	65
5.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων	67
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	69
Βιβλιογραφία	71

Κατάλογος Εικόνων και Πινάκων

Εικόνα 1. Υποσταθμός με μόνωση αέρα (AIS, Air Insulated Substation/Switchgear) [5].	21
Εικόνα 2. Υποσταθμός με μόνωση αερίου (GIS, Gas Insulated Substation/Switchgear) [6].	22
Εικόνα 3. Διαφορές μεταξύ AIS-GIS υποσταθμών όσον αφορά την έκτασή τους ([3] από [7]).	22
Εικόνα 4. Βασικά στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών (μόνωση αέρα, AIS) [3].	23
Εικόνα 5. Πιθανός τρόπος σύνδεσης του εκτροπέα μεταξύ πυλώνα και φάσης για την προστασία μονωτήρων αποτρέποντας την ηλεκτρική διάσπαση μεταξύ φάσης και πυλώνα [8].	26
Εικόνα 6. Δομή τυπικού εκτροπέα υπέρτασης με περίβλημα πορσελάνης [10].	35
Εικόνα 7. Ο ρόλος των εκτροπέων υπέρτασης στο συντονισμό μονώσεων ενός συστήματος [10].	35
Εικόνα 8. Τυπικές κυματομορφές πρώτων κεραυνικών πληγμάτων που παράγονται από μια πηγή ρεύματος CIGRE με μεταβλητό (a) χρόνο μετώπου td_{30} , (b) μέγιστη κλίση S_m και (c) διάρκεια ημίσεος εύρους t_h . Η τιμή κορυφής είναι $I = 31.1$ kA και λαμβάνεται υπόψη η στατιστική διακύμανση των παραμέτρων (τα ποσοστά συμβολίζουν πόσα κεραυνικά πλήγματα ξεπερνούν την αντίστοιχη παράμετρο) [12].	38
Εικόνα 9. Μοντέλα κεραυνικού πλήγματος (α) σε κυματική αντίστασης και (β) σε γειωμένο αντικείμενο σημαντικού ύψους. Ο κεραυνός αντιπροσωπεύεται από το ισοδύναμο κύκλωμα Norton, στα αριστερά του σχήματος [13].	39
Εικόνα 10. Πίνακας (αριστερά): Τιμές ισοδύναμης κυματικής αντίστασης Z_{ch} του καναλιού του κεραυνού από τη βιβλιογραφία. Εικόνα (δεξιά) η μεταβολή της Z_{ch} σε συνάρτηση με το ρεύμα κορυφής του κεραυνού I_p [14].	40
Εικόνα 11. Παράδειγμα κεραυνικού ρεύματος σύμφωνα με την κυματομορφή της CIGRE [18].	47
Εικόνα 12. Ενδιάμεσες τιμές της διάρκειας μετώπου, t_f , και της μέγιστης κλίσης, S_m , του κεραυνικού ρεύματος συναρτήσει της τιμής κορυφής του, I_{peak} [11].	47
Εικόνα 13. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GIS14(A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV με μόνωση αερίου GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.	49
Εικόνα 14. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GIS01(A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV με μόνωση αερίου GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.	50
Εικόνα 15. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου TRH(A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV με μόνωση αερίου GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.	51
Εικόνα 16. Απεικόνιση τιμών κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 400 kV HVSS1, στους κόμβους GIS14, GIS01 και TRH, για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X).	52
Εικόνα 17. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GIS14(A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό	

- φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 53
- Εικόνα 18. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GIS01A του υποσταθμού HVSS1 (400 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 53
- Εικόνα 19. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου TRH(A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 53
- Εικόνα 20. Απεικόνιση τιμών κορυφών υπερτάσεων στους κόμβους GISIN4(A), GIS01(A) και TRH(A) του υποσταθμού 400 kV HVSS1 GIS, για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X). 54
- Εικόνα 21. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου GISI4(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 55
- Εικόνα 22. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου GIS01(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 56
- Εικόνα 23. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου TRH(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 56
- Εικόνα 24. Απεικόνιση τιμών κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 132 kV HVSS2, στους κόμβους GISIN4(A), GIS01(A) και TRH(A) για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X). 57
- Εικόνα 25. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις στον κόμβο GISI4(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 58
- Εικόνα 26. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις στον κόμβο GIS01(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 58
- Εικόνα 27. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις στον κόμβο TRH(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 58
- Εικόνα 28. Απεικόνιση τιμών κορυφών υπερτάσεων στους κόμβους GISIN4(A), GIS01(A) και TRH(A) του υποσταθμού 132 kV HVSS2 GIS, για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X). 59
- Εικόνα 29. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου SINC του υποσταθμού HVSS3 (400 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 60

Εικόνα 30. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου TRHC του υποσταθμού HVSS3 (400 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 60

Εικόνα 31. Απεικόνιση τιμών κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 400 kV HVSS3, στους κόμβους SIN4(C) και TRH(C) για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω και άπειρη αντίσταση. 61

Εικόνα 32. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου SINA του υποσταθμού HVSS3 (400 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς για τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 62

Εικόνα 33. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου TRHA του υποσταθμού HVSS3 (400 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς για τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 62

Εικόνα 34. Απεικόνιση τιμών κορυφών υπερτάσεων στους κόμβους SIN4(A) και TRH(A) του υποσταθμού 400 kV HVSS3 AIS, για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X). 63

Εικόνα 35. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου SINC του υποσταθμού HVSS4 (161 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 64

Εικόνα 36. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GSUTC του υποσταθμού HVSS4 (161 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 64

Εικόνα 37. Απεικόνιση τιμών κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 161 kV HVSS4, στους κόμβους SIN(C) και GSUT(C) για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X). 65

Εικόνα 38. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου SINA του υποσταθμού HVSS4 (161 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς για τιμές κυματικές αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 65

Εικόνα 39. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GSUTA του υποσταθμού HVSS4 (161 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς για τιμές κυματικές αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση. 66

Εικόνα 40. Απεικόνιση τιμών κορυφών υπερτάσεων στους κόμβους SIN(A) και GSUT(A) του υποσταθμού 161 kV HVSS4 AIS, για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X). 66

Πίνακας 1. Κατηγορίες και γενικές μορφές υπερτάσεων [9]. 30

Πίνακας 2. Τιμές κυματικής αντίστασης καναλιού του κεραυνού προς διερεύνηση. 41

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Πρόλογος

Το φαινόμενο του κεραυνού ήταν ένα από τα πρώτα φυσικά φαινόμενα που παρατήρησε ο άνθρωπος. Η βίαιη φύση και εκδήλωσή του σε συνδυασμό με την άγνοια και το μυστηριώδες τρόπο που αυτός προκαλείται, δημιούργησε φόβο στον άνθρωπο αλλά και ένα κρυφό πόθο ως προς τη μελέτη του φαινομένου αυτού. Από τη φύση του ο κεραυνός προκαλεί επικίνδυνα αποτελέσματα τόσο στον ίδιο τον άνθρωπο όσο και σε κάθε κτίριο ή ηλεκτρικό σύστημα που εκείνος θα πλήξει προκαλώντας έτσι στιγμιαία ή πολλές φορές μόνιμα σφάλματα καθιστώντας επιζήμιες καταστροφές. Τα σφάλματα αυτά είναι αποτελέσματα της έντασης του κεραυνικού ρεύματος που εγγέεται στον αντικείμενο που πλήττεται η οποία καθορίζεται και από την κυματική αντίσταση του εν λόγω κεραυνού. Με λίγα λόγια, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει αναλυτική μελέτη των υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου από πλήγμα κεραυνού που αναπτύσσονται σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Γίνεται η απεικόνιση, μέσω γραφημάτων, των υπερτάσεων που προκαλούνται σε συγκεκριμένους κόμβους των υποσταθμών για διάφορες τιμές της κυματικής αντίστασης του κεραυνικού καναλιού, για διαφορετικά σημεία πλήγματος αλλά και υποσταθμούς. Οι υπερτάσεις προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ATP-EMTP.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι κατηγορίες των υποσταθμών βάση της λειτουργία τους, της θέση εγκατάστασης αλλά και το είδος της μόνωσης του εξοπλισμού ενώ αναφέρονται διαφορές και ζητήματα σύγκρισης μεταξύ τους. Παράλληλα περιγράφονται τα στοιχεία εξοπλισμού των υποσταθμών υψηλής τάσης ενώ γίνεται αναφορά στον συντονισμό των μονώσεων και στην προστασία έναντι υπερτάσεων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο των υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου και των οδευόντων κυμάτων στις εισερχόμενες στους υποσταθμούς γραμμές μεταφοράς ως αποτέλεσμα αυτών. Έμφαση δίνεται στους μηχανισμούς δημιουργίας υπερτάσεων σε υποσταθμούς.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται και επεξηγούνται οι παράμετροι εισόδου για τις κυματομορφές των κεραυνικών ρευμάτων και αναλύεται η ισοδύναμη κυματική αντίσταση του κεραυνικού καναλιού. Περιγράφεται επίσης το ισοδύναμο κύκλωμα Norton που αναπαριστά το κεραυνικό πλήγμα στις προσομοιώσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι υποσταθμοί που διερευνήθηκαν ενώ γίνεται αναφορά στα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να γίνει

η αναπαράσταση των στοιχείων των εναέριων γραμμών μεταφοράς μέσω του λογισμικού ATP-EMTP.

Στο πέμπτο κεφάλαιο απεικονίζονται και αναλύονται τα γραφήματα των υπερτάσεων για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Έμφαση δίνεται στη μέγιστη τιμή των υπερτάσεων.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο καταγράφονται τα τελικά συμπεράσματα βάσει των παραπάνω κεφαλαίων.

Κεφάλαιο 1: Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης

Στο κεφάλαιο αυτό περιέχονται εισαγωγικές πληροφορίες για τους υποσταθμούς υψηλής τάσης και τα στοιχεία που τους αποτελούν. Επίσης γίνεται αναφορά στην ανταλλαγή των στοιχείων των υποσταθμών σε υπερτάσεις και περιγράφονται οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας. Οι πληροφορίες του κεφαλαίου αυτού προέκυψαν σε μεγάλο βαθμό από τις αναφορές [1]-[4].

1.1: Χρησιμότητα και κατηγορίες υποσταθμών υψηλής τάσης

Με την έννοια του υποσταθμού (ΥΣ) σε ένα σύστημα μέσης και υψηλής τάσης (ΜΤ και ΥΤ) γίνεται αναφορά στους κόμβους του συστήματος αυτού μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων τάσης. Η κύρια χρησιμότητα των υποσταθμών σε ένα σύστημα είναι:

- Εκείνη της ανύψωσης αλλά και του υποβιβασμού της τάσης μεταξύ 2 συστημάτων (Υψηλής και Χαμηλής Τάσης),
- Υλοποίηση διακοπτικών χειρισμών για ζεύξεις και αποζεύξεις κυκλωμάτων.

Μέσω αυτών των διακοπτικών χειρισμών:

- εξασφαλίζεται η ροή ισχύος από την παραγωγή ενέργειας προς τον καταναλωτή,
- η έννοια της ασφάλειας αποκτά ουσία καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί, με μεγαλύτερη ευκολία, διακοπή τροφοδοσίας κυκλωμάτων στα οποία έχει εντοπιστεί σφάλμα αλλά και σε εκείνα που απαιτούν συντήρηση.

Οι υποσταθμοί, με βάση τη λειτουργία τους, τη μόνωση του εξοπλισμού αλλά και τη θέση εγκατάστασης, χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες.

α) Κατηγορίες ΥΣ με βάση τη λειτουργία:

- Υποσταθμός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΥΣ ανύψωσης),
- Υποσταθμός συστήματος (διασυνδετικοί ΥΣ μεταξύ συστημάτων),
- Υποσταθμός διανομής (ΥΣ υποβιβασμού),
- Υποσταθμός καταναλωτή (ΥΣ υποβιβασμού).

β) Κατηγορίες ΥΣ με βάση τη θέση εγκατάστασης:

- Εσωτερικού χώρου (Στεγασμένος),
- Εξωτερικού χώρου (Υπαίθριος).

γ) Κατηγορίες ΥΣ με βάση τη μόνωση του εξοπλισμού:

- Μόνωση αέρα (AIS, Air Insulated Substation/Switchgear),
- Μόνωση αερίου (GIS, Gas Insulated Substation/Switchgear),
- Μικτή μόνωση (MTS, Mixed-technology Substation/Switchgear).

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά την κατηγορία AIS, η μόνωση του εξοπλισμού ως προς τη γη αλλά και μεταξύ των φάσεων αποτελείται κατά κύριο λόγο από ατμοσφαιρικό αέρα. Επιπλέον να σημειωθεί πως τα αγωγίμα στοιχεία υπό τάση δεν περικλείονται από γειωμένο περίβλημα, αλλά απλώς στηρίζονται ή αναρτώνται από μονωτήρες.

Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση της μόνωσης μέσω αερίου, τα αγωγίμα στοιχεία υπό τάση προστατεύονται μέσω ενός γειωμένου περιβλήματος, ενώ η ίδια η μόνωση εξασφαλίζεται από την παρουσία μονωτικού αερίου εκτός του ατμοσφαιρικού αέρα. Το μονωτικό αέριο στην περίπτωση των GIS συνηθίζεται να είναι το εξαφθοριούχο θείο, SF₆ (ένωση με μεγάλη διηλεκτρική αντοχή) ή από μίξη αυτού με άλλα αέρια όπως το άζωτο (N₂) για περιβαλλοντικούς λόγους. Τέλος στη μικτή μόνωση (υβριδικό σύστημα) ή MTS, έχουμε τον συνδυασμό των παραπάνω κατηγοριών μόνωσης.

Σήμερα συνηθίζεται η χρήση της μόνωσης αέρα (AIS) αφού εξασφαλίζεται το χαμηλότερο κόστος κατασκευής με εύκολες μελλοντικές επεκτάσεις. Ωστόσο, απαιτείται αρκετά μεγάλη έκταση ενώ θα πρέπει να σημειωθεί πως ο εξοπλισμός είναι εκτεθειμένος σε κάθε λογής περιβαλλοντική συνθήκη. Εξίσου σύνηθες (σε μικρότερο ποσοστό από τους AIS) είναι και η μόνωση αερίου (GIS) που έχει πληθώρα πλεονεκτημάτων:

- Μικρός απαιτούμενος χώρος,
- Μικρή οπτική όχληση,
- Μικρό ηλεκτρικό πεδίο εκτός των περιβλημάτων,
- Η μεγάλη διάρκεια ζωής εξασφαλίζεται με ελάχιστη συντήρηση σε γενικές γραμμές,
- Σε αντίθεση με την κατηγορία AIS, δεν επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες,
- Ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία με λίγα σημεία εκτεθειμένα υπό τάση.

Θα πρέπει όμως να τονιστεί, πως η συγκεκριμένη μορφή μόνωσης απαιτεί αρκετά μεγάλο κόστος κατασκευής και εξίσου μεγάλο χρόνο όσον αφορά τις επιδιορθώσεις βλαβών κάτι που εν κατακλείδι καθιστά τη μόνωση αερίου (GIS) αρκετά δαπανηρή.

Τέλος, αν και όχι τόσο συχνή ως προς τη χρήση της σε σχέση με τις αναφέρουσες κατηγορίες μόνωσης, η μικτή μόνωση (MTS) εξισορροπεί

τις διαφορές μεταξύ AIS-GIS. Πιο συγκεκριμένα:

- Καταλαμβάνει μικρότερο χώρο από τους AIS, όχι όμως από τους GIS,
- Χαρακτηρίζεται από μικρότερη οπτική όχληση από τους AIS, όχι όμως για τους GIS,
- Χαμηλότερο συνολικό κόστος κατασκευής συγκριτικά με τους GIS,
- Ευκολότερη επέκταση υπάρχοντων υποσταθμών (ΥΣ) AIS σε μικρό χώρο.

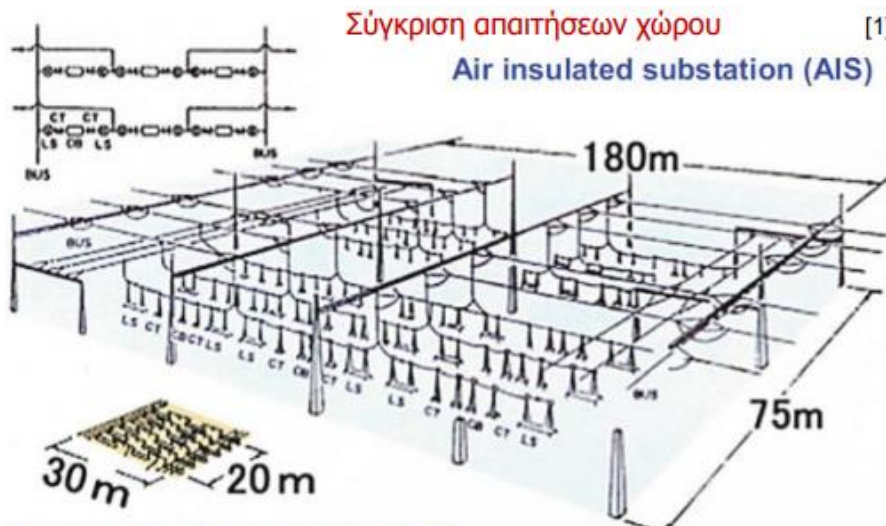
Στην Εικ. 1 και στην Εικ. 2 που ακολουθούν παρουσιάζονται αντίστοιχα παραδείγματα ΥΣ με μόνωση αέρα (AIS) και μόνωση αερίου (GIS). Στην Εικ. 3 γίνεται αναφορά στις διατάξεις AIS και GIS για την ίδια περίπτωση ΥΣ, δηλαδή τη διαφορά τους σε απαιτούμενη έκταση.



Εικόνα 1. Υποσταθμός με μόνωση αέρα (AIS, Air Insulated Substation/Switchgear) [5].



Εικόνα 2. Υποσταθμός με μόνωση αερίου (GIS, Gas Insulated Substation/ Switchgear) [6].



Εικόνα 3. Διαφορές μεταξύ AIS-GIS υποσταθμών όσον αφορά την έκτασή τους ([3] από [7]).

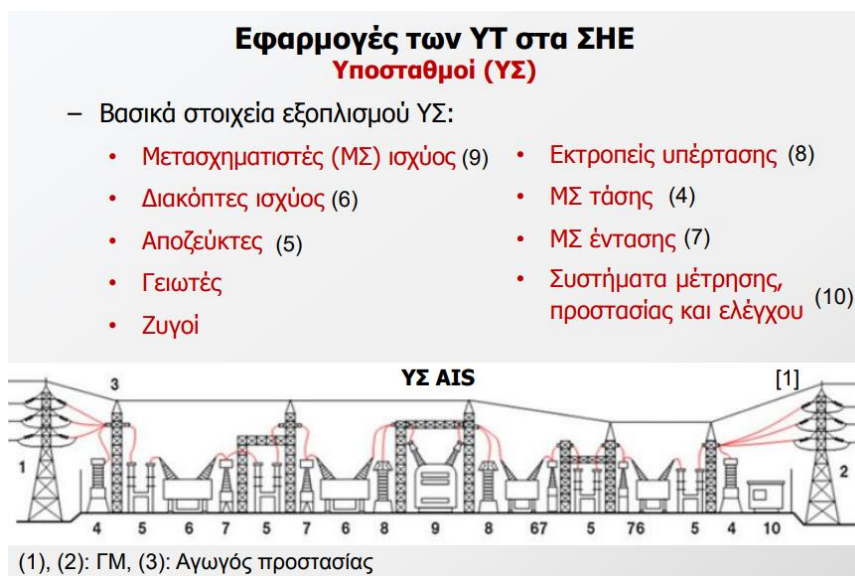
1.2: Στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών υψηλής τάσης

Τα βασικά στοιχεία εξοπλισμού που απαντώνται σε υποσταθμούς υψηλής τάσης είναι τα εξής, όπως φαίνεται και στην Εικ. 4:

- **Μετασχηματιστής Ισχύος:** Αποτελεί βασική συσκευή κάθε υποσταθμού, διότι υποβιβάζει ή ανυψώνει την τάση ανάλογα με το είδος του ΥΣ.
- **Διακόπτες Ισχύος:** Οι διακόπτες ισχύος (circuit breakers) ανοίγουν και κλείνουν το κύκλωμα σε οποιοσδήποτε συνθήκες

λειτουργίας, δηλαδή τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε βραχυκύκλωμα. Ο διακόπτης ισχύος είναι σε θέση να αντέξει, αμέσως μετά τη σβέση του τόξου, στην επιβαλλόμενη τάση του δικτύου.

- Αποζεύκτες: οι αποζεύκτες (απομονωτές) επιτρέπουν να εργαστεί το προσωπικό με ασφάλεια στο κύκλωμα μετά τη διακοπή του (ορατή απόζευξη)
- Γειωτές: συσκευή που γειώνει ενεργά τμήματα ενός συστήματος μετά τη διακοπή της τροφοδοσίας.
- Ζυγοί: Το κυριότερο στοιχείο ενός ΥΣ συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο ζυγός (bus). Οι ζυγοί χρησιμοποιούνται για να αποτελέσουν σημεία συνδέσεων στους υποσταθμούς όπου συνδέονται οι διάφορες συσκευές.
- Εκτροπείς υπέρτασης: συσκευή που έχει σχεδιαστεί για την προστασία ηλεκτρικών συσκευών ή κυκλωμάτων από υπερτάσεις. Προσπαθούν να περιορίσουν την τάση που εφαρμόζεται σε μια ηλεκτρική συσκευή όταν υπάρξουν συνθήκες υπέρτασης. Πρόκειται για μη γραμμικές αντιστάσεις.
- Μετασχηματιστής τάσης: Χρησιμοποιείται για υποβιβασμό και μέτρηση της ΥΤ.
- Μετασχηματιστής Έντασης: Είναι αναγκαίοι για τη μέτρηση υψηλών ρευμάτων ή ρευμάτων σε επίπεδα υψηλής τάσης, γιατί είναι σχεδόν ανέφικτο να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένας μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας με επαρκές μέγεθος, σε σύγκριση με τα σημερινά μεγέθη των μετρητών, και με επαρκές επίπεδο μόνωσης, ώστε να μετριέται απευθείας το ρεύμα.
- Συστήματα μέτρησης, προστασίας και ελέγχου, που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία ενός υποσταθμού.



Εικόνα 4. Βασικά στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών (μόνωση αέρα, AIS) [3].

