



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων & Συστημάτων Αποφάσεων

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



Επίδραση Μήκους Καλωδιώσεων στην Λειτουργία Απαγωγών Υπερτάσεων σε Εγκαταστάσεις Χαμηλής Τάσης

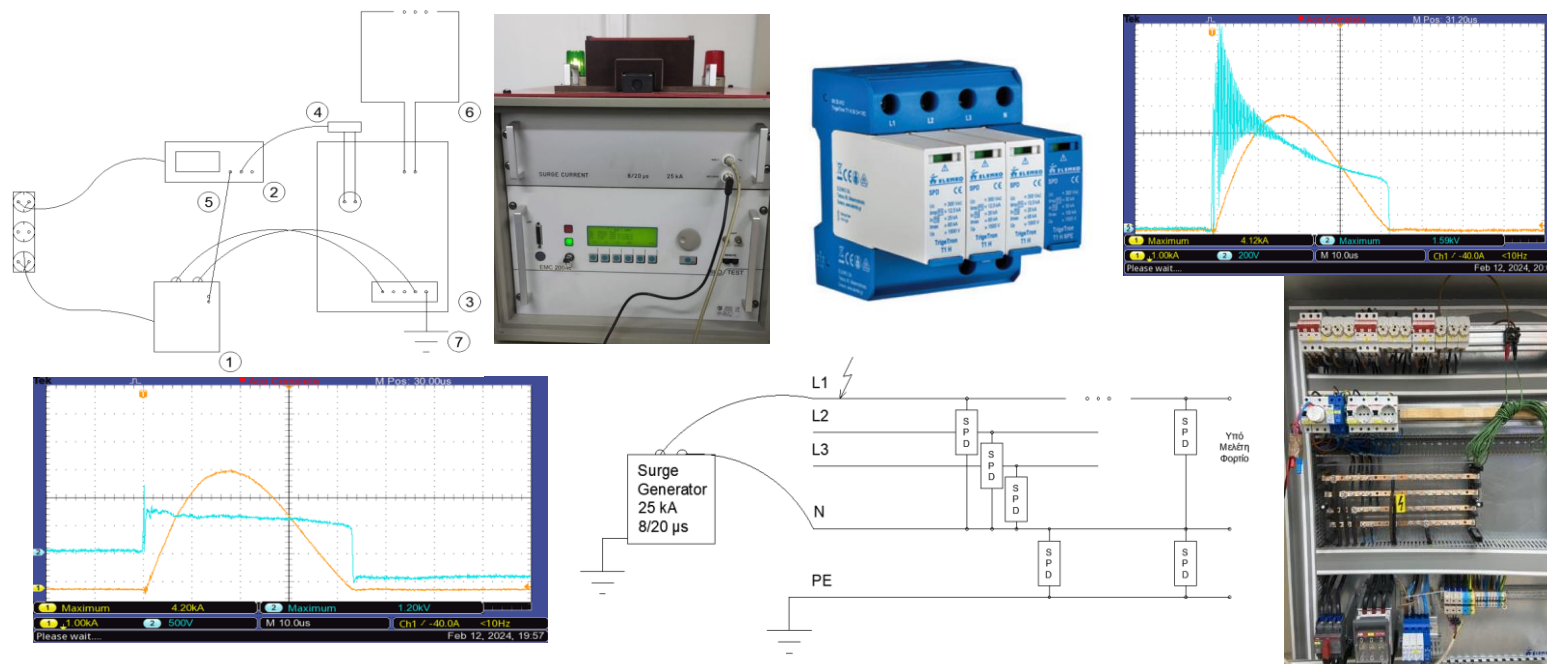
Διπλωματική Εργασία
Νίκος Μ. Φουντουλάκης

Επιβλέπων: Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

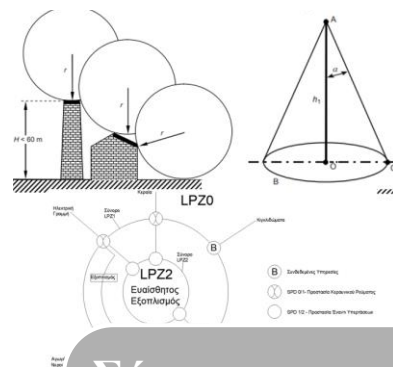
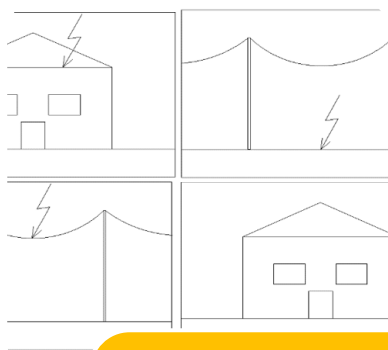
Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

- Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του μήκους καλωδιώσεων στην ορθή λειτουργία των απαγωγών υπερτάσεων σε εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης.



