



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Επίδραση Μήκους Καλωδιώσεων στην Λειτουργία Απαγωγών Υπερτάσεων σε Εγκαταστάσεις Χαμηλής Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νίκος Μ. Φουντουλάκης

**Επιβλέπων:** Ιωάννης Γκόνοσ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
 ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
 ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
 ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
 ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Επίδραση Μήκους Καλωδιώσεων στην Λειτουργία Απαγωγών Υπερτάσεων σε Εγκαταστάσεις Χαμηλής Τάσης

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΉ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νίκος Μ. Φουντουλάκης

**Επιβλέπων:** Ιωάννης Γκόνοσ  
 Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την **30<sup>η</sup>** Φεβρουαρίου 2024.

.....  
 Ιωάννης Γκόνοσ  
 Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
 Χρήστος Χριστοδούλου  
 Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
 Γεώργιος Κορρές  
 Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

.....  
Νίκος Μ. Φουντουλάκης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νίκος Φουντουλάκης, 2024  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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 δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Copying, saving and distributing this work, in whole or in part, for commercial purposes is prohibited. Reproduction, saving and distribution for a non-profit, educational or research purpose is permitted, provided that the source is acknowledged and this message is preserved. Questions regarding the commercial use of the work should be directed to the author.

The opinions and conclusions contained in this document are those of the author and should not be interpreted as representing the official positions of the National Technical University of Athens.



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Ιωάννη Γκόνο για την συνεργασία μας κατά την επίβλεψή του στην διπλωματική μου εργασία, αλλά και για την διδασκαλία του.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για την συνεισφορά τους και την μεταλαμπάδευση τεχνογνωσίας.

Θα ήθελα, γενικά, να ευχαριστήσω όσους βοήθησαν με τα σχόλια και τις παρατηρήσεις τους στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα, επιπλέον, να ευχαριστήσω την εταιρεία ΕΛΕΜΚΟ για την κατασκευή και προμήθεια κατάλληλου εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

Θα ήθελα, τέλος, να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους, χωρίς τους οποίους η ζωή θα ήταν βαρετή!

## Περίληψη

Η εν λόγω διπλωματική εργασία αποτελεί μία πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του μήκους καλωδιώσεων στην ορθή λειτουργία των απαγωγών υπερτάσεων σε εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης. Αρχικά, γίνεται μία αναφορά στο φαινόμενο του κεραυνού, τις συνθήκες δημιουργίας, τις κατηγορίες και τα χαρακτηριστικά ατμοσφαιρικών εκκενώσεων, τις βλάβες σε κατασκευές και τις ανθρώπινες επιπτώσεις. Έπειτα, αναλύονται οι εξωτερικές και εσωτερικές υπερτάσεις που καταπονούν μία εγκατάσταση χαμηλής τάσης. Οι εξωτερικές υπερτάσεις οφείλονται στο φαινόμενο του κεραυνού, ενώ οι εσωτερικές υπερτάσεις οφείλονται σε φαινόμενα είτε μεταβατικά είτε λειτουργικά, που λαμβάνουν χώρα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι μέθοδοι σχεδιασμού του αναγκαίου εσωτερικού και εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, από όπου προκύπτει η χρησιμότητα των απαγωγών υπερτάσεων, που εκτρέπουν τα κρουστικά ρεύματα από την υπό προστασία εγκατάσταση και καταστέλλουν το πλάτος των υπερτάσεων σε επίπεδο που να μην είναι επικίνδυνο για τον άνθρωπο και τον εξοπλισμό. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται λόγος για τις κατηγορίες των στοιχείων που χρησιμοποιούν οι απαγωγοί υπερτάσεων, τους τύπους και τα χαρακτηριστικά τους, τον τρόπο εγκατάστασης, συνδεσμολογίας και επιλογής τέτοιων διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων. Έμφαση, επιπλέον, δίνεται στα φαινόμενα όδευσης που λαμβάνουν χώρα αλλά και στις επαγόμενες τάσεις που εμφανίζονται με την αύξηση του μήκους καλωδιώσεων, λόγω των οποίων υπονομεύεται η λειτουργία των απαγωγών υπερτάσεων. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-4 [20], μάλιστα, «εάν το μήκος του κυκλώματος μεταξύ των απαγωγών υπερτάσεων και του εξοπλισμού είναι πολύ μεγάλο, η διάδοση των κυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο ταλάντωσης». Στο κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία, ο εξοπλισμός και η διάταξη των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, διεξήχθησαν δύο πειράματα χρησιμοποιώντας την γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων «HILO/TEST: EMC-2004» 8/20 $\mu$ s 25kA και έναν ηλεκτρικό πίνακα που αναπαριστά μία εγκατάσταση χαμηλής τάσης. Στα δύο πειράματα εγχέονται κρουστικά ρεύματα 8/20 $\mu$ s διαφορετικών επιπέδων έντασης, δοκιμάζονται επτά μήκη καλωδιώσεων και δύο διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων. Καθώς το πρότυπο IEC 62305-4 [20] αναφέρει πως «στην περίπτωση που το φορτίο είναι ανοιχτοκυκλωμένο, ενδέχεται να εμφανιστούν υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας του απαγωγού υπερτάσεων», στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν εξετάσαμε την εμφανιζόμενη υπέρταση σε έναν ρευματοδότη του ηλεκτρικού πίνακα, δηλαδή σε ένα υπό προστασία ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο της εγκατάστασης χαμηλής τάσης που χρησιμοποιούμε.

