



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

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΩΝ
ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ
ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ
ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΣΟΦΙΑΣ ΤΣΙΓΚΟΥΝΗ

Επιβλέπων: Ζαχαρίας Δάτσιος

Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

ΚΟΖΑΝΗ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING

EFFECTS OF RECORDED LIGHTNING CURRENT WAVEFORMS ON THE OVERVOLTAGES ARISING AT HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS

THESIS

SOFIA TSIGKOUNI

SUPERVISOR: Zacharias Datsios

Adjunct Lecturer

KOZANI FEBRUARY 2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



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

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “Διερεύνηση της επίδρασης καταγεγραμμένων κυματομορφών κεραυνικού ρεύματος 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 μέλους 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) Σοφία Τσιγκούνη, Ζαχαρίας Δάτσιος, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Σοφία Τσιγκούνη

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση κεραυνικών υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης με μόνωση αέρα (AIS) και σε υποσταθμούς με μόνωση αερίου (GIS) μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ATP-EMTP. Αρχικά γίνεται εισαγωγή στους υποσταθμούς υψηλής τάσης, τις κατηγορίες που χωρίζονται και αναλύονται τα στοιχεία εξοπλισμού τους. Ακόμα, γίνεται αναφορά και στην προστασία εξοπλισμού έναντι υπερτάσεων και παρουσιάζονται οι αιτίες ανάπτυξης υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου, η αντικεραυνική προστασία των υποσταθμών καθώς και οι μηχανισμοί ανάπτυξης των κεραυνικών υπερτάσεων. Στη συνέχεια αναλύεται η γενική μορφή καταγεγραμμένων κεραυνικών ρευμάτων καθώς και η περιγραφή της κυματομορφής CIGRE και των παραμέτρων της. Ταυτόχρονα, αναλύονται και τα επιλεγμένα έξι καταγεγραμμένα ρεύματα προς διερεύνηση. Εξετάζονται τέσσερις υποσταθμοί AIS και GIS με επίπεδα τάσης 132 kV, 161 kV και 400 kV και παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά τους και η μοντελοποίησή τους στο λογισμικό ATP-EMTP. Τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για κεραυνικά πλήγματα στους αγωγούς φάσης και στους πυλώνες των εισερχόμενων εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στους υποσταθμούς. Προκύπτει ότι τα αποτελέσματα αυτά εξαρτώνται από την τοπολογία και τα χαρακτηριστικά των υποσταθμών καθώς και του κεραυνικού ρεύματος.

Λέξεις Κλειδιά

Ανάστροφη Διάσπαση
Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Κεραυνικά Πλήγματα
Κεραυνικές Υπερτάσεις
Σφάλμα Θωράκισης
Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης

Abstract

The present thesis investigates lightning surges in air-insulated high-voltage substations (AIS) and gas-insulated substations (GIS) via ATP-EMTP simulations. Initially, high-voltage substations are introduced and their different categories are discussed together with main equipment. Also, reference is made to the protection of the equipment against surges. The causes of fast-front overvoltages, the lightning protection of substations and the mechanisms related to lightning surges are presented. The general form of recorded currents is discussed, as well as a description of the CIGRE waveform and its parameters. The selected recorded lightning currents to be investigated are also analyzed. Four substations are considered in this thesis: two AIS and two GIS substations with voltage levels of 132 kV, 161 kV και 400 kV. Their main characteristics and the modeling approach followed are presented. Finally, simulation results on overvoltages arising at the substations due to lightning strikes to the phase conductors and towers of connected overhead transmission lines are presented and analyzed. It is concluded that the results generally depend strongly on the main characteristics of the substations and of the lightning current waveforms.

Keywords

Backflashover
Lightning
Lightning Overvoltages
Overhead Transmission Lines
Shielding Failure
Substations

Ευχαριστίες

Με την παρούσα εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Πρόγραμμα Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, στη πόλη της Κοζάνης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δάτσιο Ζαχαρία, Έκτακτο Διδάσκοντα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς και την πολύτιμη βοήθεια, υπομονή και καθοδήγηση που προσέφερε σε κάθε στάδιο εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου, που στήριζαν τις προσπάθειες μου, σε όλη τη διάρκεια της σταδιοδρομίας μου.

Σοφία Τσιγκούνη

ΚΟΖΑΝΗ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| Περίληψη | 7 |
| Abstract | 8 |
| Ευχαριστίες | 9 |
| Περιεχόμενα | 11 |
| Κατάλογος Σχημάτων | 13 |
| Κατάλογος Πινάκων | 21 |
| Πρόλογος | 23 |
| Κεφάλαιο 1: Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης | 25 |
| 1.1 Εισαγωγή στους υποσταθμούς Υψηλής Τάσης | 25 |
| 1.2 Κατηγορίες υποσταθμών Υψηλής Τάσης | 26 |
| 1.2.1 Υποσταθμοί με βάση τη λειτουργία τους | 26 |
| 1.2.2 Υποσταθμοί με βάση τη μόνωση του εξοπλισμού | 27 |
| 1.2.3 Υποσταθμοί με βάση τη θέση εγκατάστασης | 30 |
| 1.3 Στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών Υψηλής Τάσης | 31 |
| 1.3.1 Μετασχηματιστής ισχύος | 32 |
| 1.3.2 Μετασχηματιστές έντασης και τάσης | 32 |
| 1.3.3 Διακόπτης ισχύος | 33 |
| 1.3.4 Αποζεύκτης | 34 |
| 1.3.5 Ρελέ | 34 |
| 1.3.6 Σύστημα μέτρησης | 35 |
| 1.3.7 Γειωτής | 35 |
| 1.3.8 Εκτροπέας υπέρτασης | 35 |
| 1.4 Προστασία εξοπλισμού έναντι υπερτάσεων | 36 |
| 1.4.1 Ορισμός | 36 |
| 1.4.2 Εγκατάσταση και λειτουργία | 36 |
| 1.4.3 Κατηγορίες των εκτροπέων υπέρτασης | 36 |
| 1.5 Στόχος της διπλωματικής εργασίας | 39 |
| Κεφάλαιο 2: Υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης | 41 |
| 2.1 Αιτίες ανάπτυξης υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης | 41 |
| 2.1.1 Ατμοσφαιρικές υπερτάσεις | 41 |
| 2.1.2 Διακοπτικοί χειρισμοί | 41 |
| 2.2 Αντικεραυνική προστασία υποσταθμών υψηλής τάσης | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.1 Συλλεκτήριο σύστημα | 42 |
| 2.2.2 Σύστημα γείωσης | 43 |
| 2.3 Μηχανισμοί ανάπτυξης κεραυνικών υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης | 44 |
| 2.3.1 Γενικά | 44 |
| 2.3.2 Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε πυλώνα ή αγωγό προστασίας | 44 |
| 2.3.3 Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης | 45 |
| Κεφάλαιο 3: Κυματομορφή του κεραυνικού ρεύματος | 49 |
| 3.1 Κεραυνοί – Γενική μορφή καταγεγραμμένων ρευμάτων | 49 |
| 3.2 Κυματομορφή της CIGRE | 51 |
| 3.3 Παράμετροι κυματομορφής – πιθανοτικές κατανομές | 52 |
| 3.4 Επιλεγμένα καταγεγραμμένα ρεύματα προς διερεύνηση | 53 |
| Κεφάλαιο 4: Υποσταθμοί υπό εξέταση | 55 |
| 4.1 Τοπολογία και γενικά χαρακτηριστικά | 55 |
| 4.2 Μοντελοποίηση | 56 |
| 4.3 Περιπτώσεις προσομοίωσης | 58 |
| Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συζήτηση | 59 |
| 5.1 Υποσταθμός GIS 400 kV | 59 |
| 5.1.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα | 59 |
| 5.1.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης | 64 |
| 5.2 Υποσταθμός GIS 132 kV | 69 |
| 5.2.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα | 69 |
| 5.2.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης | 73 |
| 5.3 Υποσταθμός AIS 400 kV | 77 |
| 5.3.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα | 77 |
| 5.3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης | 81 |
| 5.4 Υποσταθμός AIS 161 kV | 85 |
| 5.4.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα | 85 |
| 5.4.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης | 89 |
| 5.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων | 93 |
| Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα | 97 |
| Βιβλιογραφία | 99 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1: Τυπικός υποσταθμός υψηλής τάσης | 25 |
| Σχήμα 2: Υποσταθμοί με βάση τη λειτουργία τους | 27 |
| Σχήμα 3: Υποσταθμός AIS 400 kv | 28 |
| Σχήμα 4: Υποσταθμός GIS σε εξωτερικό χώρο | 28 |
| Σχήμα 5: Υποσταθμός GIS σε εσωτερικό χώρο | 29 |
| Σχήμα 6: Υποσταθμός MTS 145 kv | 29 |
| Σχήμα 7: Υποσταθμός GIS εσωτερικού χώρου | 30 |
| Σχήμα 8: Υποσταθμός MTS εξωτερικού χώρου, 230 kv | 30 |
| Σχήμα 9: Τυπική διάταξη εξοπλισμού υποσταθμού AIS και GIS | 31 |
| Σχήμα 10: Μετασχηματιστής Ισχύος | 32 |
| Σχήμα 11: Μετασχηματιστής έντασης | 33 |
| Σχήμα 12: Μετασχηματιστής τάσης | 33 |
| Σχήμα 13: Διακόπτης ισχύος | 33 |
| Σχήμα 14: Αποζεύκτης υποσταθμού AIS | 34 |
| Σχήμα 15: Μηχανισμός ρελέ σε έναν υποσταθμό | 34 |
| Σχήμα 16: Απεικόνιση ενός υποσταθμού GIS, στους αριθμούς 4-5 φαίνονται οι γειωτές του υποσταθμού. | 35 |
| Σχήμα 17: Εκτροπείς υπέρτασης | 35 |
| Σχήμα 18: Εσωτερικό εκτροπέα υπέρτασης SiC με διάκενο | 37 |
| Σχήμα 19: Εκτροπέας υπέρτασης οξειδίου μετάλλου 6.6 kv | 37 |
| Σχήμα 20: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος των δυο τύπων εκτροπέων υπέρτασης | 38 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 21: Εκτροπείς υπέρτασης σε υποσταθμό συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας | 38 |
| Σχήμα 22: Εκτροπείς υπέρτασης σε υποσταθμό διανομής ηλεκτρικής ενέργειας | 39 |
| Σχήμα 23: Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας υποσταθμού υψηλής τάσης. Ο ΜΣ στα δεξιά είναι μη προστατευμένος | 43 |
| Σχήμα 24: Κατασκευή συστήματος γείωσης υποσταθμού | 43 |
| Σχήμα 25: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα οδεύοντων κυμάτων λόγω κεραυνικού πλήγματος σε αγωγό προστασίας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. | 45 |
| Σχήμα 26: Πλήγμα στον πυλώνα σε εναέρια γραμμή 500 kv στην Ιαπωνία | 45 |
| Σχήμα 27: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα οδεύοντων κυμάτων λόγω κεραυνικού πλήγματος σε αγωγό φάσης γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας | 46 |
| Σχήμα 28: Πλήγμα σε αγωγό φάσης σε εναέρια γραμμή 500 kv στην Ιαπωνία | 46 |
| Σχήμα 29: Κεραυνοί από εκκενώσεις μεταξύ νεφών | 49 |
| Σχήμα 30: Κεραυνοί από εκκενώσεις μεταξύ σύννεφου και γης | 49 |
| Σχήμα 31: Κατηγοριοποίηση κεραυνών | 50 |
| Σχήμα 32: Καταγεγραμμένα κεραυνικά ρεύματα κατερχόμενων αρνητικών κεραυνών | 51 |
| Σχήμα 33: Τυπικές κυματομορφές ρεύματος κατερχόμενων αρνητικών κεραυνών που παράγονται από πηγή ρεύματος CIGRE μεταβάλλοντας (a) τη διάρκεια μετώπου t_f , (b) τη μέγιστη κλίση S_m και (c) τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h με βάση τις πιθανοτικές κατανομές τους | 51 |
| Σχήμα 34: Καταγεγραμμένες κανονικοποιημένες κυματομορφές κεραυνού W1-W6 (Πίνακας 3) μαζί με τις κυματομορφές CIGRE που τις προσεγγίζουν και κυματομορφές CIGRE βασισμένες στις πιθανοτικές κατανομές των παραμέτρων του κεραυνού | 54 |
| Σχήμα 35: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 59 |
| Σχήμα 36: : Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 60 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 37: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 60 |
| Σχήμα 38: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). Εδώ δεν έχει συμβεί ανάστροφη διάσπαση σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. | 61 |
| Σχήμα 39: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 61 |
| Σχήμα 40: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 61 |
| Σχήμα 41: Κυματομορφές υπερτάσεων για κυματομορφές κεραυνικού ρεύματος ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (ανάστροφη διάσπαση). | 62 |
| Σχήμα 42: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου GISIN4A του υποσταθμού HVSS1 (ανάστροφη διάσπαση). | 62 |
| Σχήμα 43: Διάγραμμα για τον κόμβο εξόδου GISO1A του υποσταθμού HVSS1 (ανάστροφη διάσπαση). | 63 |
| Σχήμα 44: Διάγραμμα για τον κόμβο μετασχηματιστή TRH1A του υποσταθμού HVSS1 (ανάστροφη διάσπαση). | 64 |
| Σχήμα 45: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 64 |
| Σχήμα 46: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 65 |
| Σχήμα 47: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 65 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 48: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 65 |
| Σχήμα 49: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 66 |
| Σχήμα 50: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 66 |
| Σχήμα 51: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (σφάλμα θωράκισης). | 66 |
| Σχήμα 52: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου GISIN4A του υποσταθμού HVSS1 (σφάλμα θωράκισης). | 67 |
| Σχήμα 53: Διάγραμμα για τον εξόδου κόμβο GISO1A του υποσταθμού HVSS1 (σφάλμα θωράκισης). | 68 |
| Σχήμα 54: Διάγραμμα για τον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA1 του υποσταθμού HVSS1 (σφάλμα θωράκισης) | 68 |
| Σχήμα 55: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 69 |
| Σχήμα 56: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 69 |
| Σχήμα 57: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 70 |
| Σχήμα 58: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 70 |
| Σχήμα 59: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 70 |
| Σχήμα 60: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 71 |
| Σχήμα 61: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (ανάστροφη διάσπαση). | 71 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 62: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου GISIN4A του υποσταθμού HVSS2 (ανάστροφη διάσπαση). | 72 |
| Σχήμα 63: Διάγραμμα για τον κόμβο εξόδου GISO1A του υποσταθμού HVSS2 (ανάστροφη διάσπαση). | 72 |
| Σχήμα 64: Διάγραμμα για τον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA του υποσταθμού HVSS2 (ανάστροφη διάσπαση). | 73 |
| Σχήμα 65: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 73 |
| Σχήμα 66: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 74 |
| Σχήμα 67: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 74 |
| Σχήμα 68: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 74 |
| Σχήμα 69: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 75 |
| Σχήμα 70: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 75 |
| Σχήμα 71: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (σφάλμα θωράκισης). | 75 |
| Σχήμα 72: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου GISIN4A του υποσταθμού HVSS2 (σφάλμα θωράκισης). | 76 |
| Σχήμα 73: Διάγραμμα για τον εισόδου κόμβο GISO1A του υποσταθμού HVSS2 (σφάλμα θωράκισης). | 76 |
| Σχήμα 74: Διάγραμμα για τον κόμβο TRH1A του υποσταθμού HVSS2 (σφάλμα θωράκισης). | 77 |
| Σχήμα 75: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 77 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 76: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 78 |
| Σχήμα 77: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 78 |
| Σχήμα 78: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 78 |
| Σχήμα 79: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 79 |
| Σχήμα 80: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 79 |
| Σχήμα 81: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (ανάστροφη διάσπαση). | 79 |
| Σχήμα 82: Διάγραμμα για τον εισόδου κόμβο SINC του υποσταθμού HVSS3 (ανάστροφη διάσπαση). | 80 |
| Σχήμα 83: Διάγραμμα για τον κόμβο στον μετασχηματιστή TRHC του υποσταθμού HVSS3 (ανάστροφη διάσπαση). | 81 |
| Σχήμα 84: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 81 |
| Σχήμα 85: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 81 |
| Σχήμα 86: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 82 |
| Σχήμα 87: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 82 |
| Σχήμα 88: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 82 |
| Σχήμα 89: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 83 |
| Σχήμα 90: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (σφάλμα θωράκισης). | 83 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 91: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου SINA του υποσταθμού HVSS3 (σφάλμα θωράκισης). | 84 |
| Σχήμα 92: Διάγραμμα για τον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA του υποσταθμού HVSS3 (σφάλμα θωράκισης). | 84 |
| Σχήμα 93: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 85 |
| Σχήμα 94: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 85 |
| Σχήμα 95: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 86 |
| Σχήμα 96: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 86 |
| Σχήμα 97: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 86 |
| Σχήμα 98: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). | 87 |
| Σχήμα 99: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (ανάστροφη διάσπαση). | 87 |
| Σχήμα 100: Απεικόνιση διαγράμματος για τον εισόδου κόμβο SINC του υποσταθμού HVSS4 (ανάστροφη διάσπαση). | 88 |
| Σχήμα 101: Απεικόνιση του κόμβου του μετασχηματιστή GSUT του υποσταθμού HVSS4 (ανάστροφη διάσπαση). | 88 |
| Σχήμα 102: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 89 |
| Σχήμα 103: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 89 |
| Σχήμα 104: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 90 |
| Σχήμα 105: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 90 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 106: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 90 |
| Σχήμα 107: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης). | 91 |
| Σχήμα 108: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (σφάλμα θωράκισης). | 91 |
| Σχήμα 109: Απεικόνιση του κόμβου εισόδου SINA του υποσταθμού HVSS4 (σφάλμα θωράκισης). | 92 |
| Σχήμα 110: Απεικόνιση του κόμβου του μετασχηματιστή GSUTA του υποσταθμού HVSS4 (σφάλμα θωράκισης). | 92 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1: Λογαριθμικές κανονικές κατανομές των παραμέτρων t_f , S_m και t_h της κυματομορφής του κεραυνού για αρνητικούς κατερχόμενους κεραυνούς (πρώτα πλήγματα). | 53 |
| Πίνακας 2: Ποσοστό περιπτώσεων που ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή (εξίσωση) του πίνακα για αρνητικούς κατερχόμενους κεραυνούς (πρώτα πλήγματα). Παράμετροι: t_f , S_m και t_h της κυματομορφής του κεραυνού. | 53 |
| Πίνακας 3: Καταγεγραμμένες κυματομορφές που θα διερευνηθούν στη διπλωματική αυτή | 54 |
| Πίνακας 4: Υποσταθμοί προς εξέταση. | 56 |
| Πίνακας 5: Περιπτώσεις προσομοίωσης. | 58 |

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση κεραυνικών υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης με μόνωση αέρα (AIS) και σε υποσταθμούς με μόνωση αερίου (GIS). Για την παραπάνω διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ATP-EMTP μέσω του οποίου προσομοιώθηκαν κεραυνικά πλήγματα στις εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέονται στους υποσταθμούς λαμβάνοντας υπόψη καταγεγραμμένες κυματομορφές κεραυνικού ρεύματος και τις αντίστοιχες τυποποιημένες κυματομορφές που τις προσεγγίζουν. Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στην πόλη της Κοζάνης. Το αντικείμενο της εργασίας σχετίζεται άμεσα με το αντικείμενο των Υψηλών Τάσεων και συγκεκριμένα με την προστασία έναντι κεραυνικών υπερτάσεων.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 1: Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης

1.1 Εισαγωγή στους υποσταθμούς Υψηλής Τάσης

Ως υποσταθμός (ΥΣ) υψηλής τάσης (Σχήμα 1) ορίζεται μια ηλεκτρική εγκατάσταση η οποία συνεισφέρει στην παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει την τάση ή την ηλεκτρική ισχύ σε υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές ανάλογα με τις απαιτήσεις που έχουν τα κέντρα κατανάλωσης ενέργειας [1].

Η χρησιμότητα ενός τέτοιου υποσταθμού είναι η μεταφορά ή η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των γραμμών μεταφοράς οι οποίες αναχωρούν από και προς τον υποσταθμό και έτσι οι υποσταθμοί συναποτελούν τους κόμβους του ηλεκτρικού δικτύου [2]. Τα υψηλότερα επίπεδα τάσης ενός υποσταθμού χρησιμοποιούνται για τη μείωση του ρεύματος καθώς τα χαμηλότερα ρεύματα συνεπάγονται λιγότερες απώλειες ισχύος κατά τη μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας [3]. Προτεραιότητα ενός υποσταθμού υψηλής τάσης είναι να μπορέσει να καλύψει τη διασφάλιση και την αξιοπιστία της ηλεκτροδότησης της περιοχής στην οποία βρίσκεται. Για παράδειγμα, μέσω των υποσταθμών μπορεί να γίνει άμεσα ο εντοπισμός και η απομόνωση βλαβών στο σύστημα μεταφοράς και με αυτόν τον τρόπο θα αποτραπεί η διακοπή ρεύματος για τους καταναλωτές (οικιακοί, εμπορικοί, βιομηχανικοί) [2, 4].

Επιπλέον, σε μεγάλες αποστάσεις πάνω από 600 km, αν και δεν απορρίπτεται και η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), συχνά χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα (DC). Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται τυπικοί υποσταθμοί υψηλής τάσης ενώ στη δεύτερη περίπτωση σταθμοί μετατροπής και οι αντίστοιχοι υποσταθμοί τους. Τέλος, σχετικά με τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις σήμερα χρησιμοποιούνται και οι δύο τύποι μεταφοράς (AC, DC) [3].



Σχήμα 1: Τυπικός υποσταθμός υψηλής τάσης [1].

1.2 Κατηγορίες υποσταθμών Υψηλής Τάσης

Οι υποσταθμοί υψηλής τάσης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από:

- τη λειτουργία τους
- τη μόνωση του εξοπλισμού
- τη θέση της εγκατάστασης.

1.2.1 Υποσταθμοί με βάση τη λειτουργία τους [4, 5]

Οι υποσταθμοί με βάση τη λειτουργία τους κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις υποκατηγορίες:

1. Υποσταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΥΣ ανύψωσης)
2. Υποσταθμός συστήματος (διασυνδετικοί ΥΣ μεταξύ συστημάτων)
3. Υποσταθμός διανομής (ΥΣ υποβιβασμού)
4. Υποσταθμός καταναλωτή (ΥΣ υποβιβασμού).

Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2:

- **Υποσταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΥΣ ανύψωσης)**

Ο υποσταθμός ανύψωσης τοποθετείται πολύ κοντά στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος του υποσταθμού είναι να καταφέρει να ανυψώσει την τάση παραγωγής, η οποία κυμαίνεται από 6 kV έως 20 kV, στην τάση μεταφοράς. Όταν η τάση ανυψώνεται παρατηρείται μείωση του ρεύματος στις γραμμές μεταφοράς και με αυτόν τον τρόπο μειώνονται ταυτόχρονα και οι απώλειες θερμότητας αλλά και η διατομή των αγωγών μεταφοράς.

- **Υποσταθμός συστήματος (διασυνδετικοί ΥΣ μεταξύ συστημάτων)**

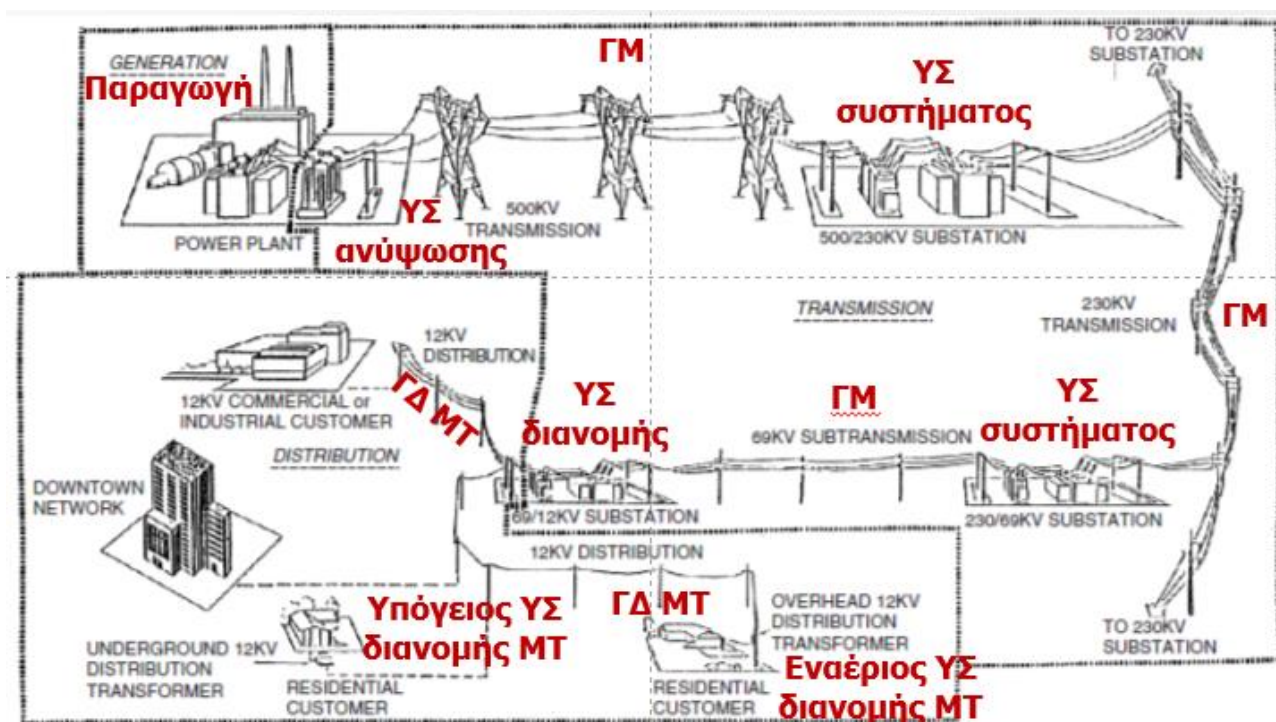
Ο διασυνδετικός υποσταθμός με βάση και την ονομασία του αναφέρεται στην σύνδεση γραμμών μεταφοράς. Όταν τα επίπεδα τάσης των συστημάτων είναι διαφορετικά είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός ισχύος.

- **Υποσταθμός διανομής (ΥΣ υποβιβασμού)**

Ο υποσταθμός διανομής έχει ως στόχο η τάση να υποβιβάζεται στην τιμή χαμηλής τάσης διανομής.

- **Υποσταθμός καταναλωτή (ΥΣ υποβιβασμού)**

Ο υποσταθμός καταναλωτή έχει ως προορισμό τον τερματισμό των γραμμών μεταφοράς ή διανομής σε κάποιον καταναλωτή, και εμπεριέχει τα διακοπτικά μέσα τα οποία είναι χρήσιμα για τον έλεγχο και την προστασία.



Σχήμα 2: Υποσταθμοί με βάση τη λειτουργία τους [5].

1.2.2 Υποσταθμοί με βάση τη μόνωση του εξοπλισμού [4, 6]

Οι υποσταθμοί με βάση τη μόνωση του εξοπλισμού διακρίνονται σε τρεις υποκατηγορίες:

1. Υποσταθμός με μόνωση αέρα (AIS)
2. Υποσταθμός με μόνωση αερίου (GIS)
3. Υποσταθμός με μικτή μόνωση (MTS).

Αναλυτικότερα:

- **Υποσταθμός με Μόνωση Αέρα (AIS)**

Ονομάζεται ο υποσταθμός (Σχήμα 3) του οποίου το δυναμικό του κύριου κυκλώματος έχει μονωθεί από τη γη με αέρα με την βοήθεια απλών ή σύνθετων μονωτήρων. Ο εξοπλισμός που διαθέτει μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα σύμφωνα με τις ανάγκες που έχει ο υποσταθμός και για αυτό το λόγο είναι και ο πιο οικονομικός στην αγορά. Το μοναδικό μειονέκτημά του είναι ως προς την έκτασή του (όταν το κόστος γης είναι μεγάλο) καθώς καλύπτει μεγάλο χώρο λόγω της μόνωσης αέρα οπότε αναγκαστικά τοποθετείται σε εξωτερικό χώρο με αποτέλεσμα να είναι απροστάτευτος από τις συνθήκες περιβάλλοντος.



Σχήμα 3: Υποσταθμός AIS 400 kV.

- **Υποσταθμός με Μόνωση Αερίου (GIS)**

Ορίζεται ένας υποσταθμός υψηλής τάσης (Σχήματα 4 και 5 για εξωτερικό και εσωτερικό χώρο, αντίστοιχα), στον οποίο τα μεταλλικά μέρη που φέρουν τάση περιέχονται σε ένα στεγασμένο περιβάλλον μέσα σε ένα περίβλημα γεμάτο με αέριο (SF_6). Τα στοιχεία εξοπλισμού του είναι σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους οπότε ο χώρος που καταλαμβάνει είναι μικρός. Τέλος, να σημειωθεί ότι ο εξοπλισμός του συγκεκριμένου υποσταθμού είναι και ο πιο ακριβός στην αγορά.



Σχήμα 4: Υποσταθμός GIS σε εξωτερικό χώρο [4].



Σχήμα 5: Υποσταθμός GIS σε εσωτερικό χώρο [7].

- **Υποσταθμός με Μικτή Μόνωση (MTS)**

Ο υποσταθμός μικτής μόνωσης (Σχήμα 6) αποτελεί έναν συνδυασμό μεταξύ του υποσταθμού με μόνωση αέρα και του υποσταθμού με μόνωση αερίου. Ο συνδυασμός αυτός έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα όπου πρέπει να γίνει επέκταση υποσταθμών AIS και δεν υπάρχει επαρκής χώρος. Όσον αφορά το κόστος και τον χώρο που καταλαμβάνει ο υποσταθμός αυτός είναι ο ενδιάμεσος στις άλλες δύο κατηγορίες.



Σχήμα 6: Υποσταθμός MTS 145 kV [7].

1.2.3 Υποσταθμοί με βάση τη θέση εγκατάστασης

Τέλος, οι υποσταθμοί με βάση τη θέση εγκατάστασης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Στεγασμένος – εσωτερικός υποσταθμός
2. Υπαίθριος – εξωτερικός υποσταθμός.

- **Στεγασμένος – Εσωτερικός Υποσταθμός**

Στον υποσταθμό εσωτερικού χώρου (Σχήμα 7) ο εξοπλισμός είναι εγκατεστημένος μέσα σε ένα στεγασμένο περιβάλλον οπότε δεν είναι εκτεθειμένος στην περιβαλλοντική ρύπανση και τις καιρικές συνθήκες της περιοχής που βρίσκεται.



Σχήμα 7: Υποσταθμός GIS εσωτερικού χώρου [7].

- **Υπαίθριος – Εξωτερικός Υποσταθμός**

Στον υποσταθμό εξωτερικού χώρου (Σχήμα 8) ο εξοπλισμός των μηχανημάτων είναι τοποθετημένος στον υπαίθριο χώρο με αποτέλεσμα να κινδυνεύει από την ρύπανση του περιβάλλοντος.