Εισαγωγή



Εσωτερικές και Εξωτερικές Υπερτάσεις

- Το Φαινόμενο του Κεραυνού
- Μεταβατικά και Λειτουργικά Φαινόμενα ΣΗΕ

Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας

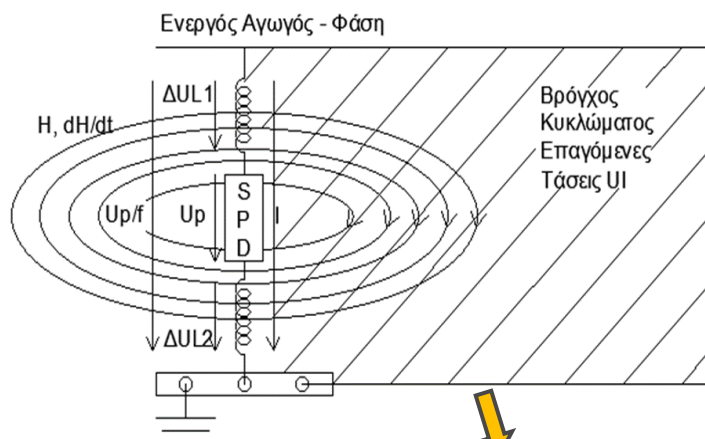
- Εξωτερικό ΣΑΠ Για απευθείας κεραυνοπληξία
- Εσωτερικό ΣΑΠ Για απευθείας κεραυνοπληξία και για εισερχόμενες από το δίκτυο υπερτάσεις

Απαγωγοί Υπερτάσεων (SPDs)

- Εκτροπή Κρουστικών Ρευμάτων
- Καταστολή Πλάτους Υπερτάσεων

Επιλογή Διατάξεων Προστασίας έναντι Υπερτάσεων

- ▶ Ένα SPD θα προστατεύει τον εξοπλισμό εάν η αποτελεσματική στάθμη προστασίας $U_{P/F}$, είναι χαμηλότερη από την διηλεκτρική αντοχή U_w του εξοπλισμού.



Η αποτελεσματική στάθμη προστασίας $U_{P/F}$ όπως παρουσιάζεται και στο πρότυπο IEC-62305-4.

| Κατηγορία Υπερτάσεων | Διηλεκτρική Αντοχή σε Κρουστική Τάση | Ονομαστική Κρουστική Τάση U_w [kV] για τάση 230/400V | Χρήση |
|----------------------|--------------------------------------|--|--|
| IV | Πολύ Υψηλή | 6 | Κοντά στην είσοδο της εγκατάστασης |
| III | Υψηλή | 4 | Κατάντη του ηλεκτρικού πίνακα |
| II | Κανονική | 2.5 | Για σταθερή εγκατάσταση, όπως οικιακές συσκευές |
| I | Ελαττωμένη | 1.5 | Για σταθερή εγκατάσταση, μόνο αν υπάρχει διάταξη προστασίας έναντι κρουστικών υπερτάσεων |

- ▶ Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-4, θα πρέπει να πληρείται μία εκ των τριών ακόλουθων προϋποθέσεων:

$U_{P/F} \leq U_w$
Μήκος κυκλώματος μεταξύ του SPD και του εξοπλισμού αμελητέο
(SPD εγκατεστημένου σε τερματικά εξοπλισμού)

$U_{P/F} \leq 0.8 U_w$
Μήκος κυκλώματος μικρότερο από δέκα μέτρα
(SPD εγκατεστημένο σε υπό πίνακα διανομής)

$U_{P/F} \leq (U_w - U_I) / 2$
Μήκος κυκλώματος μεγαλύτερο από δέκα μέτρα
(SPD εγκατεστημένο στον κύριο πίνακα διανομής στην είσοδο μιας εγκατάστασης)

**ΕΛΟΤ
60364:2020**

Το Φαινόμενο Όδευσης

«Εάν το μήκος του κυκλώματος μεταξύ του SPD και του εξοπλισμού είναι πολύ μεγάλο, η διάδοση κυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο ταλάντωσης. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ανοιχτοκυκλωμένο, μάλιστα, ενδέχεται να εμφανιστούν υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας $U_{P/F}$ του απαγωγού υπερτάσεων ($2U_{P/F}$)»