## Λέξεις Κλειδιά

Απαγωγοί Υπερτάσεων, SPDs, Μήκος Καλωδίωσης, Προστασία από Υπερτάσεις, Εγκαταστάσεις Χαμηλής Τάσης, Κεραυνικό Ρεύμα, Το Φαινόμενο Όδευσης, Ταλαντώσεις

## Abstract

The present dissertation constitutes an experimental investigation of the cable length impact on the operation of surge protective devices (SPDs) in low-voltage installations. Initially, reference is made to the lightning phenomenon, the conditions of its occurrence, the categories and characteristics of atmospheric discharges, the damages to structures and the negative effects on human. Then, the external and internal overvoltages that strain a low-voltage installation are analyzed. External overvoltages arise due to the lightning phenomenon, while internal overvoltages due to transient or operational events occurring within power systems. Subsequently, the methods for designing the necessary internal and external surge protection systems are presented, highlighting the usefulness of SPDs, which divert lightning currents away from the protected installation and suppress surge magnitudes to levels that are not dangerous for humans and equipment. Chapter 4 discusses the categories of elements used by SPDs, their types and characteristics, installation methods, connection and selection principals of such protection devices. Emphasis is also placed on the travelling and induced phenomena in circuit formed by SPD and apparatus to be protected, occurring due to cable lengths increasing, undermining the operation of SPDs. According to the standard IEC 62305-4 [20] , "If the length of the circuit between the SPD and the equipment is too long, propagation of surges can lead to an oscillation phenomenon. " In Chapter 6, the procedure, equipment and the setup of experiments conducted are presented. Specifically, two experiments were conducted using the surge current generator "HILO/TEST: EMC-2004" 8/20us 25kA and an electrical switchboard representing a low-voltage installation. In the two experiments, surge currents of 8/20us of different intensity levels were injected, testing seven cable lengths and two surge protection arrangements. In the experiments conducted, we examined the voltage appearing in a socket outlet of the electrical switchboard, representing an open-circuit at equipment's terminals of the low-voltage installation being tested, because according to the standard IEC 62305-4 [20] "In the case of an open-circuit at the equipment's terminals, this (meaning the surge propagation and oscillation phenomenon) can increase the overvoltage up to twice the effective protection level of the SPD".

## Key Words

Surge Protective Devices, SPDs, Wiring Length, Overvoltage Protection, Low Voltage Installations, Surge Current, Surge Propagation, Oscillation Phenomenon

## Extended Abstract

The present diploma thesis constitutes an experimental investigation of the cable length impact on the operation of surge protective devices (SPDs) in low-voltage installations. Therefore, two experiments were conducted using the surge current generator "HILO/TEST: EMC-2004" 8/20us 25kA and an electrical switchboard representing a low-voltage installation.

In the first experiment the surge generator is connected between phase A and the neutral (L1 – N) of the low voltage installation, and surge current of 8/20us is injected. The short-circuited generator current injected, ranges from 1.8kA to 3.8kA, with 400A step, testing 7 different lengths wiring between the SPD class 1 at the entrance of the installation and the equipment to be protected. The equipment to be protected is a socket outlet, representing an open-circuit at equipment's terminals of the low-voltage installation being tested. The different cable lengths are 20cm, 6.5m, 7m, 9m, 16m 22.5m, 100m, while the two overvoltage protection setups are a class 1 SPD at the entrance of the installation and a combination of the same SPD class 1 with a SPD class 2 parallel to the equipment. The aim of this experiment is to detect oscillations in measured voltage at the open-circuited equipment's terminals with increasing wiring length.