1.3: Αντοχή στοιχείων εξοπλισμού και προστασία έναντι υπερτάσεων

Σε ένα υποσταθμό θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή επιλογή των μονώσεων που θα προστατεύουν το σύστημα (συντονισμός μονώσεων). Η διηλεκτρική αντοχή του εξοπλισμού που θα επιλεγθεί θα πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες του υποσταθμού σε ζητήματα τάσεων λειτουργίας αλλά και πιθανών υπερτάσεων που ενδέχεται να επηρεάσουν τον ίδιο, υπό την προϋπόθεση ότι λαμβάνεται υπόψη το περιβάλλον λειτουργίας αλλά και τα χαρακτηριστικά των διατάξεων προστασίας. Για τη σωστή μόνωση του συστήματος θα πρέπει να γίνει αντιληπτή η έννοια της εξωτερικής μόνωσης, η οποία εξαρτάται από την επίδραση στου περιβάλλοντος, που αποτελεί συνδυασμό της απόστασης του ατμοσφαιρικού αέρα και των στερεών μονωτικών επιφανειών του εξοπλισμού σε επαφή με τον αέρα.

Παράλληλα, για τη σωστή λειτουργικότητα πρέπει να δοθεί έμφαση στην εσωτερική μόνωση, που οφείλει να έχει το σύστημα, η οποία αφορά οι εσωτερικές αποστάσεις σε μονώσεις εξοπλισμού κάθε τύπου (στερεές, υγρές ή αέριες). Οι μονώσεις αυτές προστατεύονται από τις εξωτερικές συνθήκες.

Στη συνέχεια θα πρέπει να υλοποιηθεί η διαδικασία του συντονισμού μονώσεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, γίνεται επιλογή της μέγιστης τάσης λειτουργίας που θα καταπονήσει τον εξοπλισμό αλλά και των αντίστοιχων τυποποιημένων επιπέδων (standard insulation levels) που αφορούν υπερτάσεις. Να σημειωθεί πως τα επίπεδα μόνωσης (εν συντομία οι τάσεις αντοχής), είναι εκείνα που χαρακτηρίζουν τη μόνωση του εξοπλισμού. Για τις κεραυνικές υπερτάσεις, με τις οποίες σχετίζεται η διπλωματική αυτή, το επίπεδο μόνωσης ονομάζεται Lightning Impulse Withstand voltage Level (LIWL) ή αλλιώς Basic Insulation Level (BIL) και αναφέρεται σε κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (κυματομορφή: 12/50 μ s). Αντιστοιχεί σε πιθανότητα διάσπασης 10% για εξωτερικές μονώσεις.

Όσον αφορά τη διαδικασία που απαιτείται για το συντονισμό των μονώσεων θα πρέπει να γίνει η ακολουθιακή υλοποίηση των εξής βημάτων:

- α) Εκτίμηση των αντιπροσωπευτικών υπερτάσεων (Representative over voltages U_{rp}) που πιθανολογείται να εμφανιστούν στο σύστημα αλλά και τα χαρακτηριστικά αυτών,
- β) Εκτίμηση των τάσεων αντοχής συντονισμού των μονώσεων (co-ordination withstand voltages, U_{cw}),
- γ) Εκτίμηση των απαιτούμενων τάσεων αντοχής (required withstand voltages, U_{rw}),
- δ) Τελικώς, επιλογή των τυποποιημένων επιπέδων μόνωσης του αναφερθέντος εξοπλισμού.

Κατά τη διαδικασία του συντονισμού μονώσεων η εκτίμηση των αντιπροσωπευτικών υπερτάσεων γίνεται μέσω αναλυτικών υπολογισμών ή μέσω προσομοιώσεων. Αναλύονται οι αναμενόμενες προσωρινές (TOV), μεγάλης διάρκειας μετώπου (SFO) και μικρής διάρκειας μετώπου (FFO) υπερτάσεις. Στο δεύτερο βήμα, για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας, θα πρέπει να σχολιαστεί η έννοια των τάσεως αντοχής: είναι η μορφή τάσεων της μόνωσης που εξασφαλίζει τις απαιτήσεις, υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην εκτίμησή τους, καθώς πρέπει να γίνουν ξεχωριστοί υπολογισμοί για τις εσωτερικές μονώσεις και τις αντίστοιχες εξωτερικές. Αντίστοιχα απαιτούμενες τάσεις αντοχής, ονομάζονται οι τάσεις δοκιμής που πρέπει να αντέξουν οι μονώσεις σε επαναλαμβανόμενες δοκιμές, ώστε να επιτευχθεί ασφάλεια κατά των ενδεχόμενων υπερτάσεων που πιθανόν να εμφανιστούν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού. Τέλος για τα επιλεχθέντα επίπεδα μόνωσης, ισχύει το πρότυπο IEC 60071-1 όπου προβλέπει συγκεκριμένα επίπεδα μόνωσης του εξοπλισμού, βασιζόμενα στη μέγιστη τάση λειτουργίας του. Βάση των τιμών των υπερτάσεων, υπάρχουν 2 κατηγορίες επιπέδων τάσης:

- Περιοχή I: $1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$,
- Περιοχή II: $U_m > 245 \text{ kV}$.

Να σημειωθεί πως στην Περιοχή I, πιο επικίνδυνες υπερτάσεις είναι εκείνες της μικρής διάρκειας μετώπου (FFO) που προκαλούνται από κεραυνικά πλήγματα, ενώ στην Περιοχή II μεγαλύτερο κίνδυνο αποτελούν οι υπερτάσεις μεγάλης διάρκειας μετώπου (SFO), κυρίως σε περιπτώσεις μεγαλύτερων επιπέδων τάσης. Αυτό ισχύει γιατί στην Περιοχή I οι αναμενόμενες κεραυνικές υπερτάσεις είναι σχετικά μεγάλες σε σχέση με το επίπεδο μόνωσης του συστήματος. Το επίπεδο αυτό γίνεται όλο και πιο μεγάλο όσο ανεβαίνει η τάση λειτουργίας και έτσι στην Περιοχή II οι FFO έχουν μικρότερη αξία.

1.3.1: Εκτροπείς Υπέρτασης

Σε παραλληλία με την επιλογή και το συντονισμό των μονώσεων θα πρέπει να γίνει μελέτη για την επιλογή του τύπου ή των τύπων εκτροπέα υπέρτασης που θα χρησιμοποιηθούν για την προστασία του εξοπλισμού.

Εκτροπέας υπέρτασης (Surge Arrester, SA), γενικότερα, είναι μια συσκευή που αποσκοπεί στην προστασία του εξοπλισμού από την παρουσία μεταβατικών τάσεων αλλά και τη μείωση του εύρους διάρκειας του ρεύματος (follow-current) που ρέει μέσω του εκτροπέα εξαιτίας της συνδεδεμένης πηγής ισχύος. Το παραπάνω ρεύμα, ακολουθεί μετά το ρεύμα του μεταβατικού φαινομένου που διαρρέει αντίστοιχα τον εκτροπέα (discharge current). Βασική λειτουργία ενός SA είναι ο περιορισμός των υπερτάσεων σε ένα προδιαγεγραμμένο επίπεδο προστασίας (protective level). Με τον τρόπο αυτό

εξασφαλίζεται η προστασία του εξοπλισμού αρκεί ο SA να αντέξει την ενέργεια που θα δεχθεί. Οι εκτροπείς αποτελούν ένα απαραίτητο στοιχείο στον συντονισμό των μονώσεων σε υποσταθμούς (AC και DC) και σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (αν και σπανιότερα, Εικ. 5), ενώ παράλληλα δεν πρέπει να έχουν καμία ουσιαστική επίδραση στο σύστημα ισχύος κατά την μόνιμη λειτουργία του. Για να μπορέσει ένας εκτροπέας να θεωρηθεί ιδανικός θα πρέπει να πληρούνται προϋποθέσεις σύμφωνα με τις οποίες:

- α) Ο SA δεν άγει υπό την τάση λειτουργίας του συστήματος στο οποίο εγκαθίσταται για να αποφευχθούν οι απώλειες,
- β) Άγει όταν $V > a \cdot V_{rated}$ (σε περίπτωση που υφίσταται υπέρταση) διατηρώντας σταθερή την τιμή της τάσης στα άκρα του, ώστε να προστατέψει τον εξοπλισμό,
- γ) Παύει να άγει μόλις $V \approx V_{rated}$, δηλαδή επιστρέφει στην αρχική κατάσταση.

Η λειτουργία των SA επιτυγχάνεται με ένα ενεργό μέρος που αποτελείται από μια σειριακή σύνδεση μη γραμμικών αντιστάσεων. Η λειτουργία των αντιστάσεων οξειδίου μετάλλου (Metal Oxide, MO) είναι βασικά πολύ απλή. Σε περίπτωση αύξησης της τάσης στους ακροδέκτες του εκτροπέα, το ρεύμα αυξάνεται σύμφωνα με τη χαρακτηριστική καμπύλη $V-I$ του εκτροπέα.

Σε περίπτωση έγχυσης ενός ισχυρού ρεύματος στο σύστημα, όπως συμβαίνει κατά τη διάρκεια ενός πλήγματος κεραυνού σε μια εναέρια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η παραμένουσα τάση στα άκρα του εκτροπέα είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την αντοχή του εξοπλισμού. Αφού υποχωρήσει το κύμα της υπέρτασης, το ρεύμα που διαρρέει τον εκτροπέα γίνεται μικρότερο σύμφωνα με τη χαρακτηριστική καμπύλη. Οι εκτροπείς υπερτάσεων ως διάταξη προστασίας πρέπει να εγκατασταθούν όσο το δυνατόν πιο κοντά στο



Εικόνα 5. Πιθανός τρόπος σύνδεσης του εκτροπέα μεταξύ πυλώνα και φάσης για την προστασία μονωτήρων αποτρέποντας την ηλεκτρική διάσπαση μεταξύ φάσης και πυλώνα [8].

αντικείμενο προς προστασία γιατί υπάρχουν πτώσεις τάσης επάνω στους αγωγούς σύνδεσης με συνέπεια να προσφέρουν σημειακή προστασία σε σχετικά μικρή απόσταση από το σημείο εγκατάστασης. Οι λεγόμενες προστατευτικές αποστάσεις («αποστάσεις διαχωρισμού» σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα) είναι αρκετά μικρές και κυμαίνονται από περίπου λιγότερο του 1 m σε σιδηροδρομικές εφαρμογές, έως 50 m σε συστήματα EHV και UHV. Οι αποστάσεις αυτές προσδιορίζονται με προσεγγιστικούς υπολογισμούς ή με προσομοιώσεις σε κάθε περίπτωση. Γενικά είναι καλό η απόσταση εγκατάστασης των εκτροπέων υπέρτασης από τον εξοπλισμό που πρέπει να προστατευθεί να είναι μικρή.

Ως προστατευτική συσκευή, ο εκτροπέας υπέρτασης πρέπει να αντέχει διαφορετικές ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις. Οι ηλεκτρικές καταπονήσεις στους SA μπορούν να διαιρεθούν σε τάσεις στη βιομηχανική συχνότητα, οι οποίες μπορεί να έχουν μεγάλη διάρκεια και παροδικές καταπονήσεις μικρής διάρκειας που προκύπτουν από χειρισμούς (εσωτερικές υπερτάσεις) και κεραυνικά πλήγματα.

Για εφαρμογές υποσταθμού, οι εκτροπείς υπερτάσεων οξειδίου μετάλλου (MO, οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO)) χωρίς διάκενα, είναι οι τελευταίας τεχνολογίας και χρησιμοποιούνται από τα τέλη της δεκαετίας του 1980. Νέοι υποσταθμοί συνήθως σχεδιάζονται με εκτροπείς υπερτάσεων MO. Ωστόσο, ακόμα υπάρχουν SA που λειτουργούν σε παλαιότερες εγκαταστάσεις με τεχνολογία καρβιδίου του πυριτίου (SiC) με διάκενα. Για γραμμές μεταφοράς, διατίθενται SA γραμμής χωρίς διάκενο (NGLA) αλλά χρησιμοποιούνται και εκτροπείς με εξωτερικό διάκενο (EGLA) (κυρίως σε ασιατικές χώρες). Και στις δύο περιπτώσεις τα εξαρτήματα που περιορίζουν την υπέρταση είναι αντιστάσεις MO όπως και στους εκτροπείς των υποσταθμών, αν και αυτοί μοιάζουν περισσότερο με τους εκτροπείς γραμμών μεταφοράς χωρίς διάκενα NGLA. Πλέον, οι εκτροπείς υπερτάσεων MO, εγκαθίστανται σε AC και DC συστήματα με πολύ διαφορετικά επίπεδα τάσης (πρακτικά σε όλα τα υπαρκτά συστήματα). Χρησιμοποιούνται σε υποσταθμούς με μόνωση αέρα (AIS) και υποσταθμούς με μόνωση αερίου (GIS). Στην τελευταία περίπτωση συνήθως χρησιμοποιούνται τυπικοί εκτροπείς στις εισόδους του ΥΣ, αν και σπανιότερα χρησιμοποιούνται εκτροπείς υπέρτασης GIS που έχουν μόνωση αερίου. Αυτοί όμως είναι πιο ακριβοί. Τέλος, χρησιμοποιούνται σε καλωδιακά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για την προστασία των καλωδίων αλλά και των μανδύων όπου απαιτείται.

1.4: Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Στα πλαίσια του συντονισμού μονώσεων γίνονται προσομοιώσεις για να προσδιοριστούν οι αναμενόμενες κεραυνικές υπερτάσεις σε ΥΣ. Κεραυνικά ρεύματα μπορούν να εισέλθουν σε ΥΣ μόνο από τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διότι οι ΥΣ διαθέτουν σύστημα αντικεραυνικής προστασίας που τους προστατεύει αξιόπιστα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κεραυνικών πληγμάτων στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζονται από πολλές παραμέτρους, η επιλογή των οποίων είναι σημαντική για το αποτέλεσμα της μελέτης συντονισμού μονώσεων. Μία από τις παραμέτρους αυτές που χρήζει διερεύνησης είναι η κυματική αντίσταση του κεραυνικού καναλιού. Η αντίσταση αυτή είναι στοχαστική παράμετρος και μεταβάλλεται ανάμεσα στα κεραυνικά πλήγματα. Καθορίζει το πόσο κεραυνικό ρεύμα θα περάσει προς τη γραμμή μεταφοράς και έτσι και προς τον ΥΣ. Η διπλωματική εργασία αυτή θα διερευνήσει σε ΥΣ AIS και GIS διαφόρων επιπέδων τάσης την επίδραση της κυματικής αντίστασης του κεραυνικού καναλιού στις αναπτυσσόμενες κεραυνικές υπερτάσεις. Η διερεύνηση θα γίνει μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ATP-EMTP.

Κεφάλαιο 2: Υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν οι αιτίες ανάπτυξης υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου σε ΥΣ ΥΤ, με σημαντικότερη τα κεραυνικά πλήγματα στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Θα παρουσιαστούν οι μηχανισμοί δημιουργίας των υπερτάσεων αυτών και θα γίνει αναφορά στην αντικεραυνική προστασία των ίδιων των ΥΣ.

2.1: Αιτίες ανάπτυξης υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης

Με τον όρο υπέρταση γίνεται αναφορά στην τιμή της τάσης με τιμή μεγαλύτερη της μέγιστης τάσης στη στάσιμη κατάσταση λειτουργίας του εξοπλισμού. Αν και ως επί το πλείστον είναι αντιμετωπίσιμες, προξενούν προβλήματα στην ομαλή λειτουργία του συστήματος, καταπονώντας τις μονώσεις του εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή μίας υπέρτασης που θα εμφανιστεί (peak), είναι εκείνη που προκαλεί τις μεγαλύτερες καταπονήσεις στις μονώσεις. Οι υπερτάσεις, συνήθως εμφανίζονται μεταξύ φάσης-γης αλλά και μεταξύ των φάσεων.

Η κατηγοριοποίηση των υπερτάσεων βάση της συχνότητας/διάρκειας (σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60071-1, Πίνακας 1) είναι:

- Προσωρινές υπερτάσεις (Temporary, TOV), πρόκειται για φαινόμενα χαμηλών συχνοτήτων (10-500 Hz, 0.02-3600 s),
- Μεγάλης Διάρκειας Μετώπου (Slow-front, SFO) (T_P : 20-5000 μ s, T_2 : 20 ms),
- Μικρής Διάρκειας Μετώπου (Fast-front, FFO) (T_P : 0.1-20 μ s, T_2 : 300 ms),
- Πολύ μικρής διάρκειας μετώπου (Very-fast-front, VFFO) ($T_f \leq 0.1 \mu$ s, f_1 : 0.3-100 MHz, f_2 : 30-300 kHz) σε ΥΣ GIS.

Οι τρεις τελευταίες κατηγορίες της παραπάνω λίστας ονομάζονται και μεταβατικές υπερτάσεις (transient overvoltages).

Όσον αφορά τις υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου (FFO), που αποτελούν αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, ονομάζονται και εξωτερικές υπερτάσεις, καθώς το σημαντικότερο αίτιό τους (οι κεραυνοί) είναι εξωτερικό για το σύστημα. Οι FFO έχουν τη μορφή οδεύοντος κύματος (κύμα που διαδίδεται σε ένα μέσο).

Πίνακας 1. Κατηγορίες και γενικές μορφές υπερτάσεων [9].

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes	 $f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ T_1^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Standard withstand voltage test	a	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	a

Όπως αναφέρθηκε ήδη, μία από τις κύριες αιτίες που προκαλούν υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου αποτελούν τα πλήγματα κεραυνού. Τα πλήγματα αυτά σε εναέριες γραμμές μπορεί να είναι έμμεσα: πλήγματα σε γειτονικά αντικείμενα ή στο έδαφος τα οποία προκαλούν επαγωγή υπερτάσεων (οδεύοντα κύματα), τα οποία ωστόσο είναι επικίνδυνα μόνο σε γραμμές διανομής (MT και XT) λόγω του μικρού βασικού επιπέδου μόνωσής τους (Basic Insulation Level, BIL), αλλά και άμεσα: πλήγμα κεραυνού σε αγωγό φάσης ή σε κάποιο γειωμένο στοιχείο (π.χ. πυλώνας). Άλλη αιτία που προκαλεί τις υπερτάσεις FFO είναι η εμφάνιση σφαλμάτων. Τέλος, οι διακοπτικοί χειρισμοί μπορούν να προκαλέσουν υπερτάσεις FFO. Οι τελευταίες κατηγορίες δεν είναι τόσο επικίνδυνες και δεν εξετάζονται.

2.2: Εισερχόμενες κεραυνικές υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης

Κατά τη σχεδίαση ενός υποσταθμού πρέπει να ληφθεί υπόψη η τάση βιομηχανικής συχνότητας του δικτύου για ολόκληρο τον εξοπλισμό που είναι εγκατεστημένος στον υποσταθμό. Πρέπει επίσης να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις προσωρινές υπερτάσεις της βιομηχανικής συχνότητας που προκαλούνται π.χ. από ξαφνική απώλεια φορτίου ή σφάλματα, καθώς και οι υπερτάσεις λόγω χειρισμών και οι κεραυνικές υπερτάσεις. Για να προσδιοριστεί η ικανότητα αντοχής του εξοπλισμού, αυτός υπόκειται σε δοκιμές ως εξής:

- Κανονικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (12/50 μ s),
- Κανονικές εσωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (250/2500 μ s),
- AC τάση βιομηχανικής συχνότητας (50 ή 60 Hz).

2.2.1: Οδεύοντα κύματα στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς

Οι πηγές των οδευόντων κυμάτων στις εισερχόμενες σε ΥΣ εναέριες γραμμές είναι οι εξής:

- **Ανάστροφη διάσπαση (backflashover):** Συμβαίνει σε γραμμές μεταφοράς που είναι θωρακισμένες έναντι κεραυνικών πληγμάτων. Ένας κεραυνός, όταν πλήξει τον αγωγό προστασίας ή έναν πυλώνα, θα κατευθυνθεί προς τη γη χωρίς να προκαλέσει τυχόν βλάβες αν η αντίσταση γείωσης των πυλώνων είναι μικρή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων κεραυνικών ρευμάτων ή μεγάλων τιμών αντίστασης γείωσης ένα πλήγμα σε ένα αγωγό προστασίας ή πυλώνα μπορεί να ανυψώσει το δυναμικό του πυλώνα πολύ πάνω από αυτό ενός αγωγού φάσης ανάλογα με το ρεύμα του κεραυνικού πλήγματος. Αποτέλεσμα αυτού θα είναι να προκύψει επιφανειακή διάσπαση (flashover) από τον πυλώνα σε έναν ή περισσότερους αγωγούς φάσης. Αυτό θα ακολουθείται από ένα ρεύμα σφάλματος γης βιομηχανικής συχνότητας μέσα από την ιονισμένη διαδρομή, που ρέει μέσα την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του ρεύματος της κεραυνικής υπέρτασης. Μία ανάστροφη διάσπαση θα δημιουργήσει ένα οδεύον κύμα υπέρτασης εξαιρετικά υψηλού ρυθμού ανόδου (κλίση μετώπου) στον αγωγό φάσης. Αυτό θα εισέλθει στους συνδεδεμένους ΥΣ. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι καθώς το κύμα οδεύει στον αγωγό φάσης αποσβένεται λόγω των απωλειών της γραμμής και ίσως εκκενώσεων κορώνων. Έτσι αν το σημείο όπου συνέβη η ανάστροφη διάσπαση είναι μακριά από τον ΥΣ αυτός δεν θα δεχθεί μεγάλες υπερτάσεις.
- **Απευθείας κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης:** Στην περίπτωση που μια γραμμή μεταφοράς δεν είναι θωρακισμένη, αυξάνονται οι πιθανότητες ώστε το κεραυνικό πλήγμα να κατευθυνθεί προς τους αγωγούς φάσης. Περιστασιακά, θα συμβεί ένα άμεσο πλήγμα σε έναν αγωγό φάσης ακόμη και στην περίπτωση μιας θωρακισμένης γραμμής. Με καλά σχεδιασμένη θωράκιση, τα λεγόμενα «σφάλματα θωράκισης» δεν αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 1% στατιστικά όλων των πληγμάτων στη γραμμή. Γενικά, τα κεραυνικά πλήγματα που οδηγούν σε σφάλμα θωράκισης σε θωρακισμένες γραμμές μεταφοράς θα έχουν χαμηλότερες τιμές υπέρτασης, διότι αντιστοιχούν σε κεραυνικά πλήγματα με μικρά ρεύματα. Τα οδεύοντα κύματα λόγω σφαλμάτων θωράκισης κινούνται στον αγωγό φάσης που έχει πληγεί και εισέρχονται στους ΥΣ καταπονώντας τον εξοπλισμό.

- **Επαγόμενες υπερτάσεις:** Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι κεραυνοί μεταξύ νέφους-εδάφους που συμβαίνουν εντός 1 km από μία εναέρια γραμμή διαχέουν το ρεύμα τους στο έδαφος μέσω γειωμένων αντικειμένων. Ωστόσο, θα προκαλέσουν επαγόμενες υπερτάσεις στους αγωγούς φάσης των εναέριων γραμμών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Τα πλάτη των υπερτάσεων (μέγιστες τιμές), θα εξαρτηθούν από το ρεύμα του κεραυνού και την απόσταση του σημείου πλήγματος από τη γραμμή, αλλά σπάνια θα υπερβαίνουν τα ~200 kV. Έτσι, ενώ οι επαγόμενες υπερτάσεις μπορεί να αντιπροσωπεύουν μεγάλο ποσοστό των κεραυνών στα ηλεκτρικά δίκτυα, έχουν μικρή σημασία για τις εναέρια γραμμές μεταφοράς και τους ΥΣ ΥΤ γιατί είναι μικρές σε σχέση με το βασικό επίπεδο μόνωσης και επιπλέον, δεν έχουν ιδιαίτερα απότομο μέτωπο. Συνεπώς ο εξοπλισμός των ΥΣ δεν κινδυνεύει από την κατηγορία αυτή.