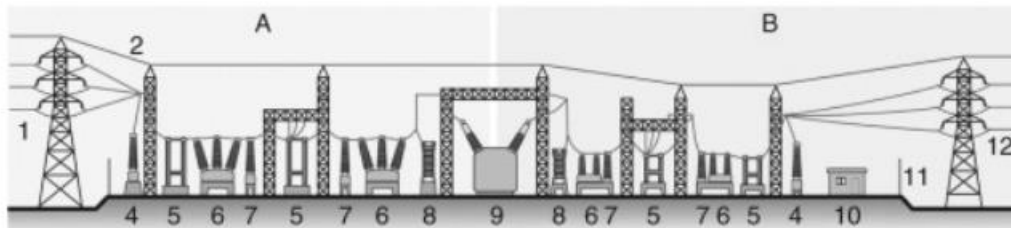


Σχήμα 8: Υποσταθμός MTS εξωτερικού χώρου, 230 kV [8].

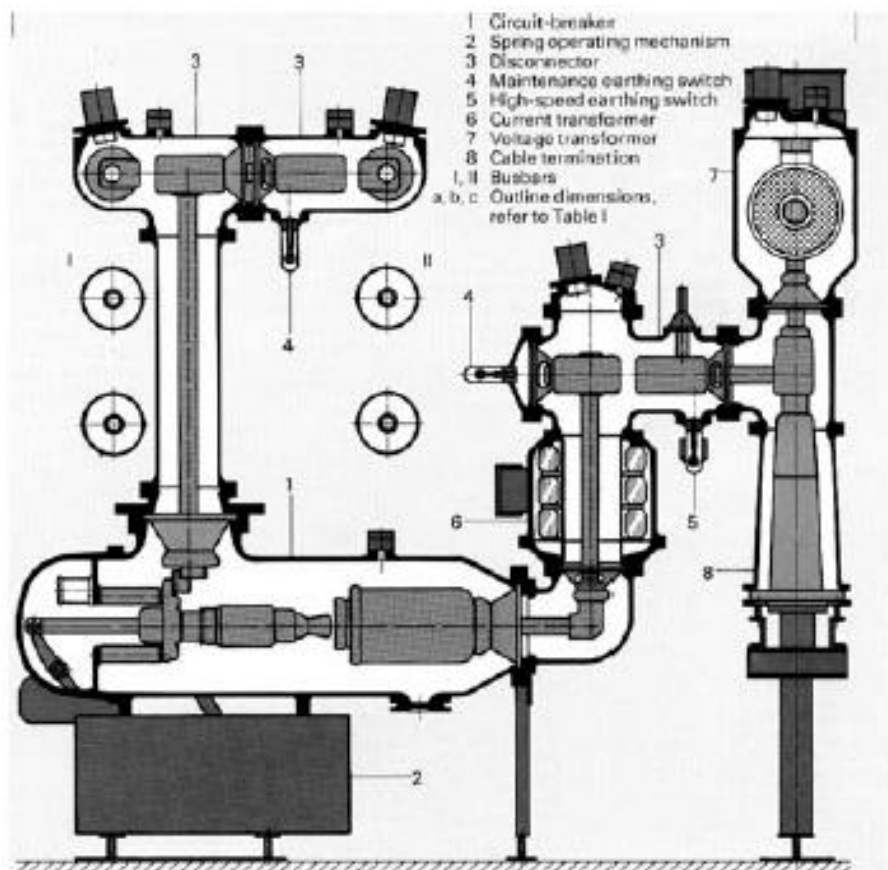
Παρόλα αυτά ανεξάρτητα με το αν θα είναι εγκατεστημένος εσωτερικά ή εξωτερικά θα πρέπει η θέση του εξοπλισμού να βρίσκεται σε σημείο που θα είναι άμεσα προσβάσιμο από κάποιον ώστε σε περίπτωση βλάβης να αντιμετωπιστεί άμεσα ή και ακόμα για την συντήρηση του εξοπλισμού.

1.3 Στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών Υψηλής Τάσης

Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα στοιχεία εξοπλισμού που υπάρχουν σε έναν υποσταθμό υψηλής τάσης οπότε θα κατανοηθεί καλύτερα η λειτουργία του. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται τυπικά στοιχεία εξοπλισμού υποσταθμών AIS και GIS.



(1) Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, (2) Αγωγός προστασίας, (4) Μετασηματιστής (ΜΣ) τάσης, (5) Αποζεύκτης, (6) Διακόπτης ισχύος, (7) ΜΣ έντασης, (8) Εκτροπέας υπέρτασης, (9) Μετασηματιστές (ΜΣ) ισχύος, (10) Συστήματα μέτρησης, προστασίας και ελέγχου. Επιπλέον, υπάρχουν οι ζυγοί και οι γειωτές.



(1) Διακόπτης ισχύος, (2) Μηχανισμός λειτουργίας διακόπτη ισχύος, (3) Αποζεύκτης, (4), (5) Γειωτές, (6) Μετασηματιστής (ΜΣ) έντασης, (7) ΜΣ τάσης, (8) Τερματισμός καλωδίου, (I), (II) Ζυγοί.

Σχήμα 9: Τυπική διάταξη εξοπλισμού υποσταθμού AIS [9] και GIS [10].

1.3.1 Μετασχηματιστής ισχύος

Ο μετασχηματιστής ισχύος (Σχήμα 10) αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο εξοπλισμού του υποσταθμού καθώς έχει την ικανότητα να ανυψώνει και να υποβιβάζει την τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αποτελείται από δύο πηνία σε κάθε φάση τα οποία είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητα και μαγνητικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Το τύλιγμα που τροφοδοτείται ονομάζεται πρωτεύον ενώ το τύλιγμα από το οποίο λαμβάνεται ηλεκτρική ενέργεια ονομάζεται δευτερεύον [11, 12].



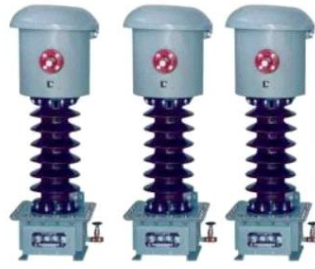
Σχήμα 10: Μετασχηματιστής Ισχύος [13].

1.3.2 Μετασχηματιστές έντασης και τάσης

Τα συστήματα προστασίας και ελέγχου χρησιμοποιούν μετασχηματιστές έντασης και τάσης για την μέτρηση του ρεύματος και της τάσης.

- **Μετασχηματιστής Έντασης**

Ο μετασχηματιστής έντασης (Σχήμα 11) είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται ώστε να μετατραπεί η τιμή του ρεύματος από υψηλότερη σε χαμηλότερη. Είναι απαραίτητος για τη λειτουργία των ηλεκτρονόμων. Ουσιαστικά χρησιμοποιείται για τον υποβιβασμό του ρεύματος ώστε να μπορεί να μετρηθεί εύκολα και με ασφάλεια [12, 14].



Σχήμα 11: Μετασχηματιστής έντασης [14].

- **Μετασχηματιστής Τάσης**

Ο μετασχηματιστής τάσης (Σχήμα 12) έχει παρόμοια χρησιμότητα με τον μετασχηματιστή έντασης με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της τάσης μέσω μετατροπής υψηλών τιμών τάσεων σε χαμηλότερες [12, 14].



Σχήμα 12: Μετασχηματιστής τάσης [14].

1.3.3 Διακόπτης ισχύος

Ο διακόπτης ισχύος (Σχήμα 13) είναι μια συσκευή η οποία έχει τη δυνατότητα να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί το κύκλωμα σε περίπτωση κανονικής λειτουργίας αλλά και σφάλματος-βραχυκυκλώματος στο σύστημα. Αποτελείται από δύο κινητές επαφές οι οποίες είναι κλειστές όταν το κύκλωμα λειτουργεί αλλά σε περίπτωση σφάλματος ενεργοποιούνται μόλις το ρελέ δώσει εντολή [12, 14, 15].



Σχήμα 13: Διακόπτης ισχύος [14].

1.3.4 Αποζεύκτης

Ο αποζεύκτης (Σχήμα 14) είναι ένας διακόπτης με ορατές επαφές που συνδέεται σε σειρά με τους διακόπτες ισχύος και προσφέρουν επιπρόσθετη προστασία και φυσική απόζευξη. Οι ακροδέκτες του είναι τοποθετημένοι επάνω σε μονωτήρες και υπάρχει και κάποιος μηχανισμός κίνησης του ενός ή και των δύο ακροδεκτών. Οι αποζεύκτες δεν είναι κατάλληλοι για τη διακοπή ρεύματος φορτίου ή σφάλματος [12, 14].



Σχήμα 14: Αποζεύκτης υποσταθμού AIS [16].

1.3.5 Ρελέ

Το ρελέ (Σχήμα 15) είναι ένας αυτόματος μηχανισμός αισθητήρων ο οποίος ενεργοποιείται σε περίπτωση που ανιχνευθεί κάποιο βραχυκύκλωμα στο σύστημα με αποτέλεσμα να δώσει εντολή ώστε να ανοίξουν οι επαφές διακόπτη ισχύος σε συγκεκριμένο σημείο του κυκλώματος. Αυτός ο μηχανισμός είναι αρκετά σημαντικός για έναν υποσταθμό καθώς τον προστατεύει από σοβαρές βλάβες που μπορεί να δημιουργηθούν [14, 15].



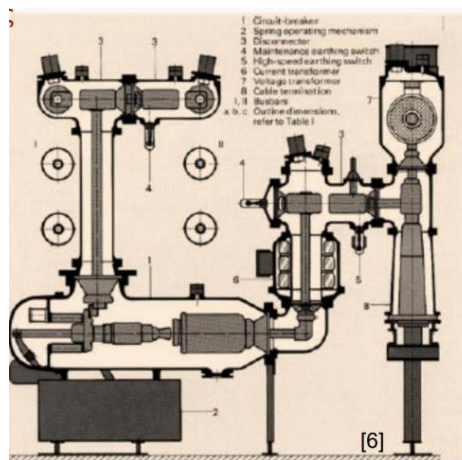
Σχήμα 15: Μηχανισμός ρελέ σε έναν υποσταθμό [14].

1.3.6 Σύστημα μέτρησης

Σε διάφορα σημεία του υποσταθμού έχουν τοποθετηθεί κάποια όργανα (αμπερόμετρα, βατόμετρα, βολτόμετρα, κτλ.) τα οποία επιτηρούν τις τιμές του ρεύματος και της τάσης [15]. Αυτά συνεργάζονται με τους μετασχηματιστές έντασης και τάσης.

1.3.7 Γειωτής

Στους υποσταθμούς υπάρχουν εγκατεστημένοι διακόπτες οι οποίοι συνδέουν τους αγωγούς των φάσεων με τη γη με σκοπό τα φορτία των αγωγών να εκφορτίζονται στη γη και να διασφαλίζεται η ασφάλεια του προσωπικού κατά τις εργασίες συντήρησης [15]. Οι διακόπτες αυτοί ονομάζονται γειωτές (Σχήμα 16).



Σχήμα 16: Απεικόνιση ενός υποσταθμού GIS, στους αριθμούς 4-5 φαίνονται οι γειωτές του υποσταθμού [10].

1.3.8 Εκτροπέας υπέρτασης

Όπως αναλύεται στην Ενότητα 1.4 που αφορά την προστασία του εξοπλισμού από υπερτάσεις, ο εκτροπέας υπέρτασης (Σχήμα 17) ενός υποσταθμού συνδέεται μεταξύ των αγωγών φάσης και της γης με σκοπό να εκτρέπει τις υπερτάσεις στη γη και να προστατεύει τον εξοπλισμό του υποσταθμού [12].



Σχήμα 17: Εκτροπέας υπέρτασης [14].

1.4 Προστασία εξοπλισμού έναντι υπερτάσεων

Οι υπερτάσεις σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και η αντιμετώπισή τους είναι ένα σημαντικό κομμάτι για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αφορά τις κεραυνικές υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Η βασικότερη μέθοδος προστασίας του εξοπλισμού των υποσταθμών είναι η χρήση εκτροπέων υπέρτασης.

1.4.1 Ορισμός

Ως εκτροπέα υπέρτασης ορίζεται μια συσκευή η οποία προστατεύει τον εξοπλισμό του υποσταθμού από υπερτάσεις, οι οποίες δημιουργούνται από ατμοσφαιρικούς κινδύνους (κεραυνός). Ο εκτροπέας περιορίζει τις κεραυνικές υπερτάσεις καθώς και τη διάρκεια του ρεύματος που ακολουθεί λόγω της συνδεδεμένης πηγής ισχύος [6, 17, 18].

1.4.2 Εγκατάσταση και λειτουργία

Η εγκατάστασή τους γίνεται στα εισερχόμενα και εξερχόμενα κυκλώματα του υποσταθμού καθώς και σε κρίσιμα στοιχεία εξοπλισμού, όπως είναι οι μετασχηματιστές ισχύος. Πάντα τοποθετούνται κοντά στον εξοπλισμό που πρέπει να προστατευθεί και συγκεκριμένα όσο το δυνατόν εγγύτερα γιατί ο εξοπλισμός καταπονείται με την παραμένουσα τάση του εκτροπέα και την πτώση τάσης στους αγωγούς διασύνδεσης. Η λειτουργία των εκτροπέων υπέρτασης είναι κρίσιμη για τον σωστό συντονισμό των μονώσεων του συστήματος [6, 17, 19].

1.4.3 Κατηγορίες των εκτροπέων υπέρτασης

Με βάση την κατασκευή τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- A) Εκτροπέας υπέρτασης SiC με διάκενα
- B) Εκτροπέας υπέρτασης Οξειδίου Μετάλλου

Η πρώτη κατηγορία δεν χρησιμοποιείται πλέον και μπορεί να βρεθεί μόνο σε υποσταθμούς πολύ παλαιότερης κατασκευής.

- **A) Εκτροπέας υπέρτασης SiC με διάκενα**

Το 1930 ανακαλύφθηκε η μη γραμμική ιδιότητα του καρβιδίου του πυριτίου (SiC) αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εκτροπέα υπέρτασης SiC με διάκενα (Σχήμα 18). Πιο συγκεκριμένα ο εκτροπέας αυτός αποτελείται από μη γραμμικές αντιστάσεις SiC σε συνδυασμό με κατάλληλες διατάξεις για τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου στο διάκενο [6, 17].



Σχήμα 18: Εσωτερικό εκτροπέα υπέρτασης SiC με διάκενα [20].

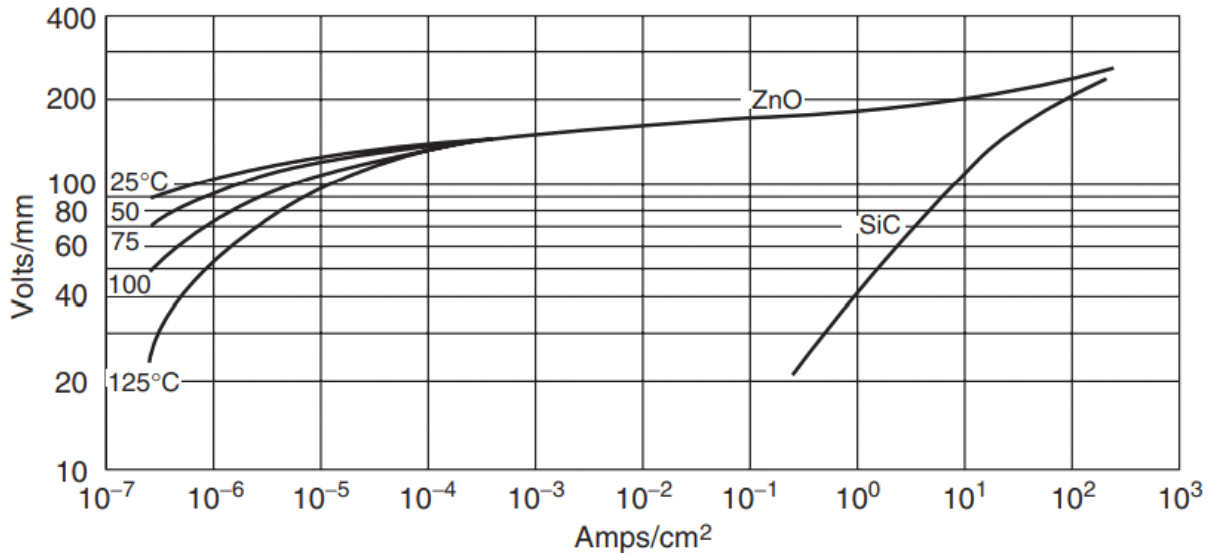
- **B) Εκτροπέας υπέρτασης οξειδίου μετάλλου**

Στα τέλη της δεκαετίας του 1968 εντάχθηκαν στην παραγωγή μη γραμμικοί αντιστάτες οξειδίου μετάλλου. Ο εκτροπέας αυτός αποτελείται από δίσκους συμπιεσμένων και συντετμημένων κόκκους οξειδίου του ψευδαργύρου ZnO σε συνδυασμό με μικρές ποσότητες προσμείξεων [6, 17]. Το Σχήμα 19 παρουσιάζει έναν τυπικό εκτροπέα αυτής της κατηγορίας.



Σχήμα 19: Εκτροπέας υπέρτασης οξειδίου μετάλλου 6.6 kV [21].

Μια σύγκριση που μπορεί να γίνει ανάμεσα σε αυτές τις δύο τεχνολογίες κατασκευής εκτροπέων υπέρτασης είναι βάσει της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης – ρεύματός τους (Σχήμα 20). Είναι εμφανείς οι βελτιωμένες ιδιότητες (μη γραμμικότητα) του ZnO σε σχέση με το SiC. Τα πλεονεκτήματα των εκτροπέων οξειδίου μετάλλου είναι οι μικρότερες απαιτήσεις και μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, η μικρότερη παραμένουσα τάση και το χαμηλότερο επίπεδο προστασίας και η δυνατότητα παράλληλης σύνδεσης εκτροπέων υπέρτασης [22].



Σχήμα 20: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος των δυο τύπων εκτροπέων υπέρτασης [22].

Οι εφαρμογές των εκτροπέων υπέρτασης οξειδίου μετάλλου γίνονται συνήθως σε υποσταθμούς συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μετασχηματιστές ισχύος συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, γραμμές διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καλώδια υψηλής τάσης, ηλεκτρικές μηχανές, πυκνωτές υψηλής τάσης κλπ. [23, 24]. Ενδεικτικές εφαρμογές σε ΜΣ ισχύος, καλώδια υψηλής τάσης και ΜΣ διανομής φαίνονται στα Σχήματα 21 και 22.



Σχήμα 21: Εκτροπείς υπέρτασης σε υποσταθμό συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 22: Εκτροπείς υπέρτασης σε υποσταθμό διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

1.5 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα διερευνηθούν κεραυνικές υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης με μόνωση αέρα (AIS) και σε υποσταθμούς με μόνωση αερίου (GIS). Θα θεωρηθεί ότι οι υποσταθμοί είναι θωρακισμένοι από άμεσα κεραυνικά πλήγματα και έτσι θα μελετηθούν κεραυνικά πλήγματα στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η διερεύνηση αφορά την επίδραση χρήσης καταγεγραμμένων κυματομορφών κεραυνικού ρεύματος σε σχέση με τις τυποποιημένες κυματομορφές που χρησιμοποιούνται συνήθως και θα πραγματοποιηθεί μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό ATP-EMTP.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 2: Υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης

2.1 Αιτίες ανάπτυξης υπερτάσεων μικρής διάρκειας μετώπου σε υποσταθμούς υψηλής τάσης

Με τον όρο υπέρταση ορίζεται μία τάση η οποία μπορεί να ξεπεράσει κατά πολύ την ονομαστική τάση λειτουργίας μιας συσκευής [25].

Οι υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου (fast-front) είναι το αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής. Προκαλούνται συνήθως από ατμοσφαιρικά φαινόμενα (κεραυνούς) και εμφανίζονται στο σύστημα είτε λόγω άμεσου ή έμμεσου κεραυνικού πλήγματος είτε λόγω χειρισμών και σφαλμάτων. Στις τελευταίες δύο περιπτώσεις δεν είναι τόσο επικίνδυνες όσο οι κεραυνικές υπερτάσεις. Έχουν μορφή οδευόντων κυμάτων με διάρκεια μετώπου 0.1 έως 20 μs και συχνότητα 10 kHz έως 3 MHz [6].

2.1.1 Ατμοσφαιρικές υπερτάσεις

Οι ατμοσφαιρικές υπερτάσεις εμφανίζονται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας των κεραυνικών φαινομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διακοπών λειτουργίας στο δίκτυο αλλά και τη φθορά του εξοπλισμού στο σύστημα μεταφοράς και διανομής. Τρεις είναι οι αιτίες που ευθύνονται για τις διαταραχές αυτού του είδους στα συστήματα υψηλών τάσεων [25, 26].

Πρώτον, το άμεσο πλήγμα στο δίκτυο είτε πρόκειται για πλήγμα σε αγωγούς φάσης είτε στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (αγωγοί προστασίας). Όσο αυξάνεται το επίπεδο της τάσης μεταφοράς, αυξάνεται και ο αριθμός των πληγμάτων λόγω των υψηλότερων πυλώνων [6, 25]. Βέβαια στα συστήματα με μεγαλύτερη τάση λειτουργίας το επίπεδο μόνωσης είναι υψηλότερο με αποτέλεσμα οι κεραυνικές υπερτάσεις να είναι λιγότερο επικίνδυνες.

Δεύτερον, το έμμεσο πλήγμα ένα σύνολο κεραυνών οι οποίοι πέφτουν αρκετά κοντά στο δίκτυο με αποτέλεσμα να δημιουργούν επαγόμενες υπερτάσεις. Διαφέρει από το άμεσο πλήγμα στο δίκτυο ως προς τη διάρκεια και τη μέγιστη τιμή των υπερτάσεων [6]. Γενικά είναι επικίνδυνες μόνο για τα συστήματα διανομής όπου το επίπεδο μόνωσης είναι χαμηλό.

2.1.2 Διακοπτικοί χειρισμοί

Με τον όρο διακοπτικοί χειρισμοί περιγράφονται χειρισμοί διακοπών ισχύος για τη ζεύξη ή απόζευξη κυκλωμάτων είτε κατά την κανονική λειτουργία ενός συστήματος είτε σε συνθήκες σφάλματος [26]. Οι χειρισμοί αυτοί συχνά οδηγούν σε υπερτάσεις και κάποιες φορές σε υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου, όπως κατά τους διακοπτικούς χειρισμούς σε υποσταθμούς AIS, σε χειρισμούς διακοπής χωρητικού και επαγωγικού ρεύματος και σε διακόπτες ισχύος κενού. Ωστόσο, οι κεραυνικές υπερτάσεις είναι πολύ υψηλότερες και επομένως δεν εξετάζονται οι υπερτάσεις διακοπτικών χειρισμών όσον αφορά τις υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου.

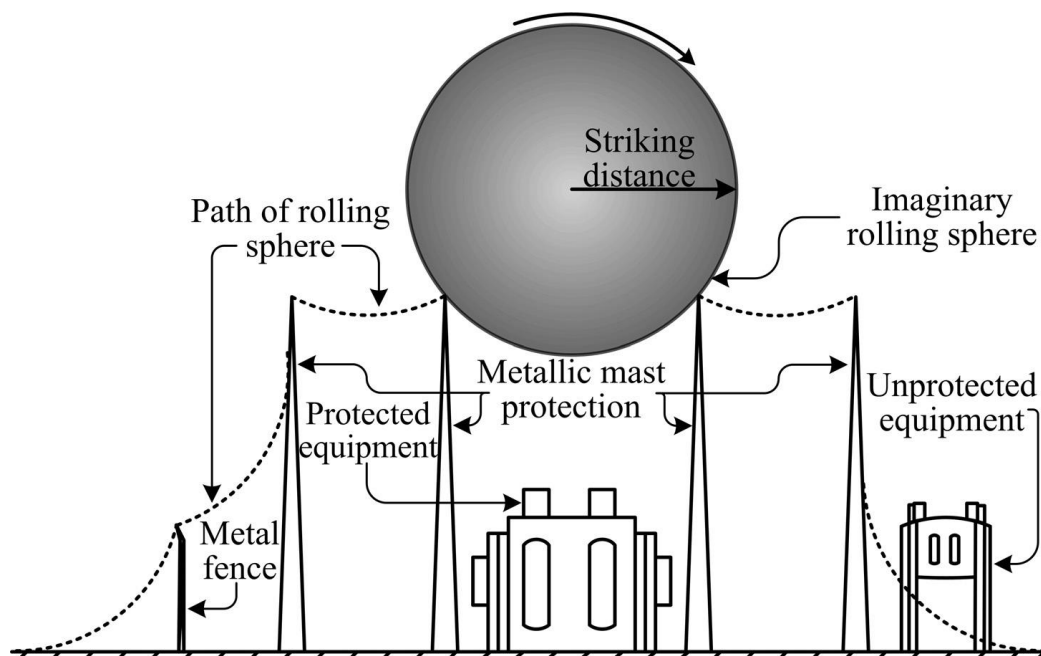
2.2 Αντικεραυνική προστασία υποσταθμών υψηλής τάσης

Για την προστασία του υποσταθμού από κεραυνούς χρειάζεται ένα σύνολο μέτρων το οποίο ονομάζεται σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ). Ο ρόλος της αντικεραυνικής προστασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς αναλαμβάνει να μεταφέρει το ρεύμα του κεραυνού στο έδαφος (μέσω της γείωσης) με ασφάλεια μέσα από μεταλλικούς αγωγούς, μειώνει τις υπερτάσεις που προκαλούνται από κεραυνικό πλήγμα και προστατεύει την εγκατάσταση καθώς και την ανθρώπινη ζωή [15]. Τα στοιχεία του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι το συλλεκτήριο σύστημα που αποτελείται από ακίδες και εναέριους αγωγούς γης, οι αγωγοί καθόδου (συχνότερα πρόκειται για τα μεταλλικά ικρίσματα στήριξης του εξοπλισμού) και το σύστημα γείωσης του υποσταθμού [15].

2.2.1 Συλλεκτήριο σύστημα

Το συλλεκτήριο σύστημα (Σχήμα 23) έχει ως στόχο να απομακρύνει το κεραυνικό ρεύμα από την υπό προστασία εγκατάσταση προς τη γη μέσω αγώγιμων διαδρομών καθόδου. Αποτελείται από ακίδες ή/και εναέριους αγωγούς γης και σχεδιάζεται με κάποια κατάλληλη μέθοδο όπως αυτή της κυλιόμενης σφαίρας. Ο στόχος του είναι να εκμηδενίσει τα απευθείας κεραυνικά πλήγματα στους αγωγούς φάσης του υποσταθμού. Συνήθως κατά τον συντονισμό μονώσεων ενός υποσταθμού θεωρείται ότι είναι απόλυτα θωρακισμένος από απευθείας κεραυνικά πλήγματα και λαμβάνονται υπόψη μόνο κεραυνικά πλήγματα στις εισερχόμενες γραμμές όπως θα γίνει και στην εργασία αυτή.

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας προστατεύονται και αυτές από άμεσα κεραυνικά πλήγματα στους αγωγούς φάσης με τους αγωγούς προστασίας (γης). Συγκεκριμένα, πάνω από τους αγωγούς φάσεων, εγκαθίσταται ένα ή δύο σύρματα με κατάλληλη διατομή. Οι αγωγοί αυτοί



Σχήμα 23: Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας υποσταθμού υψηλής τάσης [29]. Ο ΜΣ στα δεξιά είναι μη προστατευμένος.

αποτρέπουν τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα που πλήττουν τους αγωγούς φάσης και προστατεύουν τις φάσεις καθώς οδηγούν τις υπερτάσεις προς τη γη. Οι αγωγοί αυτοί γειώνονται μέσω των γειωμένων μεταλλικών πυλώνων και στην αρχή και το τέλος της γραμμής γειώνονται στο σύστημα γείωσης των αντίστοιχων υποσταθμών [27, 28].

Στους υποσταθμούς υψηλής τάσης οι αγώγιμες διαδρομές καθόδου που οδηγούν το κεραυνικό ρεύμα στη γη μέσω του συστήματος γείωσης είναι συνήθως τα μεταλλικά ικριώματα που στηρίζουν τον εξοπλισμό.

2.2.2 Σύστημα γείωσης

Το σύστημα γείωσης (Σχήμα 24) τοποθετείται κάτω από τον υποσταθμό για να τον διαχέει στο έδαφος κεραυνικά ρεύματα και ρεύματα σφάλματος. Αποτελείται από ένα δίκτυο μεταλλικών (συνήθως χάλκινων) αγωγών το οποίο καλύπτει τον εξοπλισμό του υποσταθμού. Ο εξοπλισμός είναι συνδεδεμένος με τη γείωση σε δύο σημεία για λόγους ασφαλείας. Σε περίπτωση κεραυνού, το σύστημα γείωσης προσφέρει δρόμο χαμηλής αντίστασης μέσω του οποίου οι κεραυνικές εκκενώσεις οδηγούνται στο έδαφος. Έτσι προστατεύεται ο εξοπλισμός της εγκατάστασης [27, 28]. Το σύστημα γείωσης ωστόσο δεν προσφέρει προστασία από τις εισερχόμενες υπερτάσεις στους υποσταθμούς.

Μία ακόμη βασική λειτουργία του συστήματος γείωσης των υποσταθμών υψηλής τάσης είναι η προστασία έναντι βραχυκυκλωμάτων προς γη. Συγκεκριμένα περιορίζει τις υπερτάσεις που αναπτύσσονται σε στοιχεία εξοπλισμού και προστατεύει άτομα που βρίσκονται εντός ή εκτός του υποσταθμού από τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις.



Σχήμα 24: Κατασκευή συστήματος γείωσης υποσταθμού [30].

2.3 Μηχανισμοί ανάπτυξης κεραυνικών υπερτάσεων σε υποσταθμούς υψηλής τάσης

2.3.1 Γενικά

Μεγάλο ποσοστό σφαλμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προκαλούν οι κεραυνοί. Εάν το εναέριο σύστημα μεταφοράς ή διανομής δεχθεί κεραυνικό πλήγμα τότε δημιουργείται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο κινείται και στις δυο κατευθύνεις της γραμμής μεταφοράς με ταχύτητα σχεδόν όσο και η ταχύτητα του φωτός, δημιουργώντας ανακλώμενα κύματα καθώς προσπίπτει στο τέλος των γραμμών και σε σημεία ασυνέχειας [31]. Τα κεραυνικά πλήγματα δημιουργούν υπερτάσεις μικρής διάρκειας μετώπου, οι οποίες έχουν τεράστιες επιπτώσεις στον εξοπλισμό (υποβάθμιση και καταστροφή της μόνωσης), διακοπές στην παροχή ηλεκτρισμού, άρα οικονομικές ζημιές. Η μελέτη των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων βοηθά στη κατανόηση και εκτίμηση της αντοχής μόνωσης του εξοπλισμού ώστε να σχεδιάζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα μέσα προστασίας [32].