- ▶ Ουσιαστικά καλωδίωση μικρού μήκους προσεγγίζει συμπεριφορά συγκεντρωμένου στοιχείου και μεγάλου μήκους προσεγγίζει συμπεριφορά γραμμής παρουσιάζοντας φαινόμενο όδευσης.
- ▶ «Είναι περίπλοκο να εφαρμόσουμε τη θεωρία των γραμμών μεταφοράς για τη διάδοση οδεύοντων κυμάτων όταν το μήκος καλωδίωσης είναι μικρό, καθώς ο χρόνος μετώπου της υπέρτασης είναι μεγαλύτερος από τον διπλάσιο χρόνο μετάδοσης του κύματος στο καλώδιο». Στη συγκεκριμένη μελέτη καλώδιο μήκους 1m αναπαρίσταται με συγκεντρωμένο στοιχείο, ενώ καλώδια 10m και 100m με κυματική αντίσταση.
- ▶ Τόσο το πρότυπο IEC 62305-4 όσο και το IEC 61643-12 δεν παρέχουν διεξοδική αναλυτική περιγραφή της επίδρασης που έχει η αύξηση του μήκους καλωδίωσης μεταξύ των απαγωγών υπερτάσεων και του υπό προστασία φορτίου. Έτσι κρίνεται σκόπιμη η παρούσα διπλωματική εργασία.
- ▶ Υπάρχει ένα χείριστο μήκος καλωδίωσης μεταξύ του SPD και του υπό προστασία φορτίου και δεν ισχύει πως όσο πιο μεγάλο το μήκος τόσο χειρότερα προστατεύεται ένα φορτίο.

IEC 62305-4

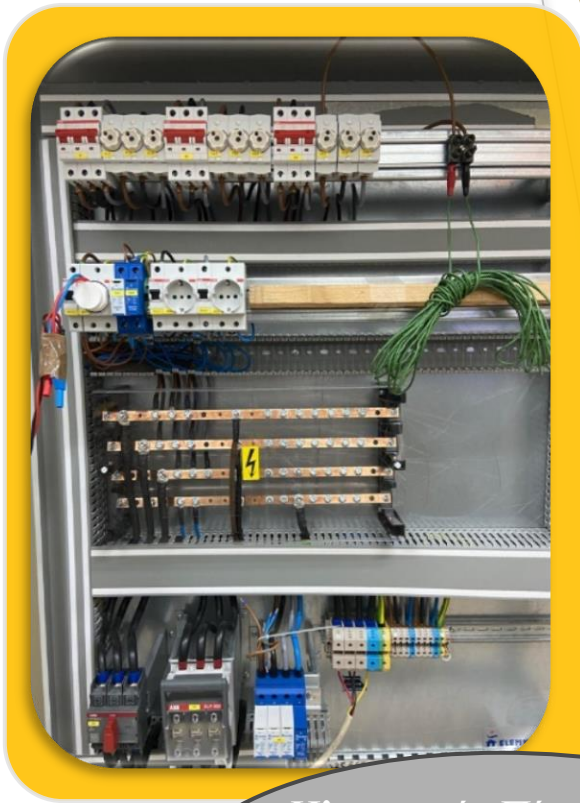
«Evaluation of the Effective Protection Distance of Low-Voltage SPD to Equipment»

Jinliang He

«Discussion on Worst Distance Between SPD and Protected Device»

Shunchao Wang

Πειραματικό Μέρος: Εξοπλισμός



Διαφορικό Probe

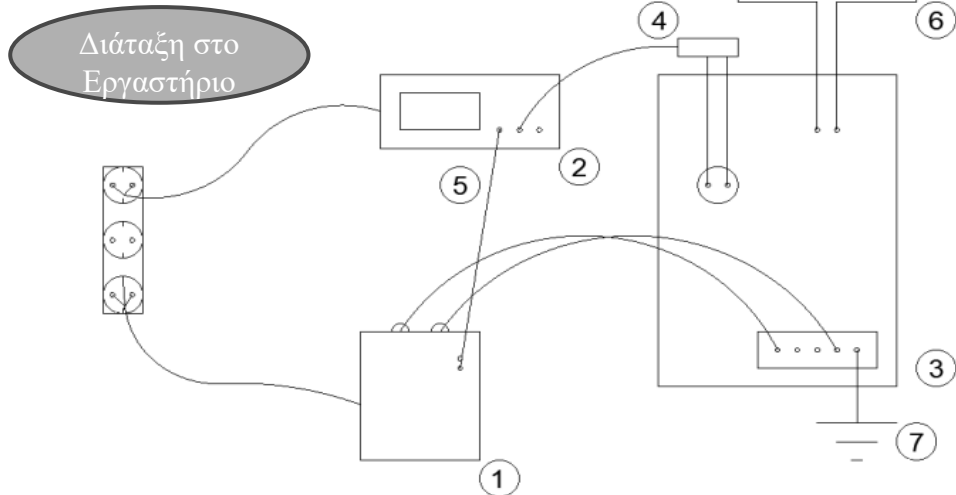
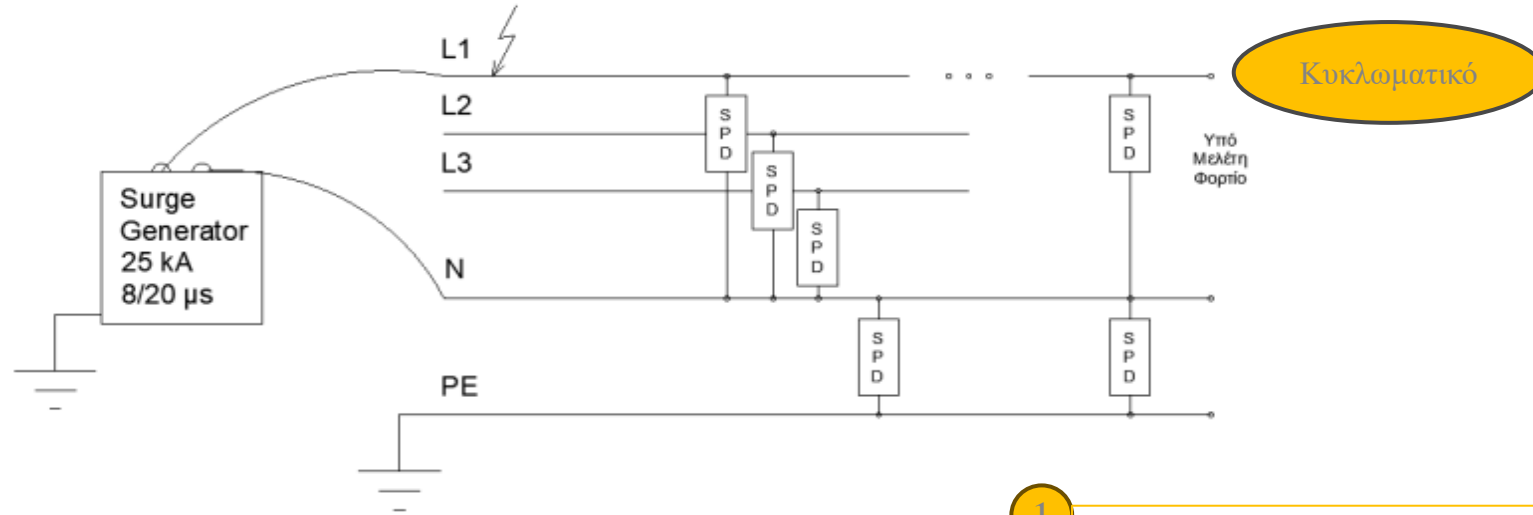
Καλώδια XT 2.5mm²
20cm-6.5m-7m-9m-
16m-22.5m-100m