2.2.2: Επίπτωση οδευόντων κυμάτων που εισέρχονται σε υποσταθμούς και προστασία από αυτά

Η πλειονότητα των υπερτάσεων εξαιτίας των κεραυνών που επηρεάζουν τους υποσταθμούς, εισέρχονται στον υποσταθμό ως οδεύοντα κύματα στις εναέρια γραμμές. Οι κεραυνικές υπερτάσεις και οι ρυθμοί (συχνότητα) εμφάνισής τους σε υποσταθμούς εξαρτώνται από:

- α) την κεραυνική δραστηριότητα και τον αριθμό των εναέριων γραμμών που συνδέονται με τον κάθε ΥΣ,
- β) τη διάταξη και το μέγεθος του υποσταθμού,
- γ) τον αριθμό, τη διάταξη και την απόδοση των εκτροπέων υπέρτασης,
- δ) τη στιγμιαία τιμή της τάσης λειτουργίας της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης, καθώς η κεραυνική υπέρταση είναι πολύ μικρή σε διάρκεια και υπερτίθεται σε αυτή.

Ένα κεραυνικό ρεύμα θα οδεύσει και προς τις δύο κατευθύνσεις από το σημείο όπου δεχθεί πλήγμα ο αγωγός, έτσι ώστε η κυματική αντίσταση είναι ουσιαστικά η μισή κυματική αντίσταση του αγωγού. Τα οδεύοντα κύματα που προκύπτουν από άμεσα πλήγματα σε αγωγούς φάσης έχουν απότομα μέτωπα. Ανάλογα με το πλάτος τους, μπορεί να συμβεί ηλεκτρική διάσπαση σε παρακείμενο πυλώνα λόγω μεγάλης καταπόνησης της μόνωσης. Τα πλάτη των υπερτάσεων που αναπτύσσονται σε ΥΣ ενδέχεται να είναι σημαντικά, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις χωρίς επαρκή περιορισμό των υπερτάσεων από εκτροπείς υπέρτασης. Σε άλλη περίπτωση, όμως, και συγκεκριμένα σε καλωδιακή σύνδεση του δικτύου μεταφοράς με υποσταθμούς, η «αυτοπροστασία» που παρέχεται από τη χαμηλή κυματική αντίσταση των καλωδίων ισχύος μπορεί μειώσει τα πλάτη των κεραυνικών υπερτάσεων σε αρκετά χαμηλές τιμές.

Οι υπερτάσεις που προκαλούνται από ανάστροφες διασπάσεις (backflashovers) είναι κυρίαρχες μεταξύ των υπερτάσεων από κεραυνούς. Επιπλέον οι ανάστροφες διασπάσεις είναι πιο πιθανό να συμβούν στη φάση που έχει την υψηλότερη στιγμιαία τιμή εναλλασσόμενης τάσης λειτουργίας αντίθετης πολικότητας από αυτή του κεραυνού. Όταν εμφανίζεται η διάσπαση, η σύνθετη αντίσταση μέσω της οποίας ρέει το ρεύμα εξαρτάται από τη σύνθετη αντίσταση του αγωγού, την κυματική αντίσταση του πυλώνα και της γείωσής του. Τα οδεύοντα κύματα υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω των ωμικών απωλειών στον αγωγό. Εάν η υπέρταση έχει τιμή που υπερβαίνει το επίπεδο έναυσης του φαινομένου κορώνα (κρουστική κορώνα, ηλεκτρικές εκκενώσεις γύρω από τον αγωγό), θα προκύψει περαιτέρω εξασθένηση με αποτέλεσμα τη μείωση της απότομης κλίσης του μετώπου του κύματος.

Επιπροσθέτως, μπορεί να συμβεί ένα σφάλμα θωράκισης σε έναν αγωγό φάσης ή μία ανάστροφη διάσπαση κοντά σε έναν υποσταθμό, δημιουργώντας ένα πολύ απότομο σε μέτωπο κύμα, το οποίο παρουσιάζει σοβαρό κίνδυνο για τον εξοπλισμό. Αυτό συμβαίνει διότι δεν προλαβαίνει να αποσβεστεί λόγω των μικρών αποστάσεων. Εάν, για λόγους ελέγχου της ρύπανσης, το επίπεδο μόνωσης της γραμμής είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση σε σχέση με αυτό του υποσταθμού, ένας κεραυνός που πλήττει άμεσα έναν αγωγό φάσης μπορεί να μη δημιουργήσει διάσπαση στη γραμμή που θα οδηγήσει μέρος του κεραυνικού ρεύματος στο έδαφος και επομένως μείωση της υπέρτασης, αλλά θα εισέλθει στον υποσταθμό ολόκληρο το κύμα δημιουργώντας προβλήματα.

Με βάση τα παραπάνω, η κοινή πρακτική πλέον είναι να εγκαθίστανται εκτροπείς υπέρτασης σε κάθε φάση στην είσοδο του ΥΣ, όταν σε αυτόν συνδέονται εναέριες γραμμές, αλλά και σε άλλα σημεία κοντά σε κρίσιμο εξοπλισμό.

2.2.3: Απόδοση προστασίας εκτροπέων υπέρτασης

Οι εκτροπείς υπέρτασης συνήθως εγκαθίστανται δίπλα σε όλους τους μετασχηματιστές ισχύος, σε συνδέσεις αυτεπαγωγών υψηλής τάσης (reactors), στους ακροδέκτες καλωδίων ισχύος, στις εισόδους και εξόδους ΥΣ GIS και στις εισόδους εισερχόμενων γραμμών σε ΥΣ για την προστασία του εξοπλισμού από οδεύοντα κύματα, είτε αυτά προκύπτουν από κεραυνό ή χειρισμούς. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα της χρήσης τους, είναι το γεγονός ότι καταστροφή τους από κάποια υπέρταση με μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο οδηγεί σε σφάλμα φάσης-γης στο σύστημα. Επιπλέον, παρέχουν κακή προστασία από πολύ απότομα κύματα (μεγάλη κλίση στο μέτωπο) λόγω της εγγενούς χρονικής υστέρησης της απόκρισής τους. Η απόδοση προστασίας των εκτροπέων υπέρτασης έναντι κεραυνικών υπερτάσεων εξαρτάται από:

- το πλάτος και τη μορφή του κύματος της υπέρτασης,
- τα χαρακτηριστικά του εκτροπέα,

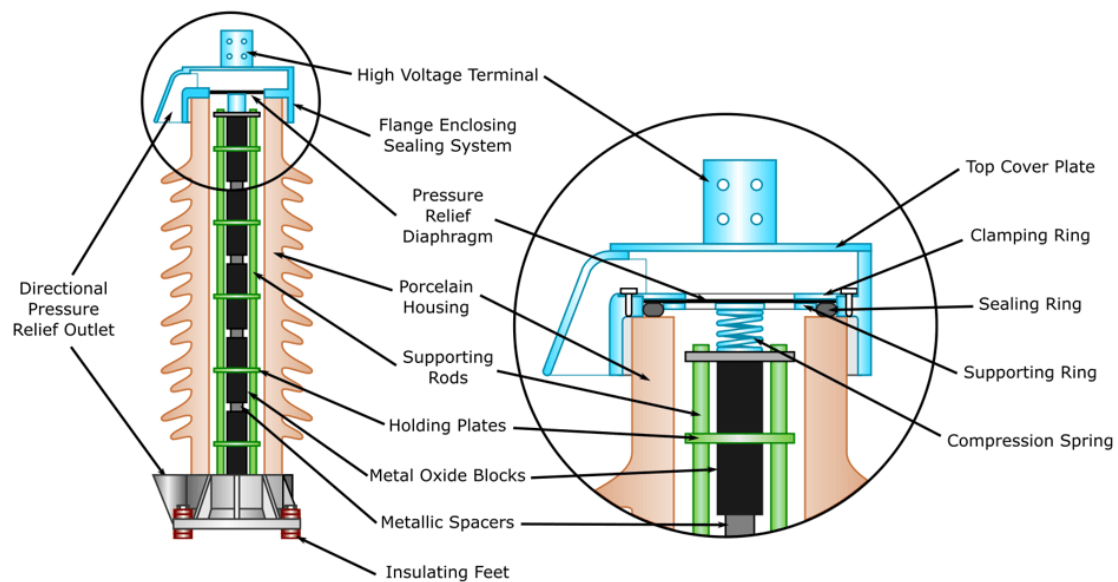
- την κρουστική αντίσταση ή/και τη χωρητικότητα του προστατευμένου εξοπλισμού,
- την απόσταση μεταξύ του εκτροπέα και του προστατευμένου εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένης της γείωσής του,
- ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά των συνδεδεμένων γραμμών στον ΥΣ.

Γενικότερα, οι εκτροπείς υπέρτασης αναγνωρίζονται διεθνώς ως η πιο αποτελεσματική προστασία έναντι υπέρτασης για ευάλωτο εξοπλισμό υποσταθμού. Το ρεύμα υπέρτασης που αντλείται από τη μη γραμμική αντίσταση προκαλεί πτώση τάσης κατά μήκος της κρουστικής αντίστασης της πηγής, περιορίζοντας την τάση κατά μήκος του προστατευμένου εξοπλισμού. Η υπέρταση εκτρέπεται στη γη μέσω του εκτροπέα χωρίς να προκαλέσει τη διακοπή κυκλώματος (δηλαδή σφάλμα γης). Ο σύγχρονος τύπος εκτροπέα είναι ο εκτροπέας οξειδίου μετάλλου (ΜΟ) χωρίς διάκενο (Εικ. 6), μερικές φορές αναφέρεται ως εκτροπέας οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO), ο οποίος έχει αντικαταστήσει τον εκτροπέα καρβιδίου του πυριτίου (SiC) με διάκενο, λόγω των υπέρτερων μη γραμμικών χαρακτηριστικών του.

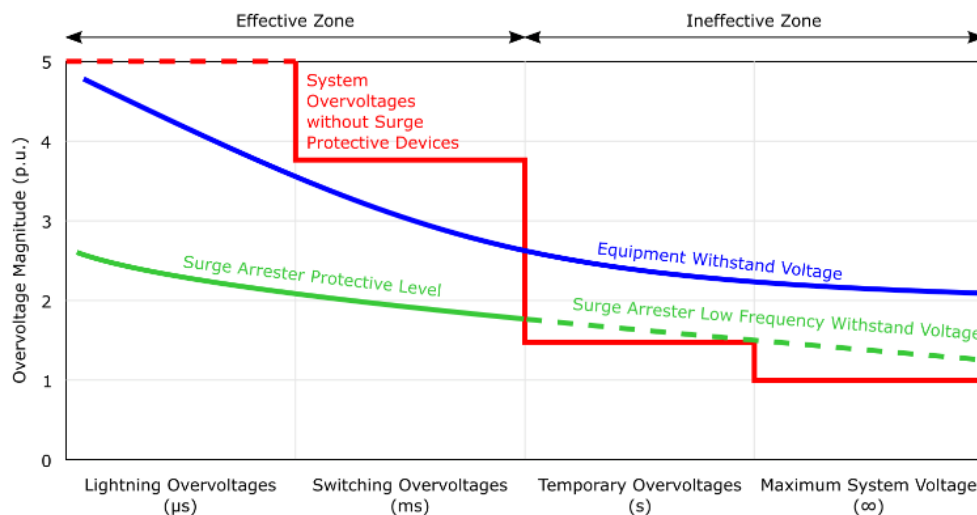
Για τον προσδιορισμό της απορρόφησης ενέργειας των εκτροπέων υπέρτασης που είναι εγκατεστημένοι σε έναν υποσταθμό, μπορεί να υποθεθεί προσεγγιστικά ότι το πλάτος της πιθανής κεραυνικής υπέρτασης μπορεί να είναι ίσο με το αρνητικό επίπεδο μόνωσης LIWV της εναέριας γραμμής. Ωστόσο, να σημειωθεί πως για τη συνολική απορρόφηση ενέργειας, είναι αναγκαίο να εξεταστεί η πιθανότητα όπου ένας κεραυνός μπορεί να έχει πολλαπλά πλήγματα (πρώτο πλήγμα και επακόλουθα πλήγματα). Επομένως, ο προσδιορισμός της απαιτούμενης ενεργειακής αντοχής απαιτεί προσομοιώσεις για να γίνει με καλή ακρίβεια.

Να τονιστεί ότι μεγάλο ρόλο στα ζητήματα προστασίας του υποσταθμού από κεραυνικά πλήγματα, παίζει η απόσταση εκτροπέα-προστατευόμενου αντικείμενου, καθώς σε σημεία που υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, η υπέρταση που δέχεται το προστατευμένο αντικείμενο θα είναι σημαντικά υψηλότερη συγκριτικά με την περίπτωση που οι εκτροπείς τοποθετηθούν κοντά στο προστατευμένο αντικείμενο. Η αυξημένη απόσταση οδηγεί σε μειωμένο περιθώριο προστασίας. Με γνώση των επιπέδων προστασίας του εκτροπέα υπέρτασης και των επιπέδων μόνωσης που αντέχουν τα προστατευόμενα αντικείμενα, μπορεί να υπολογιστεί η λεγόμενη «απόσταση προστασίας» που θα αντιπροσωπεύει την πιο απομακρυσμένη απόσταση που μπορεί να τοποθετηθεί ο εκτροπέας από το προστατευμένο αντικείμενο. Βέβαια στην πράξη αν είναι δυνατόν πρέπει να τοποθετείται όσο πιο κοντά γίνεται στους ακροδέκτες του εξοπλισμού.

Τέλος, στην Εικ. 7 παρουσιάζεται εποπτικά ο ρόλος των SA, δηλαδή η παρεχόμενη προστασία σε υπερτάσεις μικρής και μεγάλης διάρκειας μετώπου. Αντίθετα στις προσωρινές υπερτάσεις πρέπει οι SA απλώς να αντέχουν την τάση που θα δεχθούν.



Εικόνα 6. Δομή τυπικού εκτροπέα υπέρτασης με περίβλημα πορσελάνης [10].



Εικόνα 7. Ο ρόλος των εκτροπέων υπέρτασης στο συντονισμό μονώσεων ενός συστήματος [10].

2.2.4: Προστασία υποσταθμού από άμεσα κεραυνικά πλήγματα

Ένας υποσταθμός θα πρέπει να προστατεύεται σε κάθε περίπτωση από απευθείας πλήγματα κεραυνών. Δηλαδή, δεν πρέπει να καταλήξει κανένας κεραυνός στους ενεργούς αγωγούς φάσης του ΥΣ. Τα ακόλουθα είναι τα γενικά χαρακτηριστικά των κεραυνικών φαινομένων που καθιστούν δύσκολη την πλήρη άμεση προστασία από τέτοιου είδους πλήγματα:

- Η απρόβλεπτη, πιθανοτική φύση του κεραυνού,

- Η έλλειψη δεδομένων από άμεσα κεραυνικά πλήγματα σε ΥΣ λόγω της σπανιότητάς τους,
- Η πολυπλοκότητα και τα οικονομικά στοιχεία που εμπλέκονται στη λεπτομερή ανάλυση ενός συστήματος και στην καταγραφή των κεραυνικών υπερτάσεων και των αντίστοιχων κεραυνικών ρευμάτων.

Προς το παρόν, δεν υπάρχει γνωστή μέθοδος παροχής πλήρους θωράκισης εκτός από το να περικλείεται ο εξοπλισμός σε συμπαγές μεταλλικό περίβλημα (κλωβός Faraday). Μια προσέγγιση τεσσάρων βημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας:

- Αξιολόγηση της σημασίας και της αξίας της εγκατάστασης που προστατεύεται.
- Διερεύνηση της σοβαρότητας και της συχνότητας των κεραυνικών φαινομένων στην περιοχή της εγκατάστασης του υποσταθμού και της έκθεσης του υποσταθμού.
- Επιλογή μιας μεθόδου ανάλυσης σύμφωνα με την παραπάνω αξιολόγηση και στη συνέχεια διάταξη κατάλληλου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας.
- Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και του κόστους του σχεδιασμού που προκύπτει.

Η συχνότητα των κεραυνικών φαινομένων ορίζεται συνήθως με τη μέση ετήσια πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος (GFD). Η GFD ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των κεραυνικών πληγμάτων ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία.

Η προστασία από τους άμεσους κεραυνούς πραγματοποιείται με χρήση γειωμένων τεταμένων αγωγών ή μέσω ακίδων ή με το συνδυασμό και των δύο. Σε περιπτώσεις μεγάλων εγκαταστάσεων είναι προτιμότερη η επιλογή των αγωγών. Δε θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός, πως πρέπει να δοθεί προσοχή στην εξάλειψη του κινδύνου πτώσης των αγωγών αυτών επί του εξοπλισμού ή τουλάχιστον να εξασφαλιστεί ότι οι συνέπειες ενός τέτοιου γεγονότος είναι αποδεκτές και μη επιβλαβείς σε σχέση με τον αντίκτυπο στο σύστημα. Οι γειωμένοι αγωγοί και οι ακίδες σύλληψης τοποθετούνται/στηρίζονται σε μεταλλικά ικριώματα (υπάρχοντα ή ειδικά κατασκευασμένα). Σημειώνεται ότι ο ρόλος τους είναι η σύλληψη του κεραυνού και η ασφαλής (χωρίς την ανάπτυξη μεγάλων δυναμικών) διοχέτευση του κεραυνικού ρεύματος στο έδαφος. Αυτό συμβαίνει μέσω του συστήματος γείωσης του ΥΣ. Έτσι οι κεραυνοί δεν καταλήγουν στους αγωγούς φάσης μέσα στον ΥΣ.

Η κατασκευή ενός αποτελεσματικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας για τους ΥΣ έχει ως αποτέλεσμα να μη λαμβάνονται υπόψη τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα σε ΥΣ στον συντονισμό μονώσεων τους.

Κεφάλαιο 3: Κυματική αντίσταση του κεραυνικού καναλιού

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στην κυματική αντίσταση του καναλιού του κεραυνού. Η αντίσταση αυτή, είναι μία παράμετρος, η επίδραση της οποίας στις κεραυνικές υπερτάσεις σε ΥΣ, θα διερευνηθεί σε αυτή την εργασία.

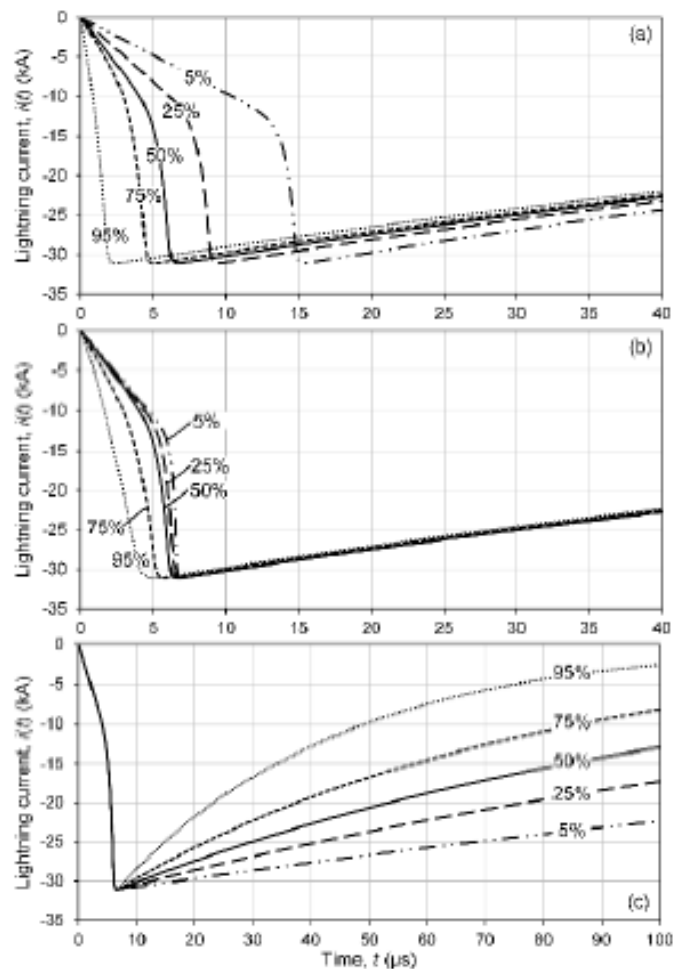
3.1: Μορφή καταγεγραμμένων κεραυνικών ρευμάτων και προσομοίωσή τους

Με βάση τις κυματομορφές κεραυνικών ρευμάτων που έχουν καταγραφεί σε πύργους που βρίσκονται σε κορυφές βουνών έχει προταθεί η κυματομορφή CIGRE [11] για την προσομοίωση άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε γειωμένες κατασκευές. Η κυματομορφή αυτή αναπαράγει βασικά στοιχεία των πραγματικών κεραυνικών ρευμάτων και περιγράφεται με δύο εξισώσεις. Στο κοίλο μέτωπο μέχρι το σημείο που αντιστοιχεί στο 90% της τιμής κορυφής, το κεραυνικό ρεύμα αντιπροσωπεύεται από το άθροισμα μιας γραμμικής συνάρτησης και μιας συνάρτησης δύναμης. Το υπόλοιπο τμήμα του μετώπου και η ουρά αντιπροσωπεύονται από μια διπλεκθετική συνάρτηση. Παραδείγματα κυματομορφών CIGRE για πρώτα αρνητικά κεραυνικά πλήγματα παρουσιάζονται στην Εικ. 8. Η εικόνα αυτή απεικονίζει και την επιρροή της στατιστικής διακύμανσης των παραμέτρων των κεραυνικών κυματομορφών στη μορφή του ρεύματος.

Οι απαιτούμενες παράμετροι εισόδου για την κυματομορφή CIGRE είναι:

- το ρεύμα κορυφής (πλάτος), I (kA),
- ο χρόνος μετώπου, t_{a30} (μ s), που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των σημείων που αντιστοιχούν στο 30% και 90% του μέγιστου ρεύματος διαιρούμενο με 0,6,
- η μέγιστη κλίση, S_m (kA/ μ s), που ορίζεται στο σημείο του 90% του μέγιστου ρεύματος στο μέτωπο της κυματομορφής,
- ο χρόνος έως τη μισή τιμή στην ουρά (διάρκεια ημίσεος εύρους), t_h (μ s).

Στην παρούσα εργασία για τα κεραυνικά ρεύματα που προσομοιώθηκαν χρησιμοποιήθηκαν ενδιάμεσες τιμές (50%) για τις παραμέτρους τους λαμβάνοντας υπόψη τη στατιστική μεταβολή τους που περιγράφεται με πιθανοτικές κατανομές.