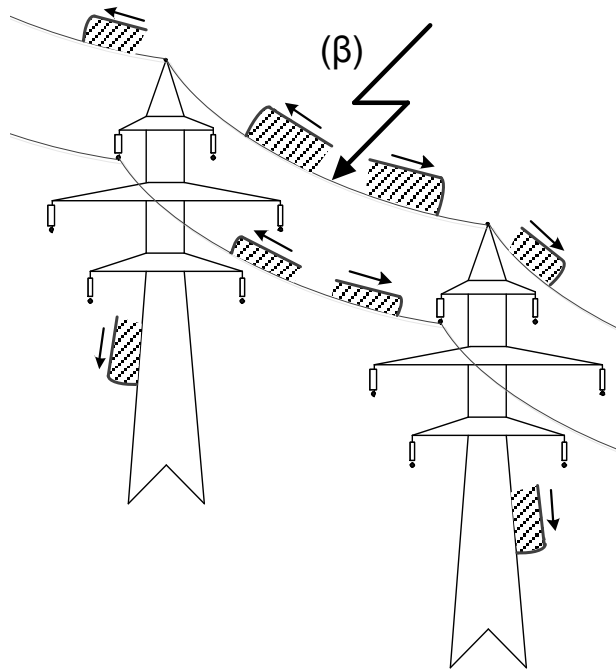
Σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί με τους οποίους ένας κεραυνός μπορεί να δημιουργήσει υπέρταση και είναι οι εξής:

- Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε πυλώνα ή αγωγό προστασίας
- Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

2.3.2 Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε πυλώνα ή αγωγό προστασίας

Στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό προστασίας ή σε κάποιον πυλώνα (Σχήματα 25 και 26) της εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τα κύματα τάσης και ρεύματος κινούνται κατά μήκος του αγωγού προστασίας και μέσω των πυλώνων προς τη γη (μέσω των συστημάτων γείωσης των πυλώνων). Τα κύματα αυτά εξαιτίας των απωλειών ενέργειας στη γραμμή μεταφοράς και της εκκένωσης κορώνων (κρουστική κορώνων) αποσβένονται με το που απομακρύνονται από το σημείο πλήγματος. Μεγάλο μέρος του κεραυνικού ρεύματος κινείται ελεύθερα προς τη γη διαμέσου των πιο κοντινών στο σημείο πλήγματος των πυλώνων επιβαρύνοντας έτσι τους μονωτήρες των πυλώνων αυτών. Η υπέρταση στους μονωτήρες εξαρτάται από το δυναμικό του αγωγού φάσης αλλά και από το δυναμικό του πυλώνα στο σημείο ανάρτησης του κάθε μονωτήρα. Όταν η υπέρταση υπερβεί το επίπεδο μόνωσης του μονωτήρα σχηματίζεται διάσπαση από τον πυλώνα προς τον αγωγό φάσης που ονομάζεται ανάστροφη διάσπαση (backflashover), διότι συμβαίνει από τον πυλώνα (μηδενικό δυναμικό σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας) προς τον αγωγό φάσης [32].

Τα οδεύοντα κύματα με τον τρόπο αυτό εισέρχονται στους αγωγούς φάσης των γραμμών μεταφοράς και προσπίπτουν στους συνδεδεμένους υποσταθμούς υψηλής τάσης προκαλώντας υπερτάσεις στον εξοπλισμό. Αυτός είναι ο ένας εκ των δύο μηχανισμών μέσω των οποίων εισέρχονται κεραυνικές υπερτάσεις στους υποσταθμούς υψηλής τάσης μέσω των συνδεδεμένων γραμμών μεταφοράς.



Σχήμα 25: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα οδευόντων κυμάτων λόγω κεραυνικού πλήγματος σε αγωγό προστασίας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [32].



Σχήμα 26: Πλήγμα στον πυλώνα σε εναέρια γραμμή 500 kV στην Ιαπωνία [33].

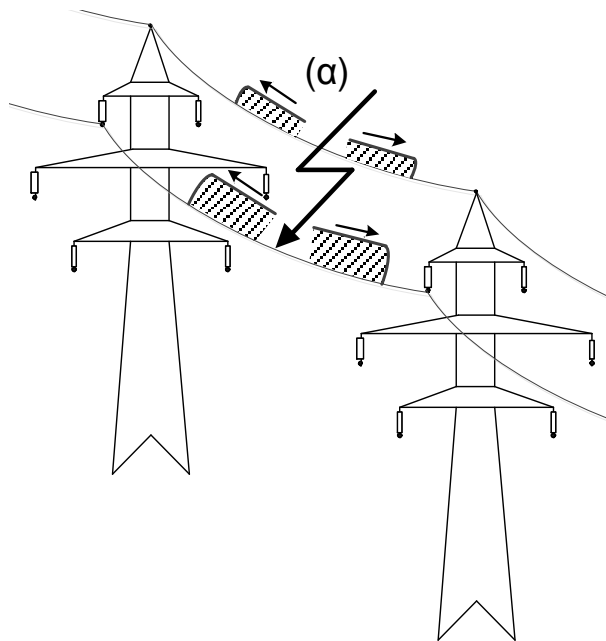
2.3.3 Άμεσο κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

Στην περίπτωση όμως κεραυνικού πλήγματος σε κάποιους από τους αγωγούς φάσης (σφάλμα θωράκισης, Σχήματα 27 και 28) το κεραυνικό ρεύμα κατευθύνεται σε δύο αντίθετες πλευρές από το σημείο πλήγματος δημιουργώντας επίσης μικρότερα επαγωγικά κύματα (μικρής σημασίας) στους άλλους αγωγούς φάσεων και στους αγωγούς προστασίας. Τα κύματα αυτά αποσβένονται καθώς συνεχίζουν την πορεία τους μακριά από το σημείο του πλήγματος, με αποτέλεσμα οι μονωτήρες στο σημείο πλήγματος πυλώνων να δεχθούν τις μεγαλύτερες αναπτυσσόμενες υπερτάσεις. Το μέγεθος της καταπόνησης του μονωτήρα εξαρτάται από το δυναμικό του αγωγού

φάσης καθώς ο γειωμένος πυλώνας ουσιαστικά δεν διαρρέεται από ρεύμα, ενώ το μέγεθος των υπερτάσεων προσδιορίζεται από την ευρύτητα και την κυματομορφή του κεραυνικού ρεύματος, τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής και την τιμή της AC τάσης του αγωγού φάσης τη χρονική στιγμή του πλήγματος [31, 32].

Τα οδεύοντα κύματα που προκαλούνται από τα σφάλματα θωράκισης προσπίπτουν στους συνδεδεμένους υποσταθμούς υψηλής τάσης προκαλώντας υπερτάσεις στον εξοπλισμό. Αυτός είναι ο δεύτερος μηχανισμός μέσω των οποίων εισέρχονται κεραυνικές υπερτάσεις στους υποσταθμούς υψηλής τάσης μέσω των συνδεδεμένων γραμμών μεταφοράς.

Επίσης, είναι σημαντικό ότι σφάλματα θωράκισης συμβαίνουν για κεραυνικά πλήγματα μέχρι κάποιο άνω όριο ρεύματος (μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης), πάνω από το οποίο όλοι οι



Σχήμα 27: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα οδευόντων κυμάτων λόγω κεραυνικού πλήγματος σε αγωγό φάσης γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 28: Πλήγμα σε αγωγό φάσης σε εναέρια γραμμή 500 kV στην Ιαπωνία [33].

κεραυνοί καταλήγουν στους αγωγούς προστασίας. Τα μικρότερα κεραυνικά πλήγματα μπορεί να καταλήξουν είτε στους αγωγούς φάσης είτε στους αγωγούς προστασίας. Σημειώνεται ότι σε κάθε αγωγό φάσης αντιστοιχεί ένα μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης, αυτό θα οδηγήσει και στις μεγαλύτερες υπερτάσεις σε έναν υποσταθμό υψηλής τάσης.

Πιο πιθανή και πιο περίπλοκη είναι η περίπτωση του κεραυνικού πλήγματος στον αγωγό προστασίας καθώς τα οδεύοντα κύματα διασταυρώνονται με πολλές διακλάδωσεις (αγωγός προστασίας, πυλώνας, αγωγός προστασίας) και πολλά σημεία ασυνέχειας (πυλώνας, σύστημα γείωσης) και έτσι κρίνεται απαραίτητη η ανάλυση και εύρεση λύσης των δυσκολιών αυτών. Δηλαδή, όταν το οδεύον κύμα προσκρούεται σε μια διακλάδωση ή σε ένα σημείο ασυνέχειας τότε μετά τη διακλάδωση δημιουργούνται οδεύοντα κύματα στους αγωγούς και δημιουργείται ένα ανακλώμενο κύμα στον αγωγό που κατευθυνόταν το προσπίπτον κύμα. Για να εκτιμηθούν σωστά οι υπερτάσεις που καταπονούν τους μονωτήρες της γραμμής (εύρος και κυματομορφή) είναι απαραίτητη η υπέρθεση των οδεύοντων κυμάτων για κάθε χρονική στιγμή στη θέση ανάρτησης του μονωτήρα [32].

Εν κατακλείδι, οι παράγοντες που καθορίζουν τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις στους μονωτήρες μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς (πυλώνας-αγωγός) είναι οι εξής [32]:

- Το εύρος και τη κυματομορφή του κεραυνικού ρεύματος.
- Το σημείο πλήγματος του κεραυνού (ανάλογα με τη θέση διαφέρει η διαίρεση του κεραυνικού ρεύματος στις διάφορες κατευθύνσεις).
- Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και η γεωμετρία της γραμμής.
- Η τιμή της AC τάσης του αγωγού φάσης τη στιγμή του πλήγματος, διότι σε αυτή υπερτίθενται οι υπερτάσεις. Η τάση λειτουργίας φαίνεται σταθερή στη μικρή διάρκεια του κεραυνικού πλήγματος (σε σχέση με την περίοδο της AC τάσης).
- Την κρουστική απόκριση του συστήματος γείωσης του πυλώνα, η οποία είναι σύνθετη και διαφέρει από την απόκριση σε ρεύματα χαμηλών συχνοτήτων.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 3: Κυματομορφή του κεραυνικού ρεύματος

3.1 Κεραυνοί – Γενική μορφή καταγεγραμμένων ρευμάτων

Ο κεραυνός είναι μια ατμοσφαιρική ηλεκτρική εκκένωση, η οποία δημιουργείται εξαιτίας δύο αντίθετα φορτισμένων περιοχών, στο εσωτερικό του ίδιου νέφους ή μεταξύ νέφους και γης ή μεταξύ δύο διαφορετικών νεφών (Σχήμα 29) [34]. Από τη σκοπιά της αντικεραυνικής προστασίας ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κεραυνοί που ξεκινούν ή καταλήγουν στη γη. Σχετικά με την κατηγορία αυτή, οι υψηλές πεδιακές εντάσεις που προκαλούν τον κεραυνό αναπτύσσονται κοντά στο νέφος αλλά και κοντά σε κάποιο σημείο το οποίο προεξέχει από το έδαφος. Επομένως, υπάρχουν δύο περιπτώσεις: α) εκκένωση η οποία ξεκινάει από το σύννεφο με ένα κατερχόμενο κεραυνό (Σχήμα 30) και β) εκκένωση η οποία ξεκινάει από ένα σημείο από το έδαφος με έναν ανερχόμενο κεραυνό [35].

Έτσι, δημιουργούνται τέσσερις τύποι κεραυνών (Σχήμα 31) που είναι οι εξής [35]:

Κατερχόμενος αρνητικός κεραυνός: εκκένωση που αρχίζει από ένα αρνητικό σύννεφο προς τη γη. Αυτός είναι ο συνηθέστερος τύπος.



Σχήμα 29: Κεραυνοί από εκκενώσεις μεταξύ νεφών [35].



Σχήμα 30: Κεραυνοί από εκκενώσεις μεταξύ σύννεφου και γης [35].

Κατερχόμενος θετικός κεραυνός: εκκένωση που αρχίζει από ένα θετικό σύννεφο προς τη γη.

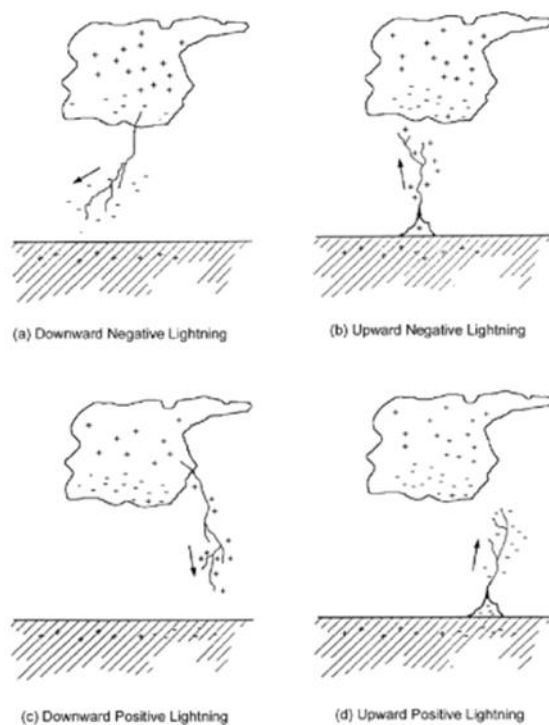
Ανερχόμενος θετικός κεραυνός: εκκένωση που αρχίζει από ένα σημείο του εδάφους κάτω από ένα αρνητικό σύννεφο.

Ανερχόμενος αρνητικός κεραυνός: εκκένωση που αρχίζει από ένα σημείο του εδάφους κάτω από ένα θετικό σύννεφο.

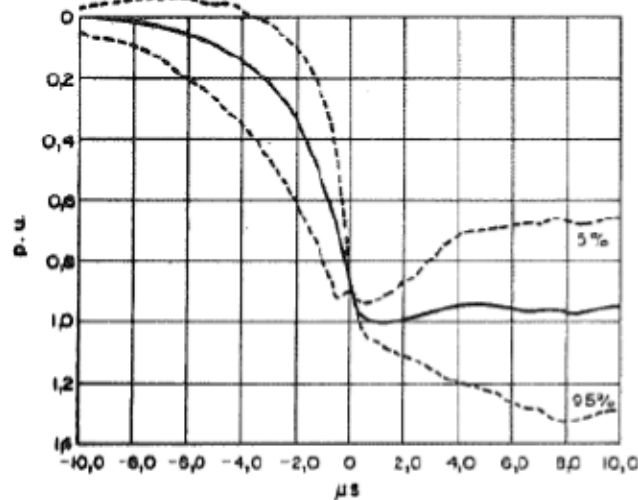
Το αρνητικό φορτίο συνήθως βρίσκεται στο κάτω μέρος του νέφους ενώ το θετικό στο άνω, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 31.

Να τονιστεί ότι οι κεραυνοί από το σύννεφο προς τη γη που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον στη σχεδίαση συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας κατά 95% είναι αρνητικοί κατερχόμενοι, καθώς οι ανερχόμενοι εκκινούν από κατασκευές άνω των 100 m σε ύψος σε κοινού εδάφους ή από κοντύτερες κατασκευές σε βουνά. Επομένως στη διπλωματική εργασία αυτή θα μελετηθούν αρνητικοί κατερχόμενοι κεραυνοί.

Οι κυματομορφές των ρευμάτων του κεραυνού καταγράφονται σε πύργους που δέχονται μεγάλο αριθμό κεραυνών μέσω εξειδικευμένων οργάνων. Η μορφή των κεραυνικών ρευμάτων των κατερχόμενων αρνητικών κεραυνών παρουσιάζει κάποια κοινά χαρακτηριστικά (Σχήμα 32) αν και οι παράμετροί τους είναι στοχαστικές, δηλαδή περιγράφονται από πιθανοτικές κατανομές [34]. Στο μέτωπο της κυματομορφής η άνοδος του ρεύματος προς το μέγιστο γίνεται με τα κοίλα προς τα πάνω. Στη συνέχεια εμφανίζεται το πρώτο μέγιστο και κατόπιν το δεύτερο που είναι και το μεγαλύτερο των δύο. Μετά ακολουθεί η ουρά και το ρεύμα μειώνεται προς το μηδέν. Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 32 για τα πρώτα κεραυνικά πλήγματα που θα μελετηθούν σε αυτή την εργασία. Τα επακόλουθα πλήγματα που ενδέχεται να καταλήξουν στο ίδιο σημείο είναι μικρότερης μέγιστης τιμής και δεν θα μελετηθούν.



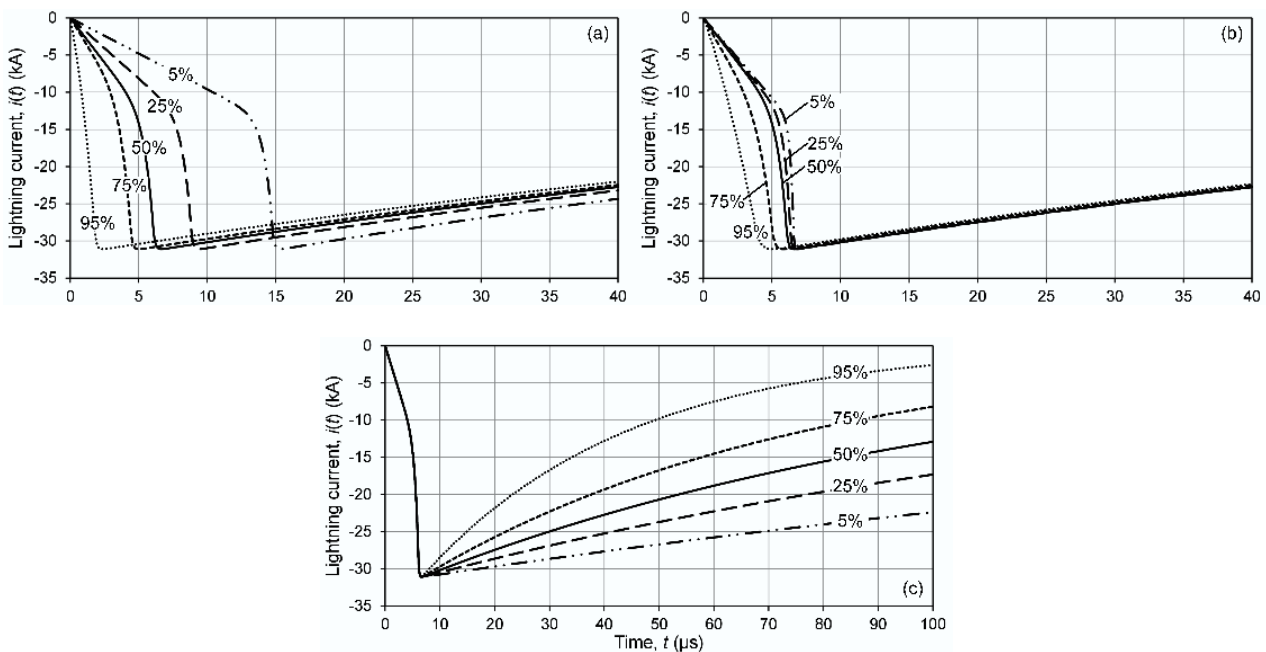
Σχήμα 31: Κατηγοριοποίηση κεραυνών [36].



Σχήμα 32: Καταγεγραμμένα κεραυνικά ρεύματα κατερχόμενων αρνητικών κεραυνών [34].

3.2 Κυματομορφή της CIGRE

Η κυματομορφή τύπου CIGRE (Σχήμα 33) χρησιμοποιείται σε μελέτες οι οποίες σχετίζονται με τους κεραυνούς. Αναπαράγει το προς τα πάνω κοίλο μέτωπο του ρεύματος του κεραυνού χρησιμοποιώντας το άθροισμα μιας γραμμικής συνάρτησης και μιας δύναμης μέχρι το σημείο του μετώπου που αντιστοιχεί στο 90% της τιμής κορυφής (μέγιστη τιμή). Η ουρά αποτελείται από μία διπλεκθετική συνάρτηση (διαφορά δύο εκθετικών συναρτήσεων) [34]. Το Σχήμα 33 απεικονίζει τυπικές κυματομορφές CIGRE για διάφορες τιμές διάρκειας μετώπου t_f , μέγιστης κλίσης S_m και διάρκειας ημίσεος εύρους t_h (διάρκεια ουράς).



Σχήμα 33: Τυπικές κυματομορφές ρεύματος κατερχόμενων αρνητικών κεραυνών που παράγονται από πηγή ρεύματος CIGRE μεταβάλλοντας (a) τη διάρκεια μετώπου t_f , (b) τη μέγιστη κλίση S_m και (c) τη διάρκεια ημίσεος εύρους t_h [37] με βάση τις πιθανοτικές κατανομές τους.

Η κυματομορφή της CIGRE έχει ενσωματωθεί στα διαδεδομένα λογισμικά προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων. Στο λογισμικό ATP-EMTP που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία η κυματομορφή αυτή παράγεται από μία πηγή CIGRE type 15. Οι απαραίτητες παράμετροι για να παραχθεί η κυματομορφή της CIGRE είναι η μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος I , η διάρκεια μετώπου t_f , η μέγιστη κλίση S_m και η διάρκεια ημίσεος εύρους t_h .

3.3 Παράμετροι κυματομορφής – πιθανοτικές κατανομές

Γενικά ανάλογα με την εφαρμογή ενδέχεται να είναι σημαντικές διάφορες παράμετροι που σχετίζονται με τον κεραυνό όπως [36]:

- Η πολικότητα, η οποία καθορίζεται από το πρόσημο του φορτίου του νέφους.
- Η κατεύθυνση, η οποία εξαρτάται από το αν ο κεραυνός ξεκινάει από το σύννεφο προς τη γη ή το αντίστροφο.
- Το ρεύμα, το οποίο εμφανίζεται με τη μορφή μιας ή περισσότερων κρούσεων, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Η τυπική κυματομορφή του ρεύματος ενός κεραυνού για πρώτα πλήγματα αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών έχει διάρκεια μετώπου της τάξης των 5.6 μs και διάρκεια ημίσεος της τάξης των 77.5 μs (ενδιάμεσες τιμές λογαριθμικών κανονικών κατανομών).
- Ολικό φορτίο Q_{total} , είναι το ολοκλήρωμα του ρεύματος του κεραυνού στον χρόνο.
- Κρουστικό φορτίο $Q_{impulse}$, είναι το ολοκλήρωμα της κρουστικής συνιστώσας του ρεύματος στον χρόνο.
- Ειδική ενέργεια SE, η οποία ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος του κεραυνού.
- Αριθμός διαδοχικών εκκενώσεων, μια ή πολλαπλές διαδοχικές εκκενώσεις του κεραυνού (πρώτο και επακόλουθα πλήγματα).

Οι παραπάνω παράμετροι κεραυνικού ρεύματος επηρεάζονται από γεωγραφικούς και εποχιακούς παράγοντες. Το ίδιο συμβαίνει και με τις παραμέτρους που απαιτούνται για να ορίσουν την κυματομορφή της CIGRE (μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος I , διάρκεια μετώπου t_f , μέγιστη κλίση S_m και διάρκεια ημίσεος εύρους t_h). Οι λογαριθμικές κανονικές κατανομές των παραμέτρων t_f , S_m και t_h παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Όπως φαίνεται για το t_f και S_m είναι συναρτήσεις της μέγιστης τιμής I του κεραυνικού ρεύματος. Στον Πίνακα 2 περιέχονται οι αντίστοιχες εξισώσεις για τα t_f και S_m και οι τιμές για το t_h για διαφορετικά ποσοστά περιπτώσεων που ξεπερνούν τις τιμές του πίνακα αυτού.

Πίνακας 1: Λογαριθμικές κανονικές κατανομές των παραμέτρων t_f , S_m και t_h της κυματομορφής του κεραυνού για αρνητικούς κατερχόμενους κεραυνούς (πρώτα πλήγματα) [37].

| Παράμετρος | Ενδιάμεση τιμή, M | Τυπική απόκλιση, θ | Εύρος μέγιστου ρεύματος, I |
|--------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| $t_f I$ (μs) | $1.77 \cdot I^{0.188}$ | 0.494 | $3 \leq I \leq 20 \text{ kA}$ |
| | $0.906 \cdot I^{0.411}$ | | $I > 20 \text{ kA}$ |
| $S_m I$ (kA/ μs) | $12 \cdot I^{0.171}$ | 0.554 | $3 \leq I \leq 20 \text{ kA}$ |
| | $6.5 \cdot I^{0.376}$ | | $I > 20 \text{ kA}$ |
| t_h (μs) | 77.5 | 0.577 | – |

Πίνακας 2: Ποσοστό περιπτώσεων που ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή (εξίσωση) του πίνακα για αρνητικούς κατερχόμενους κεραυνούς (πρώτα πλήγματα). Παράμετροι: t_f , S_m και t_h της κυματομορφής του κεραυνού [37].

| Παράμετρος | 95% | 75% | 50% | 25% | 5% | Εύρος μέγιστου ρεύματος, I |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| t_f (μs) | $0.785 \cdot I^{0.188}$ | $1.268 \cdot I^{0.188}$ | $1.770 \cdot I^{0.188}$ | $2.470 \cdot I^{0.188}$ | $3.989 \cdot I^{0.188}$ | $3 \leq I \leq 20 \text{ kA}$ |
| | $0.402 \cdot I^{0.411}$ | $0.649 \cdot I^{0.411}$ | $0.906 \cdot I^{0.411}$ | $1.265 \cdot I^{0.411}$ | $2.042 \cdot I^{0.411}$ | $I > 20 \text{ kA}$ |
| S_m (kA/ μs) | $4.824 \cdot I^{0.171}$ | $8.259 \cdot I^{0.171}$ | $12 \cdot I^{0.171}$ | $17.437 \cdot I^{0.171}$ | $29.849 \cdot I^{0.171}$ | $3 \leq I \leq 20 \text{ kA}$ |
| | $2.613 \cdot I^{0.376}$ | $4.473 \cdot I^{0.376}$ | $6.5 \cdot I^{0.376}$ | $9.445 \cdot I^{0.376}$ | $16.168 \cdot I^{0.376}$ | $I > 20 \text{ kA}$ |
| t_h (μs) | 30 | 52.5 | 77.5 | 114.4 | 200.2 | – |

3.4 Επιλεγμένα καταγεγραμμένα ρεύματα προς διερεύνηση

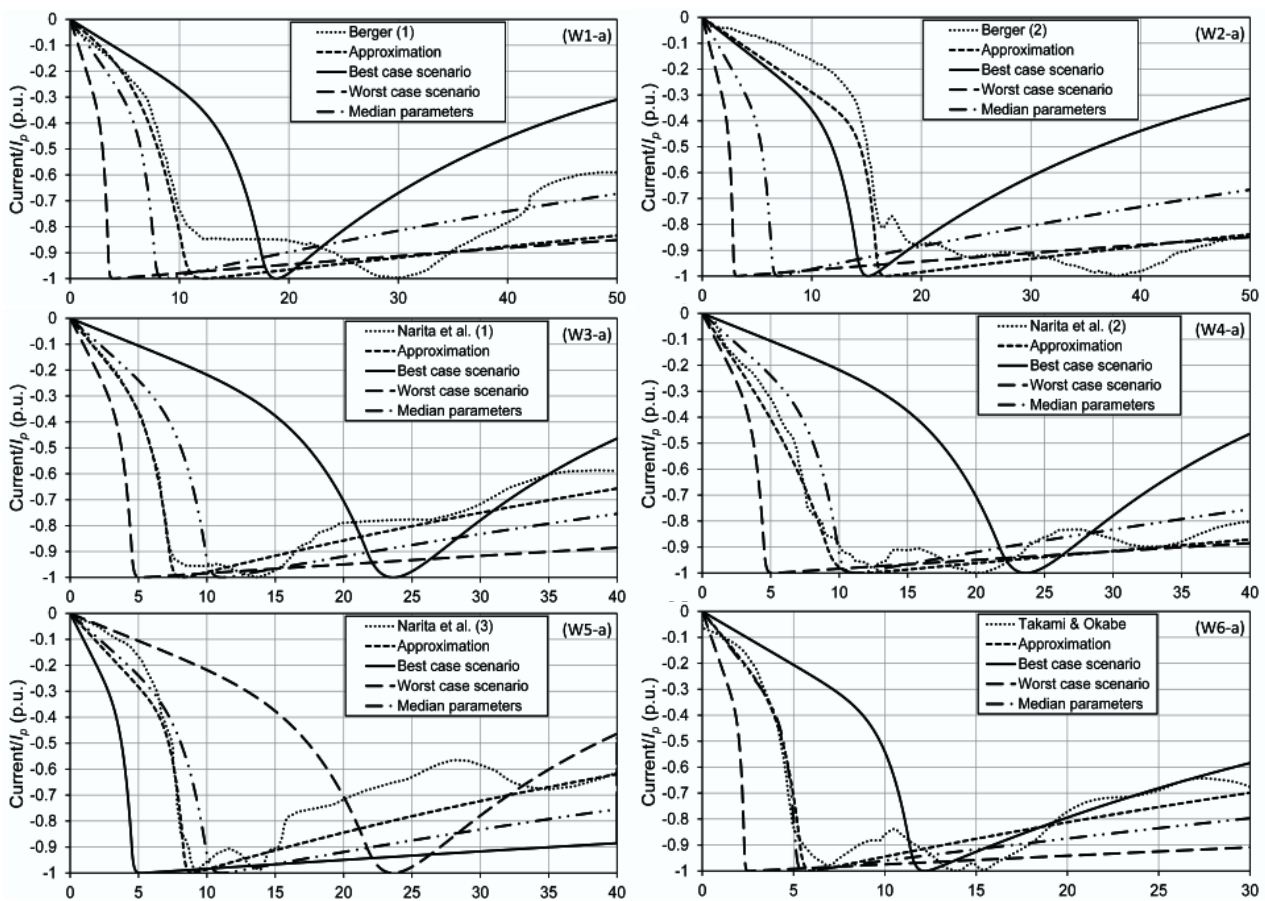
Η αναπαράσταση του ρεύματος του κεραυνού αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τις υπερτάσεις που καταπονούν τη μόνωση των εναέριων γραμμών μεταφοράς καθώς και τις ελάχιστες τιμές ρεύματος που οδηγούν σε διάσπαση της μόνωσης, είτε πρόκειται για κεραυνικά πλήγματα στον πυλώνα είτε στους αγωγούς φάσης (σφάλματα θωράκισης) [37], [38]. Επομένως θα επηρεαστούν και οι εισερχόμενες κεραυνικές υπερτάσεις στους υποσταθμούς υψηλής τάσης.

Οι πιο συνηθισμένες κυματομορφές ρεύματος που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις είναι οι εξής [38]: (α) τριγωνική κυματομορφή, (β) κυματομορφή τύπου Heilder, (γ) κυματομορφή τύπου CIGRE και (δ) κυματομορφή διπλής κορυφής. Οι δύο τελευταίες αναπαριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη γενική μορφή του κεραυνικού ρεύματος (Σχήμα 32). Ωστόσο και πάλι παρατηρούνται διαφορές οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορές στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις. Η διερεύνηση της επίδρασης στις υπερτάσεις της χρήσης καταγεγραμμένων κυματομορφών κεραυνικού ρεύματος αντί για τις συνηθισμένες τυποποιημένες κυματομορφές είναι το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι καταγεγραμμένες κυματομορφές που παρουσιάστηκαν στην αναφορά [38]. Οι κυματομορφές αυτές είναι έξι και τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στον Πίνακα 3: τα δύο πρώτα ρεύματα W1 και W2 καταγράφηκαν από τον Berger, τα επόμενα τρία ρεύματα W3-W5 από τους Narita et al. και τέλος το τελευταίο ρεύμα W6 από τους Takami & Okabe. Το Σχήμα 34 παρουσιάζει τις κυματομορφές αυτές μαζί με διάφορες κυματομορφές CIGRE: Αυτές που τις προσεγγίζουν, αυτές που αντιστοιχούν στις ενδιάμεσες τιμές των παραμέτρων και τις καλύτερες και χειρότερες περιπτώσεις όσον αφορά τη διάσπαση της μόνωσης των γραμμών μεταφοράς.