Ομοαξονικό Καλώδιο



GDT+MOV

Πειραματικό Μέρος: Πειραματική Διάταξη



- 1 Γεννήτρια Κρουστικών Ρευμάτων 8/20μs 25kA «HILO/TEST: EMC-2004»
- 2 Παλμογράφος «Tektronix TBS 1202B-EDU»
- 3 Ηλεκτρικός Πίνακας Χαμηλής Τάσης
- 4 Διαφορικό Probe
- 5 Ομοαξονικό Καλώδιο
- 6 Καλωδίωση XT
- 7 Γείωση Λειτουργίας

Πειραματικό Μέρος: Πειραματική Διαδικασία

1^ο Πείραμα

- Έγχυση Κρουστικού Ρεύματος 8/20μs
- $I_{\beta rmax}$ 1.8kA έως 3.8kA
0.4kA step
- Καλώδια XT 2.5mm²
20cm-6.5m-7m-9m-16m-
22.5-100m
- Προστασία έναντι
Υπερτάσεων T1 και T1+T2
- Ανοιχτοκυκλωμένο Φορτίο
- Μέτρηση Τάσης στο
Φορτίο και Ρεύματος
Έγχυσης

Στόχος:
Παρατήρηση
Ταλαντώσεων

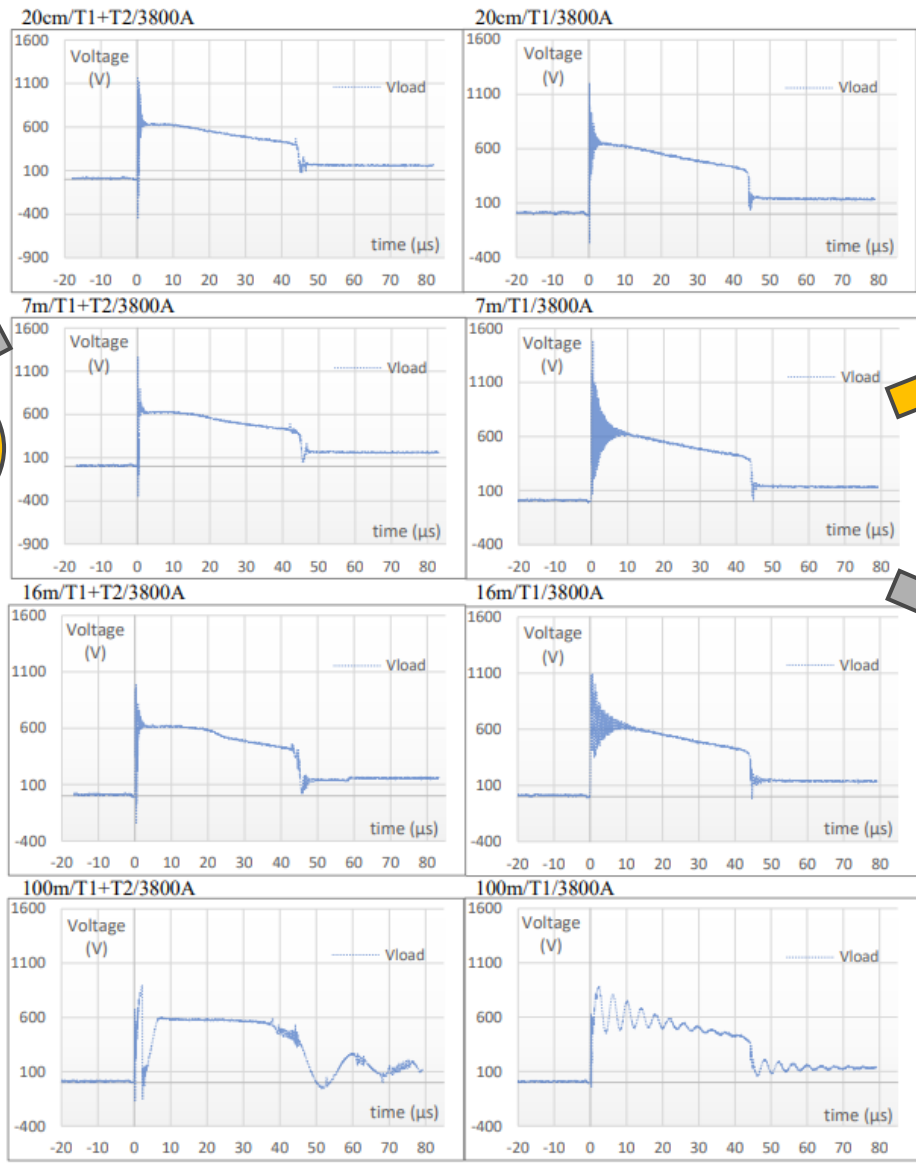
2^ο Πείραμα

- Έγχυση Κρουστικού Ρεύματος 8/20μs
- $I_{\beta rmax}$ 7kA και 9kA
- Καλώδια XT 2.5mm²
20cm-6.5m-7m-9m-16m-
22.5-100m
- Προστασία έναντι
Υπερτάσεων T1 και T1+T2
- Ανοιχτοκυκλωμένο Φορτίο
- Μέτρηση Τάσης στο
Φορτίο και Ρεύματος
Έγχυσης

Στόχος:
Παρατήρηση
 $U_{OCL} > 1.5kV$

Κατηγορία
Υπερτάσεων I

Πειραματικό Μέρος: Αποτελέσματα 1^ο Πειράματος

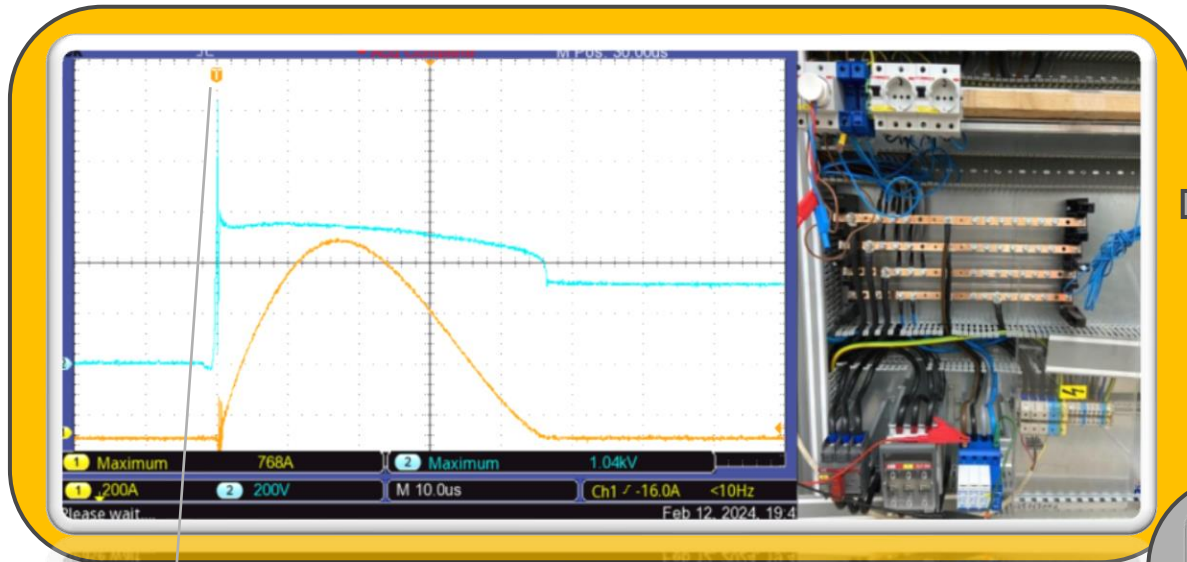


Συνδυασμός T1+T2
καλύτερη προστασία
έναντι υπερτάσεων

Με την αύξηση του μήκους
καλωδιώσεων στην περίπτωση
προστασίας μόνο με T1
εμφανίζονται ταλαντώσεις