Εικόνα 8. Τυπικές κυματομορφές πρώτων κεραυνικών πληγμάτων που παράγονται από μια πηγή ρεύματος CIGRE με μεταβλητό (a) χρόνο μετώπου t_{a30} , (b) μέγιστη κλίση S_m και (c) διάρκεια ημίσεως εύρους t_h . Η τιμή κορυφής είναι $I = 31.1$ kA και λαμβάνεται υπόψη η στατιστική διακύμανση των παραμέτρων (τα ποσοστά συμβολίζουν πόσα κεραυνικά πλήγματα ξεπερνούν την αντίστοιχη παράμετρο) [12].

3.2: Προσομοίωση άμεσων κεραυνικών πληγμάτων [13]

Επιπλέον της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος και των παραμέτρων της που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η κυματική αντίσταση του κεραυνικού καναλιού αποτελεί μία σημαντική παράμετρο που ενδέχεται να επηρεάσει κατά πολύ το ρεύμα το οποίο εγχέεται στο αντικείμενο που δέχεται το κεραυνικό πλήγμα. Επίσης, απαιτείται για τον καθορισμό του συντελεστή ανάκλασης στο σημείο έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος.

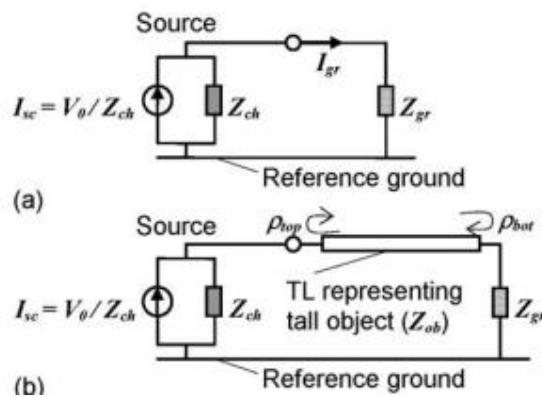
Όταν η πραγματική κατανομή ρεύματος του κεραυνού στο κανάλι του δεν είναι σημαντική, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που εξετάζονται τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα σε αντικείμενα και συστήματα, ο κεραυνός συχνά προσεγγίζεται από ένα ισοδύναμο κύκλωμα Norton [13]. Αυτή η αναπαράσταση αποτελείται από μία ιδανική πηγή ρεύματος ίση με το ρεύμα κεραυνού που θα εγχεόταν στο

έδαφος εάν η γη ήταν τέλεια αγωγίμη (πρακτικά πρόκειται για ένα ρεύμα βραχυκυκλώματος, I_{sc}) παράλληλα με την κυματική αντίσταση του καναλιού του κεραυνού Z_{ch} η οποία υποτίθεται ότι είναι σταθερή, αν και στην πράξη μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Στην περίπτωση που το αντικείμενο μπορεί να αναπαρασταθεί με μία κυματική αντίσταση Z_{gr} , αυτή η κυματική αντίσταση είναι ένα φορτίο συνδεδεμένο παράλληλα με το ισοδύναμο Norton (βλ. Εικ. 9). Επομένως, το ρεύμα «βραχυκυκλώματος» του κεραυνού I_{sc} , ουσιαστικά διαχωρίζεται μεταξύ Z_{gr} και Z_{ch} έτσι ώστε το ρεύμα που ρέει από τη βάση του καναλιού του κεραυνού στο έδαφος να προκύπτει ως εξής:

$$I_g = \frac{I_{sc} \cdot Z_{ch}}{Z_{ch} + Z_{gr}} \quad (1)$$

Τα δύο παραπάνω μεγέθη, I_{sc} και Z_{ch} , μεταβάλλονται στατιστικά μεταξύ διαφορετικών κεραυνών. Να σημειωθεί πως το Z_{ch} είναι συνάρτηση του ρεύματος του κεραυνού με αποτέλεσμα αυτή η μη γραμμικότητα, να παραβιάζει την απαίτηση γραμμικότητας που είναι αναγκαία για τη δημιουργία του ισοδύναμου κυκλώματος Norton. Παρ' όλα αυτά, η Z_{ch} , η οποία συνήθως αναφέρεται ως ισοδύναμη κυματική αντίσταση του κεραυνού, θεωρείται συνήθως πως είναι σταθερή. Το ισοδύναμο Norton απεικονίζεται στην Εικ. 9(a), ενώ στην Εικ. 9(b) απεικονίζεται η περίπτωση στην οποία παρεμβάλλεται ένα αντικείμενο σημαντικού ύψους όπως συμβαίνει συνήθως στις μετρήσεις κεραυνικών ρευμάτων σε πύργους στις κορυφές βουνών.

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του κεραυνού επηρεάζει επίσης το μεταβατικό φαινόμενο στο αντικείμενο που καταλήγει ο κεραυνός, εάν αυτό το αντικείμενο είναι μεγάλου μήκους από ηλεκτρικής σκοπιάς. Έχει δηλαδή διαστάσεις που είναι συγκρίσιμες ή μεγαλύτερες από τα πιο μικρά μήκη κύματος του ρεύματος πηγής, τα οποία συνήθως συνδέονται με το αρχικό ανοδικό τμήμα της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος (μέτωπο ρεύματος). Είναι σημαντικό να επαναληφθεί ότι τα ισοδύναμα κυκλώματα που απεικονίζονται στην Εικόνα 8 είναι κατάλληλα μόνο για τη μελέτη των άμεσων επιπτώσεων κεραυνού, όταν η πραγματική κατανομή του ρεύματος στο κανάλι του κεραυνού δεν είναι σημαντική.



Εικόνα 9. Μοντέλα κεραυνικού πλήγματος (α) σε κυματική αντίστασης και (β) σε γειωμένο αντικείμενο σημαντικού ύψους. Ο κεραυνός αντιπροσωπεύεται από το ισοδύναμο κύκλωμα Norton, στα αριστερά του σχήματος [13].

Η κατανομή αυτή παίζει ρόλο στον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που προκαλεί ο κεραυνός άρα στη μελέτη των επιπτώσεων των επαγόμενων υπερτάσεων. Αυτό όμως δεν είναι αντικείμενο της εργασίας αυτής και έτσι τα μοντέλα που αφορούν την περίπτωση αυτή δεν θα αναλυθούν.

3.3: Κυματική αντίσταση του κεραυνικού καναλιού

Η ισοδύναμη κυματική αντίσταση του καναλιού του κεραυνού είναι μια στοχαστική παράμετρος η οποία ποικίλλει μεταξύ των κεραυνών και γενικά μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος κορυφής, λαμβάνοντας τιμές από 100 έως 9000 Ω με βάση τον πίνακα της Εικ. 10. Με βάση τις φυσικές διεργασίες, ο Kostenko [15] πρότεινε μια σχέση μεταξύ της σύνθετης αντίστασης καναλιού κεραυνού Z_{ch} (Ω) και του ρεύματος κορυφής του κεραυνού I_p (kA) ως εξής:

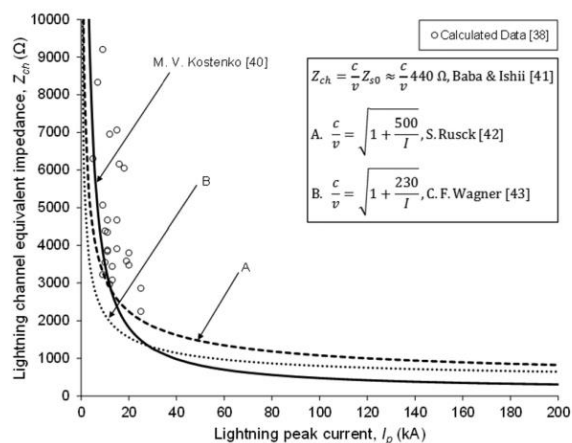
$$Z_{ch} = 140 \left(1 + \frac{240}{I_p}\right). \quad (2)$$

Η Εικ. 10 περιλαμβάνει καμπύλες $Z_{ch}-I_p$, δηλαδή αφορούν τη μεταβολή της κυματικής αντίστασης του καναλιού με το ρεύμα κορυφής. Μία από αυτές είναι η εξίσωση (2).

Συνοψίζοντας, υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα στην ισοδύναμη κυματική αντίσταση του καναλιού του κεραυνού. Το εύρος μεταβολής που αναφέρθηκε παραπάνω (100–9000 Ω) μειώνεται μεταξύ περίπου 400 και 2500 Ω όταν λαμβάνονται υπόψη δεδομένα πεδίου που μετρήθηκαν σε ψηλούς πύργους με κατάλληλα όργανα καταγραφής του ρεύματος.

TABLE I
LIGHTNING CHANNEL EQUIVALENT IMPEDANCE

Authors	Z_{ch} (Ω)
Wagner & Hileman [30]	1000–6000
L. V. Bewley [1]	100–600
Gorin et al. [31], [32]	600–2500
From O. Beierl [21], F. Fuchs [23] and [33], [34]	~700
From Janischewskyj et al. [22] and [33], [34]	~460
V. A. Rakov [35]	500–1000
Ishimoto et al. [36] from Goshima et al. [37]	1000
M. R. Garvic [28]	700
EPRI [38] calculations from field data of Mazur & Ruhnke [39]	1000–9000



Εικόνα 10. Πίνακας (αριστερά): Τιμές ισοδύναμης κυματικής αντίστασης Z_{ch} του καναλιού του κεραυνού από τη βιβλιογραφία. Εικόνα (δεξιά) η μεταβολή της Z_{ch} σε συνάρτηση με το ρεύμα κορυφής του κεραυνού I_p [14].

3.4: Περιπτώσεις προς διερεύνηση

Οι τιμές της κυματικής αντίστασης του κεραυνικού καναλιού που θα μελετηθούν μέσω προσομοιώσεων σφάλματος θωράκισης και ανάστροφης διάσπασης σε αυτή τη διπλωματική επιλέχθηκαν βάσει του πίνακα της Εικ. 10:

α) Από 200 Ω έως 10000 Ω,

β) Ιδανική πηγή ρεύματος (άπειρη κυματική αντίσταση),

γ) Κυματική αντίσταση σύμφωνα με την εξίσωση του Kostenko [15] (εξίσωση (2)).

Οι τιμές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2. Τιμές κυματικής αντίστασης καναλιού του κεραυνού προς διερεύνηση.

A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Z_{ch} (Ω)	200	400	600	800	1000	1200	1600	3200	6400	10000	∞	Kostenko

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 4: Υποσταθμοί υπό εξέταση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, πραγματοποιείται ανάλυση όσον αφορά τους υποσταθμούς υψηλής τάσης που θα μελετηθούν. Επίσης θα γίνει αναφορά στη μοντελοποίησή τους στο λογισμικό ATP-EMTP [16], [17] και στις περιπτώσεις προσομοίωσης.

4.1: Περιγραφή

Στη συγκεκριμένη ενότητα, πραγματοποιείται περιγραφή των υποσταθμών που θα μελετηθούν μέσω προσομοιώσεων. Τα χαρακτηριστικά των υποσταθμών είναι:

α) Υποσταθμός 400 kV – GIS (HVSS1)

Η εναέρια γραμμή μεταφοράς που συνδέεται στον υποσταθμό και στην οποία θα συμβεί το κεραυνικό πλήγμα είναι μονού κυκλώματος με οριζόντια διάταξη φάσεων. Ο υποσταθμός διαθέτει εκτροπείς υπέρτασης στην είσοδό του (σημείο σύνδεσης της γραμμής μεταφοράς), όπως επίσης και πριν τον μετασχηματιστή ισχύος. Αυτός συνδέεται με τους ζυγούς GIS με τρία μονοπολικά καλώδια ισχύος. Στην πλευρά της χαμηλής τάσης του ΜΣ συνδέονται δύο γεννήτριες. Αυτές προστατεύονται με εκτροπείς υπέρτασης. Το ίδιο συμβαίνει και με τον διακόπτη ισχύος τους.

β) Υποσταθμός 132 kV – GIS (HVSS2)

Η γραμμή μεταφοράς σε αυτόν τον υποσταθμό είναι διπλού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη φάσεων. Στις εισόδους του υπάρχουν εκτροπείς υπέρτασης. Όπως και στον 1ο υποσταθμό ο ΜΣ ισχύος συνδέεται στο GIS μέσω καλωδίων ισχύος και προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης. Το ίδιο και συμβαίνει και στη μεριά της χαμηλής τάσης, από την οποία τροφοδοτεί τα συνδεδεμένα φορτία.

γ) Υποσταθμός 400 kV – AIS (HVSS3)

Η γραμμή μεταφοράς είναι μονού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη φάσεων. Ο υποσταθμός διαθέτει εκτροπείς υπέρτασης στην είσοδό του, αλλά και στο τέλος των ζυγών των 400 kV. Ο ΜΣ ισχύος προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης και στις τρεις πλευρές του (ΥΤ, ΧΤ, τριτεύον τύλιγμα). Σε αυτόν τον υποσταθμό δεν υπάρχουν καλώδια υψηλής τάσης.

δ) Υποσταθμός 161 kV – AIS (HVSS4)

Η γραμμή μεταφοράς σε αυτόν τον υποσταθμό είναι μονού κυκλώματος με οριζόντια διάταξη φάσεων. Η είσοδος του υποσταθμού προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης. Το ίδιο και ο μετασχηματιστής ισχύος. Στην πλευρά του χαμηλότερου επιπέδου τάσης συνδέεται μέσω Isolated Phase Busducts γεννήτρια, η οποία προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης.

4.2: Μοντελοποίηση

Στην παρούσα υποενότητα, παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση των στοιχείων των εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και των διασυνδεδεμένων υποσταθμών στο λογισμικό ATP-EMTP [16], [17] για την εκτίμηση αναπτυσσόμενων υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου λόγω άμεσων κεραυνικών πληγμάτων στις γραμμές μέσω προσομοιώσεων. Οι προσομοιώσεις αυτές αφορούν πλήγμα στην κορυφή πυλώνα της γραμμής και πλήγμα σε αγωγό φάσης. Η πρώτη περίπτωση σχετίζεται με την ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς, η οποία ονομάζεται συνήθως backflashover, BF. Η δεύτερη περίπτωση ονομάζεται σφάλμα θωράκισης (shielding failure, SF), γιατί ο κεραυνός δεν πλήττει τον αγωγό προστασίας (θωράκισης) αλλά τον αγωγό που προστατεύεται (αγωγός φάσης). Βασικές πληροφορίες αυτής της ενότητας αντλήθηκαν από την αναφορά [18].

Τα ακόλουθα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις και έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς αντιπροσωπεύονται από μια ακολουθία μοντέλων JMarti [19] που εξαρτώνται από τη συχνότητα, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία των πυλώνων και των ανοιγμάτων των γραμμών. Οι παράμετροι γραμμής για τη μοντελοποίηση υπολογίζονται για την ειδική αντίσταση του εδάφους στην περιοχή του υποσταθμού. Το τμήμα των προσομοιωμένων γραμμών, περιλαμβάνει πολλά ανοίγματα αλλά και ένα τελικό άνοιγμα προς τον υποσταθμό. Το άνοιγμα αυτό καταλήγει στην πύλη του υποσταθμού. Οι γραμμές τερματίζονται κατάλληλα στο μακρινό άκρο τους ώστε να εξαλειφθούν οι τεχνητές ανακλάσεις των οδευόντων κυμάτων. Ο ελάχιστος αναγκαίος αριθμός των ανοιγμάτων μεταξύ πυλώνων προσδιορίστηκε μέσω διερεύνησης ώστε να μην επιδρά στα αποτελέσματα.

- Οι πυλώνες μοντελοποιούνται ως κατακόρυφες μονοφασικές γραμμές κατανομημένων παραμέτρων (ανεξάρτητες από συχνότητα και χωρίς απώλειες). Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος θεωρείται ίση με το 85% της ταχύτητας του φωτός. Η κυματική αντίσταση των πυλώνων υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε προσεγγίζονται οι πυλώνες διπλού κυκλώματος ως κώνοι και οι μονού κυκλώματος ως κύλινδροι. Οι πυλώνες χωρίζονται σε τμήματα ανάλογα με τη θέση των βραχιόνων

τους (για να δημιουργηθούν στο κύκλωμα προσομοίωσης οι κόμβοι σύνδεσης των μονωτήρων) και η κυματική αντίσταση, Z_T (Ω), όλων των τμημάτων είναι η ίδια.

Σε περίπτωση πλήγματος κεραυνού στην κορυφή του πυλώνα διπλού κυκλώματος η Z_T μπορεί να υπολογιστεί προσεγγίζοντας τον πυλώνα με έναν κώνο σύμφωνα με τη σχέση που προτάθηκε από τους Sargent και Darveniza [20]:

$$Z_T = 60 \ln\left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r_{Tb}^2 + h_T^2}}{r_{Tb}}\right) \quad (3)$$

όπου r_{Tb} (m) είναι η ακτίνα της βάσης του πυλώνα και h_T (m) το ύψος του. Οι πυλώνες μονού κυκλώματος με οριζόντια διάταξη φάσεων χωρίζονται σε δύο τμήματα αφού ο μοναδικός βραχίονας είναι οριζόντιος. Για πλήγμα κεραυνού στην κορυφή του πυλώνα, η κυματική αντίστασή του, Z_T (Ω), υπολογίζεται από τη σχέση που πρότειναν οι Sargent και Darveniza [20]. προσεγγίζοντας τον πυλώνα ως κύλινδρο.

$$Z_T = 60 \ln\left(\sqrt{2} \frac{2h_T}{r_{TW}}\right) - 60 \quad (4)$$

Στη σχέση (4), r_{TW} (m) είναι η ακτίνα μέσης του πυλώνα (στενότερο σημείο).

- Οι πύλες εισόδου των υποσταθμών όπου τερματίζουν οι εναέριες γραμμές μεταφοράς μοντελοποιούνται ως κατανεμημένες μονοφασικές γραμμές χωρίς απώλειες και ανεξάρτητες από τη συχνότητα (όπως και οι πυλώνες της γραμμής). Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων έχει ληφθεί και εδώ ίση με το 85% της ταχύτητας του φωτός και η κυματική αντίσταση υπολογίστηκε από τη σχέση που προτάθηκε στην αναφορά [21].

- Υιοθετώντας μια συντηρητική προσέγγιση από τη σκοπιά του μηχανικού, τα συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης των πυλώνων των εναέριων γραμμών μεταφοράς αναπαραστάθηκαν απλώς με την αντίσταση γείωσης σε ρεύμα χαμηλής συχνότητας και έντασης, R_g .

- Η ηλεκτρική διάσπαση των μονωτήρων των γραμμών μεταφοράς, μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας το στοιχείο LDM type-94 [22], [23] με βάση το μοντέλο προόδου του λήντερ της CIGRE [11].

- Τα καλώδια ισχύος αντιπροσωπεύονται από το μοντέλο Bergeron [24], [25] με παραμέτρους που υπολογίζονται στα 50 kHz.

- Οι εκτροπείς υπέρτασης καθώς και οι περιοριστές τάσης (SVL) που προστατεύουν τους μανδύες των καλωδίων, προσομοιώνονται με το μοντέλο Pinceti και Giannettoni [26], [27]. Οι παράμετροι του μοντέλου υπολογίζονται με βάση τα χαρακτηριστικά του κάθε εκτροπέα υπέρτασης.

- Οι μετασχηματιστές μοντελοποιούνται με ένα χωρητικό κύκλωμα Π μαζί με ένα μοντέλο BCTAN [28].
- Οι ζυγοί GIS προσομοιώνονται ως γραμμές χωρίς απώλειες με αντίσταση υπέρτασης 75Ω [29]. Οι ζυγοί AIS και οι αγωγοί με μήκος >3 m μοντελοποιούνται ως γραμμές χωρίς απώλειες με σύνθετη αντίσταση υπέρτασης 400Ω [29], ενώ για μήκη <3 m χρησιμοποιούνται αυτεπαγωγές $1 \mu\text{H/m}$ [29].
- Το πλήγμα κεραυνού αντιπροσωπεύεται από μια πηγή ρεύματος παράλληλη με μια αντίσταση 400Ω (BF) ή 1000Ω (για σφάλμα θωράκισης) συνδεδεμένη παράλληλα στη πηγή ρεύματος. Η αντίσταση αναπαριστά το κανάλι του κεραυνού. Για την προσομοίωση στο λογισμικό ATP-EMTP χρησιμοποιήθηκε η πηγή ρεύματος CIGRE τύπου 15. Για τις παραμέτρους της κυματομορφής χρησιμοποιήθηκαν οι ενδιάμεσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών οι οποίες δίνονται από τη CIGRE [11]. Η ενδιάμεση τιμή της διάρκειας ημίσεος εύρους των πρώτων κεραυνικών πληγμάτων είναι $77.5 \mu\text{s}$. Οι υπόλοιπες παράμετροι δίνονται από τις σχέσεις:

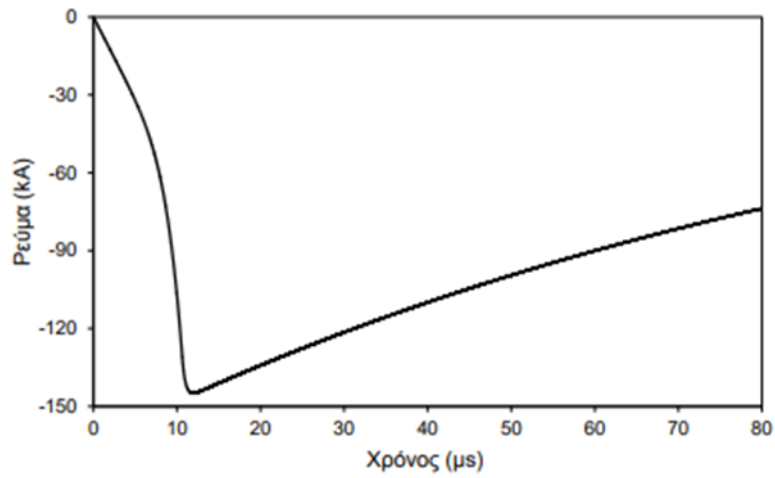
$$t_f = \begin{cases} 1.77 * I_{peak}^{0.188}, & 3 \leq I_{peak} \leq 20kA \\ 0.906 * I_{peak}^{0.411}, & I_{peak} > 20kA \end{cases} \quad (5)$$

$$S_m = \begin{cases} 12 * I_{peak}^{0.171}, & 3 \leq I_{peak} \leq 20kA \\ 6.5 * I_{peak}^{0.376}, & I_{peak} > 20kA \end{cases} \quad (6)$$

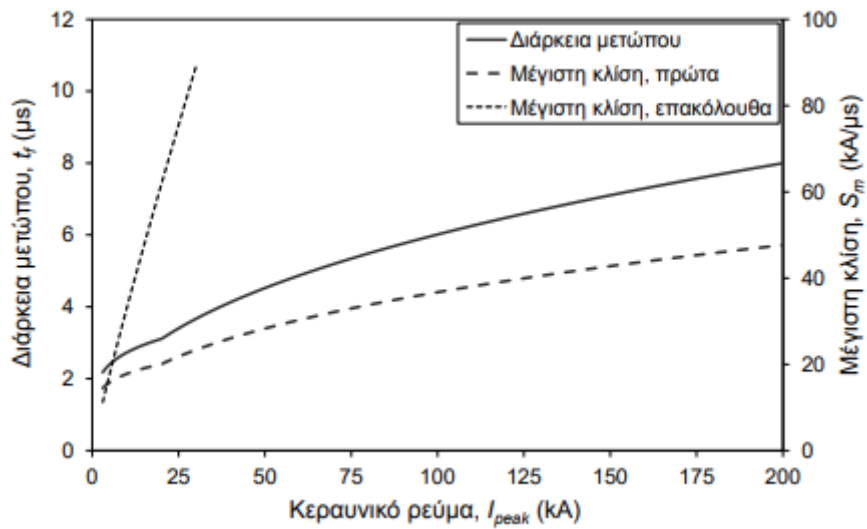
Όπου:

- I_{peak} , η τιμή κορυφής του κεραυνικού ρεύματος (kA)
- t_f , η διάρκεια μετώπου (μs)
- S_m , η μέγιστη κλίση ($\text{kA}/\mu\text{s}$).