Πίνακας 3: Καταγεγραμμένες κυματομορφές που θα διερευνηθούν στη διπλωματική αυτή [38].

| Κυματομορφή | | I_i (kA) | I_F (kA) | t_f (μ s) | t_h (μ s) | | | | | |
|-------------|---|---------------|---------------|---------------------|---------------------|------------------|-------|-------|------|-------|
| W1 | Berger no. 6235, (1) Fig. 15 της αναφοράς [39] | 53.4 | 63.0 | 7.1 | 151.0 | | | | | |
| W2 | | | | | | no. 6236, (2) | 39.8 | 48.9 | 5.5 | 139.4 |
| W3 | Narita et al. Fig. 5 της αναφοράς [40] | 128.2 | 134.2 | 5.3 | 52.5 | | | | | |
| W4 | | | | | | (2) | 136.5 | 139.0 | 9.1 | 120.6 |
| W5 | | | | | | (3) | 122.6 | 3.7 | 46.0 | |
| W6 | Takami & Okabe Fig. 5(a) της αναφοράς [41] | 18.8 | 19.2 | 3.4 | 62.2 | | | | | |

I_i : αρχική (πρώτη) τιμή κορυφής, I_F : τελική (δεύτερη) τιμή κορυφής,
 t_f : διάρκεια μετώπου, t_h : διάρκεια ημίσεος εύρους.



Σχήμα 34: Καταγεγραμμένες κανονικοποιημένες κυματομορφές κεραυνού W1-W6 (Πίνακας 3) μαζί με τις κυματομορφές CIGRE που τις προσεγγίζουν και κυματομορφές CIGRE βασισμένες στις πιθανοτικές κατανομές των παραμέτρων του κεραυνού [38].

Κεφάλαιο 4: Υποσταθμοί υπό εξέταση

4.1 Τοπολογία και γενικά χαρακτηριστικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι υποσταθμοί που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της επίδρασης των κυματομορφών που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 και πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα 3. Στόχος των προσομοιώσεων είναι να συγκριθούν οι κυματομορφές των υπερτάσεων που αναπτύσσονται σε κάθε υποσταθμό και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των κυματομορφών στα αποτελέσματα προσομοίωσης. Προσομοιώνονται τέσσερις υποσταθμοί οι δύο πρώτοι έχουν μόνωση αερίου (GIS) με επίπεδα τάσης 400 kV και 132 kV αντίστοιχα ενώ οι άλλοι δύο υποσταθμοί έχουν μόνωση αέρα (AIS) με επίπεδα τάσης 400 kV και 161 kV. Το κοινό που έχουν αυτοί οι υποσταθμοί είναι ότι η υπέρταση εισέρχεται πάντα από τη γραμμή μεταφοράς η οποία συνδέεται στον υποσταθμό.

Αναλυτικότερα, στον πρώτο υποσταθμό (ονομασία: HVSS1) υπάρχει μια εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς μονού κυκλώματος 400 kV, η οποία αποτελείται από τρεις φάσεις και δύο αγωγούς προστασίας η οποία υφίσταται κεραυνικό πλήγμα είτε στον πυλώνα είτε σε αγωγό φάσης που συνδέεται με τον υποσταθμό. Ακολουθεί μια πύλη εισόδου (gantry) και εκτροπείς υπέρτασης, οι οποίοι προστατεύουν την είσοδο του υποσταθμού και τη σύνδεση του με τη γραμμή μεταφοράς. Έπειτα, ξεκινάει ο υποσταθμός GIS ο οποίος περιλαμβάνει τους ζυγούς και τον διακοπτικό εξοπλισμό. Στην έξοδο του GIS ξεκινάει ένα καλώδιο 400 kV που αποτελείται από τρία μονοπολικά καλώδια σε ένα φρεάτιο από σκυρόδεμα. Μετά, ακολουθούν οι εκτροπείς υπέρτασης που προστατεύουν το καλώδιο και τον μετασχηματιστή ισχύος. Τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή ισχύος είναι ότι 400 kV υψηλή με δύο τυλίγματα μέσης τάσης στα 15 kV και εκεί συνδέονται δύο γεννήτριες. Τέλος, υπάρχουν εκτροπείς υπέρτασης και στην μέση τάση.

Όσον αφορά, τον δεύτερο υποσταθμό (ονομασία: HVSS2) υπάρχει μια εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς στα 132 kV που αποτελείται από έξι φάσεις (δύο κυκλώματα) και έναν αγωγό προστασίας, η οποία υφίσταται κεραυνικό πλήγμα είτε στον πυλώνα είτε σε αγωγό φάσης που συνδέεται με τον υποσταθμό. Ακολουθεί μια πύλη εισόδου εκεί είναι τοποθετημένοι οι εκτροπείς υπέρτασης που προστατεύουν τον υποσταθμό με τη γραμμή μεταφοράς. Η γραμμή μεταφοράς τερματίζει στον υποσταθμό GIS όπου εκεί βρίσκεται ο διακοπτικός εξοπλισμός και οι ζυγοί. Κατόπιν συνδέεται καλώδιο ισχύος 132 kV. Το καλώδιο αυτό ενώνει τον υποσταθμό με έναν μετασχηματιστή ο οποίος υποβιβάζει την τάση στα 132 kV στα 6,9 kV. Ο μετασχηματιστής προστατεύεται με εκτροπείς υπέρτασης και στις δυο πλευρές του (υψηλή και μέση τάση).

Στη συνέχεια, στον τρίτο υποσταθμό (ονομασία: HVSS3) υπάρχει μια εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς στα 400 kV μονού κυκλώματος με τρεις φάσεις σε κατακόρυφη διάταξη και δύο αγωγούς προστασίας που υφίσταται κεραυνικό πλήγμα είτε στον πυλώνα είτε σε αγωγό φάσης που συνδέεται με τον υποσταθμό. Στην είσοδο του υποσταθμού βρίσκονται οι εκτροπείς υπέρτασης καθώς και οι ζυγοί με το διακοπτικό υλικό το οποίο είναι τύπου μόνωσης αέρα (AIS). Στους ζυγούς συνδέεται μετασχηματιστής ο οποίος έχει τρία τυλίγματα από τα 400 kV στα 220 kV και στα 35 kV που προστατεύονται με εκτροπείς υπέρτασης. Στα 220 kV υπάρχουν πάλι ζυγοί, οι οποίοι περιλαμβάνονται στην προσομοίωση. Εκτροπείς υπέρτασης υπάρχουν και στους ζυγούς των 400 kV.

Τέλος, στον τέταρτο υποσταθμό (ονομασία: HVSS4) υπάρχει μια εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς στα 161 kV μονού κυκλώματος που αποτελείται από τρεις φάσεις και δύο αγωγούς προστασίας που υφίσταται κεραυνικό πλήγμα είτε στον πυλώνα είτε στον αγωγό φάσης που συνδέεται με τον υποσταθμό. Υπάρχει μια πύλη εισόδου και ακολουθούν οι εκτροπείς υπέρτασης που προστατεύουν την είσοδο του υποσταθμού από τις εισερχόμενες υπερτάσεις. Μετά ακολουθεί ο μετασχηματιστής ο οποίος από 161 kV υποβιβάζει στα 11 kV. Εκτροπείς υπέρτασης υπάρχουν και πριν και μετά τον μετασχηματιστή καθώς και στη γεννήτρια στην οποία συνδέεται ο μετασχηματιστής ώστε να προστατεύονται.

Συμπερασματικά, στους υποσταθμούς που δεν υπάρχουν γεννήτριες (HVSS2 και HVSS3) συμβαίνει υποβιβασμό τάσης για να μεταφερθεί η ενέργεια στην κατανάλωση. Αντίθετα, στους υποσταθμούς που υπάρχουν γεννήτριες (HVSS1 και HVSS4) συμβαίνει ανύψωση της τάσης από τον μετασχηματιστή για να περάσει η ενέργεια προς το δίκτυο ώστε να μεταφερθεί προς τα κέντρα κατανάλωσης και να καταναλωθεί. Ο Πίνακας 4 συγκεντρώνει τα βασικά χαρακτηριστικά των υποσταθμών που προσομοιώθηκαν.

Πίνακας 4: Υποσταθμοί προς εξέταση.

| Ονομασία | Μόνωση | Υψηλή Τάση | Μέση Τάση | Κατηγορία |
|----------|--------|---------------|-----------|-------------|
| HVSS1 | GIS | 400 kV | 15 kV | Ανύψωσης |
| HVSS2 | GIS | 132 kV | 6.9 kV | Υποβιβασμού |
| HVSS3 | AIS | 400 kV/220 kV | 35 kV | Υποβιβασμού |
| HVSS4 | AIS | 161 kV | 11 kV | Ανύψωσης |

4.2 Μοντελοποίηση

Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα μοντέλα:

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται από μια σειρά μοντέλων J.Marti [42] που εξαρτώνται από τη συχνότητα, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία των πυλώνων και τα ανοίγματα των γραμμών. Υπολογίστηκαν παράμετροι γραμμής για την ειδική αντίσταση του εδάφους στην περιοχή της εγκατάστασης στην κάθε περίπτωση.

Το τμήμα των προσομοιωμένων γραμμών περιλάμβανε διάφορα ανοίγματα και το τελικό άνοιγμα προς τον υποσταθμό (μεταξύ τελευταίου πυλώνα και πύλης του υποσταθμού). Οι γραμμές τερματίστηκαν κατάλληλα με μεγάλα τμήματα γραμμής (σε μήκος), ώστε να εξαλειφθούν οι τεχνητές αντανάκλασεις από το τέλος της γραμμής.

Οι πυλώνες μεταφοράς μοντελοποιήθηκαν ως κατακόρυφες μονοφασικές γραμμές κατανεμημένων παραμέτρων χωρίς απώλειες, ανεξάρτητες από τη συχνότητα. Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος λήφθηκε ίση με το 85% της ταχύτητας του φωτός [43] και η κυματική αντίσταση υπολογίστηκε σύμφωνα με τις αναφορές [43], [44] προσεγγίζοντας τους πυλώνες διπλού κυκλώματος ως κώνους και τους πύργους μονού κυκλώματος ως κυλίνδρους.

Οι πύλες των υποσταθμών μοντελοποιήθηκαν ως κατακόρυφες γραμμές κατανεμημένων παραμέτρων χωρίς απώλειες, ανεξάρτητες από τη συχνότητα. Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος

λήφθηκε ίση με το 85% της ταχύτητας του φωτός [43] και η κυματική αντίσταση υπολογίστηκε σύμφωνα με την αναφορά [43].

Υιοθετώντας μια συντηρητική προσέγγιση, το σύστημα γείωσης των πυλώνων προσομοιώθηκε με την αντίσταση γείωσης υπό χαμηλό ρεύμα και συχνότητα [45], [46].

Η ηλεκτρική διάσπαση των αλυσοειδών μονωτήρων των γραμμών μεταφοράς μοντελοποιήθηκε με τη χρήση του κυκλωματικού στοιχείου LDM τύπου 94 [47], [48], με τη βοήθεια του οποίου η διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μπορεί να αναπαρασταθεί με βάση διάφορα κύρια μοντέλα ανάπτυξης του λήντερ από τη βιβλιογραφία λαμβάνοντας υπόψη το ρεύμα προεκκένωσης που ρέει στο διάκενο κατά τη κύρια φάση ανάπτυξης. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ανάπτυξης του λήντερ που προτάθηκε από τον Weck, το οποίο υιοθετήθηκε από την CIGRE [34], σε προσομοιώσεις με παραμέτρους για αρνητική διάσπαση της μόνωσης.

Τα μονοπολικά καλώδια ισχύος αναπαρίστανται από το μοντέλο Bergeron [49], [50] με παραμέτρους που υπολογίστηκαν στα 50 kHz χρησιμοποιώντας τις ρουτίνες υποστήριξης του λογισμικού ATP-EMTP: Cable Constants ή Cable Parameters.

Οι εκτροπείς υπερτάσεων, καθώς και οι περιοριστές τάσης μανδύα των καλωδίων, αναπαρίστανται από το μοντέλο των Pinceti και Giannettoni που εξαρτάται από τη συχνότητα [51], [52] με παραμέτρους που υπολογίζονται με βάση τα χαρακτηριστικά του εκτροπέα υπέρτασης.

Οι ζυγοί GIS προσομοιώθηκαν ως γραμμές χωρίς απώλειες με κυματική αντίσταση 75 Ω [53].

Οι ζυγοί AIS, οι αγωγοί και τα καλώδια μήκους μεγαλύτερου των 3 m μοντελοποιήθηκαν ως γραμμές χωρίς απώλειες με κυματική αντίσταση 400 Ω, ενώ για μήκη μικρότερα των 3 m χρησιμοποιήθηκαν επαγωγές 1μH/m [53].

Οι αυτομετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές ισχύος μοντελοποιήθηκαν με ένα κύκλωμα χωρητικότητας π μαζί με ένα μοντέλο BCTRAN. Αυτός ο συνδυασμός έχει καλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με ένα κύκλωμα χωρητικότητας π μόνο του [54].

Ο κεραυνός αναπαρίσταται από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια αντίσταση 400Ω (για ανάστροφη διάσπαση, backflashover) ή 1000 Ω (για σφάλμα θωράκισης, shielding failure) που αντιπροσωπεύει τη σύνθετη αντίσταση του καναλιού του οχετού επιστροφής του κεραυνού [55]. Για κυματομορφές τύπου CIGRE [34], χρησιμοποιήθηκε μια πηγή ρεύματος CIGRE τύπου 15, που παράγει ρεύμα με μέτωπο προς τα πάνω κοίλο. Οι πραγματικές κυματομορφές και οι προσεγγίσεις τους κατά CIGRE αναπαράχθηκαν με ένα μοντέλο που ελέγχει μια πηγή ρεύματος TACS τύπου 60 με ζεύγη σημείων ρεύματος χρόνου που ορίζονται από τον χρήστη.

Οι προσομοιώσεις ανάστροφης διάσπασης έγιναν με ρεύμα κεραυνού 200 kA (μέγιστο άνω άκρο). Το μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης χρησιμοποιήθηκε για τα κεραυνικά πλήγματα σε αγωγούς φάσης και υπολογίστηκε με βάση το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο που προτείνεται στο διεθνές πρότυπο IEEE Std 1243 [56].

Περισσότερες πληροφορίες για τη μοντελοποίηση μπορούν να βρεθούν στην αναφορά [32].

4.3 Περιπτώσεις προσομοίωσης

Με τη βοήθεια του προγράμματος ATP-EMTP [57], [58], το οποίο αποτελεί ένα εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εξετάζονται και στους τέσσερις υποσταθμούς δύο περιπτώσεις κεραυνικού πλήγματος, η πρώτη είναι ανάστροφη διάσπαση (πλήγμα κεραυνού στον πυλώνα) και η δεύτερη είναι πλήγμα στον αγωγό φάσης. Όσον, αφορά τα ρεύματα κορυφής που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση τις ανάστροφης διάσπασης είναι στα 200 kA σε όλους τους υποσταθμούς. Αντίθετα, στην περίπτωση του αγωγού φάσης τα ρεύματα κορυφής είναι διαφορετικά για τον κάθε υποσταθμό. Ο πρώτος υποσταθμός έχει τιμή ρεύματος 10.3 kA, ο δεύτερος 20.9 kA, ο τρίτος 15.2 kA και ο τέταρτος 4.9 kA. Τα ρεύματα αυτά προκύπτουν με το μοντέλο σύλληψης του διεθνούς προτύπου βάσει της γεωμετρίας των γραμμών μεταφοράς. Προσομοιώθηκαν λοιπόν, οι κυματομορφές που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3 και πιο συγκεκριμένα στην Υποενότητα 3.4 καθώς και οι καταγεγραμμένες κυματομορφές που αναφέρονται στον Πίνακα 3 με σκοπό να αναπαρασταθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια τη κυματομορφή του κεραυνικού ρεύματος. Για να ελεγχθεί η επίδραση της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις, σε κάθε υποσταθμό και σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά ελέγχθηκαν διάφορες θέσεις κοντά στα στοιχεία εξοπλισμού όπως για παράδειγμα στην είσοδο του υποσταθμού, στα άκρα των καλωδίων ισχύος υψηλής τάσης, στο μετασχηματιστή, σε διάφορα σημεία στους ζυγούς κ.ά. και καταγράφηκαν τόσο οι τιμές κορυφής των τάσεων όσο και οι κυματομορφές τους. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει συνοπτικά τις περιπτώσεις προσομοίωσης της εργασίας αυτής.

Πίνακας 5: Περιπτώσεις προσομοίωσης.

| Ονομασία ΥΣ | Ανάστροφη διάσπαση | Σφάλμα θωράκισης | Κυματομορφή |
|-------------|--------------------|------------------|--|
| HVSS1 | 200 kA | 10.3 kA | Καταγεγραμμένες W1-W6 (Πίνακας 3) Προσέγγιση CIGRE W1-W6 (Πίνακας 3) Ενδιάμεσες τιμές (Πίνακες 1 και 2) Καλύτερη περίπτωση (Πίνακες 1 και 2) Χειρότερη περίπτωση (Πίνακες 1 και 2) |
| HVSS2 | | 20.9 kA | |
| HVSS3 | | 15.2 kA | |
| HVSS4 | | 4.9 kA | |

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και συζήτηση

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των κυματομορφών των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων στους υποσταθμούς (Πίνακας 4) λόγω κεραυνικών πλήγμάτων (Πίνακας 5) στις εισερχόμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυματομορφές των κεραυνικών ρευμάτων που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 ενώ οι υποσταθμοί στο Κεφάλαιο 4. Όλοι οι υποσταθμοί έχουν ένα κοινό στοιχείο, συνδέονται με μια εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς στην οποία παρουσιάζεται κεραυνικό πλήγμα είτε στον πυλώνα είτε στον αγωγό φάσης. Η υπέρταση εισέρχεται στον υποσταθμό πάντα από τη γραμμή μεταφοράς.

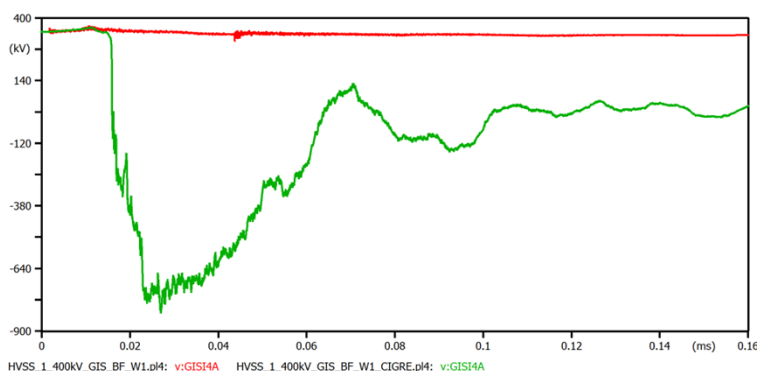
5.1 Υποσταθμός GIS 400 kV

Όσον αφορά τον πρώτο υποσταθμό με μόνωση αερίου (GIS) και επίπεδο υψηλής τάσης 400 kV προσομοιώθηκαν δύο περιπτώσεις κεραυνικού πλήγματος, στον πυλώνα και στον αγωγό φάσης. Τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων θα αναλυθούν ξεχωριστά παρακάτω.

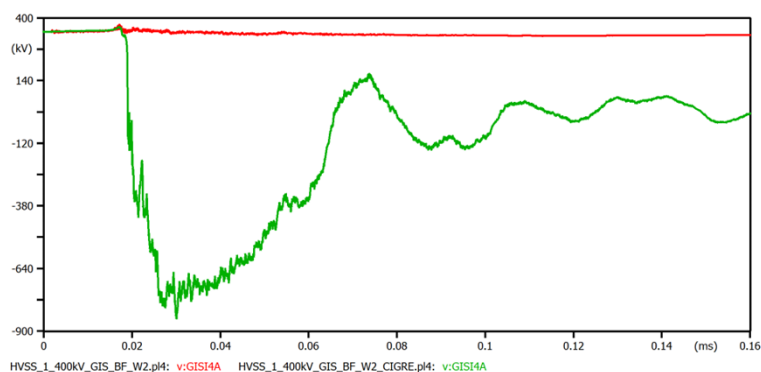
5.1.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Στην προσομοίωση του υποσταθμού με κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα παρουσιάζονται παρακάτω τα συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν τις υπερτάσεις στον υποσταθμό για τις πραγματικές κυματομορφές W1-W6 του Πίνακα 3 σε σχέση με τις προσεγγίσεις τους με την κυματομορφή της CIGRE. Οι πλήρεις κυματομορφές παρουσιάζονται για την είσοδο του υποσταθμού ενώ για κάποια επιλεγμένα σημεία μέτρησης από τα υπόλοιπα στα οποία καταγράφηκαν κυματομορφές παρουσιάζονται οι τιμές κορυφής των υπερτάσεων.

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 35 και 36 η προσέγγιση της CIGRE εμφανίζει συστηματικά μεγαλύτερες τιμές (κατ' απόλυτη τιμή) σε σχέση με την πραγματική κυματομορφή για τις W1 και W2. Συγκεκριμένα με τις πραγματικές κυματομορφές δεν συμβαίνει ανάστροφη διάσπαση στη γραμμή μεταφοράς με συνέπεια να μην αναπτύσσονται υπερτάσεις στον υποσταθμό.



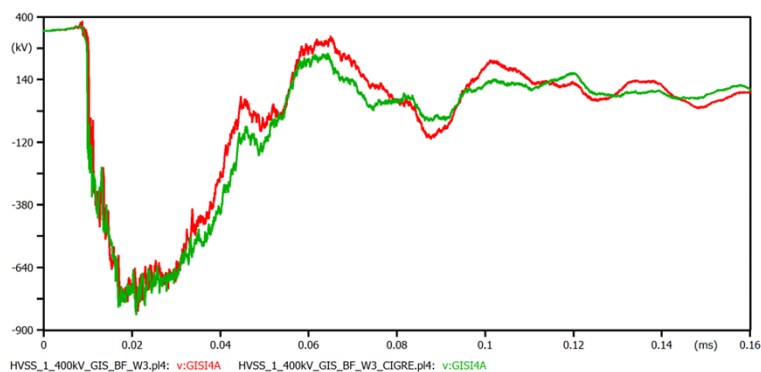
Σχήμα 35: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



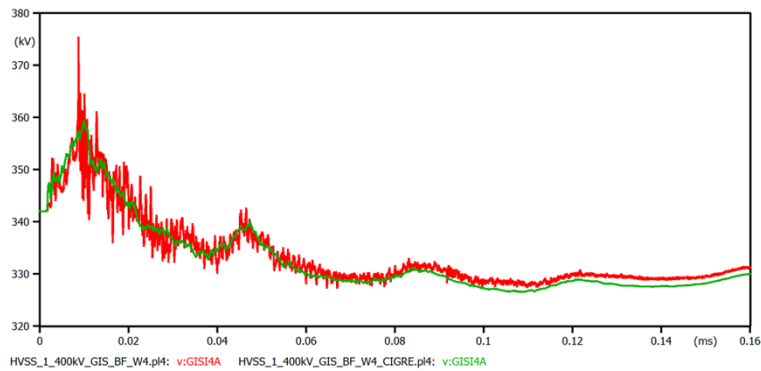
Σχήμα 36: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

Η προσέγγιση της W3_CIGRE (Σχήμα 37) δεν δίνει συστηματικά μεγάλες τιμές παρά μόνο σε ορισμένους κόμβους του υποσταθμού. Στους υπόλοιπους κόμβους η μεγαλύτερη τιμή εμφανίζεται λόγω της πραγματικής κυματομορφής W3. Επιπλέον είναι σημαντικό ότι σε κάποιες χρονικές στιγμές η υπέρταση ενδέχεται να είναι μεγαλύτερη για την πραγματική κυματομορφή και σε άλλες για την προσέγγισή της.

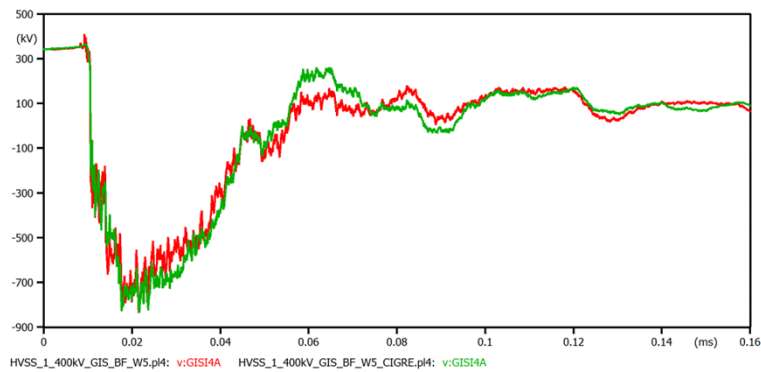
Το ίδιο παρατηρείται και για τις πραγματικές κυματομορφές W4-W6 μαζί με τις προσεγγίσεις τους όπως φαίνονται στα Σχήματα 38-40, αντίστοιχα.



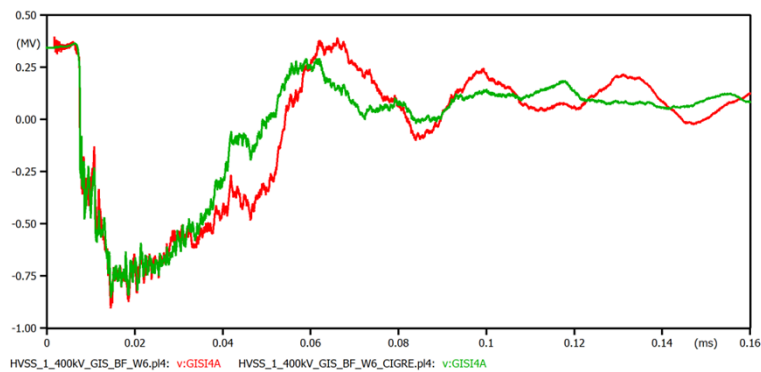
Σχήμα 37: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



Σχήμα 38: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση). Εδώ δεν έχει συμβεί ανάστροφη διάσπαση σε καμία από τις δύο περιπτώσεις.



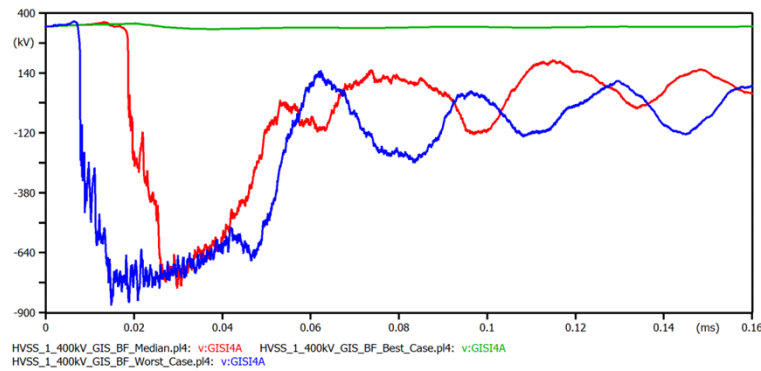
Σχήμα 39: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



Σχήμα 40: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

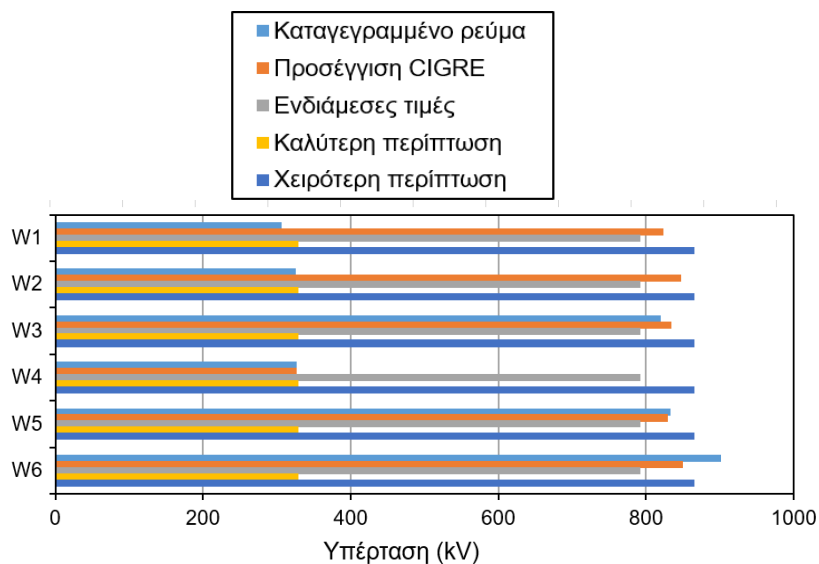
Μελετήθηκαν επίσης, τρεις περιπτώσεις όπως φαίνεται και στο Σχήμα 41, οι οποίες είναι η ενδιάμεση (Median), η καλύτερη περίπτωση (Best case) και η χειρότερη περίπτωση (Worst case) και αφορούν τη στατιστική μεταβολή των παραμέτρων του κεραυνού (Κεφάλαιο 3). Οι δύο τελευταίες αναφέρονται στις παραμέτρους που οδηγούν πιο εύκολα και πιο δύσκολα αντίστοιχα σε διάσπαση της μόνωσης των εισερχόμενων γραμμών μεταφοράς Στην καλύτερη περίπτωση δεν δημιουργείται καμία διάσπαση στον πυλώνα αντίθετα στις άλλες δύο περιπτώσεις παρουσιάζεται διάσπαση και πιο συγκεκριμένα στη χειρότερη περίπτωση υπάρχουν μεγάλες τιμές σε σχέση με

την ενδιάμεση περίπτωση. Ο διαφορετικός χρόνος άφιξης της υπέρτασης στον υποσταθμό οφείλεται στον διαφορετικό χρόνο διάσπασης της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς.



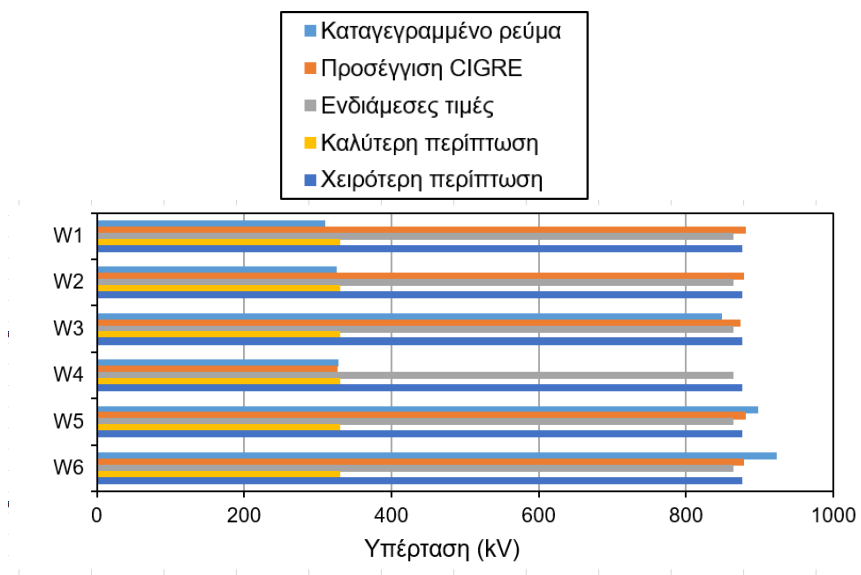
Σχήμα 41: Κυματομορφές υπερτάσεων για κυματομορφές κεραυνικού ρεύματος ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (ανάστροφη διάσπαση).