Το χειρότερο μήκος καλωδίωσης
παρατηρήθηκε κοντά στα 7m
(+ επιπλέον μήκος
καλωδιώσεων ασφαλειών και
διακοπτικών στοιχείων)

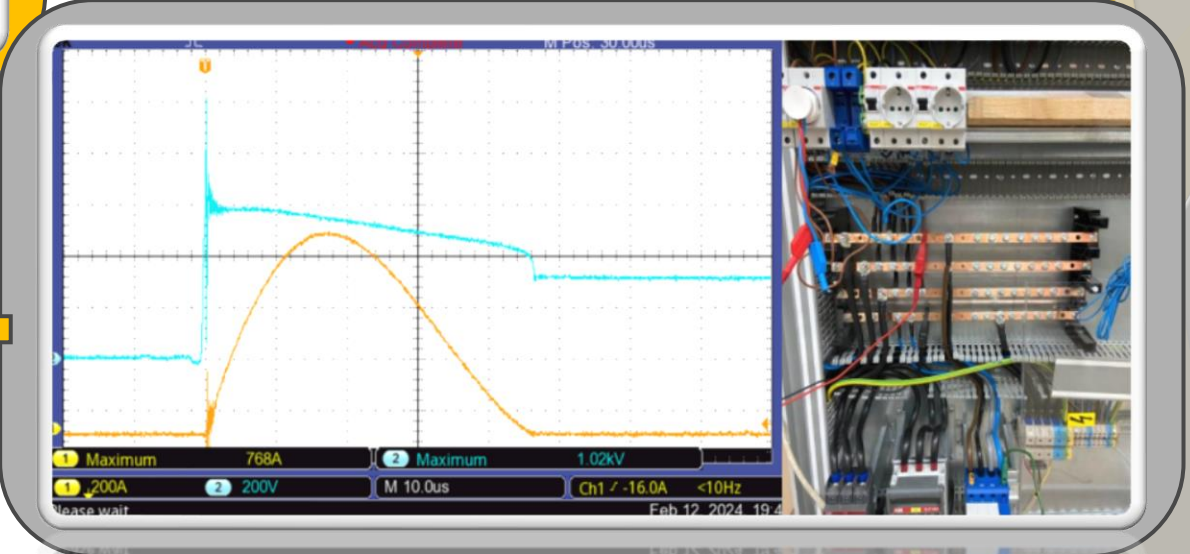
Πειραματικό Μέρος: Αποτελέσματα 1^ο Πειράματος



Τάση στα άκρα του SPD T1 μεταξύ L1 – N
2.6kA/T1/6.5m

- Το αρχικό spike που κάνει η τάση του SPD T1 οφείλεται στην ενεργοποίηση του GDT (25-100ns).
- Στην συνέχεια η λειτουργία του MOV που σταθεροποιεί σχετικά την τάση.

Τάση στα άκρα των ζυγών L1 – N
2.6kA/T1/6.5m



Πειραματικό Μέρος: Αποτελέσματα 2^ο Πειράματος

| $V_{loadmax}$ (kV) | T1+T2 | | T1 | |
|---------------------------|-------|------|------|------|
| Μήκος Καλωδίου \ $I_{βρ}$ | 7kA | 9kA | 7kA | 9kA |
| 20cm | 1.24 | 1.2 | 1.07 | 1.48 |
| 6.5m | 1.02 | 1.16 | 1.7 | 1.82 |
| 7m | 1.28 | 1.3 | 1.34 | 1.74 |
| 9m | 1.26 | 1.3 | 1.34 | 1.78 |
| 16m | 1.28 | 1.24 | 1.28 | 1.66 |
| 22.5m | 1.14 | 1.2 | 1.18 | 1.64 |
| 100m | 1.12 | 1.28 | 1.48 | 1.52 |

Η εμφανιζόμενη τάση στο ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1.5kV (Κατηγορία Υπερτάσεων I)

Το χειρότερο μήκος καλωδίωσης παρατηρήθηκε κοντά στα 7m

Η μέγιστη τιμή της μετρούμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο κατά την διεξαγωγή του δεύτερου πειράματος