Η Εικ. 11 απεικονίζει μία τυπική κυματομορφή κεραυνικού ρεύματος σύμφωνα με τη CIGRE. Στην Εικ. 12 παρουσιάζεται η μεταβολή της διάρκειας μετώπου και της μέγιστης κλίσης με το κεραυνικό ρεύμα σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις. Είναι εμφανές ότι το ρεύμα αυξάνεται αρχικά με πιο αργό ρυθμό και κατόπιν με πιο γρήγορο. Δηλαδή, η μέγιστη κλίση είναι κοντά στην κορυφή του. Επίσης φαίνεται ότι μεγαλύτερο ρεύμα αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο μέτωπο και μέγιστη κλίση.



Εικόνα 11. Παράδειγμα κεραυνικού ρεύματος σύμφωνα με την κυματομορφή της CIGRE [18].



Εικόνα 12. Ενδιάμεσες τιμές της διάρκειας μετώπου, t_f , και της μέγιστης κλίσης, S_m , του κεραυνικού ρεύματος συναρτήσει της τιμής κορυφής του, I_{peak} [11].

4.3 Περιπτώσεις Προσομοίωσης

Στη διπλωματική εργασία αυτή προσομοιώθηκαν οι 4 υποσταθμοί της Ενότητας 4.1 (HVSS, HVSS2, HVSS3, HVSS4) για τις περιπτώσεις κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού της Ενότητας 3.4 (Πίνακας 2). Εξετάστηκαν πλήγματα στην κορυφή του πυλώνα (backflashover) αλλά σφάλματα θωράκισης (shielding failure), δηλαδή πλήγματα στον αγωγό φάσης. Στην πρώτη περίπτωση σε όλους του υποσταθμούς χρησιμοποιήθηκε το μέγιστο ρεύμα που θεωρείται ρεαλιστικό (200 kA) για αρνητικούς κατερχόμενους κεραυνούς. Στην περίπτωση του πλήγματος σε αγωγό φάσης χρησιμοποιήθηκε το μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης που υπολογίστηκε για τη γεωμετρία της κάθε εναέριας γραμμής μεταφοράς. Οι τιμές για τον κάθε υποσταθμό ήταν:

- HVSS1: 10.3 kA
- HVSS2: 20.9 kA
- HVSS3: 15.2 kA
- HVSS4: 4.9 kA.

Η προσομοίωση όλου του εύρους τιμών της κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού σε συνδυασμό με τους υποσταθμούς διαφορετικών επιπέδων τάσης και είδους μόνωσης, δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής γενικών συμπερασμάτων.

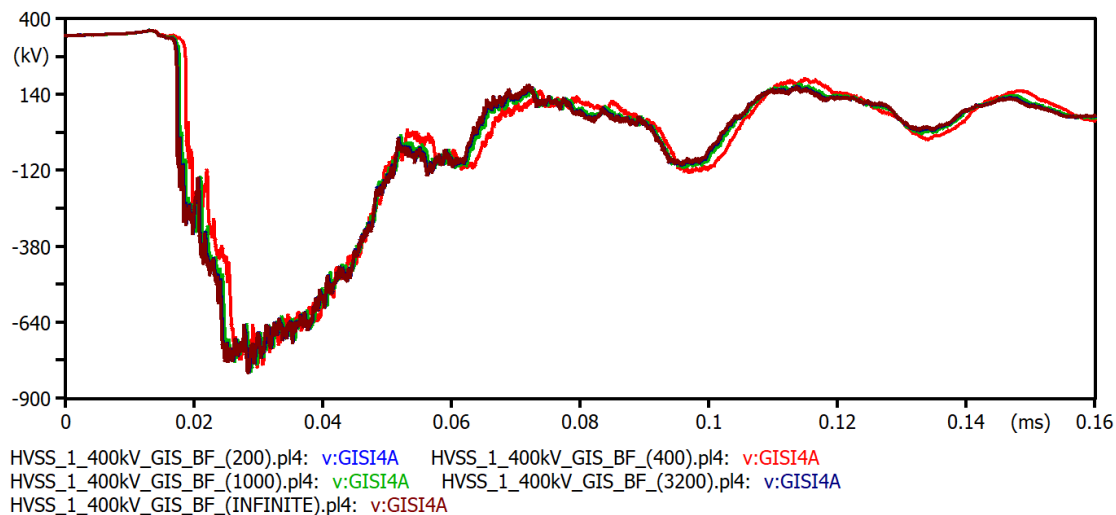
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συζήτηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των υποσταθμών HVSS1–HVSS4 (Ενότητα 4.1) για τις περιπτώσεις προσομοίωσης των Ενότητων 3.4 και 4.3.

5.1 Υποσταθμός GIS 400 kV (HVSS1)

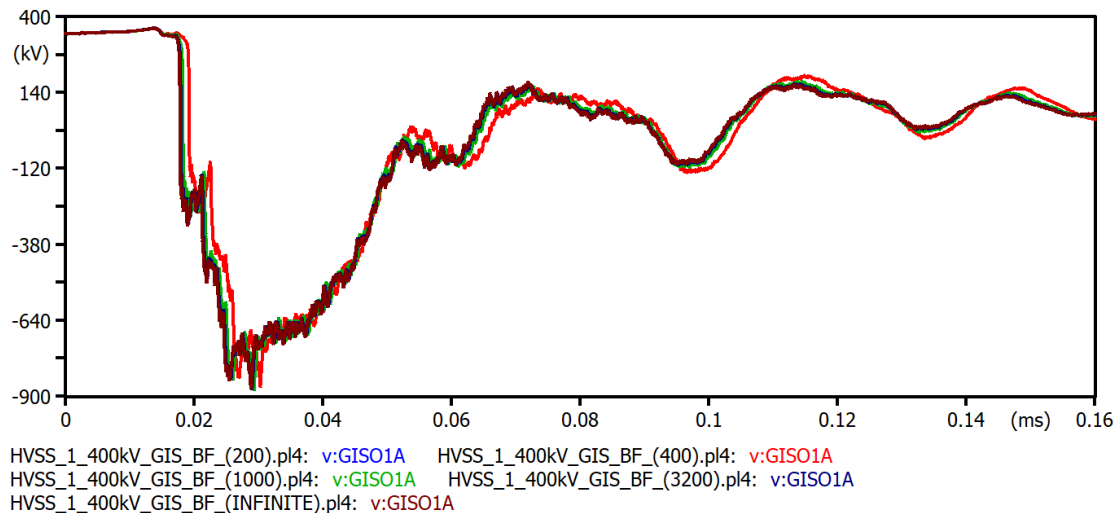
5.1.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Στην Εικ. 13 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που αντιστοιχούν στον κόμβο GIS4A (είσοδος GIS) του ΥΣ HVSS1 400 kV με μόνωση εξοπλισμού GIS (μόνωση αερίου) για συγκεκριμένες τιμές κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού. Η υπέρταση είναι γενικά αρνητική αφού ο κεραυνός είναι αρνητικός και προκαλεί ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης του πυλώνα (backflashover). Άρα το ρεύμα που ρέει προς τον ΥΣ είναι αρνητικό. Αρχικά αυξάνεται (κατ' απόλυτη τιμή) προς το μέγιστο και κατόπιν οι τιμές των υπερτάσεων μειώνονται. Για κάθε τιμή της κυματικής αντίστασης που έχει επιλεγθεί, οι κυματομορφές έχουν σχεδόν την ίδια μορφή, με κάποια χρονική καθυστέρηση λόγω διαφοράς στη στιγμή που γίνεται η ανάστροφη διάσπαση. Οι τιμές κορυφής διαφέρουν όμως, όπως θα φανεί σε επόμενα γραφήματα.



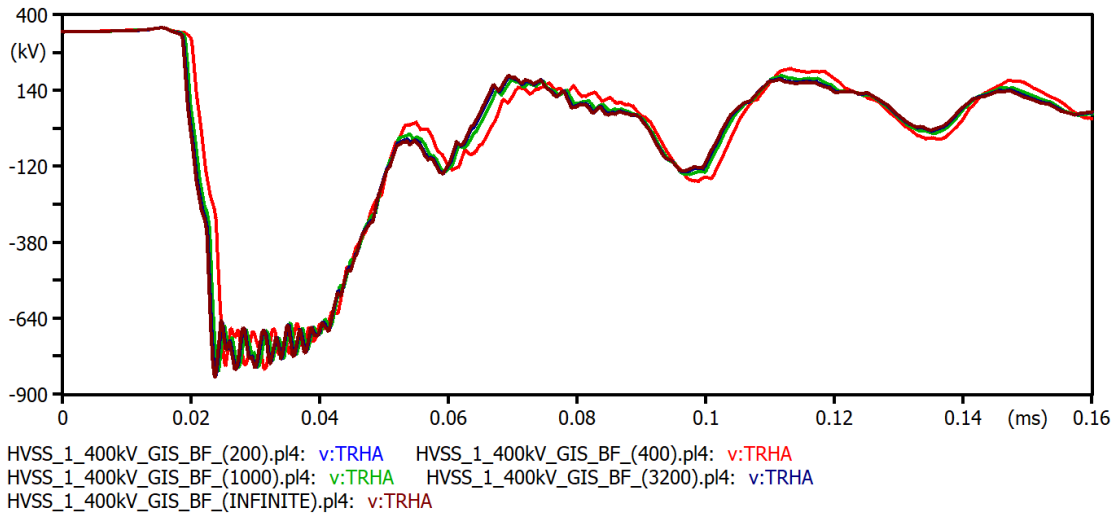
Εικόνα 13. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GIS4(A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV με μόνωση αερίου GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

Στην Εικ. 14 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στον κόμβο GIS01(A) (έξοδος GIS) του υποσταθμού 400 kV HVSS1 με μόνωση εξοπλισμού GIS (μόνωση αερίου) για συγκεκριμένες τιμές κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση οι κυματομορφές έχουν σχεδόν την ίδια μορφή για κάθε τιμή της κυματικής αντίστασης αλλά διαφέρουν οι τιμές κορυφής. Οι υπερτάσεις είναι μεγαλύτερες από αυτές του κόμβου GIS14(A) καθώς ο κόμβος GIS01(A) είναι πιο μακριά από τα σημεία που είναι εγκατεστημένοι οι εκτροπείς υπέρτασης του ΥΣ.



Εικόνα 14. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GIS01(A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV με μόνωση αερίου GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

Στην Εικ. 15 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στον κόμβο TRH(A) του υποσταθμού 400 kV HVSS1. Ο κόμβος αυτός αντιστοιχεί στους ακροδέκτες του ΜΣ ισχύος του ΥΣ. Όπως και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και εδώ. Ο ΜΣ ισχύος προστατεύεται από εκτροπείς υπέρτασης και γι' αυτό οι υπερτάσεις της Εικ. 15 είναι μικρότερες από της Εικ. 14. Επίσης, αν οι τρεις εικόνες συγκριθούν μεταξύ τους προκύπτει ότι οι μορφές των κυματομορφών στους διαφορετικούς κόμβους διαφέρουν ανάλογα με τα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε αυτούς. Ωστόσο, τα γενικά ποιοτικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση της μεταβολής της κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού είναι όμοια. Ακόμη φαίνεται ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ένας κόμβος από το σημείο του κεραυνικού πλήγματος τόσο πιο αργά φτάνουν οι υπερτάσεις σε αυτόν (μεγαλύτερος χρόνος όδευσης για τον κόμβο TRH(A), μετά για τον GIS01(A) και τέλος μικρότερος χρόνος για τον GIS14(A)).

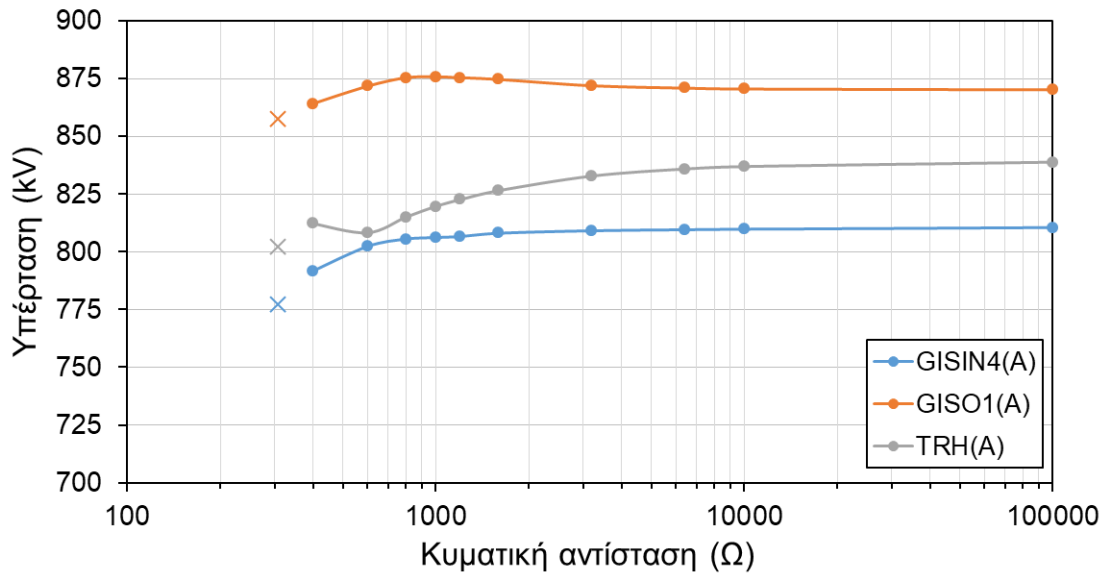


Εικόνα 15. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου TRH(A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV με μόνωση αερίου GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

Στην Εικ. 16 απεικονίζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 400 kV HVSS1, που προκλήθηκαν από πλήγμα κεραυνού στην εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς. Οι τιμές που απεικονίζονται είναι αυτές των κόμβων GISIN4(A), GISO1A και TRH(A) για όλες τις τιμές των κυματικών αντιστάσεων του καναλιού του κεραυνού (Πίνακας 2, 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω και άπειρη αντίσταση). Επιπροσθέτως, υπολογίστηκε και η τιμή κορυφής της υπέρτασης για την κυματική αντίσταση που προκύπτει από τη σχέση (2) του Kostenko, η οποία ισοδυναμεί με 308 Ω. Να τονιστεί ότι η τιμή κορυφής που αντιστοιχεί στην παραπάνω σχέση, απεικονίζεται με το σύμβολο «X» για κάθε κόμβο. Το τελευταίο, ισχύει αντίστοιχα και για τα μετέπειτα γραφήματα που θα παρουσιαστούν για τους υπόλοιπους υποσταθμούς. Επιπλέον, στον ΥΣ HVSS1 δεν υπάρχουν τιμές κορυφής υπέρτασης και στους τρεις κόμβους για αντίσταση 200 Ω. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως δε συμβαίνει διάσπαση μόνωσης της γραμμής μεταφοράς για τα 200 Ω με αποτέλεσμα την απουσία υπερτάσεων.

Από την Εικ. 16 συνάγεται ότι η μεταβολή της τιμής κορυφής με την αύξηση της κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού δεν είναι ίδια σε όλους τους κόμβους. Στον κόμβο GISIN4(A) παρατηρείται αύξηση της τιμής κορυφής, αρχικά πιο γρήγορα και έπειτα εμφανίζεται μία σταθερότητα προς το άπειρο. Αυτό ερμηνεύεται βάσει του γεγονότος ότι μεγαλύτερη κυματική αντίσταση συνεπάγεται περισσότερο ρεύμα προς το σύστημα και λιγότερο ρεύμα στο κανάλι του κεραυνού. Στους άλλους κόμβους φαίνεται ότι υπάρχουν τοπικά μέγιστα και ελάχιστα. Αυτό πιθανόν να έχει να κάνει με τις διαφορετικές χρονικές στιγμές που συμβαίνει η διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς σε συνδυασμό με την περίπλοκη γεωμετρία και τα μη γραμμικά μοντέλα που υπάρχουν στο

κύκλωμα.

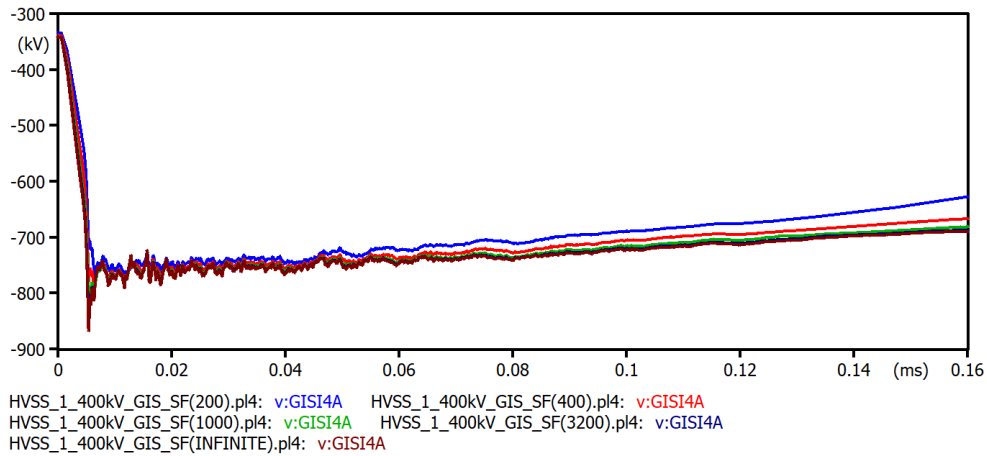


Εικόνα 16. Απεικόνιση τιμών κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 400 kV HVSS1, στους κόμβους GISIN4, GISO1 και TRH, για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X).

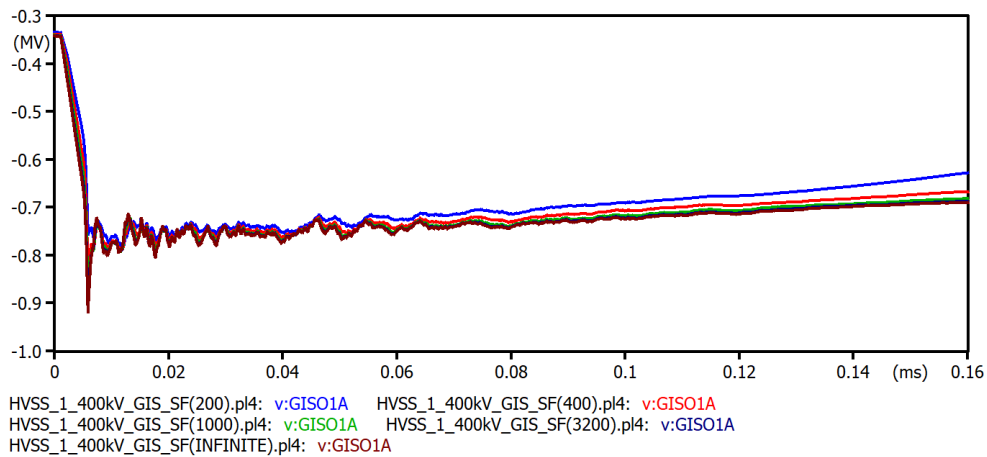
5.1.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

Στην Εικ. 17 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στον κόμβο GISIN4 του υποσταθμού 400 kV HVSS1 με μόνωση αερίου για τον εξοπλισμό (GIS) όταν κεραυνός πλήξει τον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς. Τα αποτελέσματα αφορούν διάφορες τιμές κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού. Οι υπερτάσεις είναι και πάλι αρνητικές λόγω της πολικότητας του κεραυνικού ρεύματος. Σε σχέση με τις αντίστοιχες υπερτάσεις της Εικ. 13 και πάλι υπάρχει γρήγορη αύξηση στο μέγιστο αλλά πλέον όμως, με την πάροδο του χρόνου, οι τιμές των υπερτάσεων ποσοτικά μειώνονται, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό σε σχέση με τη μείωση που υπήρχε στην περίπτωση πλήγματος του πυλώνα από κεραυνό. Τέλος, η τιμή της κυματικής αντίστασης αλλάζει τις τιμές των υπερτάσεων γύρω από το μέγιστο και συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση, τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των υπερτάσεων. Κατά τα άλλα η μορφή τους είναι παρόμοια.

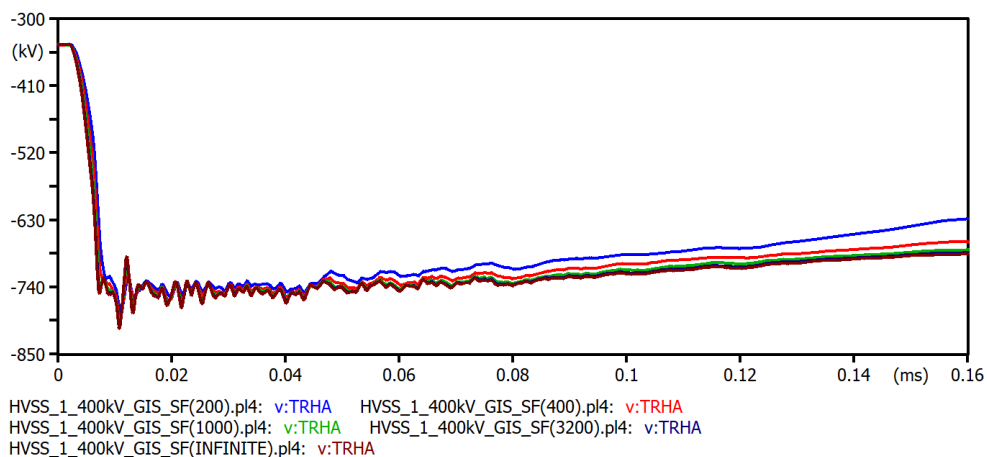
Στην Εικ. 18 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στον κόμβο GISO1(A) του υποσταθμού 400 kV GIS HVSS1. Εδώ, σε αντίθεση με το πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα (Ενότητα 5.1.1), η μορφή των υπερτάσεων στους διαφορετικούς κόμβους είναι παρόμοια. Αυτό φαίνεται και από την Εικ. 19 στην οποία απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων του κόμβου TRH(A) του ίδιου ΥΣ. Και σε αυτές τις περιπτώσεις η αύξηση της κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού οδηγεί σε μεγαλύτερες υπερτάσεις τόσο ως προς την τιμή κορυφής αλλά και στην ουρά.