Επιπλέον, μελετήθηκαν τα αποτελέσματα τριών κόμβων (είσοδος υποσταθμού, έξοδος υποσταθμού, μετασχηματιστής) οι οποίοι έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο κομμάτι της υψηλής τάσης του υποσταθμού από την πλευρά του συντονισμού μόνωσης. Στο Σχήμα 42 στον κόμβο GISIN4A φαίνεται πως οι καταγεγραμμένες κυματομορφές W1-W3 δίνουν μικρότερες τιμές συγκριτικά με τις προσεγγίσεις W1_CIGRE-W3_CIGRE. Αντίθετα, η W6 κυματομορφή παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την W6_CIGRE, ενώ οι τιμές των W4, W5 σε σχέση με την W4_CIGRE και την W5_CIGRE είναι αρκετά κοντά. Οι τιμές της κυματομορφής Median είναι σε γενικές γραμμές αρκετά μικρότερες όπως φαίνονται παρακάτω σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE. Η κυματομορφή της Best Case έχει μια σταθερή τιμή και μικρότερη από τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE καθώς δεν γίνεται κάποια διάσπαση επομένως δεν υπάρχουν υπερτάσεις. Τέλος, η Worst Case δίνει μεγάλες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές εξάιρεση αποτελεί η W6 η οποία δίνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με αυτήν.



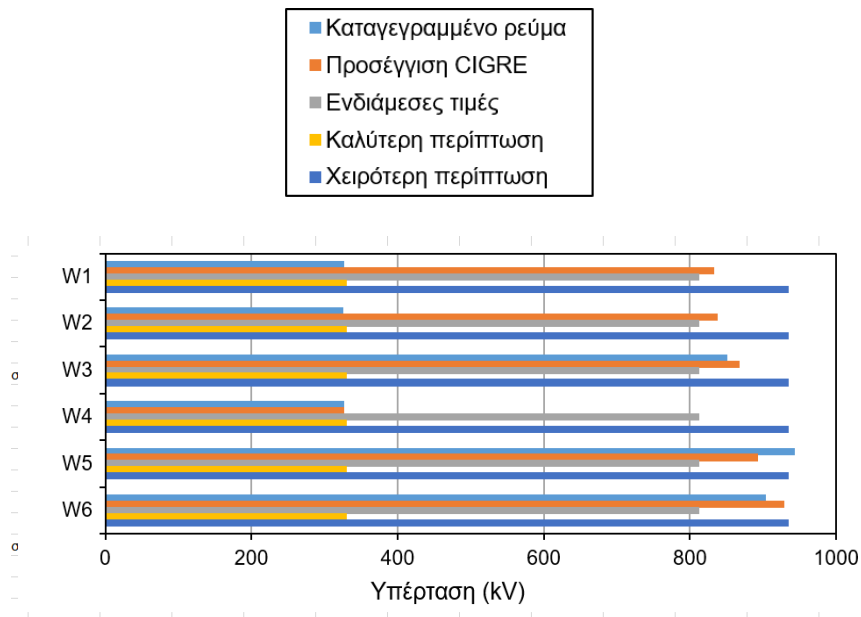
Σχήμα 42: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου GISIN4A του υποσταθμού HVSS1 (ανάστροφη διάσπαση).

Για τον κόμβο GIS01A από το Σχήμα 43 μπορεί να ειπωθεί πως οι W1-W3 κυματομορφές εμφανίζουν μικρότερες τιμές σε σχέση με τις προσεγγίσεις W1_CIGRE και W2_CIGRE. Αντίθετα η W5 και W6 κυματομορφές εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις προσεγγίσεις τους, ενώ η κυματομορφή W4 εμφανίζει σχεδόν ίδιες τιμές με την W4_CIGRE. Η κυματομορφή της Best Case εμφανίζει σταθερή τιμή καθώς δεν έχει συμβεί διάσπαση στη μόνωση της γραμμής οπότε δεν δημιουργείται υπέρταση. Οι τιμές της κυματομορφής Median είναι μικρότερες σε σχέση με τις προσεγγίσεις των κυματομορφών W1_CIGRE-W3_CIGRE όμως εμφανίζει μεγάλες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές W1-W3. Οι κυματομορφές W5 και W6 δίνουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την Median. Τέλος, η Worst Case δεν παρουσιάζει αρκετά μεγάλες τιμές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 43.



Σχήμα 43: Διάγραμμα για τον κόμβο εξόδου GIS01A του υποσταθμού HVSS1 (ανάστροφη διάσπαση).

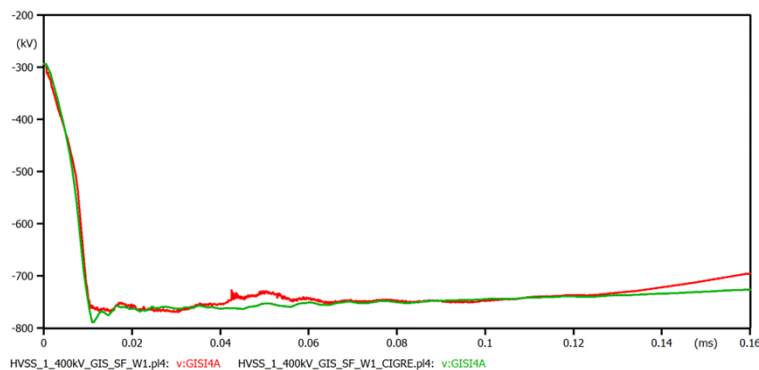
Για τον κόμβο TRH1A οι προσεγγίσεις των κυματομορφών W1_CIGRE-W3_CIGRE και W6_CIGRE εμφανίζουν μεγάλες τιμές σε σχέση με τις κυματομορφές W1-W3 και W6 αντίστοιχα. Αντιθέτως, η κυματομορφή W5 εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές από την προσέγγισή της, ενώ η κυματομορφή W4 δίνει σχεδόν πολύ κοντινές με την προσέγγισή της. Η κυματομορφή της Best Case εμφανίζει σταθερή τιμή καθώς δεν έχει συμβεί διάσπαση στη μόνωση οπότε δεν δημιουργείται υπέρταση. Η κυματομορφή Median δεν παρουσιάζει μεγάλες τιμές σε σχέση με τις W1_CIGRE, W2_CIGRE, W3, W3_CIGRE, W4, W4_CIGRE, W5, W5_CIGRE, W6 και W6_CIGRE αντιθέτως δίνει μεγάλες τιμές στις κυματομορφές W1, W2, W4 και W4_CIGRE. Τέλος, η Worst Case είναι η μόνη κυματομορφή η οποία παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες κυματομορφές.



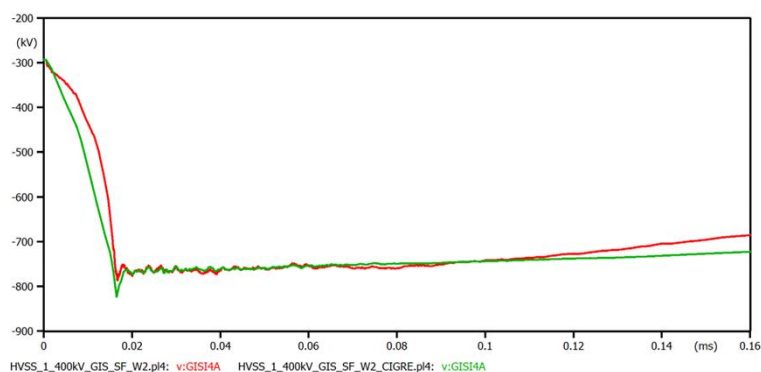
Σχήμα 44: Διάγραμμα για τον κόμβο μετασχηματιστή TRH1A του υποσταθμού HVSS1 (ανάστροφη διάσπαση).

5.1.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

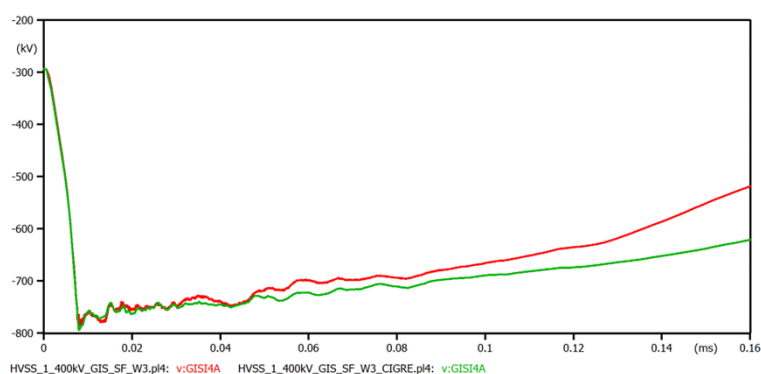
Όσον αφορά, το κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης του υποσταθμού HVSS1 και αφού προσομοιώθηκαν οι καταγεγραμμένες πραγματικές τιμές σε σχέση με τις προσεγγίσεις CIGRE με βάση τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε πως οι προσεγγίσεις των κυματομορφών CIGRE δίνουν συστηματικά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις πραγματικές κυματομορφές. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα γραφήματα για την κάθε κυματομορφή ξεχωριστά για την είσοδο του υποσταθμού 400 kV GIS (HVSS1).



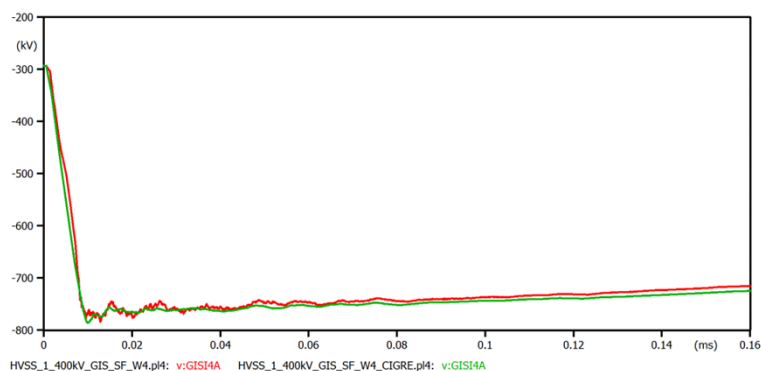
Σχήμα 45: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



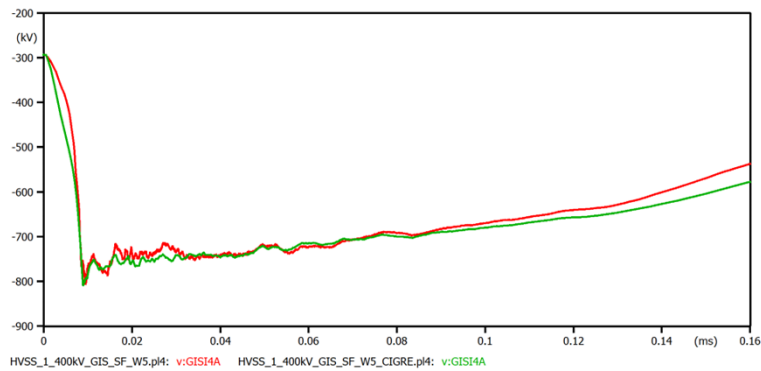
Σχήμα 46: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



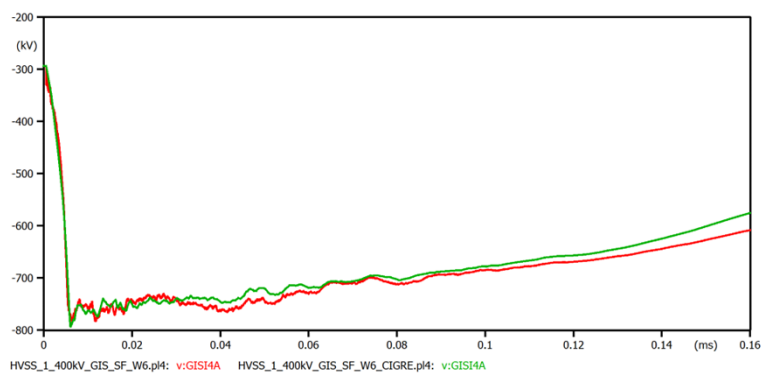
Σχήμα 47: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



Σχήμα 48: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

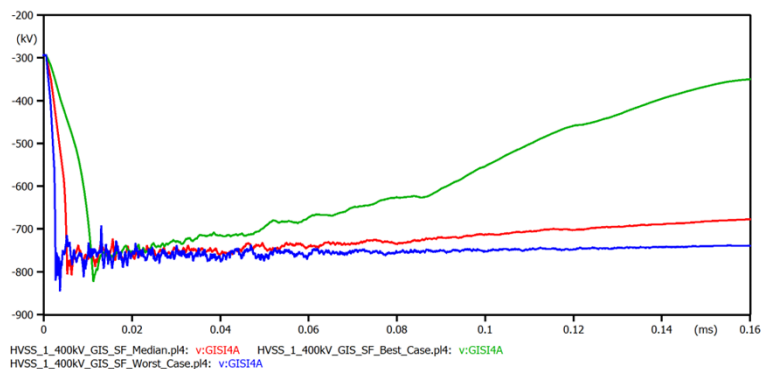


Σχήμα 49: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



Σχήμα 50: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS1 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

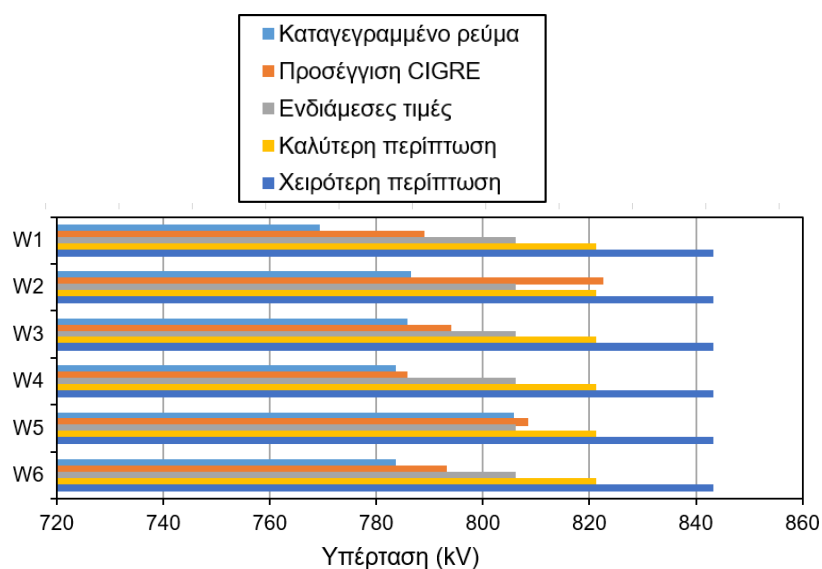
Στη συνέχεια μελετήθηκαν πάλι οι τρεις περιπτώσεις που είχαν μελετηθεί και στην ανάστροφη διάσπαση και διαπιστώθηκε πως η χειρότερη περίπτωση (Worst Case) δίνει αρκετά αυξημένες τιμές συγκριτικά με τις άλλες δύο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 51.



Σχήμα 51: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (σφάλμα θωράκισης).

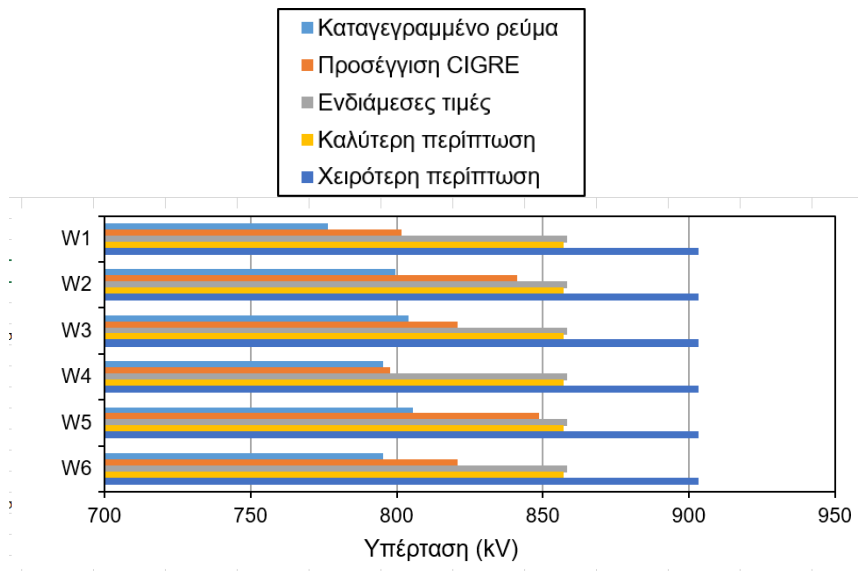
Μελετήθηκαν κάποιοι κόμβοι (είσοδος υποσταθμού GIS, έξοδος υποσταθμού GIS, μετασχηματιστής) στους οποίους φαίνεται καλύτερα ποιες κυματομορφές παρουσιάζουν αυξημένες τιμές κορυφής.

Στον κόμβο εισόδου GISIN4A όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 52 φαίνεται πως η κυματομορφή της χειρότερης περίπτωσης εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις πραγματικές κυματομορφές, τις προσεγγίσεις CIGRE καθώς και την ενδιάμεση και καλύτερη περίπτωση. Η καλύτερη περίπτωση όπως φαίνεται και από το διάγραμμα παρουσιάζει συστηματικά μεγάλες τιμές σε σχέση με τις πραγματικές κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE. Εξαιρέση αποτελεί η W2_CIGRE στην οποία η ενδιάμεση περίπτωση παρουσιάζει αυξημένες τιμές σε ορισμένους κόμβους. Τέλος η καλύτερη περίπτωση δεν εμφανίζει μεγάλες τιμές στην προσέγγιση W2_CIGRE σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές.



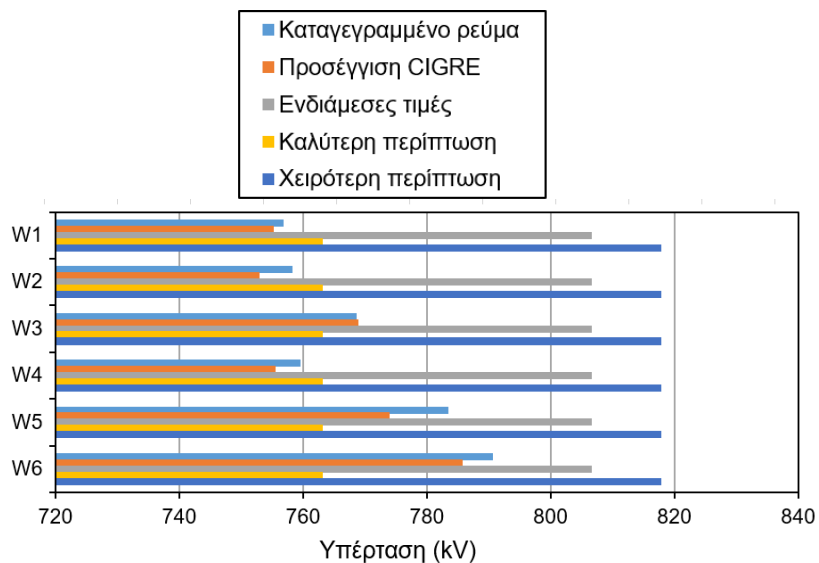
Σχήμα 52: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου GISIN4A του υποσταθμού HVSS1 (σφάλμα θωράκισης).

Στον κόμβο εξόδου GISO1A όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα η χειρότερη περίπτωση παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές, τις προσεγγίσεις CIGRE και τις άλλες δύο περιπτώσεις. Η ενδιάμεση περίπτωση επίσης εμφανίζει συστηματικά μεγάλες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE, εκτός από την περίπτωση W5_CIGRE όπου εκεί παρουσιάζονται αυξημένες τιμές σε ορισμένους κόμβους.



Σχήμα 53: Διάγραμμα για τον εξόδου κόμβο GISO1A του υποσταθμού HVSS1 (σφάλμα θωράκισης).

Τέλος για τον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA1 η ενδιάμεση περίπτωση δίνει συστηματικά μεγάλες τιμές συγκριτικά με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE. Το ίδιο ισχύει και για την χειρότερη κυματομορφή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 54 όπου και αυτή δίνει αρκετά υψηλές τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές.



Σχήμα 54: Διάγραμμα για τον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA1 του υποσταθμού HVSS1 (σφάλμα θωράκισης)

5.2 Υποσταθμός GIS 132 kV

Στη συνέχεια στον δεύτερο υποσταθμό με μόνωση αερίου και επίπεδο τάσης 132 kV προσομοιώνονται δύο περιπτώσεις, κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα και στον αγωγό φάσης. Τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων θα αναλυθούν ξεχωριστά παρακάτω.

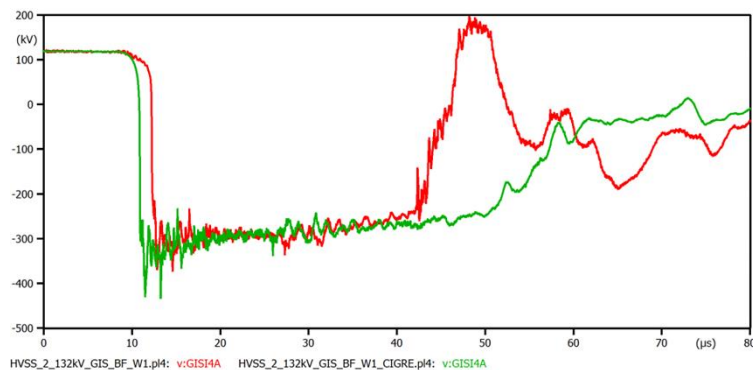
5.2.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Μετά την προσομοίωση που έγινε στον δεύτερο υποσταθμό και στην περίπτωση του κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα και συμπεράσματα.

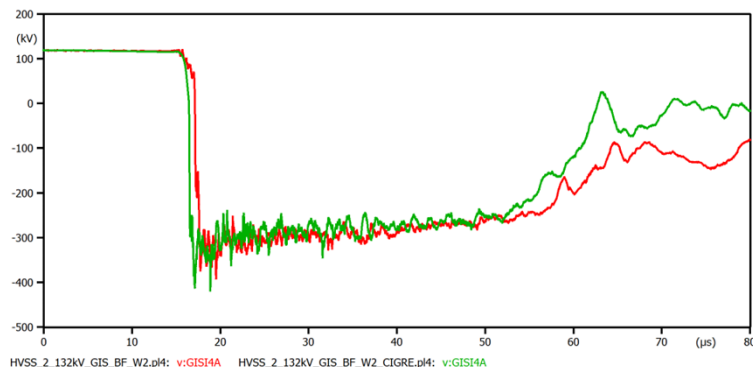
Αρχικά, όσον αφορά τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE παρατηρήθηκαν τα εξής: Η προσέγγιση της κυματομορφής W1_CIGRE όπως φαίνεται και στο Σχήμα 54 φαίνεται πως παρουσιάζει συστηματικά μεγάλες τιμές σε σχέση με την κυματομορφή W1.

Το ίδιο ισχύει και για την προσέγγιση της κυματομορφής W2_CIGRE η οποία δίνει αρκετά μεγάλες τιμές σε σχέση με την καταγεγραμμένη κυματομορφή W2 που παρουσιάζεται στο Σχήμα 55.

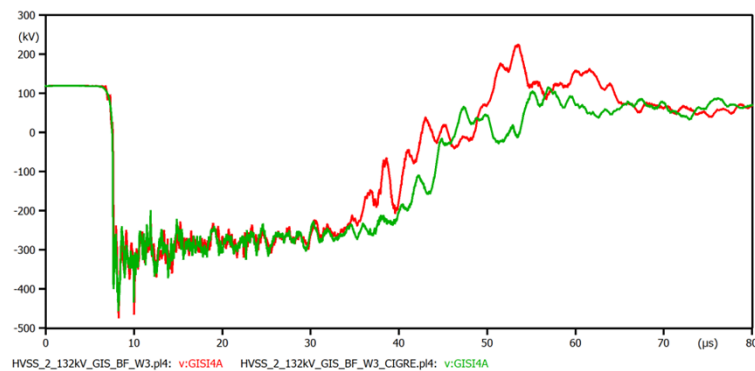
Ακριβώς το ίδιο συμπέρασμα παρατηρήθηκε και για τις κυματομορφές W3_CIGRE και W6_CIGRE οι οποίες δίνουν και αυτές μεγάλες τιμές σε σχέση με τις κυματομορφές W3 και W6 όπως φαίνεται στα Σχήματα 55 και 56.



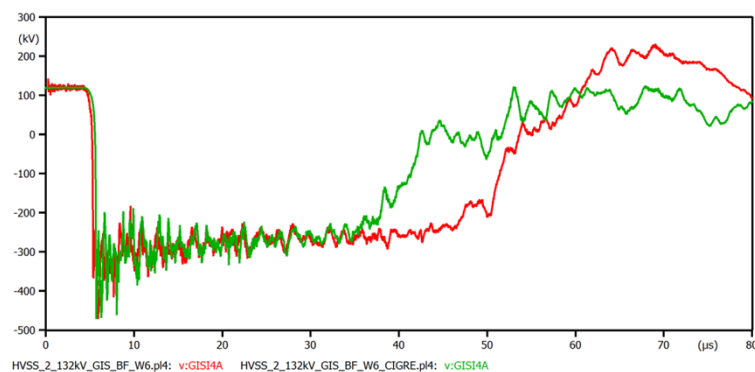
Σχήμα 55: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



Σχήμα 56: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

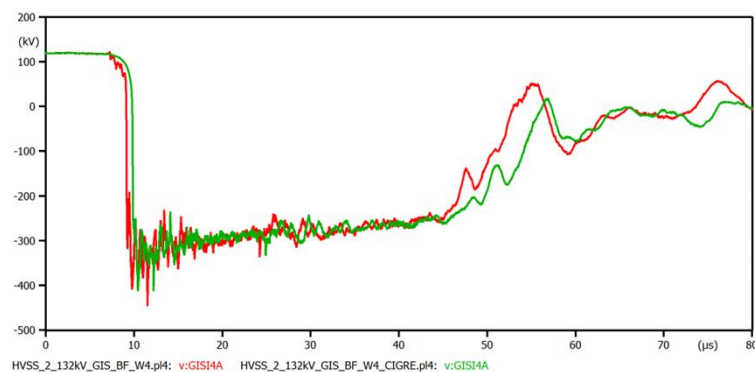


Σχήμα 57: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

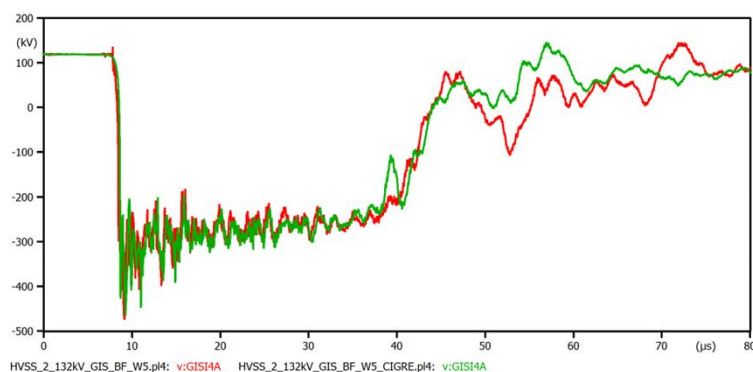


Σχήμα 58: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

Όμως, οι προσεγγίσεις των κυματομορφών W4_CIGRE και W5_CIGRE παρουσιάζουν μεγάλες τιμές σε κάποιους κόμβους και όχι συστηματικά. Αυτό φαίνεται και στα Σχήματα 59 και 60.

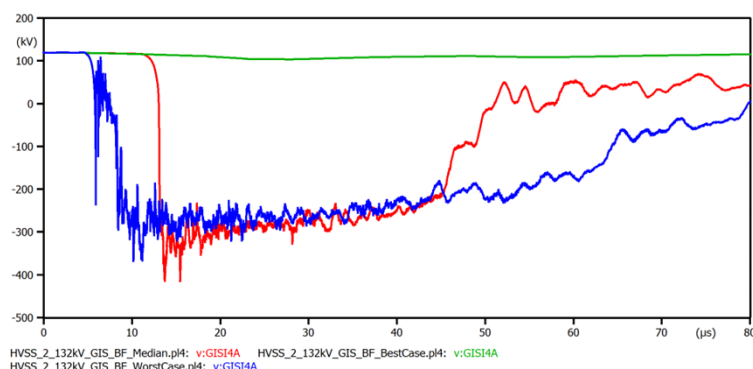


Σχήμα 59: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



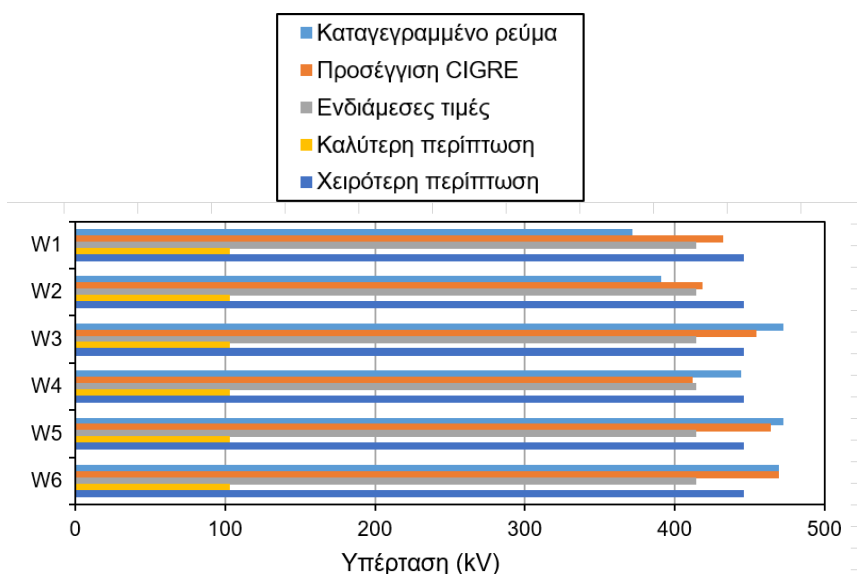
Σχήμα 60: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

Τέλος, έγινε σύγκριση μεταξύ των κυματομορφών που αντιστοιχούν σε ενδιάμεσες τιμές, στην καλύτερη και τη χειρότερη περίπτωση όπου εκεί όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα Σχήμα 61 στην κυματομορφή της καλύτερης περίπτωσης δεν παρατηρείται διάσπαση της μόνωσης και επομένως δεν εμφανίζει υπερτάσεις. Αντίθετα, η κυματομορφή για τις ενδιάμεσες τιμές παρουσιάζει συστηματικά μεγάλες τιμές σε σχέση με την κυματομορφή για τη χειρότερη περίπτωση.



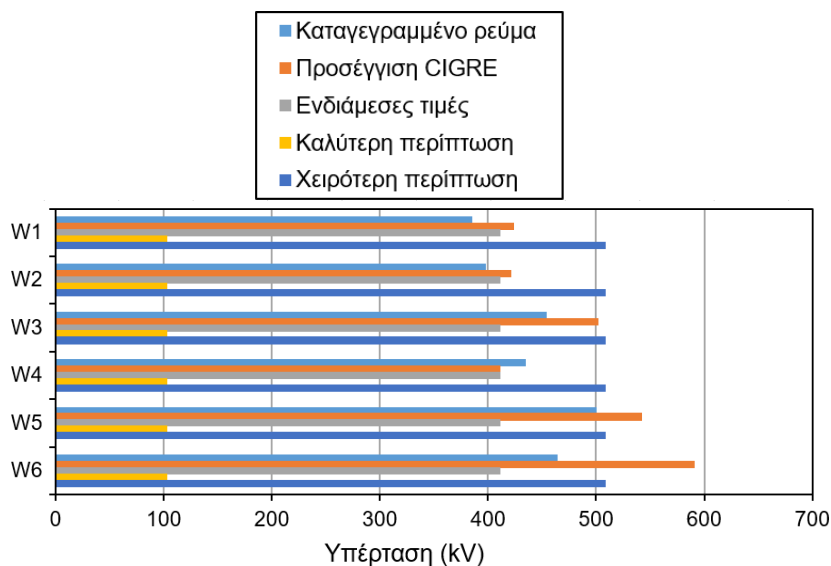
Σχήμα 61: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (ανάστροφη διάσπαση).