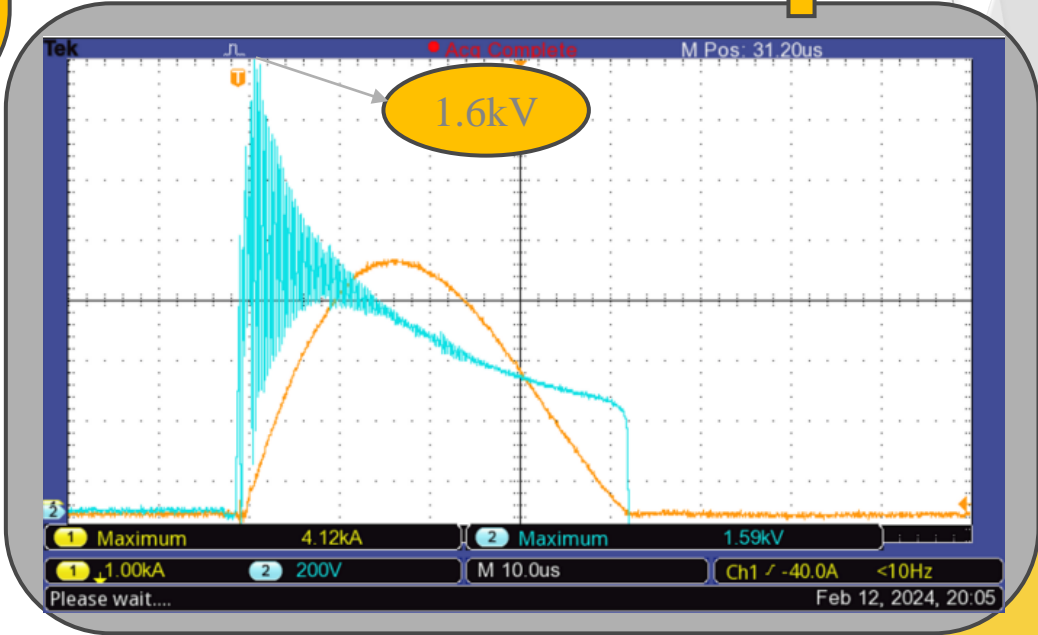
- ▶ Στην περίπτωση διάταξης προστασίας με T1+T2 η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στην πρώτη απότομη αιχμή της κυματομορφής της τάσης στην αρχή της κρούσης που οφείλεται στον χρόνο απόκρισης του GDT.
- ▶ Στην περίπτωση με διάταξη προστασίας μόνο με T1, ωστόσο, η μέγιστη τιμή λαμβάνεται κατά την ταλάντωση της κυματομορφής της τάσης στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο.
- ▶ Στις μετρήσεις που έγιναν παρατηρούμε την τάση να ταλαντώνεται γύρω από τα 700-1000V και κατά την ταλάντωση να λαμβάνει τιμές έως και 1.82kV

Πειραματικό Μέρος: Αποτελέσματα 2^ο Πειράματος



Τάση στα
άκρα ζυγών
L1 – N
8kA/T1/9m

Η εμφανιζόμενη τάση
στο υπό μελέτη
ανοιχτοκυκλωμένο
φορτίο
8kA/T1/9m



- ▶ Στην περίπτωση ανοιχτοκυκλωμένου φορτίου, όπως εξετάσαμε, ενδέχεται να εμφανιστούν υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας του απαγωγού υπερτάσεων.
- ▶ Ο διπλασιασμός αυτός παρατηρήθηκε στην περίοδο λειτουργίας του MOV του SPD T1, που περιορίζει την αποτελεσματική στάθμη προστασίας κοντά στα 800V, και όχι στη λειτουργία του GDT, κάτι που δεν διευκρινίζεται στο πρότυπο IEC 62305-4.

Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας 1/5

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε έναν απαγωγέα υπερτάσεων στην είσοδο της εγκατάστασης, με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης από το υπό προστασία φορτίο, παρατηρείται πως η καλωδίωση τείνει να συμπεριφερθεί σαν γραμμή και να παρουσιάσει κάτι σαν φαινόμενα όδευσης. Οι διάφορες ανακλάσεις που συμβαίνουν παρατηρούνται υπό μορφή ταλαντώσεων στο υπό προστασία φορτίο. Αυτό συμφωνεί με το πρότυπο IEC62305-4 που αναφέρει ότι «εάν το μήκος του κυκλώματος μεταξύ του SPD και του εξοπλισμού είναι πολύ μεγάλο, η διάδοση των κυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο ταλάντωσης»

Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας 2/5

Στην περίπτωση έγχυσης κρουστικών ρευμάτων μεγάλης έντασης, με την αύξηση του μήκους καλωδιώσεων μίας εγκατάστασης, ενδέχεται να εμφανιστούν στο υπό προστασία φορτίο τάσεις ικανές να βλάψουν τα ηλεκτρονικά ηλεκτρικών συσκευών που είναι συνδεδεμένα στις εγκαταστάσεις, παρά την λειτουργία του απαγωγού υπερτάσεων στην είσοδο της εγκατάστασης.

Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας 3/5

Για την αποφυγή των ταλαντώσεων και καλύτερη προστασία από υπερτάσεις για καλωδιώσεις μεγάλου μήκους ενδείκνυται η προσθήκη δεύτερου SPD. Αυτό προβλέπει και το πρότυπο IEC 61643-12 σύμφωνα με το οποίο «Ο λόγος για την ανάγκη πρόσθετης προστασίας από υπερτάσεις είναι η πιθανότητα εμφάνισης ταλαντώσεων ή οδεύοντων κυμάτων που προκαλούνται από την κρουστική υπέρταση και μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλότερες από τις αναμενόμενες τάσεις στον εξοπλισμό που πρόκειται να προστατευθεί». Ένας άλλος τρόπος για καλύτερη προστασία από υπερτάσεις είναι η επιλογή απαγωγών υπερτάσεων χαμηλότερης αποτελεσματικής στάθμης προστασίας ακολουθώντας τις οδηγίες του προτύπου IEC 62305-4.

Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας 4/5

Στην περίπτωση ανοιχτοκυκλωμένου φορτίου, όπως εξετάσαμε, ενδέχεται να εμφανιστούν και υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας του απαγωγού υπερτάσεων. Αυτό συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 που αναφέρει ότι «στην περίπτωση που το φορτίο είναι ανοιχτοκυκλωμένο, η μετάδοση κυμάτων και η εμφάνιση ταλαντώσεων ενδέχεται να εμφανιστούν υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας $U_{P/F}$ του απαγωγού υπερτάσεων ($2 \cdot U_{P/F}$) και βλάβη στον εξοπλισμό μπορεί να συμβεί, παρά το γεγονός ότι η αποτελεσματική στάθμη προστασίας του απαγωγού υπερτάσεων είναι μικρότερη από την κρουστική τάση αντοχής του υπό προστασία εξοπλισμού ($U_{P/F} < U_w$)». Αυτό ακριβώς παρατηρήθηκε στο δεύτερο πείραμα της εν λόγω εργασίας, όπου η αποτελεσματική στάθμη προστασίας του SPD T1 είναι μικρότερη του 1.5kV και η εμφανιζόμενη υπέρταση στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο είναι μεγαλύτερη. Ο διπλασιασμός της αποτελεσματικής στάθμης προστασίας, μάλιστα, παρατηρήθηκε στην περίοδο λειτουργίας του MOV του SPD T1, που περιορίζει την αποτελεσματική στάθμη προστασίας κοντά στα 800V, και όχι κατά την ενεργοποίηση του GDT, κάτι που δεν διευκρινίζεται στο πρότυπο IEC 62305-4.

Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας 5/5

Υπάρχει ένα χείριστο μήκος καλωδίωσης μεταξύ του SPD και του υπό προστασία φορτίου και δεν ισχύει πως όσο πιο μεγάλο το μήκος τόσο χειρότερα προστατεύεται ένα φορτίο. Αυτό συμφωνεί με την μελέτη «Discussion on Worst Distance Between SPD and Protected Device».

Το χειρότερο μήκος καλωδίωσης στην εγκατάσταση χαμηλής τάσης που εξετάσαμε παρατηρήθηκε να είναι κοντά στα 7 – 9m. Στο μήκος καλωδίωσης από το SPD T1 στο υπό μελέτη φορτίο, ωστόσο, θα πρέπει να προσθέσουμε και το επιπλέον μήκος λόγω των καλωδιώσεων των ασφαλειών και διακοπτικών στοιχείων του πίνακα.

Η Επόμενη Μέρα

- ▶ Επανάληψη των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιώντας Combination Wave Surge Generator.
- ▶ Επανάληψη των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιώντας SPDs περιορισμού τάσης και όχι μεταγωγής.
- ▶ Δημιουργία προσομοίωσης σε λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής μεταβατικής ανάλυσης αντιμετωπίζοντας την καλωδίωση σαν γραμμή με κυματική αντίσταση και σαν συγκεντρωμένο στοιχείο και σύγκριση αποτελεσμάτων με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- ▶ Πειραματική μελέτη της επίδρασης του φορτίου στην εμφάνιση ταλαντώσεων για διάφορα μήκη καλωδίωσης χρησιμοποιώντας ωμικά, επαγωγικά, χωρητικά, σειριακά ωμικά επαγωγικά και παράλληλα ωμικά χωρητικά φορτία.
- ▶ Δημιουργία προσομοίωσης σε λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής μεταβατικής ανάλυσης αντιμετωπίζοντας την καλωδίωση σαν γραμμή με κυματική αντίσταση και μελέτη της επίδραση του φορτίου χρησιμοποιώντας ωμικά, επαγωγικά, χωρητικά, σειριακά ωμικά επαγωγικά και παράλληλα ωμικά χωρητικά φορτία.
- ▶ Διεξαγωγή εργαστηριακής άσκησης στα πλαίσια του μαθήματος «Προστασία Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων από Υπερτάσεις».



ΤΕΛΟΣ

Ευχαριστώ για την
Προσοχή σας!!

Ερωτήσεις; Απορίες;

Διπλωματική Εργασία
Νίκος Μ. Φουντουλάκης