Εικόνα 17. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GISI4 (A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



Εικόνα 18. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GISO1A του υποσταθμού HVSS1 (400 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

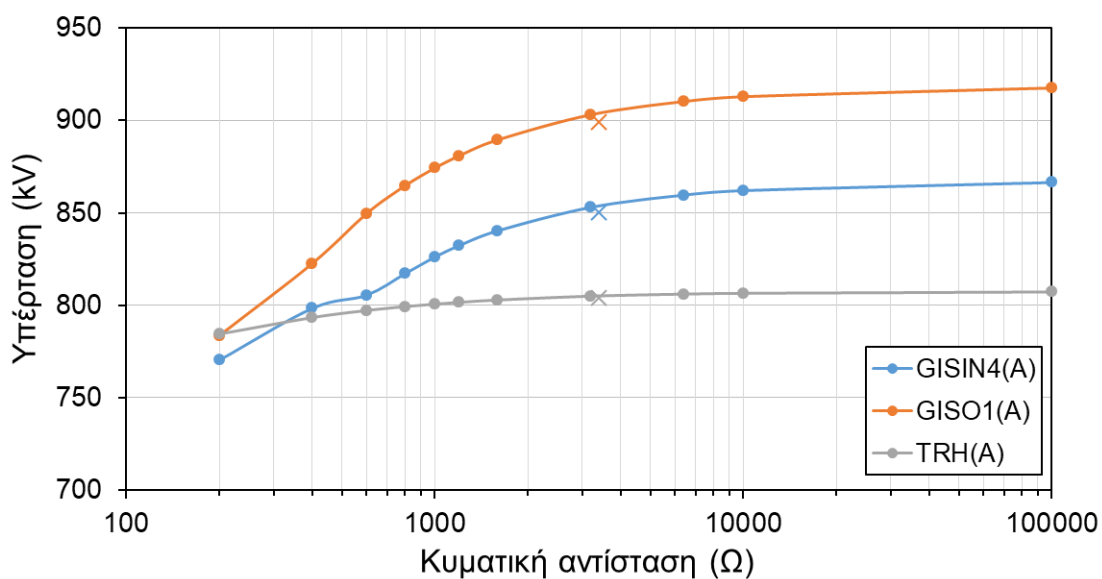


Εικόνα 19. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου TRH (A) του υποσταθμού HVSS1 (400 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

Στην Εικ. 20 απεικονίζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 400 kV HVSS1 GIS, που προκλήθηκαν από πλήγμα κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης εναέριας γραμμής μεταφοράς. Το γράφημα αφορά τους κόμβους GISIN4(A), GISO1(A) και TRH(A) για όλες τις τιμές των κυματικών αντιστάσεων του κεραυνικού καναλιού. Στη παρούσα περίπτωση, υπολογίστηκε πως η κυματική αντίσταση βάσει του Kostenko ισοδυναμεί με 3403,4 Ω, όπως φαίνεται και στο γράφημα με το «X».

Οι τιμές κορυφής υπερτάσεων ξεκινάνε πλέον και από την τιμή της κυματικής αντίστασης των 200 Ω. Και στους 3 κόμβους παρατηρείται το φαινόμενο της αύξησης αυτών των τιμών, όσο η κυματική αντίσταση αυξάνεται προσεγγίζοντας την άπειρη τιμή. Δηλαδή, σε σχέση με τα αποτελέσματα για το πλήγμα στον πυλώνα τα αποτελέσματα είναι πιο σαφή. Αύξηση της κυματικής αντίστασης προκαλεί αύξηση του ρεύματος που ρέει στο σύστημα και κατά συνέπεια αύξηση των υπερτάσεων. Η συμπεριφορά αυτή είναι σημαντική όταν οι κυματικές αντιστάσεις είναι μικρές.

Οι ελαφρώς μικρότερες τιμές του Kostenko από αυτές της σταθερής κυματικής αντίστασης οφείλονται στο γεγονός ότι η κυματική αντίσταση βάσει του Kostenko μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση (2) κατά τη διάρκεια του μετώπου του κεραυνικού ρεύματος, δηλαδή δεν μένει σταθερό σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



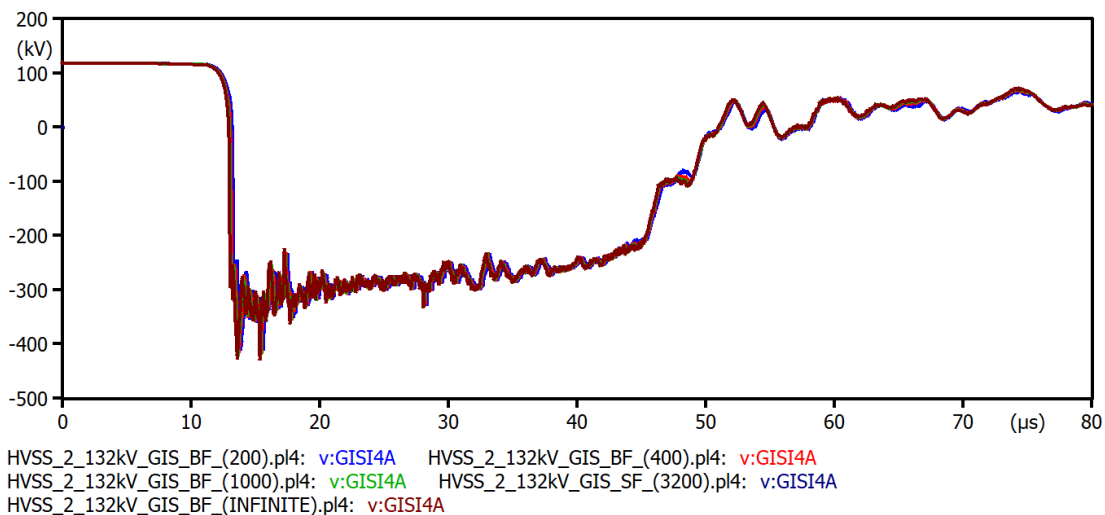
Εικόνα 20. Απεικόνιση τιμών κορυφών υπερτάσεων στους κόμβους GISIN4(A), GISO1(A) και TRH(A) του υποσταθμού 400 kV HVSS1 GIS, για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X).

5.2 Υποσταθμός GIS 132 kV

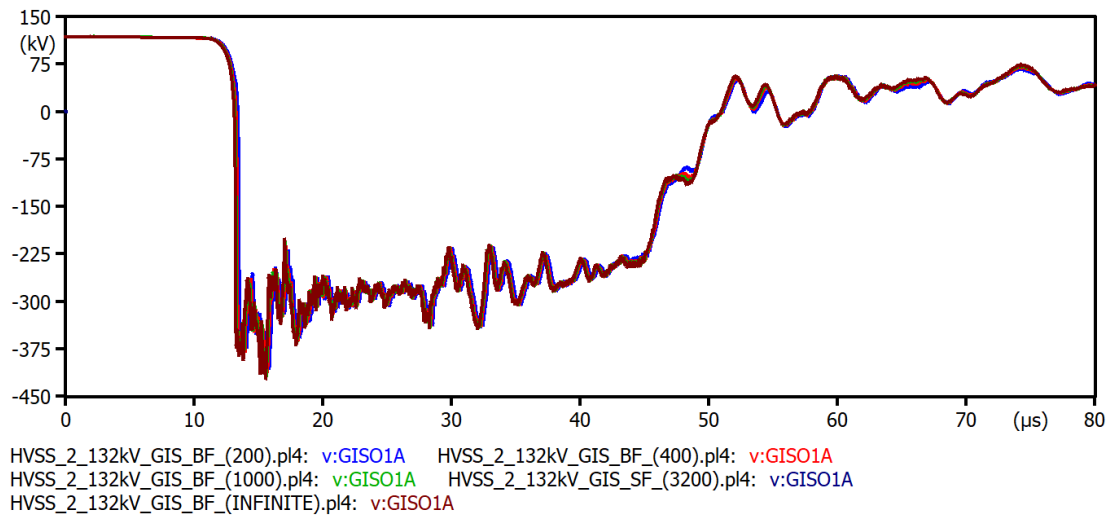
5.2.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Στην Εικ. 21 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων του κόμβου GISI4(A) του υποσταθμού 132 kV HVSS2 με μόνωση εξοπλισμού GIS (μόνωση αερίου) για κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα που προκαλεί ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς. Είναι φανερό ότι αρχικά η υπέρταση αυξάνεται απότομο έως το μέγιστο και με την πάροδο του χρόνου οι τιμές μειώνονται καταλήγοντας περίπου στα αρχικά επίπεδα τάσης, δηλαδή στην τάση λειτουργίας. Να τονιστεί πως ο χρόνος που ξεκινάει να γίνεται η μείωση της υπέρτασης είναι μεγαλύτερος από εκείνον της περίπτωσης του υποσταθμού 400 kV HVSS1. Τέλος γίνεται αντιληπτό, πως για κάθε τιμή της κυματικής αντίστασης που έχει επιλεχθεί, οι κυματομορφές έχουν σχεδόν την ίδια μορφή, αλλά η τιμή κορυφής αλλάζει. Τα παραπάνω ισχύουν και στους άλλους δύο κόμβους που μελετήθηκαν και απεικονίζονται στις Εικ. 22 και 23. Οι κόμβοι αυτοί είναι η έξοδος του GIS (κόμβος: GISO1) και ο κόμβος του ΜΣ (TRH).

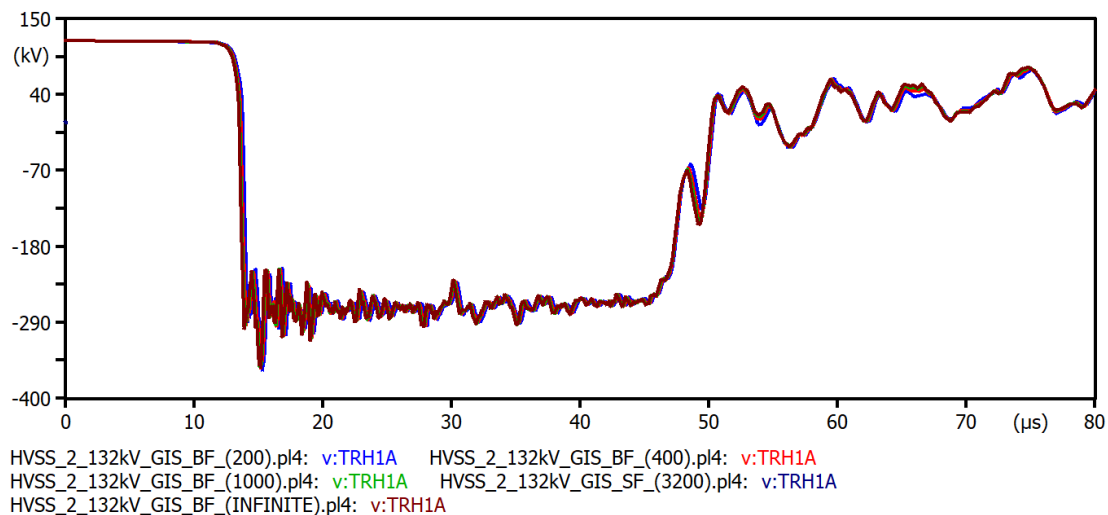
Από τη σύγκριση των τριών εικόνων φαίνεται ότι η υπέρταση εμφανίζεται σε διαφορετικούς χρόνους λόγω διαφορετικών αποστάσεων από το σημείο του κεραυνικού πλήγματος. Επίσης οι μορφές των υπερτάσεων στους διαφορετικούς κόμβους διαφέρουν στο κομμάτι που μειώνεται. Αυτό σχετίζεται με τη διαφορετική απόσταση από τους εκτροπείς υπέρτασης του ΥΣ.



Εικόνα 21. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου GISI4(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



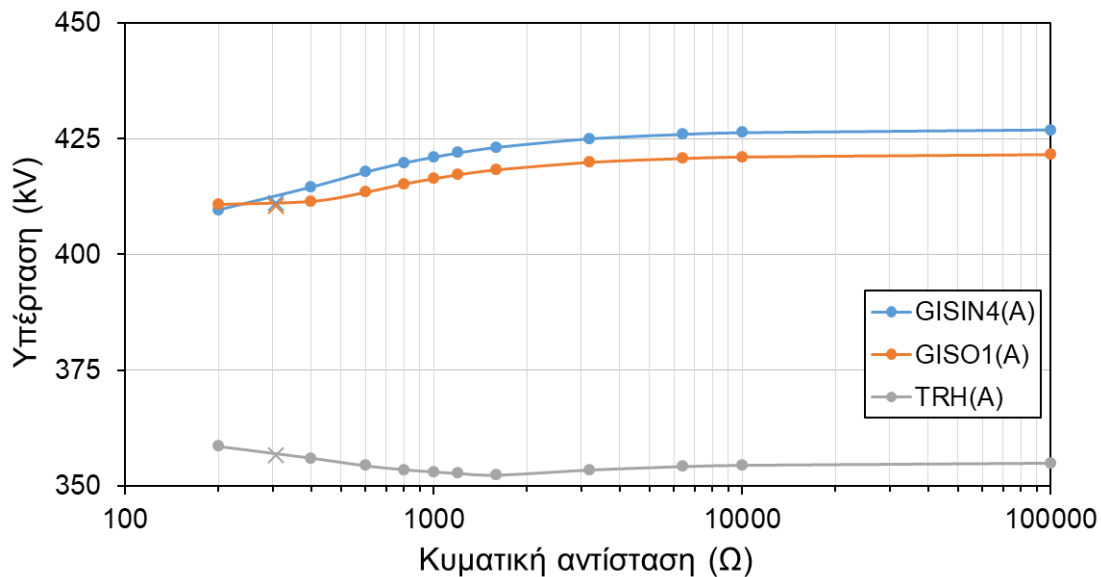
Εικόνα 22. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου GISO1(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



Εικόνα 23. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου TRH(A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

Στην Εικ. 24 απεικονίζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων, που προκλήθηκαν από πλήγμα κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς στον υποσταθμό 132 kV HVSS2 με μόνωση GIS(μόνωση αερίου). Το γράφημα αφορά τους κόμβους GISI4(A), GISO1(A) και TRH(A) για όλες τις τιμές των κυματικών αντιστάσεων του κεραυνικού καναλιού. Στη παρούσα περίπτωση, υπολογίστηκε πως η κυματική αντίσταση βάσει του Kostenko ισοδυναμεί με 308 Ω, όπως φαίνεται και στο γράφημα. Παρατηρήθηκε πως οι 2 πρώτοι κόμβοι με την αύξηση της τιμής της αντίστασης, σημειώνουν μεγαλύτερες τιμές κορυφών υπερτάσεων ενώ όσο οι πρώτες προσεγγίζουν την άπειρη τιμή, οι

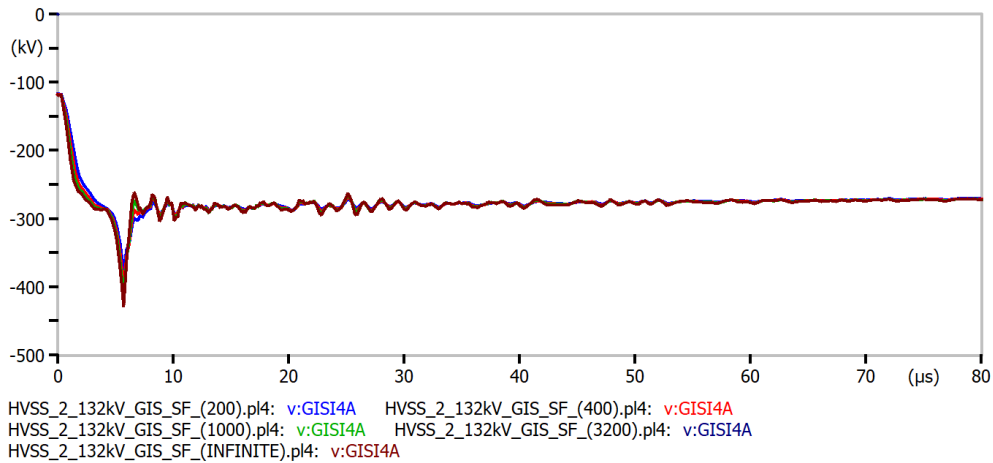
δεύτερες παρουσιάζουν μία σταθερότητα. Ο τρίτος κόμβος (TRHA) παρουσιάζει μειούμενες τιμές κορυφής υπερτάσεων, οι οποίες όμως καταλήγουν να αυξάνονται πάνω από τα 1600 Ω και έπειτα. Από την τιμή 10.000 Ω και έπειτα, η αύξηση είναι απειροελάχιστη. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχη με αυτή του ΥΣ HVSS1.



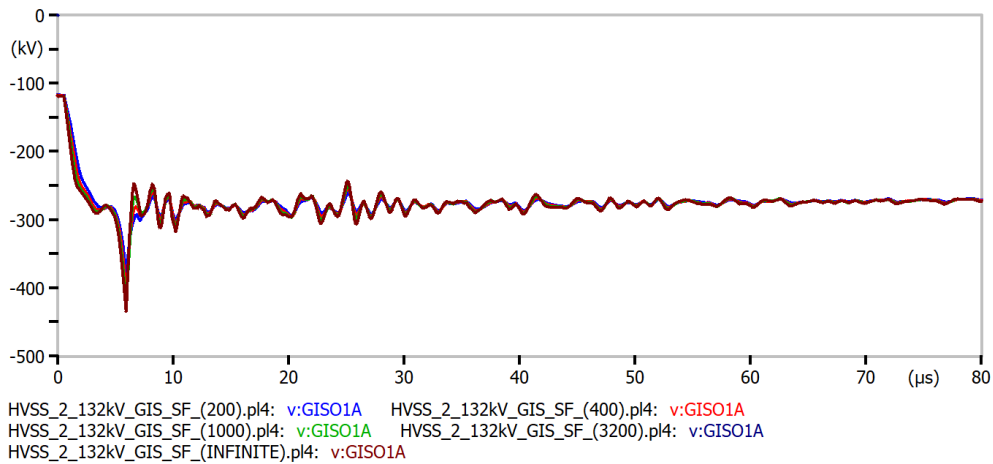
Εικόνα 24. Απεικόνιση τιμών κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 132 kV HVSS2, στους κόμβους GISIN4(A), GISO1(A) και TRH(A) για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X).

5.2.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

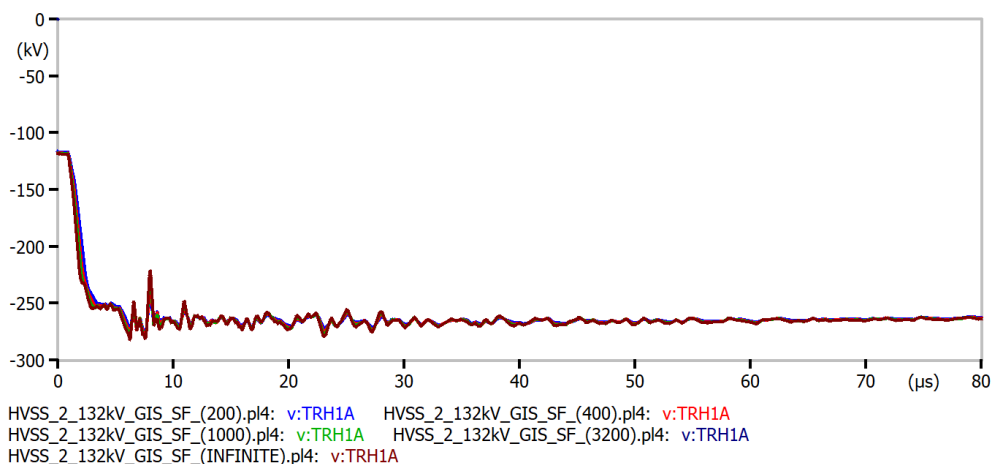
Στην Εικ. 25 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στον κόμβο GIS4A του υποσταθμού 132 kV HVSS2 GIS για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς. Η κυματομορφή παρουσιάζει μία αιχμή και μετά μειώνεται με πάρα πολύ αργό ρυθμό. Για όλες τις τιμές της κυματικής αντίστασης η μορφή των υπερτάσεων είναι ίδια με μόνη διαφορά την τιμή κορυφής που επηρεάζεται. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από τους άλλους δύο κόμβους που εξετάζονται (Εικ. 26 και 27).



Εικόνα 25. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις στον κόμβο GISI4 (A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



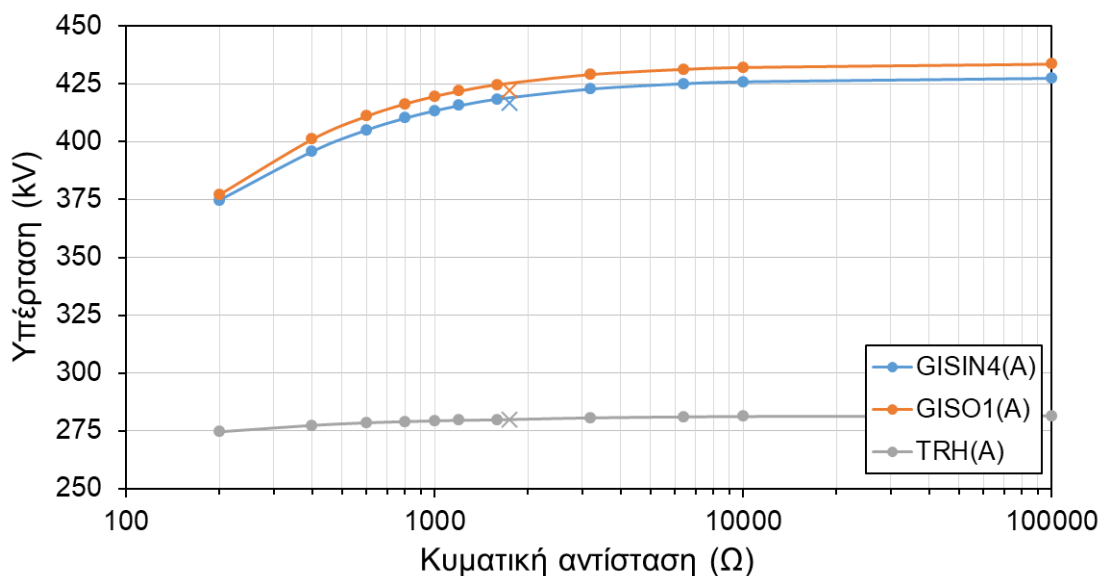
Εικόνα 26. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις στον κόμβο GISO1 (A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



Εικόνα 27. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις στον κόμβο TRH (A) του υποσταθμού HVSS2 (132 kV GIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

Στην Εικ. 28 απεικονίζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων που προκλήθηκαν από πλήγμα κεραυνού στον αγωγό φάσης της εισρχόμενης γραμμής μεταφοράς στον υποσταθμό HVSS2 132 kV με μόνωση εξοπλισμού GIS (μόνωση αερίου). Παρουσιάζονται αποτελέσματα για τους κόμβους GISIN4(A), GISO1(A) και TRH(A) για όλες τις τιμές των κυματικών αντιστάσεων του κεραυνικού καναλιού. Στη παρούσα περίπτωση, υπολογίστηκε πως η τιμή για τη σχέση του Kostenko ισοδυναμεί με 1749,8 Ω, όπως φαίνεται και στο γράφημα.

Οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων και στους 3 κόμβους αυξάνονται με την αύξηση της κυματικής αντίστασης. Από ένα σημείο και έπειτα, η αύξηση των τιμών κορυφής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Ο ρυθμός αύξησης είναι βραδύτερος για την περίπτωση του κόμβου του ΜΣ ισχύος λόγω της τοπολογίας του ΥΣ.



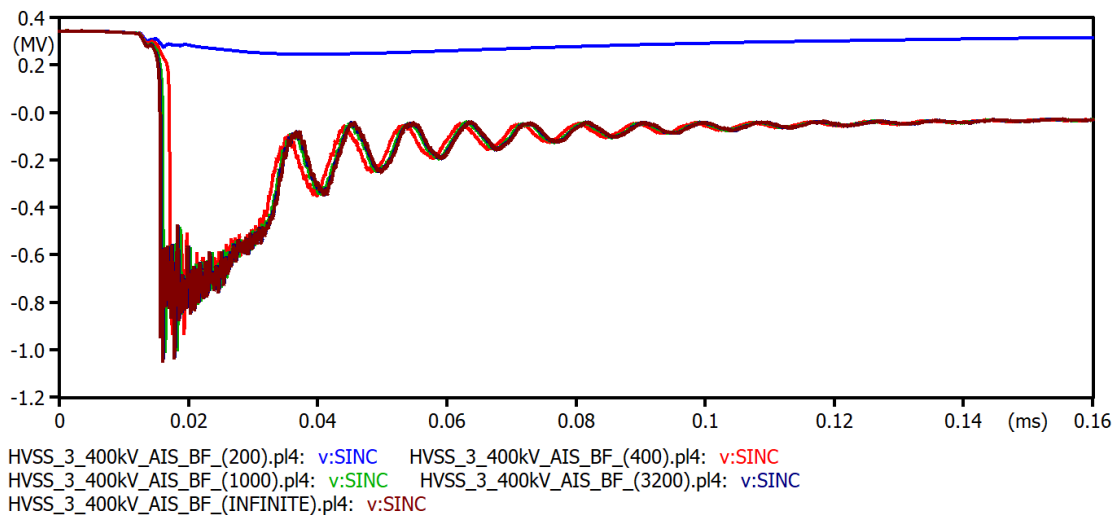
Εικόνα 28. Απεικόνιση τιμών κορυφών υπερτάσεων στους κόμβους GISIN4(A), GISO1(A) και TRH(A) του υποσταθμού 132 kV HVSS2 GIS, για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισρχόμενης γραμμής για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X).

5.3 Υποσταθμός AIS 400 kV

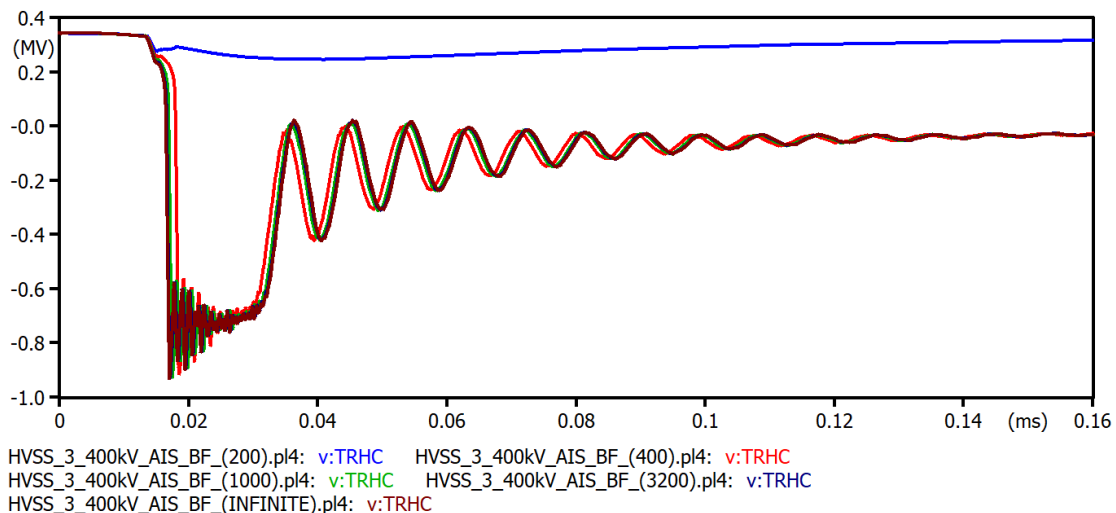
5.3.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Στην Εικ. 29 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στον κόμβο SINC του υποσταθμού 400 kV HVSS3 με μόνωση εξοπλισμού AIS (μόνωση αέρα) για κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα της εισρχόμενης γραμμής. Σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί ότι υπάρχει μία ταλάντωση στην ουρά της κυματομορφής. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην περίπτωση της κυματικής αντίστασης των 200 Ω. Σε αυτή, σε καμία

από τις τρεις φάσεις δε σημειώνεται διάσπαση μόνωσης της εισερχόμενης γραμμής με αποτέλεσμα να μη σημειώνονται υπερτάσεις και να μην επηρεάζεται η ομαλή λειτουργία του υποσταθμού. Τέλος γίνεται αντιληπτό, πως για κάθε τιμή της κυματικής αντίστασης που έχει επιλεχθεί, οι κυματομορφές έχουν σχεδόν την ίδια μορφή (εκτός εκείνης των 200 Ohm), αλλά διαφορετικές τιμές κορυφής. Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και για την περίπτωση του κόμβου TRHC όπου βρίσκεται ο ΜΣ ισχύος του ΥΣ. Οι υπερτάσεις του κόμβου αυτού απεικονίζονται στην Εικ. 30.

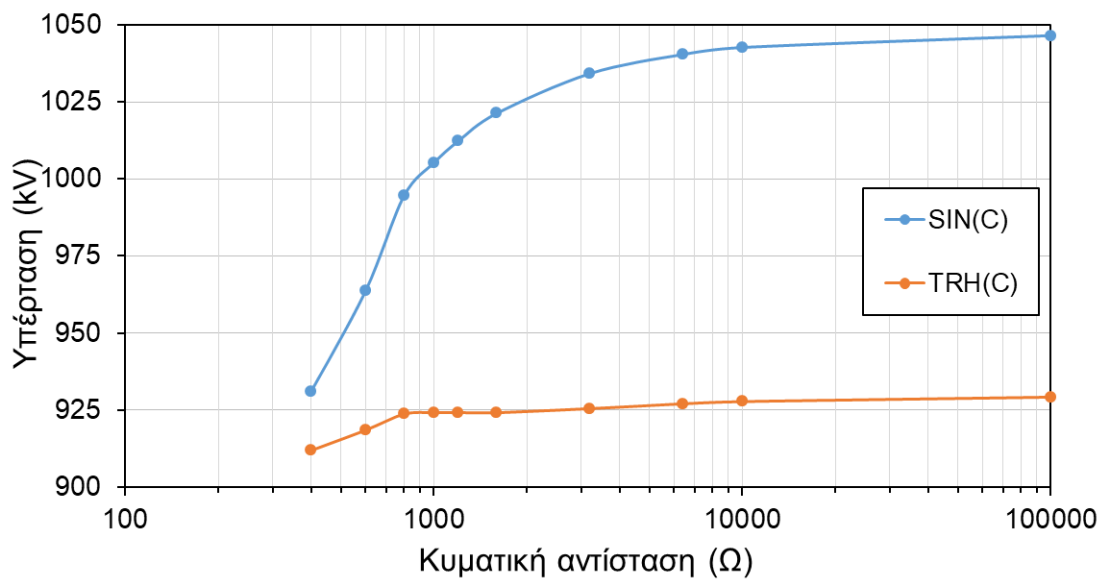


Εικόνα 29. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου SINC του υποσταθμού HVSS3 (400 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



Εικόνα 30. Απεικόνιση κυματομορφών των υπερτάσεων του κόμβου TRHC του υποσταθμού HVSS3 (400 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

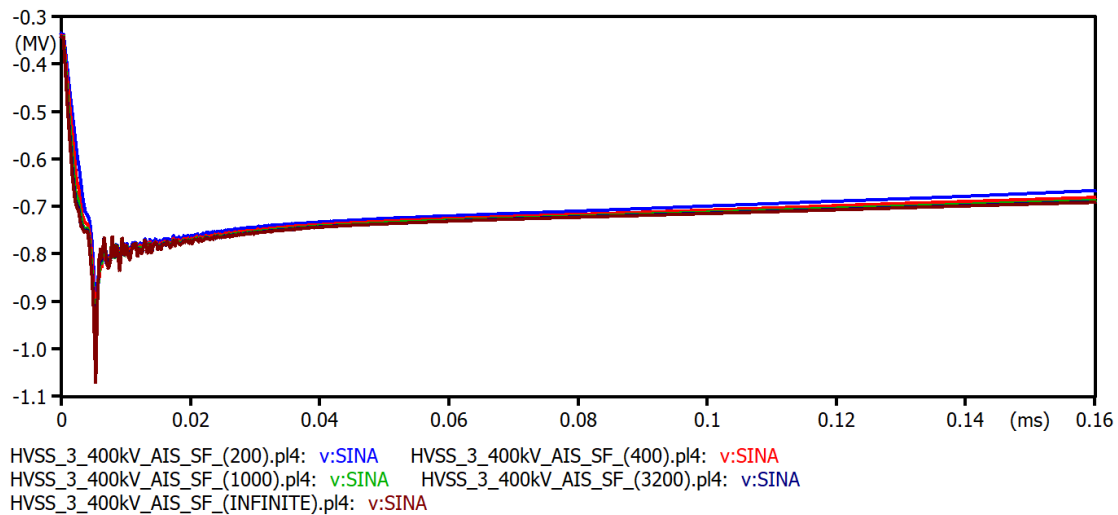
Στην Εικ. 31 απεικονίζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 400 kV HVSS3 με μόνωση εξοπλισμού AIS (μόνωση ατμοσφαιρικού αέρα) που προκλήθηκαν από πλήγμα κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς. Οι κόμβοι που παρουσιάζονται είναι οι SIN4(C) και TRH(C) στην είσοδο του ΥΣ και στον ΜΣ ισχύος, αντίστοιχα. Στη παρούσα περίπτωση, υπολογίστηκε πως η τιμή της κυματικής αντίστασης για τη σχέση του Kostenko ισοδυναμεί με 308 Ω. Αυτή, όμως, δεν φαίνεται στο γράφημα διότι, όπως και στην περίπτωση των 200 Ω δεν συμβαίνει διάσπαση. Παρατηρώντας το γράφημα, φαίνεται πως ο πρώτος κόμβος αποκτά μεγαλύτερες αυξήσεις των τιμών κορυφής των υπερτάσεων με την αύξηση της κυματικής αντίστασης.



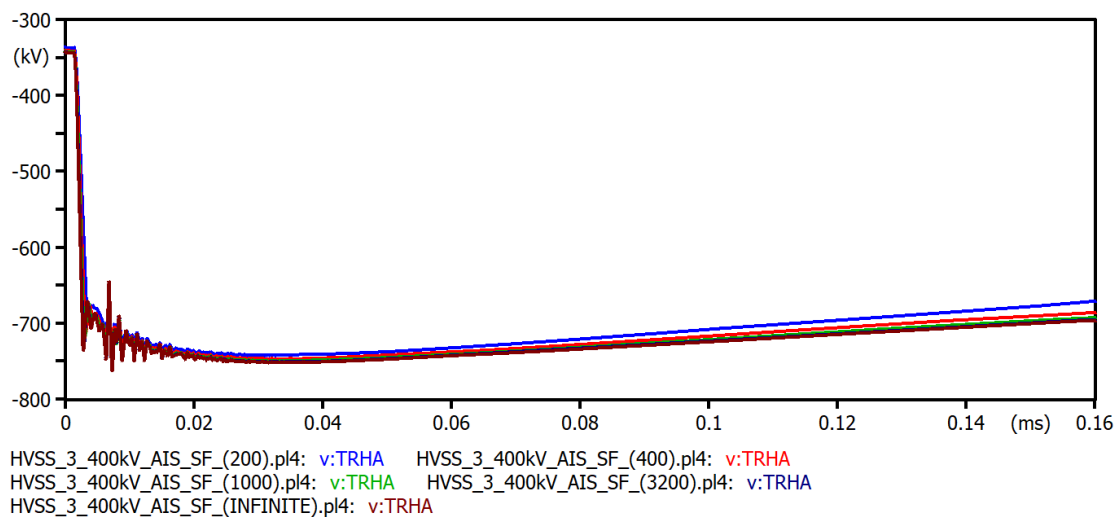
Εικόνα 31. Απεικόνιση τιμών κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 400 kV HVSS3, στους κόμβους SIN4(C) και TRH(C) για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω και άπειρη αντίσταση.

5.3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

Στις Εικ. 32 και 33 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στους κόμβους SINA και TRHA του υποσταθμού 400 kV HVSS3 με μόνωση εξοπλισμού AIS (μόνωση αέρα) για κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς. Στον πρώτο κόμβο υπάρχει μία αιχμή στην υπέρταση που δεν υπάρχει στον δεύτερο. Η επίδραση της κυματικής αντίστασης του κεραυνικού καναλιού είναι παρόμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις: ίδια γενική μορφή και διαφορετική τιμή κορυφής.

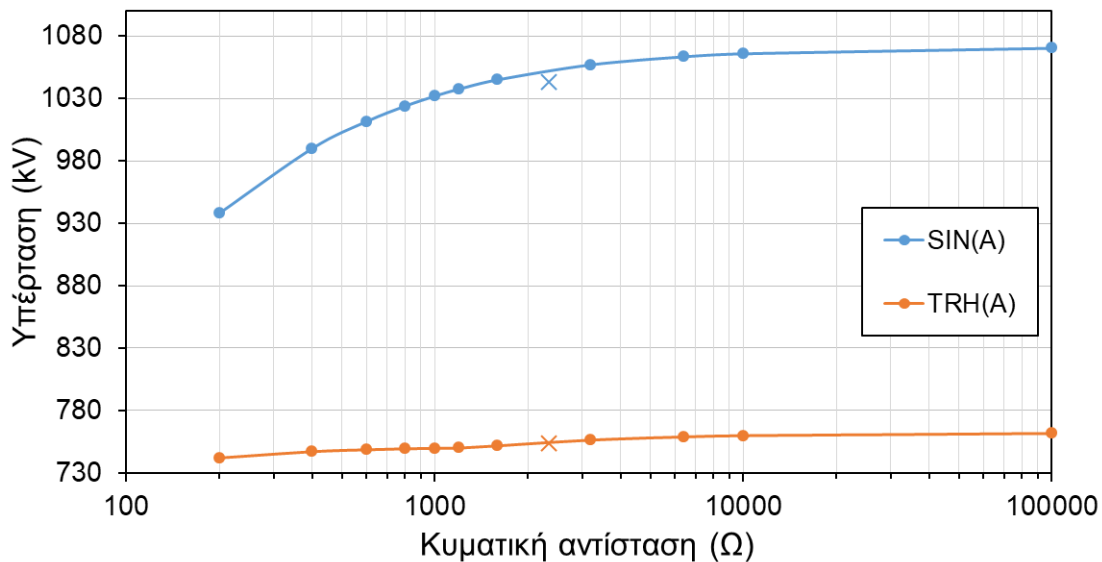


Εικόνα 32. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου SINA του υποσταθμού HVSS3 (400 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς για τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



Εικόνα 33. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου TRHA του υποσταθμού HVSS3 (400 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς για τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

Στην Εικ. 34 απεικονίζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων, που προκλήθηκαν από πλήγμα κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής στον υποσταθμό 400 kV HVSS3 με μόνωση εξοπλισμού AIS (μόνωση ατμοσφαιρικού αέρα). Παρουσιάζονται οι κόμβοι SIN4(A) και TRH(A) για όλες τις τιμές των κυματικών αντιστάσεων. Στη παρούσα περίπτωση, υπολογίστηκε πως με τη σχέση του Kostenko η κυματική αντίσταση είναι 2350,5 Ω, όπως φαίνεται και στο γράφημα με «X». Παρατηρώντας το γράφημα, φαίνεται ότι, όπως και στην περίπτωση του πλήγματος κεραυνού στον πυλώνα, ο πρώτος κόμβος παρουσιάζει μεγαλύτερες αυξήσεις στις τιμές κορυφής σε σχέση με τον δεύτερο του οποίου οι τιμές των φαίνεται να επηρεάζονται πολύ λίγο ως προς την αύξηση της αντίστασης κεραυνού.



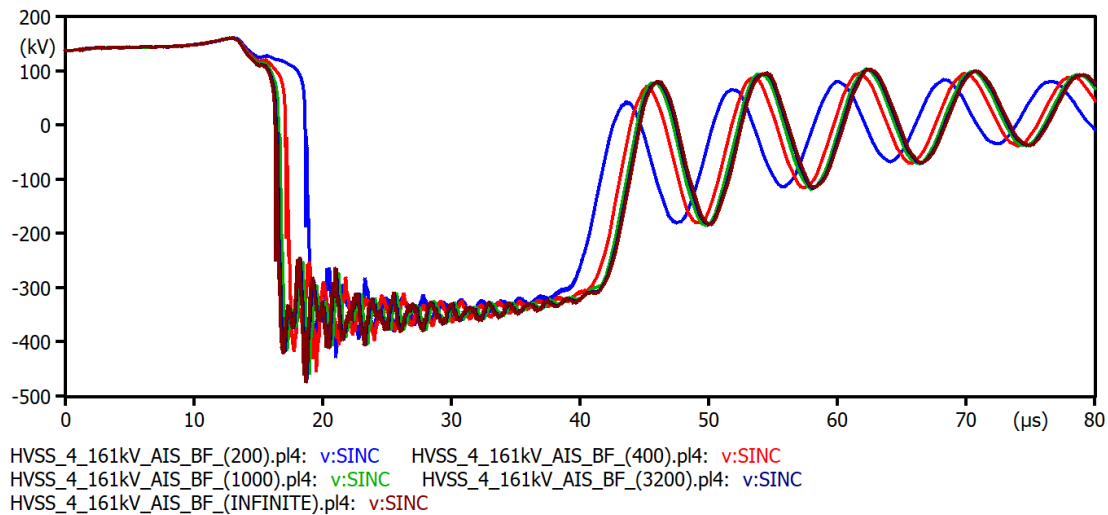
Εικόνα 34. Απεικόνιση τιμών κορυφών υπερτάσεων στους κόμβους SIN4(A) και TRH(A) του υποσταθμού 400 kV HVSS3 AIS, για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X).

5.4 Υποσταθμός AIS 161 kV

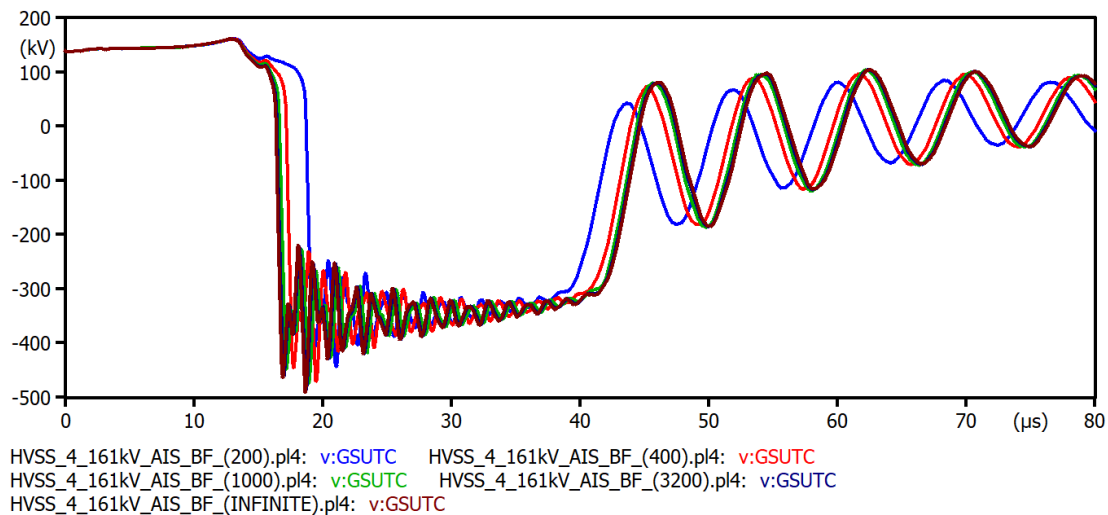
5.4.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Στις Εικ. 35 και 36 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στους κόμβους SINC και GSUTC του υποσταθμού 161 kV HVSS4 με μόνωση εξοπλισμού AIS (μόνωση αέρα) για κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς. Και πάλι φαίνεται η αρχική απότομη αύξηση και η μετέπειτα μείωση των υπερτάσεων. Και στον ΥΣ αυτό υπάρχει ταλάντωση στην ουρά των υπερτάσεων, η γενική μορφή των οποίων είναι παρόμοια ανεξάρτητα από την κυματική αντίσταση του καναλιού του κεραυνού. Αυτό που αλλάζει είναι η τιμή κορυφής και ο χρόνος εμφάνισης λόγω αλλαγής της χρονικής στιγμής διάσπασης της μόνωσης της γραμμής.

Στην Εικ. 37 απεικονίζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων, που προκλήθηκαν από πλήγμα κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής στον υποσταθμό 161 kV HVSS4 με μόνωση εξοπλισμού AIS (μόνωση ατμοσφαιρικού αέρα). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κόμβων SIN(C) και GSUT(C) για όλες τις τιμές των κυματικών αντιστάσεων που μελετήθηκαν. Στη παρούσα περίπτωση, υπολογίστηκε πως η τιμή κυματικής αντίστασης βάσει του Kostenko ισοδυναμεί με 308 Ω, όπως φαίνεται και στο γράφημα.