Αποτελέσματα παρουσιάζονται από τρεις κόμβους (εισόδου υποσταθμού, εξόδου υποσταθμού, μετασχηματιστή) οι οποίοι είχαν αρκετό ενδιαφέρον από τη σκοπιά του συντονισμού μονώσεων. Πιο αναλυτικά, για το κόμβο GISIN4A όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 62) η προσέγγιση της κυματομορφής W1_CIGRE δίνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την κυματομορφή W1. Η κυματομορφή Median παρουσιάζει μικρότερες τιμές σε σχέση με την W1_CIGRE ενώ με την W1 δίνει μεγαλύτερες τιμές. Η χειρότερη περίπτωση δίνει τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές. Σχετικά με την κυματομορφή της W2 φαίνεται πως σε σχέση με την W2_CIGRE δίνει μικρότερες τιμές, ενώ η W2_CIGRE δίνει μεγαλύτερες τιμές από την κυματομορφή της Median. Η χειρότερη περίπτωση Case φαίνεται πως δίνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές. Όσον αφορά την κυματομορφή της W3 φαίνεται πως δίνει μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τις υπόλοιπες κυματομορφές. Το ίδιο ισχύει και για την κυματομορφή W4 και για την W5. Ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι η κυματομορφή της καλύτερης περίπτωσης δίνει αρκετά μικρές τιμές καθώς δεν γίνεται διάσπαση μόνωσης οπότε δεν υπάρχουν υπερτάσεις.



Σχήμα 62: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου GISIN4A του υποσταθμού HVSS2 (ανάστροφη διάσπαση).

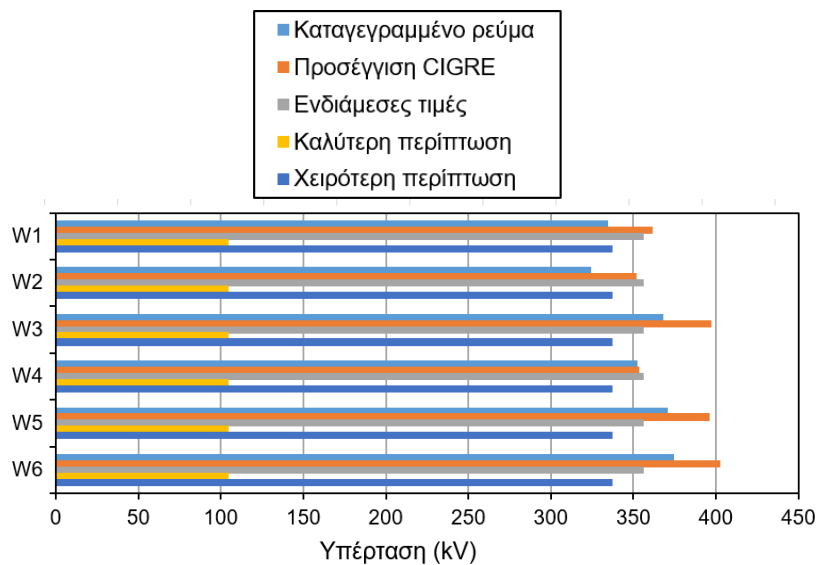
Για τον κόμβο εξόδου GISO1A, βλέποντας το Σχήμα 63 φαίνεται ότι η W1_CIGRE δίνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την W1 και τη Median. Όμως, η Worst Case δίνει ακόμα μεγαλύτερες τιμές από όλες τις κυματομορφές. Το ίδιο ισχύει και για την W2_CIGRE και W4_CIGRE. Η W3_CIGRE όπως φαίνεται δίνει αρκετά μεγάλες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές που είναι σχεδιασμένες στο διάγραμμα. Το ίδιο ισχύει και για τις κυματομορφές W5 και W6. Όπως και στον κόμβο GISIN4A έτσι και εδώ η κυματομορφή Best Case δίνει αρκετά μικρές τιμές καθώς δεν γίνεται διάσπαση μόνωσης οπότε δεν υπάρχουν υπερτάσεις.



Σχήμα 63: Διάγραμμα για τον κόμβο εξόδου GISO1A του υποσταθμού HVSS2 (ανάστροφη διάσπαση).

Τέλος, για τον κόμβο στον μετασχηματιστή TRHA όπως φαίνεται και στο Σχήμα 64 η W1_CIGRE εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με καταγεγραμμένη κυματομορφή W1, τη Median, τη Best

Case και τη Worst Case. Η κυματομορφή της Best Case δεν παρουσιάζει διάσπαση στη μόνωση όποτε δεν υπάρχουν υπερτάσεις για αυτό και οι τιμές της είναι αρκετά μικρές σε σχέση με τις άλλες κυματομορφές. Επίσης, και οι προσεγγίσεις W3_CIGRE, W5_CIGRE και W6_CIGRE εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με καταγεγραμμένη κυματομορφή W1, τη Median ,τη Best Case και τη Worst Case. Αν συγκριθούν όμως η W2_CIGRE με τη Median είναι εμφανές πως η Median εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές. Τέλος για την κυματομορφή W4 είναι φανερό πως οι τιμές των κυματομορφών Median, Worst Case και της προσέγγισής της είναι αρκετά κοντά.

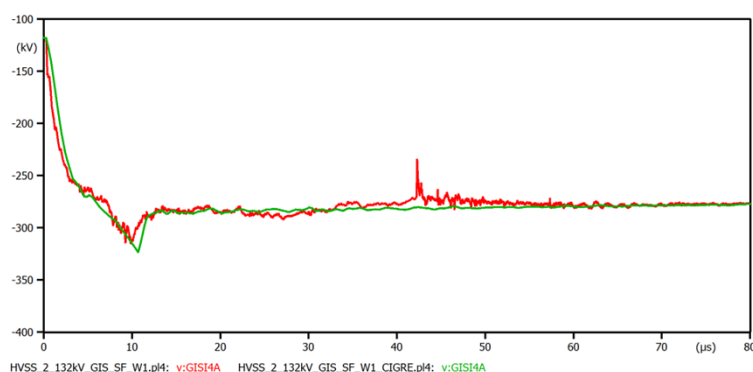


Σχήμα 64: Διάγραμμα για τον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA του υποσταθμού HVSS2 (ανάστροφη διάσπαση).

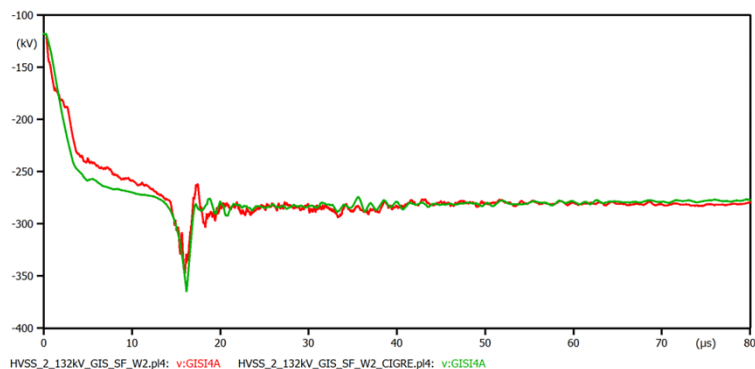
5.2.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κεραυνικό πλήγμα στον αγωγό φάσης είναι τα παρακάτω.

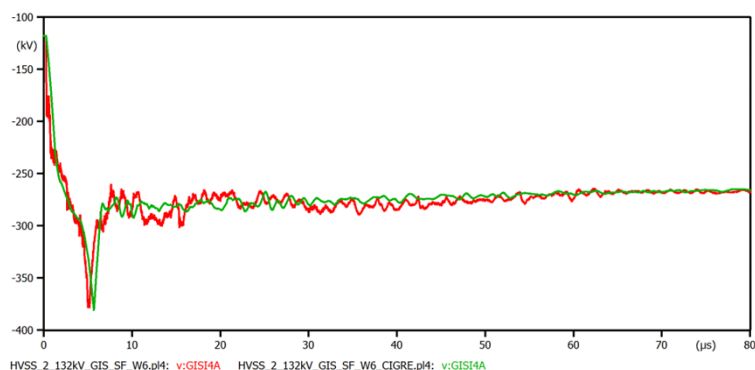
Η W1_CIGRE, W2_CIGRE και W6_CIGRE είναι εμφανές και από τα διαγράμματα που ακολουθούν ότι εμφανίζουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές τους.



Σχήμα 65: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

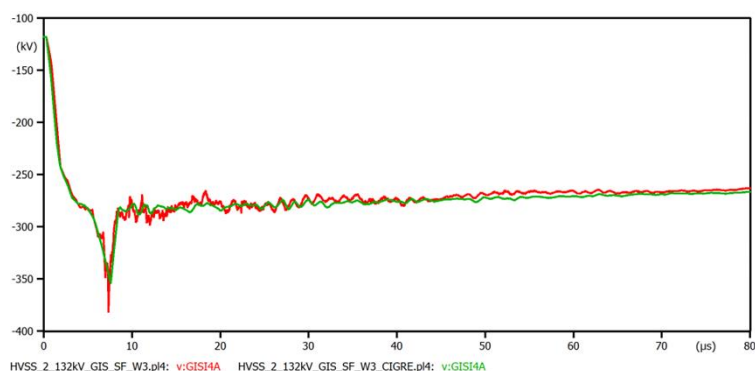


Σχήμα 66: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

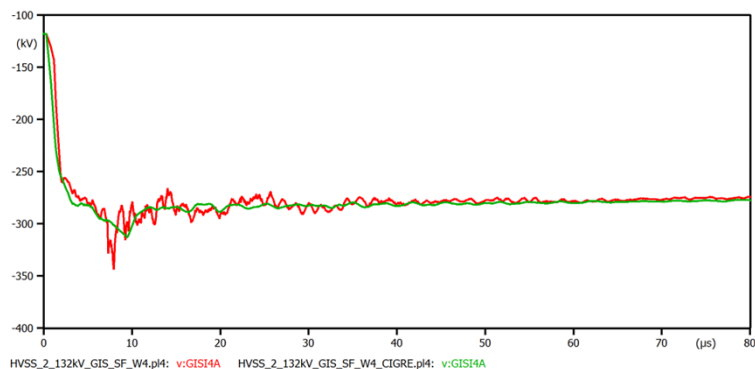


Σχήμα 67: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

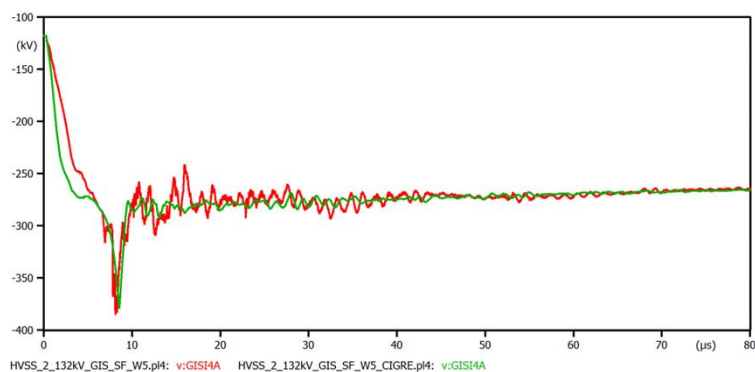
Αντίθετα, οι καταγεγραμμένες κυματομορφές W3, W4 και W5 παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις προσεγγίσεις CIGRE όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 68: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

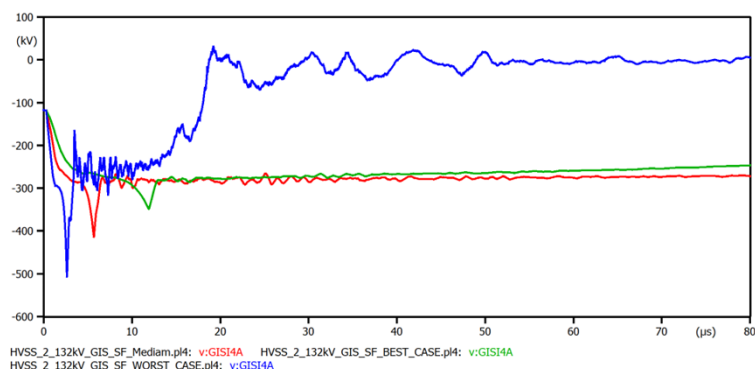


Σχήμα 69: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



Σχήμα 70: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS2 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

Τέλος συγκρίθηκαν οι τρεις περιπτώσεις Median, Best Case και Worst Case και διακρίνονται τα εξής συμπεράσματα. Η χειρότερη περίπτωση δίνει αρκετά μεγάλες υπερτάσεις σε σχέση με τις άλλες δυο κυματομορφές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 71.

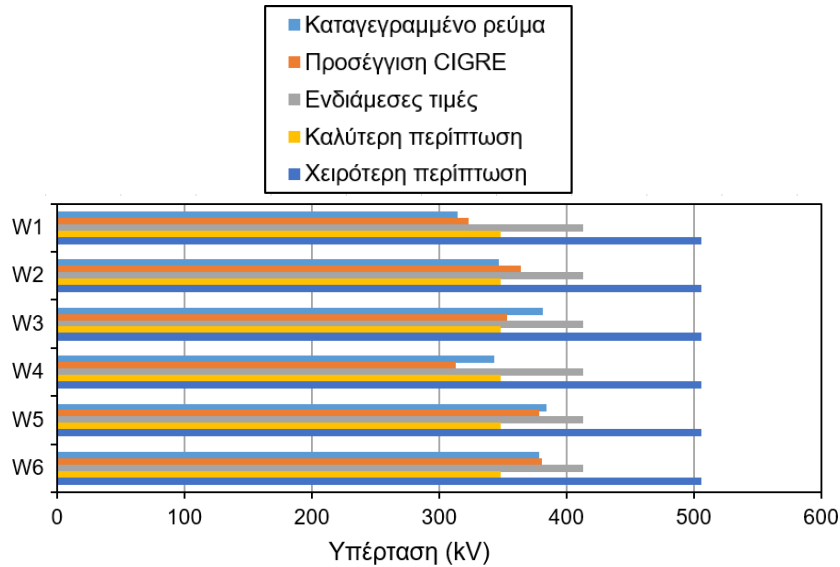


Σχήμα 71: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (σφάλμα θωράκισης).

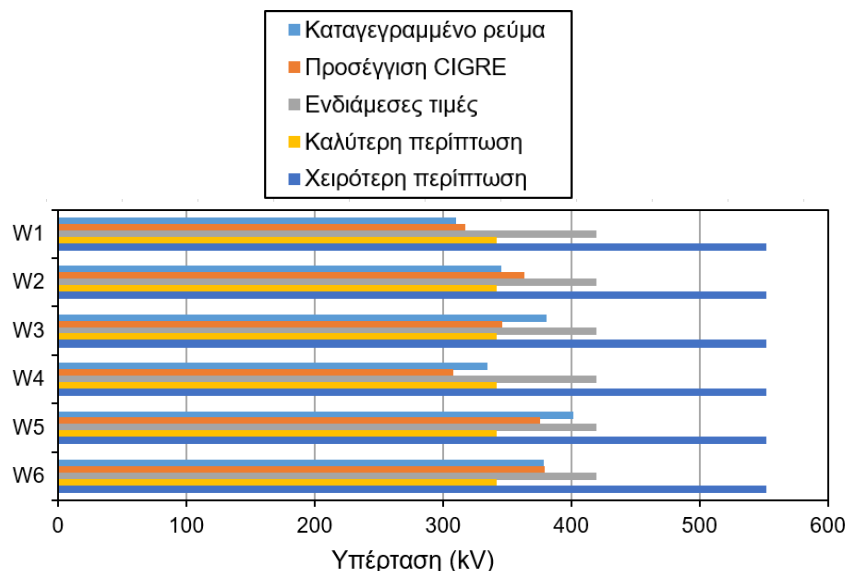
Επιπλέον, μελετήθηκαν οι παρακάτω κόμβοι και τα αποτελέσματά τους θα αναφερθούν παρακάτω. Από το Σχήμα 72 όπως φαίνεται για τον κόμβο εισόδου GISIN4A ότι σε όλες τις κυματομορφές η πρώτη κυματομορφή που δίνει μεγαλύτερη τιμή είναι η Worst Case και

έπειτα η αμέσως επόμενη κυματομορφή Median. Οι καταγεγραμμένες κυματομορφές σε σχέση με τις προσεγγίσεις του παρουσιάζουν μικρές διαφορές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκύπτει με την κυματομορφή της καλύτερης περίπτωσης η οποία είναι σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις.

Στην συνέχεια για τον κόμβο εξόδου GIS01A τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν είναι παρόμοια με τον κόμβο GISIN4A όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

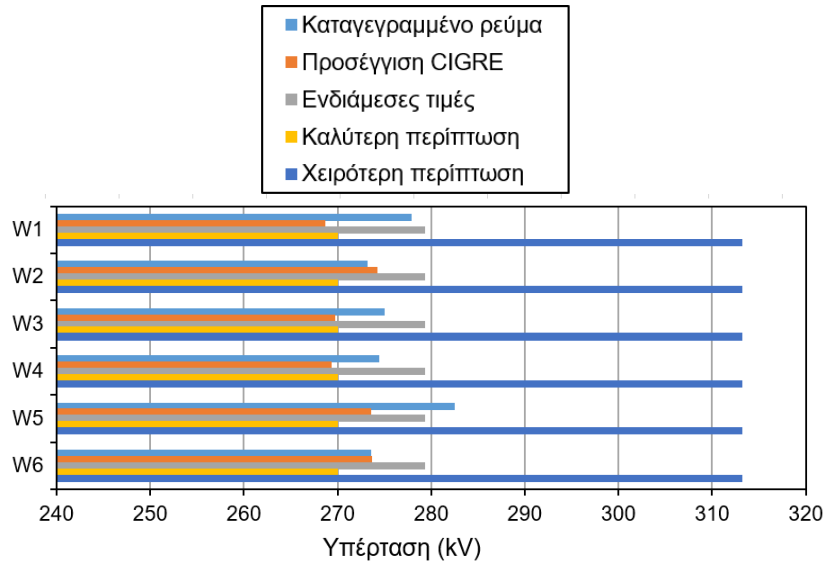


Σχήμα 72: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου GISIN4A του υποσταθμού HVSS2 (σφάλμα θωράκισης).



Σχήμα 73: Διάγραμμα για τον εισόδου κόμβο GIS01A του υποσταθμού HVSS2 (σφάλμα θωράκισης).

Τέλος για τον κόμβο στον μετασχηματιστή TRH1A τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το παρακάτω διάγραμμα είναι ακριβώς τα ίδια με τους δυο προηγούμενους κόμβους.



Σχήμα 74: Διάγραμμα για τον κόμβο TRH1A του υποσταθμού HVSS2 (σφάλμα θωράκισης).

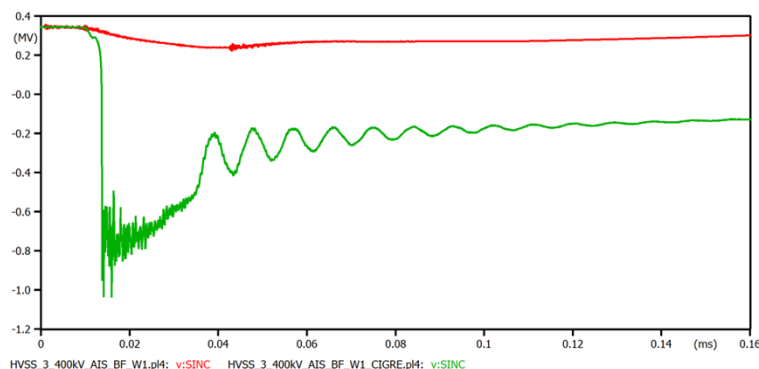
5.3 Υποσταθμός AIS 400 kV

Για τον τρίτο υποσταθμό HVSS3 με μόνωση αέρα και επίπεδα τάσης 400 kV πάλι μελετώνται δύο περιπτώσεις, οι οποίες προσομοιώνονται και εξάγονται κάποια συμπεράσματα.

5.3.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

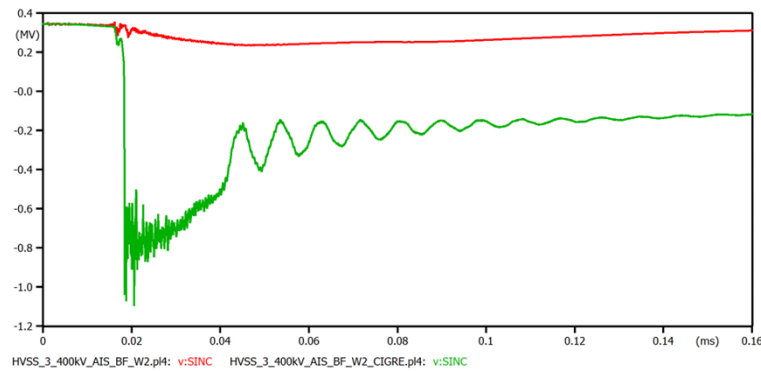
Για την προσομοίωση του υποσταθμού σε κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE είναι τα εξής:

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 74 η προσέγγιση της W1_CIGRE εμφανίζει μεγάλες τιμές σε σχέση με την καταγεγραμμένη κυματομορφή W1. Αυτό συμβαίνει διότι στη W1_CIGRE γίνεται διάσπαση στη μόνωση ενώ στη W1 δεν γίνεται.



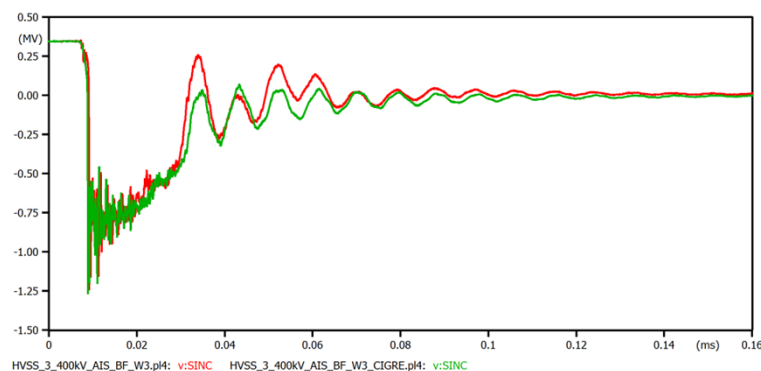
Σχήμα 75: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

Ακριβώς το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και για την W2_CIGRE σε σχέση με την καταγεγραμμένη κυματομορφή W2, παρουσιάζεται στο Σχήμα 76.

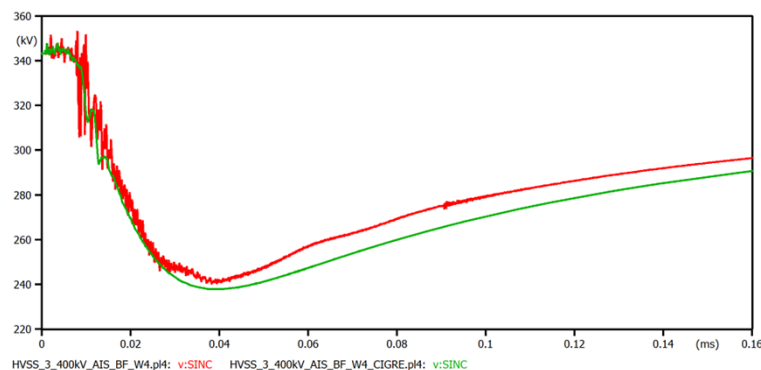


Σχήμα 76: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

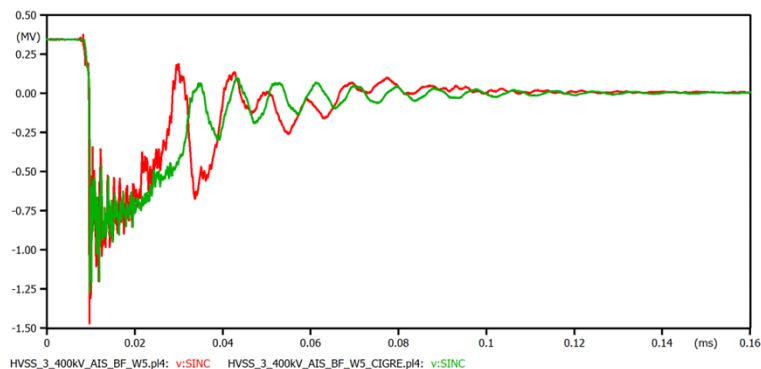
Αντίθετα, στις υπόλοιπες κυματομορφές όπου πραγματοποιείται διάσπαση και στις καταγεγραμμένες κυματομορφές και στις προσεγγίσεις CIGRE διαπιστώνεται ότι οι καταγεγραμμένες κυματομορφές παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις προσεγγίσεις τους ή το αντίθετο. Ενώ για τη W6 δεν συμβαίνει διάσπαση με την προσέγγισή της με κυματομορφή CIGRE.



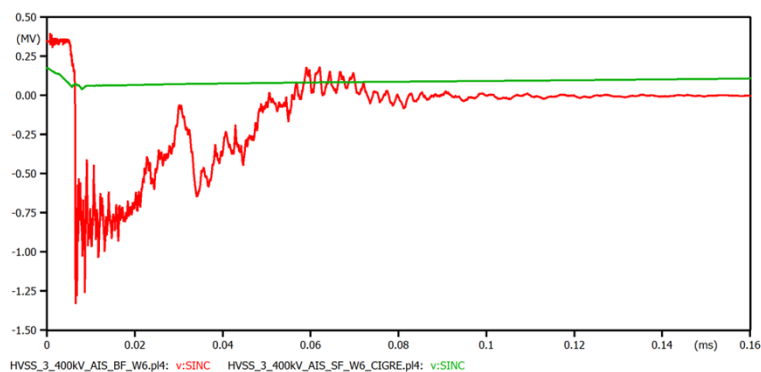
Σχήμα 77: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



Σχήμα 78: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

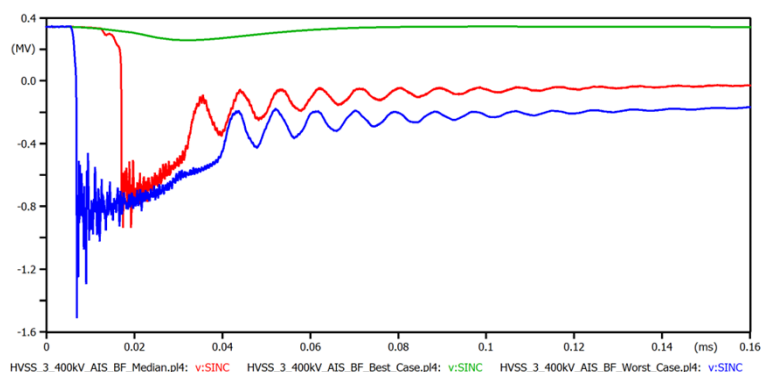


Σχήμα 79: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



Σχήμα 80: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

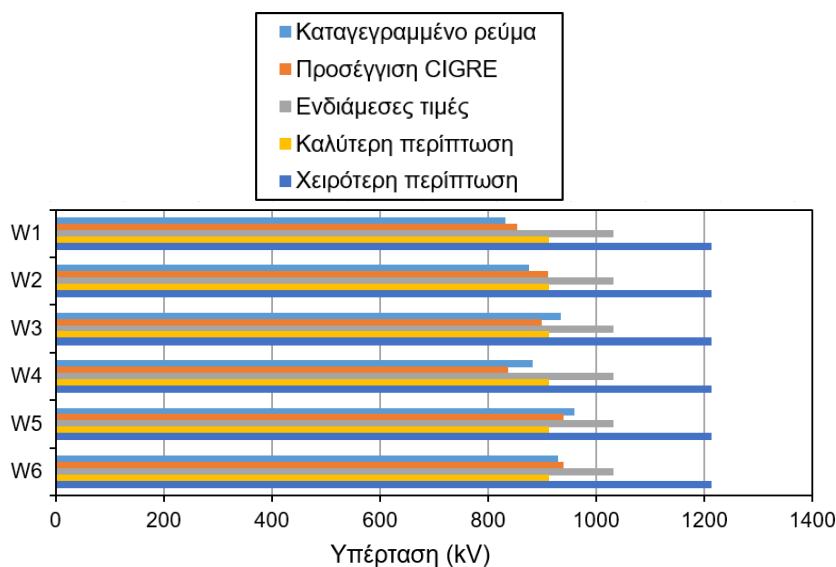
Αν συγκριθούν οι κυματομορφές Median, Best Case και Worst Case και παρατηρώντας το Σχήμα 81 φαίνεται πως η κυματομορφή Best Case δεν δημιουργεί υπερτάσεις καθώς δεν γίνεται διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς. Η κυματομορφή Worst Case δίνει μεγάλες υπερτάσεις σε σχέση με τη κυματομορφή Median.



Σχήμα 81: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (ανάστροφη διάσπαση).

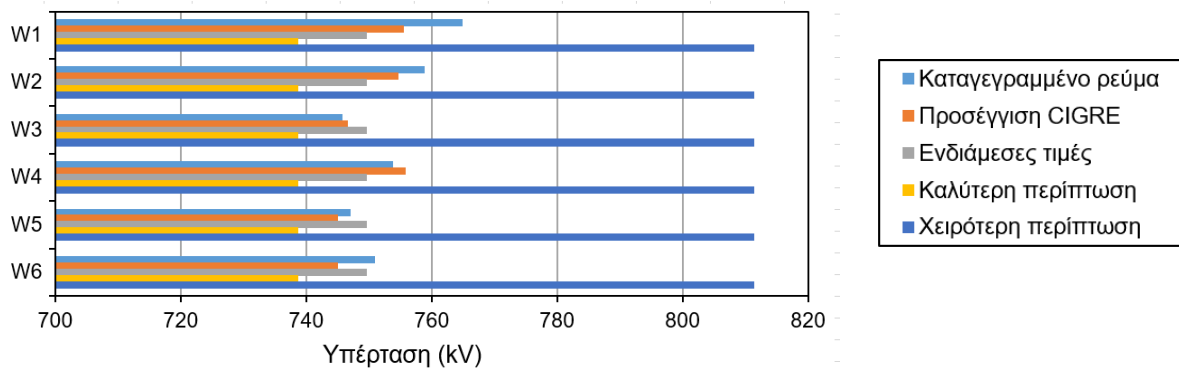
Επιπλέον, στον υποσταθμό αυτό ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασαν οι κόμβοι SINC (είσοδος υποσταθμού) και TRHC (μετασχηματιστής) των οποίων τα αποτελέσματα θα αναλυθούν παρακάτω.

Για τον κόμβο εισόδου SINC όπως φαίνεται και στο Σχήμα 82 τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι οι καταγεγραμμένες κυματομορφές W1-W4 και W6 δίνουν μικρές τιμές σε σχέση με τις προσεγγίσεις CIGRE. Αντίθετα, η κυματομορφή W5 δίνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την W5_CIGRE. Η καλύτερη περίπτωση (Best Case) στην οποία δεν δημιουργείται κάποια διάσπαση οπότε δεν υπάρχουν υπερτάσεις η τιμή που παρουσιάζει είναι σταθερή. Η ενδιάμεση κυματομορφή (Median) φαίνεται πως η τιμή της σε κάποιες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη από τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE όπως στην W4 και W4_CIGRE, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις είναι μικρότερη από την προσέγγιση CIGRE όπως στην W1_CIGRE. Τέλος, η χειρότερη κυματομορφή (Worst Case) εμφανίζει μεγάλες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές, τις προσεγγίσεις CIGRE, Median και τη Best Case.



Σχήμα 82: Διάγραμμα για τον εισόδου κόμβο SINC του υποσταθμού HVSS3 (ανάστροφη διάσπαση).

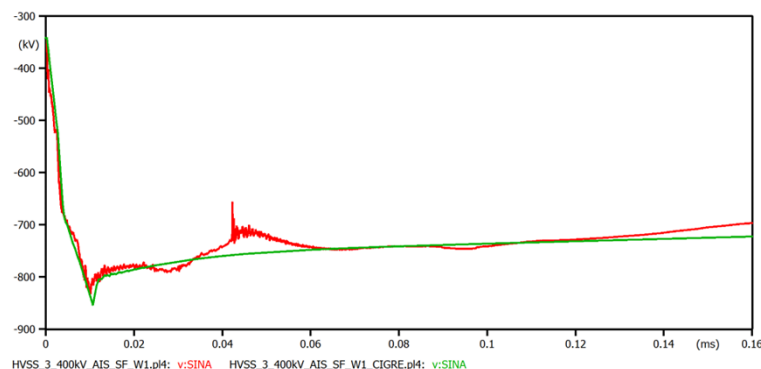
Για τον κόμβο στον μετασχηματιστή TRHC φαίνεται ότι στις περιπτώσεις των κυματομορφών W1_CIGRE, W2_CIGRE, W3_CIGRE και W5_CIGRE οι προσεγγίσεις δίνουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες τιμές των κυματομορφών αυτών. Όσον αφορά, την προσέγγιση W4_CIGRE με την κυματομορφή W4 οι τιμές που παρουσιάζουν και οι δυο είναι αρκετά κοντά. Αντίθετα, η κυματομορφή W5 δίνει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την W5_CIGRE. Η Best Case δίνει σταθερή τιμή καθώς δεν παρουσιάζει υπερτάση. Τέλος, η κυματομορφή Worst Case εμφανίζει αρκετά μεγάλες τιμές ακόμα και από την Median κυματομορφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 83.



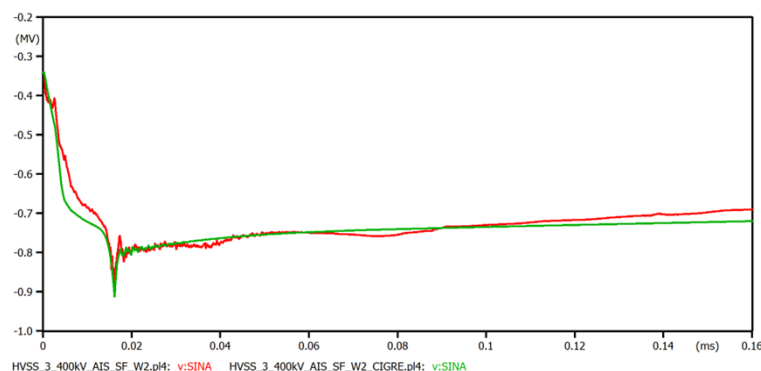
Σχήμα 83: Διάγραμμα για τον κόμβο στον μετασχηματιστή TRHC του υποσταθμού HVSS3 (ανάστροφη διάσπαση).

5.3.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

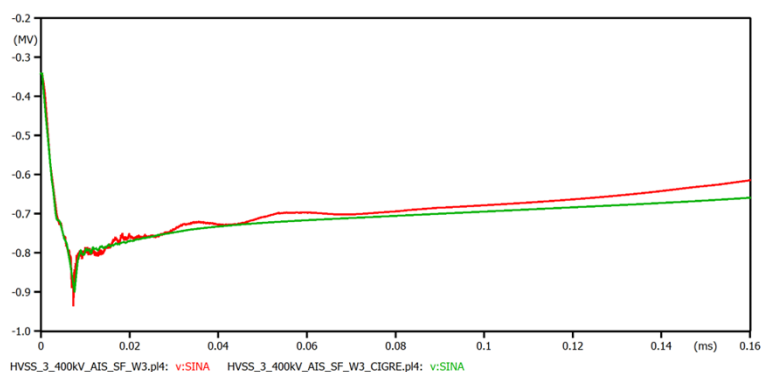
Σχετικά με την περίπτωση όπου ο υποσταθμός διαρρέεται από κεραυνικό ρεύμα στον αγωγό φάσης (απευθείας πλήγμα) φαίνεται ότι σχεδόν όλες οι προσεγγίσεις δίνουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές (Σχήματα 84-88).



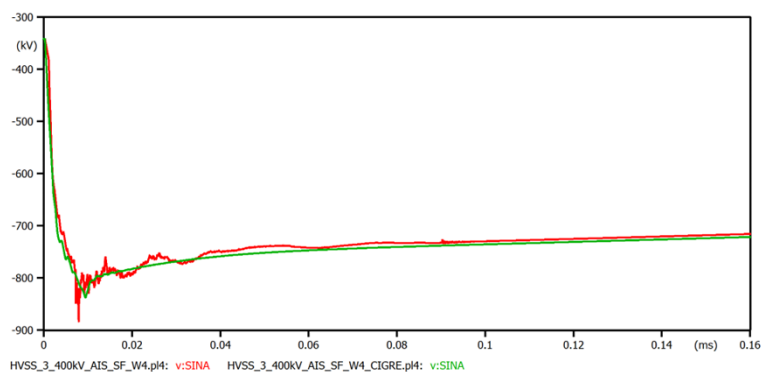
Σχήμα 84: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



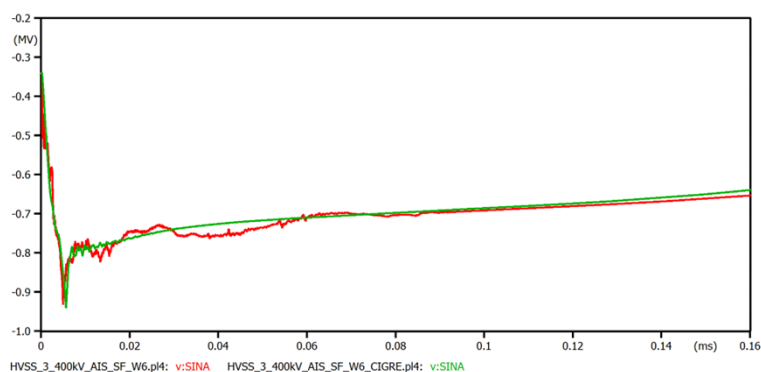
Σχήμα 85: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



Σχήμα 86: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

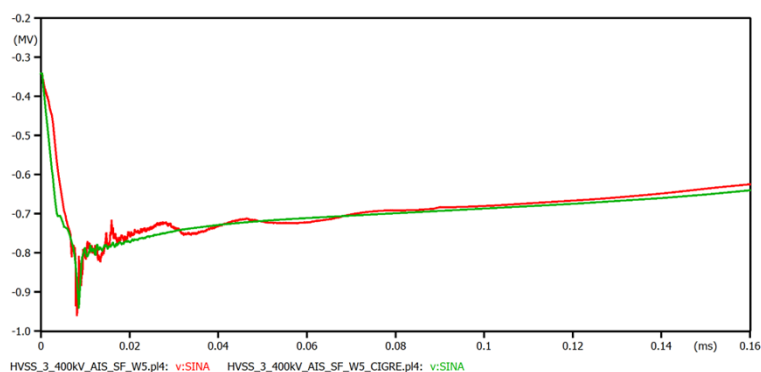


Σχήμα 87: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



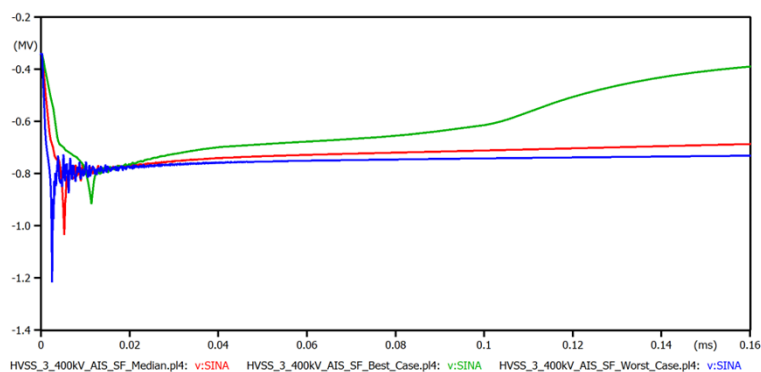
Σχήμα 88: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης)..

Η μόνη κυματομορφή η οποία δίνει αρκετά μεγάλες τιμές από τις προσεγγίσεις της είναι η W5 όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 89.



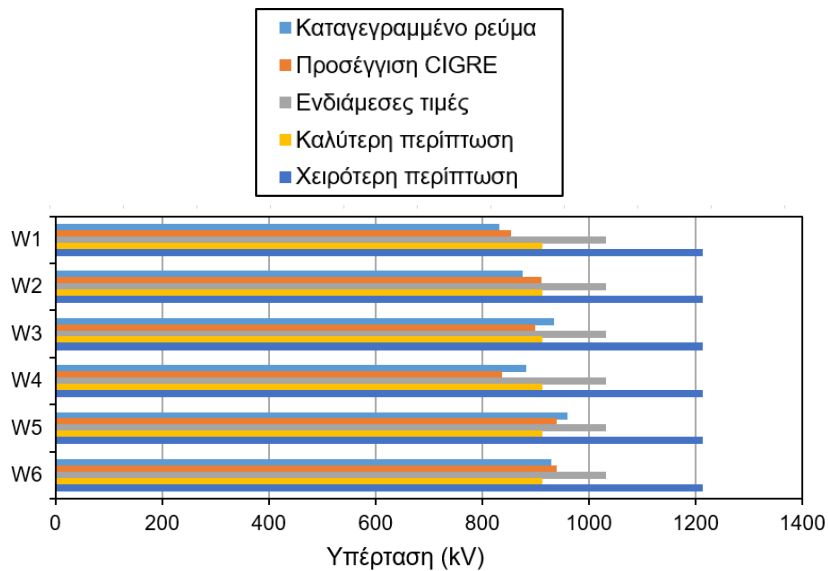
Σχήμα 89: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS3 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

Συγκρίνοντας τις κυματομορφές Median, Best Case και Worst Case παρατηρείται πως η Worst Case σχηματίζει τις μεγαλύτερες υπερτάσεις σε σχέση με τις άλλες δυο κυματομορφές.



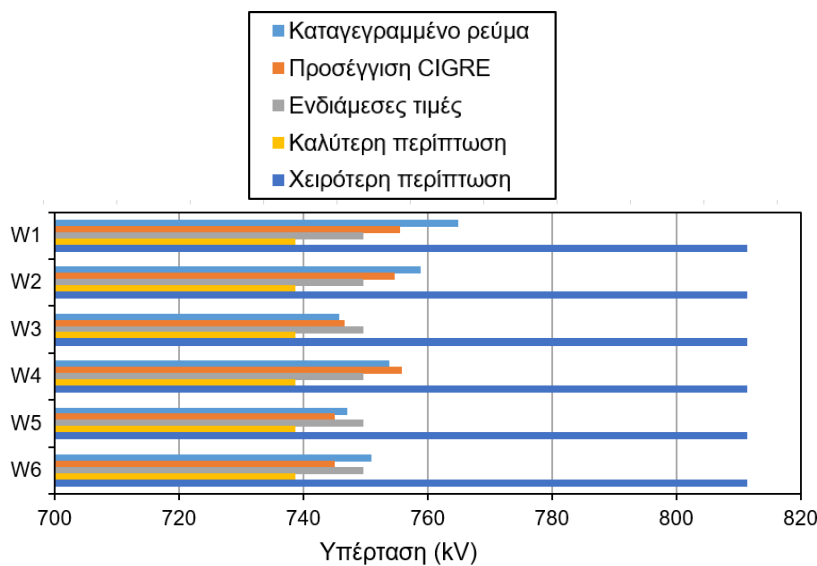
Σχήμα 90: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (σφάλμα θωράκισης).

Σχετικά με τον πρώτο κόμβο εισόδου που μελετήθηκε SINA όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα 91 οι προσεγγίσεις W1_CIGRE και W2_CIGRE δίνουν λίγο μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές W1, W2. Αντίθετα, οι καταγεγραμμένες κυματομορφές W3, W4 και W5 παρουσιάζουν αυξημένες τιμές σε σχέση με τις προσεγγίσεις τους, όμως η κυματομορφή W6 εμφανίζει κοντινές τιμές την προσέγγιση CIGRE. Σχετικά με τις κυματομορφές Median, Best Case και Worst Case οι τιμές τους είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις τιμές των καταγεγραμμένων κυματομορφών και των προσεγγίσεων τους. Αν όμως συγκριθούν τις τιμές ανάμεσα σε αυτές τις τρεις κυματομορφές θα παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα της Worst Case είναι τα μεγαλύτερα.



Σχήμα 91: Διάγραμμα για τον κόμβο εισόδου SINA του υποσταθμού HVSS3 (σφάλμα θωράκισης).

Για τον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA η κυματομορφή Worst Case δίνει τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 92. Μια άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι οι τιμές των καταγεγραμμένων κυματομορφών, οι προσεγγίσεις τους, η κυματομορφή Median και Best Case είναι πολύ κοντά με κάποιες μικρές αποκλίσεις.



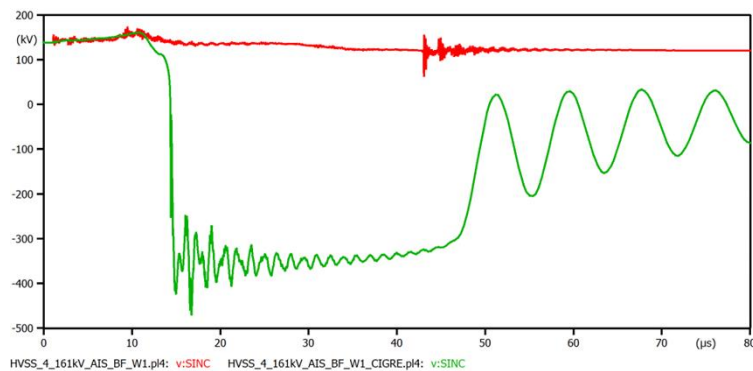
Σχήμα 92: Διάγραμμα για τον κόμβο του μετασχηματιστή TRHA του υποσταθμού HVSS3 (σφάλμα θωράκισης).

5.4 Υποσταθμός AIS 161 kV

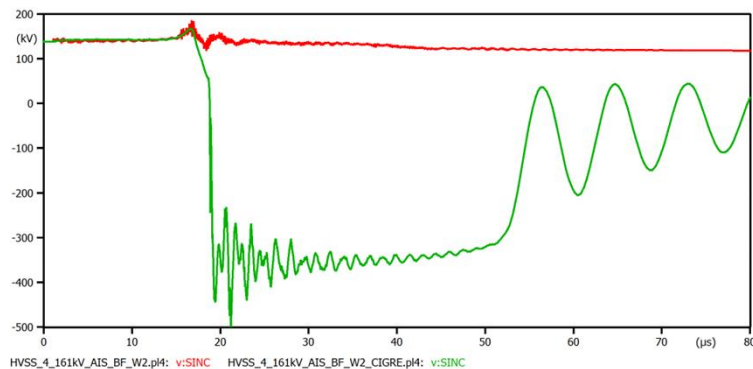
Για τον τέταρτο υποσταθμό HVSS4 με μόνωση αέρα σε επίπεδο τάσης 161 kV προσομοιώθηκαν και εδώ οι ίδιες περιπτώσεις οι οποίες θα μελετηθούν πάλι.

5.4.1 Κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα

Τα αποτελέσματα που δόθηκαν από τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE είναι ότι οι προσεγγίσεις W1_CIGRE και W2_CIGRE δίνουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις κυματομορφές W1 και W2 αντίστοιχα.

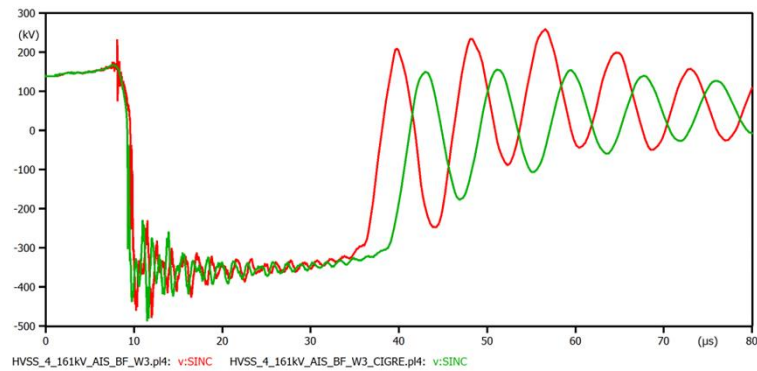


Σχήμα 93: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

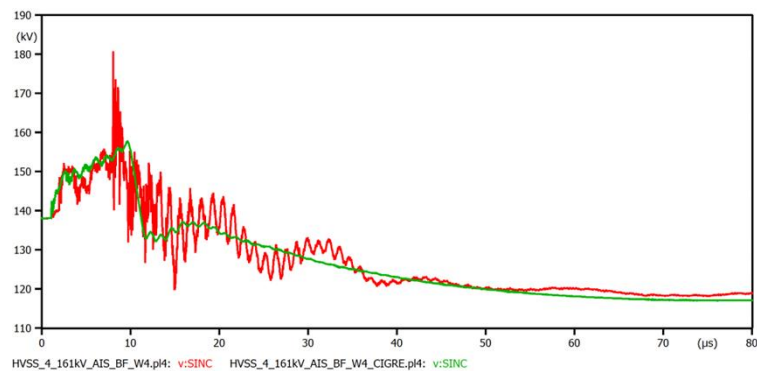


Σχήμα 94: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

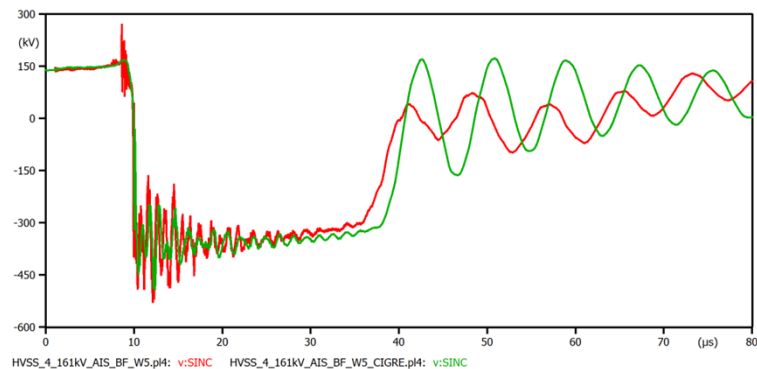
Αντίθετα, οι υπόλοιπες κυματομορφές W3-W6 παρατηρήθηκε πως εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις προσεγγίσεις CIGRE, όπως απεικονίζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



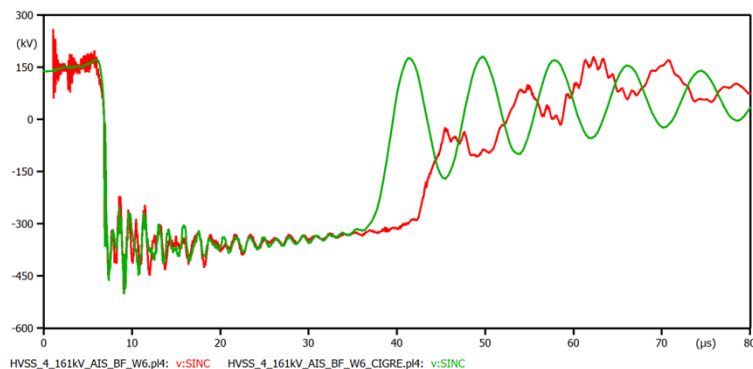
Σχήμα 95: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



Σχήμα 96: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

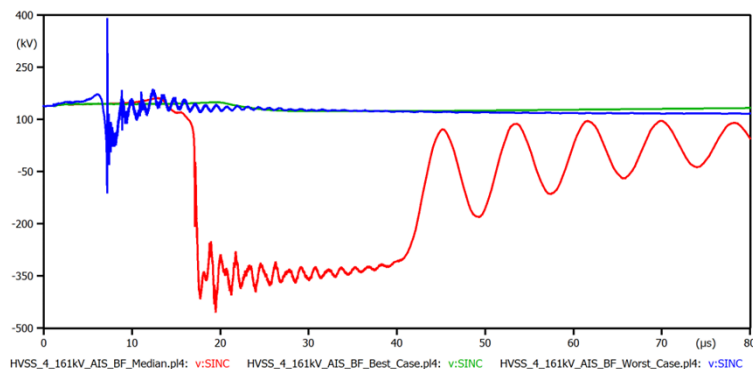


Σχήμα 97: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).



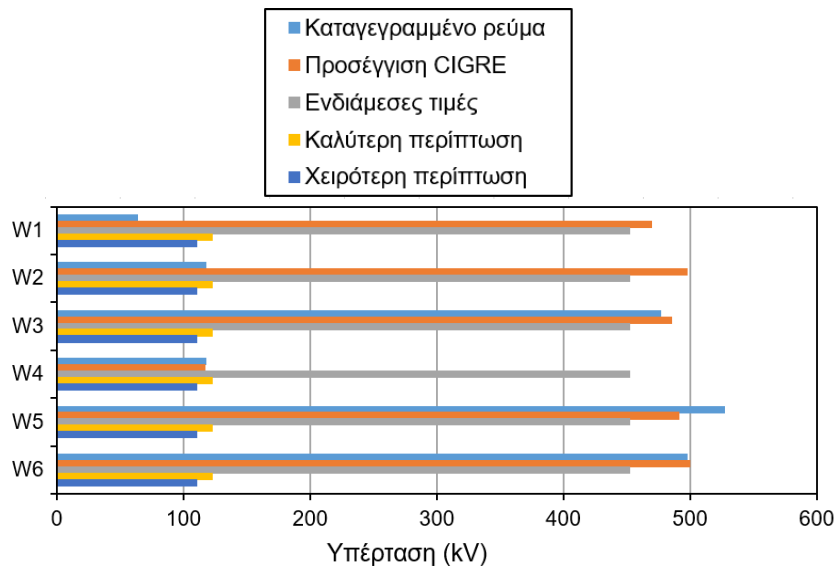
Σχήμα 98: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (ανάστροφη διάσπαση).

Συγκρίνοντας τις κυματομορφές Median, Best Case και Worst Case όπως απεικονίζονται και στο Σχήμα 99 φαίνεται πως η κυματομορφή Median δίνει τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις άλλες δυο κυματομορφές.



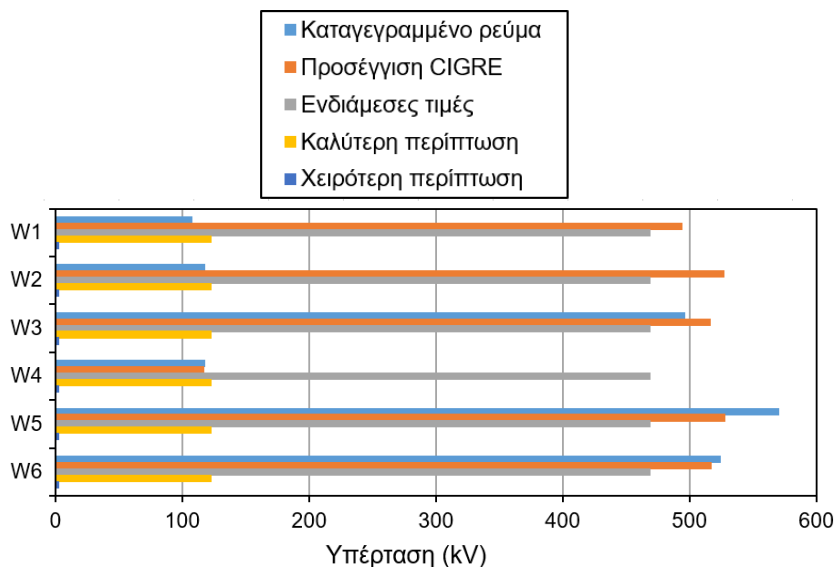
Σχήμα 99: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (ανάστροφη διάσπαση).

Στον κόμβο εισόδου SINC όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 100 οι προσεγγίσεις CIGRE στις τρεις πρώτες κυματομορφές εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές υπερτάσεων σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές, την κυματομορφή Median, την Best Case και τη Worst Case. Έπειτα, η κυματομορφή W4 δημιουργεί μικρότερες τιμές υπερτάσεων συγκριτικά με τις υπόλοιπες κυματομορφές. Σχετικά με την κυματομορφή W5 και τις υπόλοιπες κυματομορφές που συγκρίνονται φαίνεται πως η καταγεγραμμένη κυματομορφή W5 είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες. Το ίδιο συμβαίνει και για την προσέγγιση της W6_CIGRE.



Σχήμα 100: Απεικόνιση διαγράμματος για τον εισόδου κόμβο SINC του υποσταθμού HVSS4 (ανάστροφη διάσπαση).

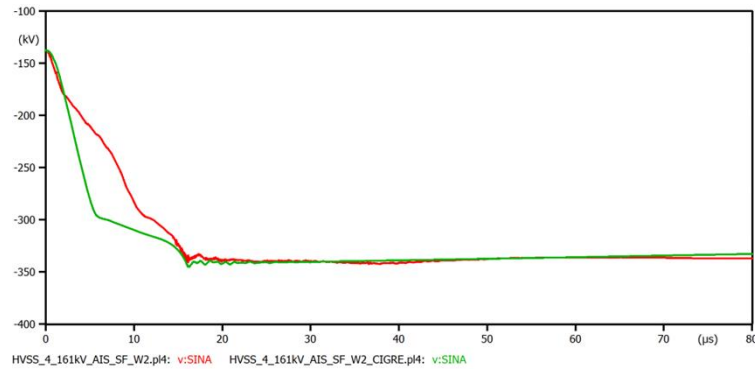
Για τον κόμβο του μετασχηματιστή GSUT ένα κοινό που συμβαίνει και στις έξι γραφικές κυματομορφές είναι ότι η κυματομορφή της Worst Case δίνει πολύ μικρές τιμές υπερτάσεων με αποτέλεσμα να μην απεικονίζονται καθόλου στο Σχήμα 101. Οι προσεγγίσεις CIGRE των κυματομορφών W1-W3 έχουν μεγαλύτερες τιμές υπερτάσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές που παρουσιάζονται. Όμως, οι καταγεγραμμένες κυματομορφές W5, W6 σε σχέση με τις αντίστοιχες προσεγγίσεις CIGRE έχουν μεγαλύτερες υπερτάσεις. Τέλος, η κυματομορφή W4 και η προσέγγιση W4_CIGRE φαίνεται πως έχουν πολύ κοντινές τιμές υπερτάσεων.



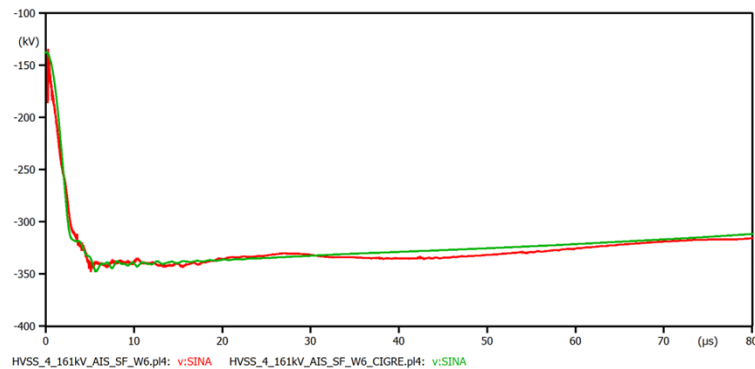
Σχήμα 101: Απεικόνιση του κόμβου του μετασχηματιστή GSUT του υποσταθμού HVSS4 (ανάστροφη διάσπαση).

5.4.2 Κεραυνικό πλήγμα σε αγωγό φάσης

Για την περίπτωση όπου ο υποσταθμός διαρρέεται από κεραυνικό ρεύμα στον αγωγό φάσης λόγω απευθείας πλήγματος είναι φανερό ότι οι προσεγγίσεις W2_CIGRE και W6_CIGRE δίνουν μεγαλύτερες τιμές υπερτάσεων σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές W2 και W6.

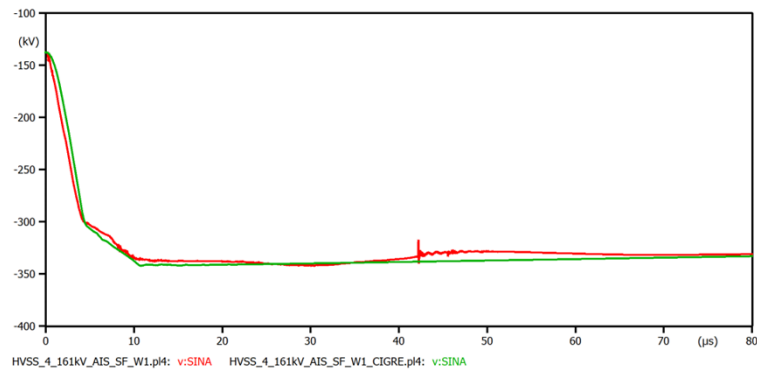


Σχήμα 102: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W2 μαζί με την κυματομορφή W2_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

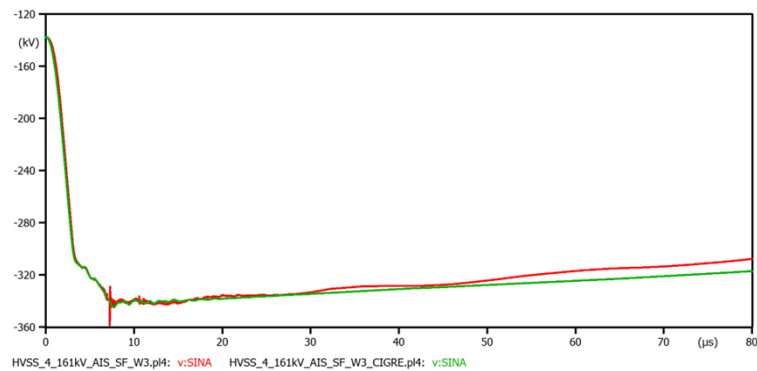


Σχήμα 103: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W6 μαζί με την κυματομορφή W6_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης)..