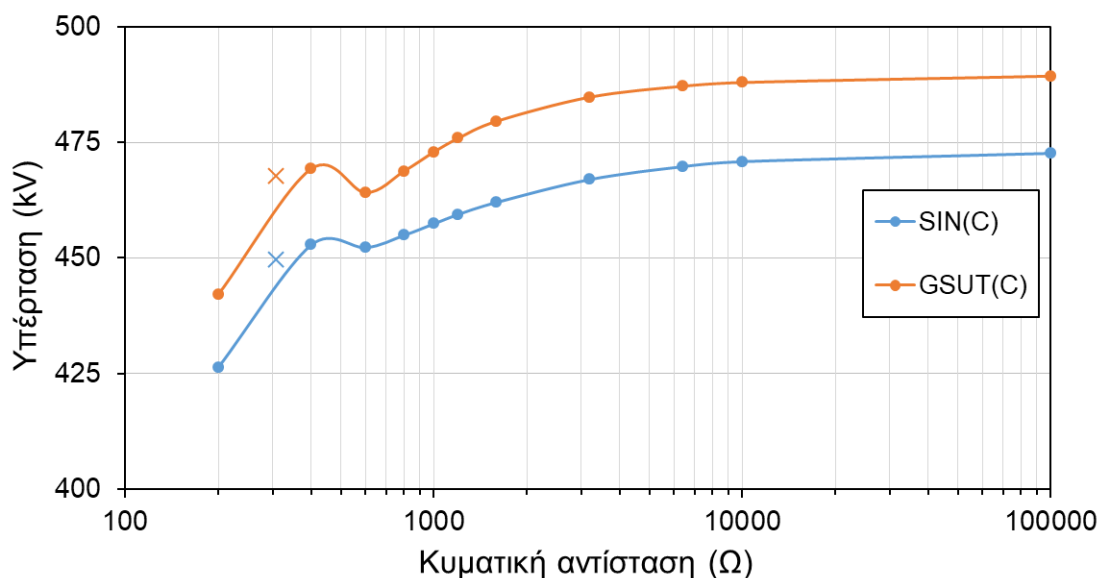


Εικόνα 35. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου SINC του υποσταθμού HVSS4 (161 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



Εικόνα 36. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GSUTC του υποσταθμού HVSS4 (161 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς με τιμές κυματικής αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

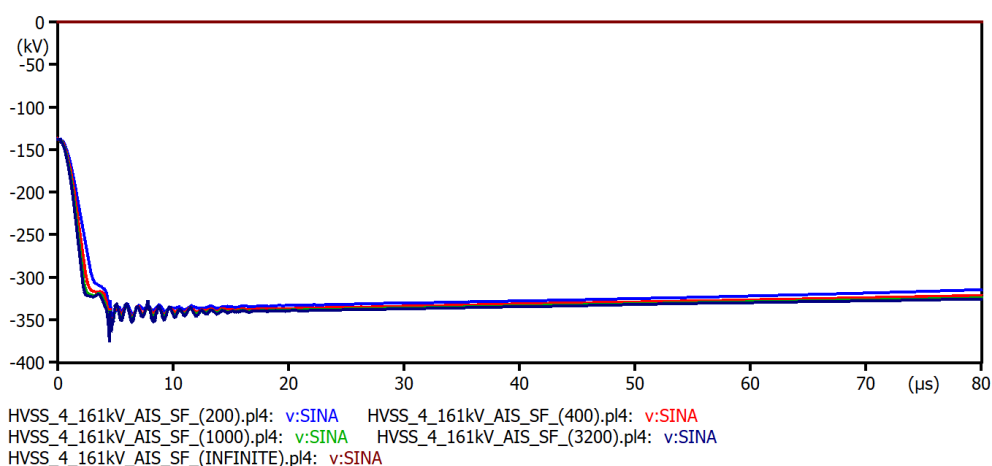
Παρατηρώντας το γράφημα της Εικ. 37, φαίνεται οι 2 κόμβοι να έχουν όμοια συμπεριφορά ως προς την αύξηση των τιμών των κεραυνικών υπερτάσεων με την αύξηση της κυματικής αντίστασης. Και οι 2 μεταξύ των τιμών 400 Ω και 600 Ω σημειώνουν μείωση των υπερτάσεων, οι οποίες εν συνεχεία, σημειώνουν αυξανόμενες τιμές με μικρότερο ρυθμό προς την άπειρη αντίσταση.



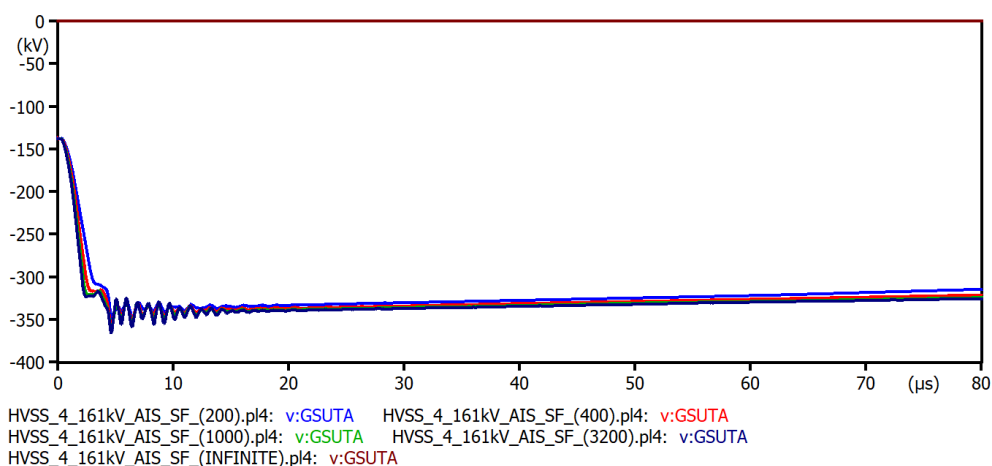
Εικόνα 37. Απεικόνιση τιμών κορυφής των υπερτάσεων στον υποσταθμό 161 kV HVSS4, στους κόμβους SIN(C) και GSUT(C) για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X).

5.4.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

Στις Εικ. 38 και 39 απεικονίζονται οι κυματομορφές των υπερτάσεων που καταγράφονται στους κόμβους SINA και GSUTA του υποσταθμού 161 kV HVSS4 με μόνωση εξοπλισμού AIS (μόνωση αέρα) για κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς. Η μορφή των υπερτάσεων είναι παρόμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις πλήγματος σε αγωγό φάσης. Το ίδιο συμβαίνει και με την επίδραση της κυματικής αντίστασης του κεραυνικού καναλιού.

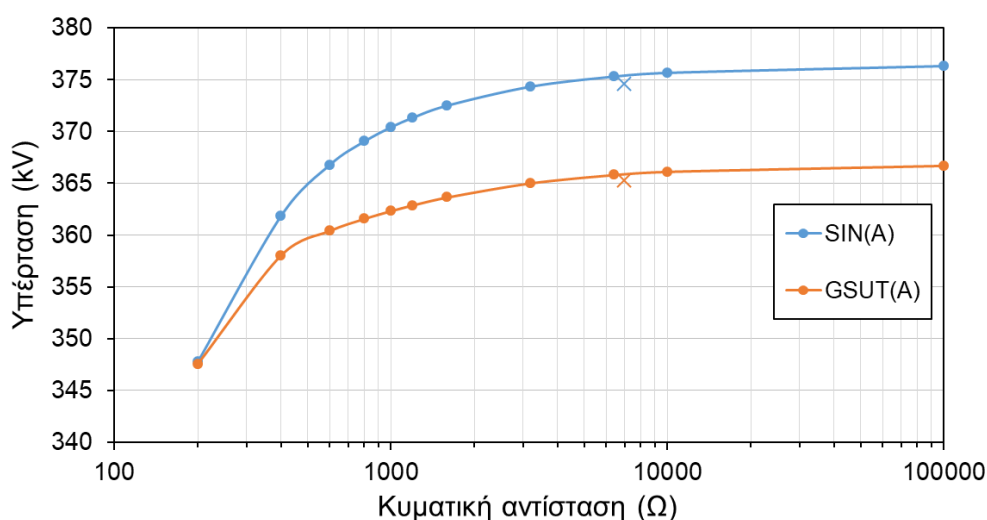


Εικόνα 38. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου SINA του υποσταθμού HVSS4 (161 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς για τιμές κυματικές αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.



Εικόνα 39. Απεικόνιση κυματομορφών που παρουσιάζουν τις υπερτάσεις του κόμβου GSUTA του υποσταθμού HVSS4 (161 kV AIS) εξαιτίας πλήγματος κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς για τιμές κυματικές αντίστασης 200 Ω, 400 Ω, 1000 Ω, 3200 Ω και άπειρη αντίσταση.

Στην Εικ. 40 απεικονίζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων, που προκλήθηκαν από πλήγμα κεραυνού σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης εναέριας γραμμής μεταφοράς στον υποσταθμό 161 kV HVSS4 με μόνωση εξοπλισμού AIS (μόνωση ατμοσφαιρικού αέρα). Το γράφημα αφορά τα αποτελέσματα των κόμβων SIN(A) και GSUT(A) για όλες τις τιμές των κυματικών αντιστάσεων που μελετήθηκαν (Πίνακας 2). Στη παρούσα περίπτωση, υπολογίστηκε πως η τιμή για τη σχέση του Kostenko ισοδυναμεί με 6.997,1 Ω, όπως φαίνεται και στο γράφημα. Παρατηρώντας το γράφημα της Εικ. 40, φαίνεται οι 2 κόμβοι να έχουν οριακά ίδιες τιμές υπερτάσεων για τιμή κυματικής αντίστασης 200 Ω. Παράλληλα, σημειώνουν όμοια αυξητική συμπεριφορά των υπερτάσεων με την αύξηση της κυματικής αντίστασης. Ωστόσο, η αύξηση στον κόμβο SIN(A), δηλαδή στην είσοδο του ΥΣ είναι πολύ πιο έντονη αρχικά.



Εικόνα 40. Απεικόνιση τιμών κορυφών υπερτάσεων στους κόμβους SIN(A) και GSUT(A) του υποσταθμού 161 kV HVSS4 AIS, για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής για τιμές των κυματικών αντιστάσεων 200 Ω, 400 Ω, 800 Ω, 1200 Ω, 1600 Ω, 3200 Ω, 6400 Ω, 10.000 Ω, άπειρη αντίσταση και σχέση Kostenko (σύμβολο: X).

5.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μόνωση εξοπλισμού AIS, τόσο με τη γη όσο και μεταξύ των φάσεων αποτελείται κατά κύριο λόγο από ατμοσφαιρικό αέρα. Επίσης τα αγώγιμα στοιχεία που βρίσκονται υπό τάση, δεν περικλείονται από γειωμένο περίβλημα αλλά απλούστατα στηρίζονται ή αναρτώνται από μονωτήρες. Από την άλλη, κατά τη μόνωση εξοπλισμού GIS, τα στοιχεία υπό τάση προστατεύονται από γειωμένο περίβλημα ενώ η ίδια η μόνωση εξασφαλίζεται από την παρουσία μονωτικού αερίου κάτι που προσφέρει στο σύστημα καλύτερη μόνωση και προστασία. Βάσει των παραπάνω πληροφοριών γίνεται σαφής η διαφορετική κατασκευή των υποσταθμών των δύο κατηγοριών, η οποία επηρεάζει και τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις καθώς ο εξοπλισμός συμπεριφέρεται διαφορετικά σε υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου.

Για τα πλήγματα κεραυνού σε πυλώνα της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς, προκαλούνται μεγαλύτερες υπερτάσεις στην κατηγορία των υποσταθμών με μόνωση εξοπλισμού AIS έναντι εκείνων με εξοπλισμό GIS, αν συγκριθούν τα επίπεδα τάσης που είναι κοινά (400 kV) ή έχουν παρόμοια τιμή (132 kV και 161 kV). Αυτό βέβαια ενδέχεται να επηρεάζεται από την τοπολογία του ΥΣ, ίσως ακόμα και από αλλαγές της λόγω χειρισμών διακοπών ισχύος στον ίδιο ΥΣ. Η περίπτωση του σφάλματος θωράκισης δεν προσφέρεται για συμπεράσματα καθώς τα μέγιστα ρεύματα κεραυνού δεν είναι ίδια σε όλους τους ΥΣ αφού εξαρτώνται από τη γεωμετρία των γραμμών μεταφοράς (θέση αγωγών προστασίας σε σχέση με τους αγωγούς φάσης). Από τα αποτελέσματα επίσης είναι εμφανές ότι στα μεγαλύτερα επίπεδα τάσης παρατηρούνται μεγαλύτερες υπερτάσεις για το ίδιο κεραυνικό ρεύμα. Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά των εκτροπέων υπέρτασης που προστατεύουν τον ΥΣ.

Γενικά η αύξηση της κυματικής αντίστασης του κεραυνικού καναλιού οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης τιμής των υπερτάσεων στις περισσότερες περιπτώσεις διότι το ρεύμα του κεραυνού που ρέει προς το σύστημα αυξάνεται με την αύξηση της κυματικής αντίστασης. Σε κάποιες όμως περιπτώσεις, κυρίως για πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα και ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς, μπορεί να εμφανίζονται τοπικά μέγιστα και ελάχιστα με την αύξηση της κυματικής αντίστασης. Αυτό έχει να κάνει με την τοπολογία του κάθε υποσταθμού σε συνδυασμό με τη χρονική στιγμή της διάσπασης της μόνωσης. Σε όλες περιπτώσεις οι κυματομορφές έχουν παρόμοια μορφή.

Για την ασφαλή λειτουργία του εξοπλισμού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το βασικό επίπεδο μόνωσης του εξοπλισμού (BIL), το οποίο είναι η τιμή τάσης με κυματομορφή 1.2/50 μ s που αντέχει ο εξοπλισμός. Αν ξεπεραστεί το επίπεδο αυτό από την υπέρταση μπορεί να καταστραφεί ο εξοπλισμός. Γνωρίζοντας πως:

- Ο υποσταθμός 400 kV HVSS1, για το GIS και τα καλώδια έχει BIL =

1425 kV και για τον μετασχηματιστή BIL = 1550 kV,

- Ο υποσταθμός 132 kV HVSS2 GIS έχει BIL = 650 kV,
- Ο υποσταθμός 400 kV HVSS3 AIS έχει BIL = 1425 kV,
- Ο υποσταθμός 161 kV HVSS4 GIS έχει BIL = 750 kV,

προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο εξοπλισμός θα αντέξει τις υπολογισμένες υπερτάσεις που έχουν καταγραφεί στους υποσταθμούς εξαιτίας κεραυνικού πλήγματος σε πυλώνα ή αγωγό φάσης. Επομένως τα μέσα προστασίας των ΥΣ αυτών είναι επαρκή ανεξάρτητα από την κυματική αντίσταση που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η επίδραση της κυματικής αντίστασης του κεραυνικού καναλιού στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Πιο συγκεκριμένα, η κυματική αντίσταση του καναλιού πρακτικά είναι μία στοχαστική παράμετρος και έτσι στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές που ενδέχεται να παρουσιάσει στην πράξη, από 200 Ω έως και την άπειρη τιμή. Ταυτόχρονα, για τις παραπάνω αντιστάσεις, εξετάστηκαν οι επιδράσεις στην ομαλή λειτουργία των συστημάτων κατά το πλήγμα κεραυνού. Η διερεύνηση έγινε μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ATP-EMTP.

Συνολικά εξετάστηκαν 4 διαφορετικές τοπολογίες υποσταθμών υψηλής τάσης. Οι δυο εξ αυτών διαθέτουν μόνωση με αέριο (GIS) ενώ οι υπόλοιποι με ατμοσφαιρικό αέρα (AIS). Τα επίπεδα τάσης των ΥΣ είναι 132 kV, 161 kV, και 400 kV (2 ΥΣ). Για κάθε υποσταθμό έγινε καταγραφή των κεραυνικών υπερτάσεων (μικρής διάρκειας μετώπου) για κάθε τιμή της κυματικής αντίστασης που μελετήθηκε. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από το άμεσο πλήγμα του κεραυνού σε αγωγό φάσης και από το αντίστοιχο σε πυλώνα της εισερχόμενης εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή τόσο σε περίπτωση σφάλματος θωράκισης (shielding failure) όσο και σε ανάστροφη διάσπαση (backflashover).

Η μορφή των υπερτάσεων που προκύπτει για τον κάθε ΥΣ εξαρτάται από την τοπολογία του, το είδος της μόνωσης (GIS ή AIS), τα στοιχεία που τον απαρτίζουν και τις μεταξύ τους αποστάσεις. Επομένως, η μορφή των υπερτάσεων εξαρτάται έντονα από τον ίδιο τον ΥΣ. Και οι δύο κατηγορίες υπερτάσεων (backflashover και shielding failure) παρουσιάζουν μία έντονη και γρήγορη αύξηση προς το μέγιστο (μέτωπο κυματομορφής) και μια βραδύτερη μείωση σε σχέση με την αύξηση αυτή (ουρά κυματομορφής). Στη δεύτερη περίπτωση, ωστόσο, η μείωση είναι πολύ πιο αργή σε όλους του ΥΣ.

Η κυματική αντίσταση του καναλιού του κεραυνού βρέθηκε ότι δεν επιδρά στη μορφή των υπερτάσεων. Οι κυματομορφές καθορίζονται από την τοπολογία και τα στοιχεία του υποσταθμού. Έχει, όμως, επίδραση στην τιμή κορυφής τους. Στις προσομοιώσεις πληγμάτων κεραυνών σε αγωγό φάσης της εισερχόμενης γραμμής μεταφοράς βρέθηκε αύξηση των τιμών κορυφής των υπερτάσεων με την αύξηση της κυματικής αντίστασης καθώς το ρεύμα που ρέει στο σύστημα γίνεται μεγαλύτερο (μικρότερο ρεύμα στο κανάλι του κεραυνού). Στην περίπτωση πλήγματος σε πυλώνα ο μηχανισμός δημιουργίας των υπερτάσεων είναι η ανάστροφη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς. Μέσω της διάσπασης ρέει κεραυνικό ρεύμα σε κάποια ή κάποιες φάσεις του ΥΣ. Έτσι τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα, καθώς η αλλαγή της κυματικής αντίστασης αλλάζει τη στιγμή της διάσπασης της μόνωσης. Έτσι, αν και πάλι γενικά οι τιμές κορυφής αυξάνονται με την αύξηση της

κυματικής αντίστασης, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες αυτό δεν συμβαίνει και παρατηρούνται αυξομειώσεις των τιμών κορυφής καθώς η κυματική αντίσταση αυξάνεται. Πιθανός λόγος είναι η πολυπλοκότητα των υποσταθμών που διαθέτουν διαφορετικές διαδρομές και πολλά στοιχεία εξοπλισμού και η ύπαρξη μη γραμμικών στοιχείων όπως είναι οι εκτροπείς υπέρτασης.

Είναι σημαντικό τέλος να αναφερθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις κυματικής αντίστασης που εξετάστηκαν οι υπερτάσεις ήταν μικρότερες από το βασικό επίπεδο μόνωσης του εξοπλισμού. Πάντως η επίδραση της κυματικής αντίστασης του καναλιού του κεραυνού ενδέχεται να είναι πολύ σημαντικότερη σε άλλες διερευνήσεις, όπως στην εκτίμηση ενέργειας που καταπονεί τους εκτροπείς υπέρτασης.

Βιβλιογραφία

- [1] T. Krieg and J. Finn (eds.), *Substations*, CIGRE Green Books, CIGRE Study Committee B3: Substations, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019.
- [2] H. Koch (ed.), *GIS, Gas Insulated Substations*, IEEE Press, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, UK, 2014.
- [3] Ζ. Γ. Δάτσιος, *Εφαρμογές των Υψηλών Τάσεων, 3η Διάλεξη Θεωρίας, Υψηλές Τάσεις ΙΙ*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2021.
- [4] Ζ. Γ. Δάτσιος, *Μεταβατικά Φαινόμενα, Υπερτάσεις και Συντονισμός Μονώσεων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (α)-(γ), 2η-4η Διάλεξη Θεωρίας, Υψηλές Τάσεις Ι*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2022.
- [5] R. Kumar, K. Bansal, D. K. Saini, and I. P. S. Paul, "Development of Empirical Formulas and Computer Program with MATLAB GUI for Designing of Grounding System in Two Layer Soil Resistivity Model for High Voltage Air Insulated and Gas Insulated Substations," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 28, pp. 1-7, 2016.
- [6] *Transformers Magazine*, L&T to Build Substation in Saudi Arabia, Σύνδεσμος, Τελευταία πρόσβαση: Αύγουστος 2023.
- [7] L. Van der Sluis and N. Uzelac, *Equipment in Power Systems*, Chapter 2, pp. 11-62, in: H. Ito (ed.), *Switching Equipment*, CIGRE Green Books, CIGRE Study Committee A3: High Voltage Equipment, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019.
- [8] Hitachi Energy, PEXLINK - Line Surge Arresters, Σύνδεσμος, Τελευταία πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2023.
- [9] IEC 60071-1, *Insulation Co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules*, 2019.
- [10] *Surge Arrester*, SAVREE, Σύνδεσμος, Τελευταία πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2023.
- [11] CIGRE Working Group 33.01, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," *Technical Brochure 63*, 1991.
- [12] 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 International*

Conference on Lightning Protection (ICLP), Cape Town, South Africa, 2022, pp. 521-526, paper no. ICLP 2022-PPTDL2-6.

[13] CIGRE Working Group C4.407, "Lightning parameters for engineering applications," Technical Brochure 549, 2013.

[14] 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.

[15] M. V. Kostenko, "Electrodynamic characteristics of lightning and their influence on disturbances of high-voltage lines," J. Geophys. Res., vol. 100, no. D2, pp. 2739-2747, 1995.

[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.

[18] Ζ. Γ. Δάτσιος, «Διερεύνηση του φαινομένου ιονισμού του εδάφους γύρω από συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης: Επίδραση στην κεραυνική συμπεριφορά εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας», Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Ιούνιος 2017.

[19] J. R. Marti, "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147-157, 1982.

[20] M. A. Sargent and M. Darveniza, "Tower surge impedance," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no. 5, pp. 680-687, 1969.

[21] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, "A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932, 1985.

[22] Z. G. Datsios and P. N. Mikropoulos, "Implementation of leader development models in ATP-EMTP using a type-94 circuit component," in Proc. 32nd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014, pp. 735-741, paper no. 270.

[23] 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," *Electric Power Systems Research*, vol. 139, pp. 37-46, 2016.
- [24] 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)
- [25] L. Bergeron, *Du Coup de Béliier en Hydraulique - Au Coup de Foudre en Electricité: Méthode Graphique Générale*, Dunod, Paris, France, 1950. (in French), English translation: *Water Hammer in Hydraulics and Wave Surges in Electricity*, John Wiley & Sons, New York, New York, USA, 1961
- [26] P. Pinceti and M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 393-398, April 1999.
- [27] M. Caserza Magro, M. Giannettoni, and P. Pinceti, "Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1692-1695, October 2004.
- [28] A. Borghetti, A. Morched, F. Napolitano, C. A. Nucci, and M. Paolone, "Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 360-372, 2009.
- [29] IEEE Fast Front Transients Task Force, "Modeling guidelines for fast front transients," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 493-506, 1996.