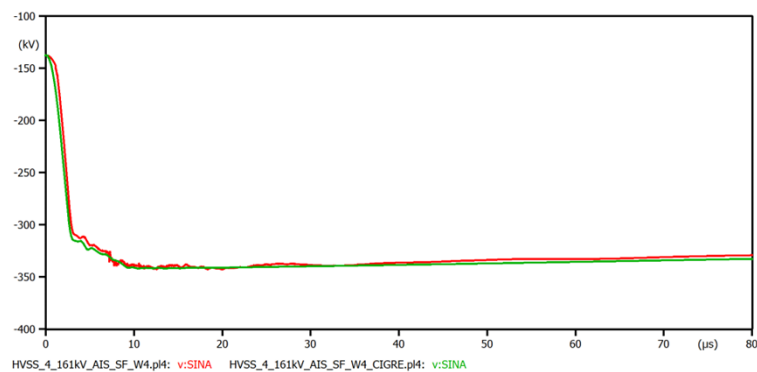
Αντίθετα, στις υπόλοιπες περιπτώσεις των κυματομορφών δηλαδή W1, W3-W5 παρατηρείται πώς σε ορισμένους κόμβους υπάρχουν μεγάλες υπερτάσεις λόγω των καταγεγραμμένων κυματομορφών ενώ σε κάποιους άλλους κόμβους είναι εξαιτίας των προσεγγίσεων CIGRE.



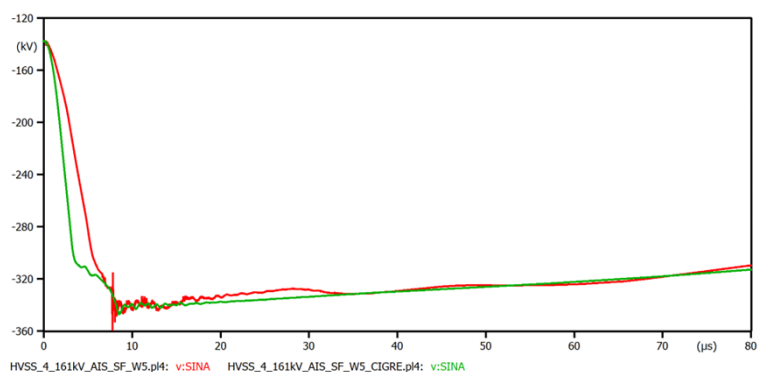
Σχήμα 104: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W1 μαζί με την κυματομορφή W1_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



Σχήμα 105: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W3 μαζί με την κυματομορφή W3_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).

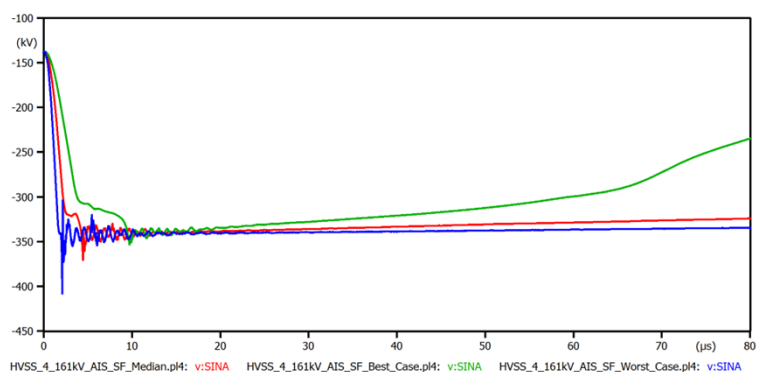


Σχήμα 106: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W4 μαζί με την κυματομορφή W4_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης).



Σχήμα 107: Υπέρταση στην είσοδο του υποσταθμού HVSS4 για την καταγεγραμμένη κυματομορφή κεραυνού W5 μαζί με την κυματομορφή W5_CIGRE που την προσεγγίζει (σφάλμα θωράκισης)..

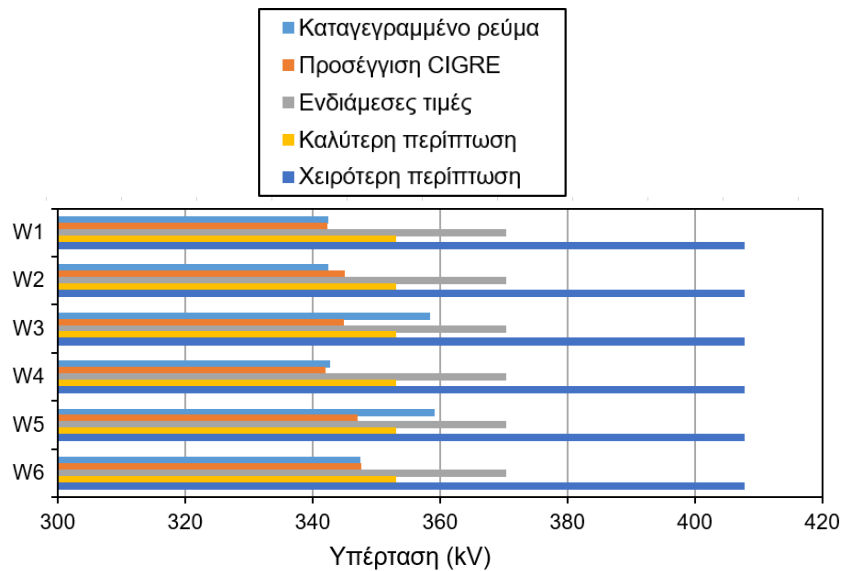
Στο Σχήμα 108 παρουσιάζονται οι τρεις κυματομορφές Median, Best Case και Worst Case όπου παρατηρείται πως η κυματομορφή Worst Case δίνει αρκετά μεγάλες υπερτάσεις σχέση με τις άλλες δυο κυματομορφές.



Σχήμα 108: Κυματομορφές υπερτάσεων ενδιάμεσης περίπτωσης, καλύτερης περίπτωσης και χειρότερης περίπτωσης (σφάλμα θωράκισης).

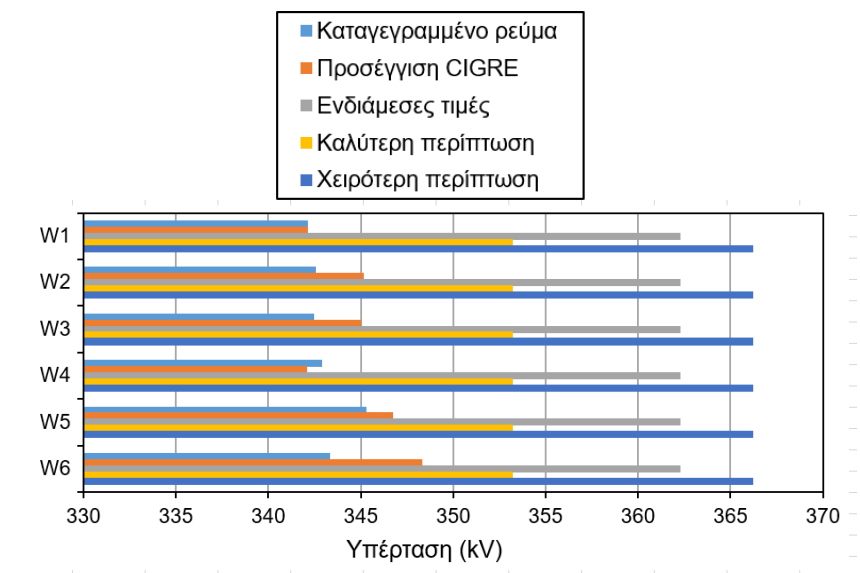
Για τον κόμβο εισόδου SINA παρατηρείται πως η κυματομορφή Worst Case εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές υπερτάσεων συγκριτικά με τις άλλες κυματομορφές που απεικονίζονται στο Σχήμα 109.

Η αμέσως επόμενη κυματομορφή που δίνει μεγάλες τιμές υπερτάσεων είναι η Median. Επιπλέον, οι καταγεγραμμένες κυματομορφές W1 και W6 μαζί με τις προσεγγίσεις W1_CIGRE και W6_CIGRE εμφανίζουν πολύ κοντινές τιμές υπερτάσεων. Αντίθετα, οι κυματομορφές W3, W4 και W5 εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες προσεγγίσεις τους. Εξάιρεση αποτελεί η W2 η οποία έχει μικρότερες τιμές από την προσέγγιση CIGRE.



Σχήμα 109: Απεικόνιση του κόμβου εισόδου SINA του υποσταθμού HVSS4 (σφάλμα θωράκισης).

Για τον κόμβο του μετασχηματιστή GSUTA φαίνεται πως η Worst Case δίνει αρκετά μεγάλες υπερτάσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές που παρουσιάζονται. Η αμέσως επόμενη κυματομορφή που δίνει μεγάλες τιμές είναι η Median. Στη συνέχεια, η κυματομορφή W1 με την W1_CIGRE δίνουν αρκετά κοντινές τιμές υπερτάσεων. Επίσης, οι προσεγγίσεις των κυματομορφών W2_CIGRE, W3_CIGRE, W5_CIGRE και W6_CIGRE παρουσιάζουν μεγάλες τιμές υπερτάσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες κυματομορφές. Τέλος, η W4 κυματομορφή δίνει αυξημένες υπερτάσεις συγκριτικά με την W4_CIGRE.



Σχήμα 110: Απεικόνιση του κόμβου του μετασχηματιστή GSUTA του υποσταθμού HVSS4 (σφάλμα θωράκισης).

5.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Αφού αναλύθηκαν όλα τα αποτελέσματα των υποσταθμών που προσομοιώθηκαν και στις δύο περιπτώσεις (πλήγμα στον πυλώνα και πλήγμα στον αγωγό φάσης), μπορεί να γίνει ένας σχολιασμός των αποτελεσμάτων που έδωσαν οι υποσταθμοί. Στο σημείο αυτό να τονισθεί πώς μόνο την πρώτη περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των τιμών των υπερτάσεων μεταξύ των υποσταθμών διότι όλοι οι υποσταθμοί δέχονται υπερτάσεις με το ίδιο ρεύμα κορυφής το οποίο είναι 200 kA ενώ στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος σε αγωγό φάσης (σφάλμα θωράκισης) ο κάθε υποσταθμός έχει διαφορετικό μέγιστο ρεύμα λόγω της γεωμετρίας των πυλώνων των γραμμών μεταφοράς. Βέβαια, μπορεί να γίνει ποιοτική σύγκριση (όχι ποσοτική).

Όσον αφορά τον πρώτο και τον δεύτερο υποσταθμό (HVSS1 και HVSS2) οι οποίοι έχουν ίδια μόνωση (GIS) αλλά διαφορετικό επίπεδο τάσης 400 kV και 132 kV και μόνωσης αντίστοιχα τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Η κυματομορφή που αντιστοιχεί στις ενδιάμεσες τιμές (Median) ενδέχεται να εμφανίζει και στους δυο υποσταθμούς μεγαλύτερες υπερτάσεις συγκριτικά με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις προσεγγίσεις τους με την κυματομορφή της CIGRE, ιδίως για το πλήγμα στον αγωγό φάσης.
- Η κυματομορφή που αντιστοιχεί στη χειρότερη περίπτωση για τη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής (Worst Case) στον πρώτο υποσταθμό εμφανίζει συστηματικά μεγάλες υπερτάσεις σε σχέση με τις πραγματικές κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE, εξαίρεση αποτελεί η καταγεγραμμένη κυματομορφή W6 στην οποία εμφανίζει μεγάλες υπερτάσεις σε ορισμένους κόμβους. Αντίθετα, στον δεύτερο υποσταθμό δίνει μεγάλες τιμές υπερτάσεων μόνο για τις πραγματικές κυματομορφές W1 και W2 ενώ στις υπόλοιπες κυματομορφές καθώς και στις προσεγγίσεις εμφανίζει σε ορισμένους κόμβους.
- Σχετικά με τις πραγματικές κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE ακόμα και αν οι δυο υποσταθμοί έχουν διαφορετικά επίπεδα τάσης και μόνωσης παρατηρήθηκε ότι η W1_CIGRE και η W2_CIGRE παρουσιάζουν υψηλές τιμές υπερτάσεων και στις δυο περιπτώσεις. Επίσης, η W4_CIGRE και W5_CIGRE δίνει υψηλές τιμές σε ορισμένους κόμβους σε σχέση με την W4 και W5. Γενικά, στις περισσότερες από τις μισές περιπτώσεις που εξετάστηκαν οι προσεγγίσεις της CIGRE οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές υπερτάσεων.
- Στην περίπτωση της κυματομορφής που αντιστοιχεί στην καλύτερη περίπτωση όσον αφορά τη διάσπαση της μόνωσης της γραμμής (Best Case) για το πλήγμα στον πυλώνα (ανάστροφη διάσπαση) δεν προκύπτει κάποιο συμπέρασμα καθώς δεν δημιουργείται διάσπαση επομένως δεν υφίστανται υπερτάσεις σε κανέναν υποσταθμό. Για το πλήγμα στον αγωγό φάσης ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα ακόμα και μεγαλύτερες υπερτάσεις από τις πραγματικές κυματομορφές και τις προσεγγίσεις τους.
- Μία ακόμη διαφορά ανάμεσα σε αυτούς τους δυο υποσταθμούς GIS είναι ότι εξαιτίας των διαφορετικών επιπέδων τάσης και της τοπολογίας τους οι τιμές υπερτάσεων στον πρώτο υποσταθμό είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τον δεύτερο υποσταθμό όπου το επίπεδο τάσης και το βασικό επίπεδο μόνωσης είναι μικρότερο. Αυτό σχετίζεται με τη μεγαλύτερη

παραμένουσα τάση των εκτροπέων υπέρτασης που προστατεύουν τον εξοπλισμό του υποσταθμού των 400 kV, ο οποίος έχει μεγαλύτερο επίπεδο μόνωσης. Συγκεκριμένα οι εκτροπείς υπέρτασης περιορίζουν τις υπερτάσεις οδηγώντας το κεραυνικό ρεύμα στη γείωση του υποσταθμού.

Στη συνέχεια για τον τρίτο και τέταρτο υποσταθμό (HVSS3 και HVSS4) οι οποίοι έχουν και αυτοί ίδια κατηγορία μόνωσης (AIS) και διαφορετικά επίπεδα τάσης 400 kV και 161 kV αντίστοιχα, προκύπτουν τα εξής:

- Η κυματομορφή Median παρουσιάζει και στους δυο υποσταθμούς υψηλές υπερτάσεις λόγω κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα σε σχέση με τις πραγματικές κυματομορφές W1, W2, W4 καθώς και στην προσέγγιση W4_CIGRE. Στην περίπτωση πλήγματος στον αγωγό φάσης οι υπερτάσεις για την κυματομορφή αυτή ενδέχεται να είναι μεγαλύτερες.
- Η κυματομορφή Worst Case στον τρίτο υποσταθμό εμφανίζει υψηλές υπερτάσεις στις κυματομορφές W1, W2, W4, W4_CIGRE, ενώ στον τέταρτο υποσταθμό εμφανίζει υψηλή υπέρταση μόνο στην W1_CIGRE για κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα. Στην περίπτωση πλήγματος στον αγωγό φάσης οι υπερτάσεις της κυματομορφής Worst Case είναι μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες.
- Επιπλέον, οι προσεγγίσεις W1_CIGRE και W2_CIGRE εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές W1 και W2. Ωστόσο, γενικά οι προσεγγίσεις των πραγματικών κυματομορφών με την κυματομορφή της CIGRE ενδέχεται να οδηγήσουν σε μεγαλύτερες ή μικρότερες υπερτάσεις ανάλογα με τον κόμβο του υποσταθμού και την περίπτωση που εξετάζεται.
- Στην κυματομορφή Best Case δεν δημιουργείται διάσπαση στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στον πυλώνα οπότε δεν υφίστανται υπερτάσεις. Για το πλήγμα στον αγωγό φάσης ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα ακόμα και μεγαλύτερες υπερτάσεις από τις πραγματικές κυματομορφές και τις προσεγγίσεις τους.
- Η διαφορά ανάμεσα σε αυτούς τους δυο υποσταθμούς είναι ότι στον τρίτο υποσταθμό λόγω της διαφορετικής τάσης λειτουργίας τους και το επίπεδο μόνωσής τους κάποιες κυματομορφές παρουσιάζουν μεγάλες υπερτάσεις σε αντίθεση με τον τέταρτο υποσταθμό. Αυτό σχετίζεται με τη μεγαλύτερη παραμένουσα τάση των εκτροπέων υπέρτασης που προστατεύουν τον εξοπλισμό του υποσταθμού των 400 kV.

Όσον αφορά τώρα τους υποσταθμούς οι οποίοι έχουν ίδιο επίπεδο τάσης το οποίο είναι στα 400 kV προκύπτει ότι ο πρώτος υποσταθμός ο οποίος έχει μόνωση αερίου οι υπερτάσεις που υπολογίστηκαν είναι μικρότερες από τις υπερτάσεις στον τρίτο υποσταθμό με μόνωση αέρα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη διαφορετική τοπολογία των δύο υποσταθμών, στην ύπαρξη καλωδίων ισχύος, στη διαφορετική κυματική αντίσταση των ζυγών και στα διαφορετικά χαρακτηριστικά και τη θέση εγκατάστασης των εκτροπέων υπέρτασης. Η θέση εγκατάστασης των εκτροπέων παίζει σημαντικό ρόλο καθώς όσο αυξάνεται η απόστασή τους από το σημείο ενδιαφέροντος, αυξάνεται και η αναπτυσσόμενη υπέρταση σε αυτό λόγω μεγαλύτερης πτώσης τάσης στους αγωγούς σύνδεσης του εκτροπέα με το σημείο αλλά και με το σύστημα γείωσης.

Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η περίπτωση Best Case δεν παρουσιάζει υπερτάσεις σε κανέναν από τους τέσσερις υποσταθμούς για κεραυνικό πλήγμα στον πυλώνα.

Επιπλέον, έγινε έλεγχος για το αν οι υπερτάσεις του κάθε υποσταθμού υπερβαίνουν τα επίπεδα μόνωσης BIL. Όπως ήδη είναι γνωστό τα επίπεδα μόνωσης έχουν επιλεγεί με σκοπό να αντέχουν την πιθανή αύξηση τάσης πάνω από κανονικές τάσεις λειτουργίας κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Ο εκτροπέας που επιλέγεται και εγκαθίσταται πρέπει να λειτουργεί κάτω από το ελάχιστο επίπεδο μόνωσης του εξοπλισμού, συνήθως με κάποιον συντελεστή ασφαλείας, π.χ. 1.15.

Άρα, για τον πρώτο υποσταθμό και σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι φανερό πως οι υπερτάσεις δεν υπερβαίνουν το BIL του εξοπλισμού το οποίο είναι 1425 kV. Το ίδιο ισχύει και για τον δεύτερο υποσταθμό του οποίου οι υπερτάσεις δεν ξεπερνούν το BIL του εξοπλισμού που βρίσκεται στα 650 kV. Αντίθετα, στον τρίτο υποσταθμό οι υπερτάσεις σε κάποιες περιπτώσεις σε συγκεκριμένους κόμβους φαίνεται πως υπερβαίνουν το BIL του υποσταθμού που είναι 1425 kV με αποτέλεσμα ο εξοπλισμός να κινδυνεύει να καταστραφεί. Τέλος, ούτε ο εξοπλισμός του τέταρτου υποσταθμού κινδυνεύει καθώς οι υπερτάσεις δεν ξεπερνούν τα 750 kV που είναι το BIL του εξοπλισμού.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετήθηκαν κεραυνικές υπερτάσεις σε υποσταθμούς υψηλής τάσης με μόνωση αέρα (AIS) και σε υποσταθμούς με μόνωση αερίου (GIS). Προσομοιώθηκαν με το λογισμικό ATP-EMTP τέσσερις υποσταθμοί με τρία διαφορετικά επίπεδα τάσης (132 kV, 161 kV, 400 kV) για δύο περιπτώσεις κεραυνικού πλήγματος (ανάστροφη διάσπαση, πλήγμα στον αγωγό φάσης των εισερχόμενων εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας). Χρησιμοποιήθηκαν έξι πραγματικές κυματομορφές κεραυνικών ρευμάτων και οι προσεγγίσεις τους με κυματομορφές CIGRE με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της χρήσης καταγεγραμμένων κυματομορφών κεραυνικού ρεύματος σε σχέση με τις τυποποιημένες κυματομορφές που χρησιμοποιούνται συνήθως. Με τον τρόπο αυτό μελετάται η ακρίβεια της αναπαράστασης της κυματομορφής του πραγματικού κεραυνικού ρεύματος.

Επίσης, υπολογίστηκαν οι κυματομορφές του κεραυνικού ρεύματος που αντιστοιχούν στις ενδιάμεσες τιμές, καθώς και οι καλύτερες και χειρότερες περιπτώσεις για τη διάσπαση μόνωσης της γραμμής, λαμβάνοντας υπόψη τις λογαριθμικές κανονικές κατανομές των παραμέτρων της κυματομορφής του κεραυνού. Για τις κυματομορφές αυτές επιλέχθηκε και πάλι η τυποποιημένη κυματομορφή της CIGRE. Για όλες τις κυματομορφές που προσομοιώθηκαν αποθηκεύτηκαν οι αντίστοιχες κυματομορφές υπερτάσεων σε διάφορα σημεία των υποσταθμών. Από αυτές υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές των υπερτάσεων και συγκρίθηκαν με τα βασικά επίπεδα μόνωσης του εξοπλισμού, αλλά και μεταξύ τους. Από τις προσομοιώσεις και την επεξεργασία τους προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Σχετικά, με τον πρώτο και το δεύτερο υποσταθμό οι οποίοι έχουν ίδια μόνωση (GIS) αλλά διαφορετικό επίπεδο τάσης (400 kV και 132 kV) βρέθηκε ότι οι τιμές των υπερτάσεων στον πρώτο υποσταθμό (400 kV) είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το δεύτερο υποσταθμό (132 kV) καθώς στον δεύτερο το επίπεδο τάσης και το βασικό επίπεδο μόνωσης είναι μικρότερο. Αυτό σχετίζεται με τη μεγαλύτερη παραμένουσα τάση των εκτροπέων υπέρτασης που προστατεύουν τον εξοπλισμό του υποσταθμού των 400 kV και επηρεάζεται επίσης από τη διαφορετική τοπολογία τους. Σχετικά με τις πραγματικές κυματομορφές και τις προσεγγίσεις τους με την κυματομορφή της CIGRE, στις περισσότερες από τις μισές περιπτώσεις που εξετάστηκαν οι προσεγγίσεις της CIGRE οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές υπερτάσεων. Επιπλέον, η κυματομορφή που αντιστοιχεί στις ενδιάμεσες τιμές των παραμέτρων ενδέχεται να εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές και στους δυο υποσταθμούς. Η κυματομορφή της χειρότερης περίπτωσης στον πρώτο υποσταθμό δίνει αρκετά μεγάλες υπερτάσεις σε σχέση με τις πραγματικές κυματομορφές και τις προσεγγίσεις CIGRE ενώ στον δεύτερο υποσταθμό δίνει μόνο σε δύο από τις έξι πραγματικές κυματομορφές.

Όσον αφορά τον τρίτο και τέταρτο υποσταθμό (μόνωση αέρα (AIS), 400 kV και 161 kV) παρατηρήθηκε ότι και πάλι ο υποσταθμός με το χαμηλότερο επίπεδο τάσης παρουσιάζει μικρότερες υπερτάσεις. Σχετικά με τις πραγματικές κυματομορφές και τις προσεγγίσεις τους κατά CIGRE, γενικά οι προσεγγίσεις των πραγματικών κυματομορφών με την κυματομορφή της CIGRE ενδέχεται να οδηγήσουν σε μεγαλύτερες ή μικρότερες υπερτάσεις ανάλογα με τον κόμβο του υποσταθμού και την περίπτωση που εξετάζεται. Για την κυματομορφή που αντιστοιχεί ενδιάμεσες τιμές των παραμέτρων ενδέχεται να εμφανιστούν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές και στους δυο υποσταθμούς. Όσον αφορά την κυματομορφή της χειρότερης

περίπτωσης, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την περίπτωση και τον κόμβο του υποσταθμού που εξετάζεται.

Από τις υπερτάσεις που υπολογίστηκαν βρέθηκε ότι ο μόνος υποσταθμός στον οποίο οι υπερτάσεις ενδέχεται να υπερβούν το βασικό επίπεδο μόνωσης του εξοπλισμού σε κάποιες περιπτώσεις και κάποιους κόμβους είναι ο υποσταθμός 400 kV με μόνωση αέρα (AIS). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πιθανή υποβάθμιση της μόνωσης του εξοπλισμού ή/και καταστροφή της.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η γενίκευση των περισσότερων αποτελεσμάτων δεν είναι εύκολη καθώς εξαρτώνται από τον συνδυασμό της τοπολογίας των υποσταθμών και των χαρακτηριστικών τους με τα χαρακτηριστικά των κεραυνικών ρευμάτων. Γενικά, όμως μπορεί να ειπωθεί ότι για την κυματομορφή της καλύτερης περίπτωσης παρατηρήθηκε ότι σε κανέναν υποσταθμό δεν παρουσίασε υπερτάσεις για κεραυνικό πλήγμα σε πυλώνα, καθώς δεν διασπάστηκε η μόνωση της γραμμής μεταφοράς.

Εν κατακλείδι, η προσέγγιση κυματομορφών πραγματικών ρευμάτων με κυματομορφές CIGRE μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερες ή μεγαλύτερες υπερτάσεις κατά περίπτωση.

Βιβλιογραφία

- [1] High Voltage Substations, October 2020, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [2] ENMAX, Transmission and Distribution, Because as Calgary, so do our energy needs, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [3] United States Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration, Electric Power Generation, Transmission and Distribution eTool, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [4] 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.
- [5] G. G. Karay, Concept of Energy Transmission and Distribution, Chapter 8, in: L. L. Grigsby (ed.), *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*, Electric Power Engineering Handbook, 2nd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2007.
- [6] T. Krieg and J. Finn (eds.), *Substations*, CIGRE Green Books, CIGRE Study Committee B3: Substations, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019.
- [7] H. Koch, P. Grossmann, A. Arora, and D. Solhtalab, *Applications*, Chapter 8, pp. 321-399, in: H. Koch (ed.), *GIS, Gas Insulated Substations*, IEEE Press, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, UK, 2014.
- [8] P. Glaubitz, C. Siebert, and K. Zuber, Why Choose GIS?, Chapter 15, pp. 361-368, in: T. Krieg and J. Finn (eds.), *Substations*, CIGRE Green Books, CIGRE Study Committee B3: Substations, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019.
- [9] I. A. Hiskens, "Sensing solutions for assessing and monitoring power systems," *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, pp. 638-668, 2014.
- [10] BHEL, *Handbook of Switchgears*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, NY, USA, 2007.
- [11] H. Koch, *GIL, Gas-Insulated Transmission Lines*, IEEE Press, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, UK, 2012.
- [12] Π. Ντοκόπουλος, *Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, Ιανουάριος 2005.
- [13] SIEMENS ENERGY, First Sensformer Advanced in Latin America (Brazil), διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [14] WatElectrical.com, *Electrical Substation Components & their Workings*, 2018, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [15] *Electrical Articles*, Most Important Electrical Substation Equipment, 2019, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)

- [16] D. Peelo, Disconnecting Switches and Earthing Switches, Chapter 9, pp. 296-323, in: H. Ito (ed.), Switching Equipment, CIGRE Green Books, CIGRE Study Committee A3: High Voltage Equipment, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019.
- [17] Z. Liu, in Ultra – High Voltage Ac/dc Grids, External Insulation Characteristics and Insulation Coordination of UHV Transmission System, 2015, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [18] Utility Practice & Experience, Surge Protection of Substations, 2021, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [19] O. S. E. Atwa, Practical Power System and Protective Relays Commissioning, Surge Arresters Theory Testing and Commissioning, 2019, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [20] Outline of Guide for Application of Transmission Line Surge Arresters—42 to 765 kV: Extended Outline. EPRI, Palo Alto, CA: 2006. 1012313.
- [21] Y. Yoneda, Y. Koga, T. Sato, and S. Yokoyama, “A study of degradation characteristics and diagnostic method of lightning surge arrester for 6.6 kV power distribution lines,” in Proc. 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, Poland, September 2018.
- [22] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, Newnes, Oxford, England, UK, 2000.
- [23] V. Hinrichsen, *Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems: Fundamentals*, Siemens AG, Berlin, Germany, 2011.
- [24] CIGRE WG C4.301, “Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines”, CIGRE TB 440, December 2010.
- [25] N. S. Othman et al., “An overview on overvoltage phenomena in power systems,” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 557, The 1st International Conference on Mechanical Electronic and Biosystem Engineering (MEBSE 2018), December 2018, Bogor, Indonesia.
- [26] Μ. Γ. Δανίκας, Στοιχεία Υψηλών Τάσεων, Εκδόσεις Ηρόδοτος, Αθήνα, Ελλάδα, 2019
- [27] Electrical4U, Overvoltage Protection, 2020, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [28] Protection Against Overvoltages Chapter 24, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [29] M. A. Uman, The Art and Science Lightning Protection, Cambridge University Press, Cambridge, England, UK, 2008.
- [30] EasyPower, Grounding Analysis, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)
- [31] Π. Ντοκόπουλος και Δ. Λαμπρίδης, Μεταβατικά Φαινόμενα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, Νοέμβριος 1994..
- [32] Ζ. Γ. Δάτσιος, «Διερεύνηση του Φαινομένου Ιονισμού του Εδάφους γύρω από Συγκεντρωμένα Συστήματα Γείωσης: Επίδραση στην Κεραυνική Συμπεριφορά Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς

Ηλεκτρικής Ενέργειας», Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2017.

[33] S. Okabe, T. Tsuboi, and J. Takami, "Analysis of aspects of lightning strokes to large-sized transmission lines," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 1, pp. 182-191, 2011.

[34] CIGRE, Working Group SC 33 WG 01, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines", Technical Brochure 63, October 1991.

[35] Wikipedia, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#)

[36] CIGRE Working Group C4.407, "Lightning Parameters for Engineering Applications", Technical Brochure 549, August 2013.

[37] 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, October 2022, pp. 521-526, paper no. ICLP 2022-PPTDL2-6.

[38] D. G. Patsalis, Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, "Estimation of lightning overvoltages and critical currents causing flashover to a 150 kV overhead transmission line: Effects of recorded lightning current waveforms," in Proc. 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Chongqing, China, September 2022, paper no. PA-21_286.

[39] K. Berger, "Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore," J. Franklin Inst., vol. 283, no. 6, pp. 478-525, June 1967.

[40] T. Narita, T. Yamada, A. Mochizuki, E. Zaima, and M. Ishii, "Observation of current waveshapes of lightning strokes on transmission towers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp. 429-435, January 2000.

[41] J. Takami and S. Okabe, "Observational results of lightning current on transmission towers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 2, no. pp. 547-556, January 2007.

[42] 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.

[43] 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.

[44] 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.

[45] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, Z. G. Datsios, and N. C. Mavrikakis, "Effects of simulation models of overhead transmission line basic components on backflashover surges impinging on GIS

substations,” in Proc. 45th International Universities’ Power Engineering Conference (UPEC), Cardiff, Wales, August 2010, paper no. 72.

[46] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, “Impulse resistance of concentrated tower grounding systems simulated by an ATPDraw object”, in Proc. International Conference on Power Systems Transients (IPST), Delft, The Netherlands, 2011, paper no. 39.

[47] 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.

[48] 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.

[49] 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).

[50] L. Bergeron, “Du coup de bélier en hydraulique – Au coup de foudre en électricité: Méthode graphique générale,” Dunod, Paris, 1950. (in French), English translation: “Water hammer in hydraulics and wave surges in electricity,” John Wiley & Sons, New York, 1961.

[51] 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, 1999.

[52] 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, 2004.

[53] 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.

[54] 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.

[55] 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.

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

[57] ATP Rule Book. Portland, OR, USA: Canadian-American EMTP Users Group, 1997.

[58] H. W. Dommel, *Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.