In the second experiment the surge generator is connected again between phase A and the neutral (L1 – N) of the low voltage installation, and surge current of 8/20us is injected. The short-circuited generator current injected, are 7kA and 9kA, testing 7 different lengths wiring between the SPD class 1 at the entrance of the installation and the equipment to be protected. The equipment to be protected is a socket outlet, representing an open-circuit at equipment's terminals of the low-voltage installation being tested. The different cable lengths are 20cm, 6.5m, 7m, 9m, 16m 22.5m, 100m, while the two overvoltage protection setups are a class 1 SPD at the entrance of the installation and a combination of the same SPD class 1 with a SPD class 2 parallel to the equipment. Aim of this experiment is the detection of voltage values at the open-circuited equipment's terminals greater than 1.5kV (lowest rated impulse withstand voltage), when oscillations occur with increasing wiring length.

The conclusions of the two experiments and the overall results of the thesis are enumerated as follows:

1. In the case of using a single SPD class 1 at the entrance of the installation, by increasing the length of wiring to the equipment, it is observed that the wiring tends to behave like a line with surge propagation. The various reflections that occur are observed in the form of oscillations at the equipment's terminals. This is in line with the standard IEC 62305-4 [20] , "If the length of the circuit between the SPD and the equipment is too long, propagation of surges can lead to an oscillation phenomenon. "
2. In the case of high-intensity surge currents, by increasing the length of wiring to the equipment, we observed voltages capable of damaging the electronics of electrical devices (higher than 1.5kV) connected to the installation, despite the operation of the SPD class 1 at the installation entrance.
3. To avoid oscillations and provide better overvoltage protection for long wiring, the addition of a second SPD is recommended. This suggestion is made also by the standard

IEC 61643-12 [22] , which states that "The reason for the need for additional surge protection is the possibility that oscillations or travelling waves caused by the surge impulse may result in higher-than-expected voltages at the equipment that is to be protected». Another way to improve overvoltage protection is by selecting SPDs of lower effective protection level, following the guidelines of standard IEC 62305-4 [20] , as discussed in Chapter 4.6 (1 2 3).

4. In the case of an open-circuit load, as examined, doubling of the effective protection level of the SPD class 1 may appear (see picture 8.2 and 8.3 page 141-142). This is in line with the standard IEC 62305-4 [20] , which states that " In the case of an open-circuit at the equipment's terminals, this (meaning surge propagation and oscillation phenomenon) can increase the overvoltage up to double the maximum value from the effective protection level  $U_{P/F}$  of the SPD ( $2 \times U_{P/F}$ ) and failure of equipment may result even if the effective protection level of the surge SPD is lower than the impulse withstand voltage of the protected equipment ( $U_{P/F} \leq U_W$ )". This was precisely observed in the second experiment of this work, where the effective protection level of SPD class 1 is less than 1.5kV (picture 8.2 page 141) and the measured overvoltage in the open-circuited equipment is higher (picture 8.3 page 142). Specifically, the doubling of the effective protection level was observed during the operation period of the MOV of SPD class 1, rather than during the activation of the GDT (something not clarified in standard IEC 62305-4), which limits the effective protection level close to 800V and the overvoltage at tested equipment's terminals was close to 1.6kV.
5. There is a worst distance between the SPD and the protected device, and it is not correct to assume that the longer the length of wiring, the worse a device is protected. This agrees with the study "Discussion on Worst Distance Between SPD and Protected Device" [26] . The worst length of wiring in the low-voltage installation examined was observed to be around 7 – 9m. However, the length of wiring from SPD class 1 to the equipment we tested, should also include the additional length due to the wiring of fuses and circuit breakers of the switchboard.



## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο	1 <sup>ο</sup>	Το Φαινόμενο του Κεραυνού	
	1.1	Εισαγωγή και Ιστορική Αναδρομή.....	13
	1.2	Συνθήκες Δημιουργίας Ατμοσφαιρικών Εκκενώσεων.....	14
	1.3	Κατηγορίες Κεραυνικών Εκκενώσεων.....	16
	1.4	Στάδια Κεραυνικών Εκκενώσεων.....	17
	1.5	Χαρακτηριστικά και Παράμετροι Κεραυνών.....	18
	1.6	Επιπτώσεις Κεραυνού.....	20
	1.6.1	Βλάβες σε Κατασκευές.....	20
	1.6.2	Αιτίες και Τύποι Ζημιών σε Κατασκευές.....	21
	1.6.3	Τύποι Απωλειών.....	21
	1.6.4	Επιπτώσεις στον Άνθρωπο.....	23
Κεφάλαιο	2 <sup>ο</sup>	Υπερτάσεις που Καταπονούν Εγκαταστάσεις ΧΤ	
	2.1	Εισαγωγή.....	25
	2.2	Εξωτερικές Υπερτάσεις Καταπόνησης Εγκαταστάσεων ΧΤ.....	25
	2.3	Εσωτερικές Υπερτάσεις Καταπόνησης Εγκαταστάσεων ΧΤ.....	27
Κεφάλαιο	3 <sup>ο</sup>	Προστασία Εγκαταστάσεων ΧΤ από Υπερτάσεις	
	3.1	Εισαγωγή.....	31
	3.2	Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ).....	31
	3.2.1	Εξωτερική Προστασία.....	31
	3.2.2	Εσωτερική Προστασία.....	35
	3.3	Μελέτη Διακινδύνευσης για Προστασία έναντι Μεταβατικής Υπέρτασης.....	35
	3.4	Προστασία Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Συσκευών.....	37
Κεφάλαιο	4 <sup>ο</sup>	Απαγωγείς Υπερτάσεων (Surge Protective Devices – SPDs)	
	4.1	Εισαγωγή.....	39
	4.2	Λειτουργική Κατηγοριοποίηση Απαγωγών Υπερτάσεων.....	40
	4.2.1	Στοιχεία Μεταγωγής Τάσης.....	40
	4.2.2	Στοιχεία Περιορισμού Τάσης.....	41
	4.3	Τύποι Απαγωγέων Υπερτάσεων.....	43
	4.4	Χαρακτηριστικά Απαγωγέων Υπερτάσεων.....	44
	4.5	Εγκατάσταση και Συνδεσμολογία.....	46
	4.6	Επιλογή Διατάξεων Προστασίας έναντι Υπερτάσεων.....	48
	4.7	Συστήματα Γειώσεων.....	51
Κεφάλαιο	5 <sup>ο</sup>	Επίδραση του μήκους καλωδιώσεων στην ορθή λειτουργία των απαγωγών υπερτάσεων	
	5.1	Εισαγωγή.....	53
	5.2	Το Φαινόμενο Όδευσης.....	53
	5.3	Επαγόμενες Τάσεις.....	54
	5.4	Η Επίδραση του Φορτίου.....	54

Κεφάλαιο	6 <sup>ο</sup>	Πειραματικό Μέρος: Εξοπλισμός, Διάταξη και Διαδικασία	
	6.1	Εισαγωγή .....	57
	6.2	Εξοπλισμός Πειραματικής Διάταξης.....	57
	6.3	Πειραματική Διάταξη.....	65
	6.4	Πειραματική Διαδικασία.....	67
Κεφάλαιο	7 <sup>ο</sup>	Πειραματικό Μέρος: Αποτελέσματα Πρώτου Πειράματος	
	7.1	Εισαγωγή .....	69
	7.2	Παρουσίαση Μετρήσεων.....	70
	7.3	Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	120
Κεφάλαιο	8 <sup>ο</sup>	Πειραματικό Μέρος: Αποτελέσματα Δεύτερου Πειράματος	
	8.1	Εισαγωγή .....	125
	8.2	Παρουσίαση Μετρήσεων.....	125
	8.3	Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	140
Κεφάλαιο	9 <sup>ο</sup>	Συμπεράσματα και η Επόμενη Μέρα	
	9.1	Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας .....	143
	9.2	Η Επόμενη Μέρα.....	144
Βιβλιογραφία		.....	147



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Το Φαινόμενο του Κεραυνού

### 1.1 Εισαγωγή και Ιστορική Αναδρομή

Ο κεραυνός αποτελεί ένα θαυμαστό, ηχηρό και καταστροφικό φυσικό φαινόμενο, που χαρακτηρίζεται από την εκθαμβωτική του λάμψη και τον επακόλουθο έντονο κρότο, προξενεί φόβο σε ζώα και ανθρώπους και επιφέρει θανάτους, τραυματισμούς, πυρκαγιές και σοβαρές ζημιές σε περιουσίες. Το δέος που έχει ανά τους αιώνες προκαλέσει στην ανθρωπότητα γίνεται εύκολα αντιληπτό αν αναλογιστούμε την θεική και υπερφυσική ερμηνεία που του προσάπτεται από διάφορες θρησκείες.

Πιο συγκεκριμένα, στην ελληνική μυθολογία ο θεός Δίας χρησιμοποιούσε τους κεραυνούς που του κατασκεύαζε ο θεός Ήφαιστος για να τιμωρεί ανθρώπους και άλλες θεικές οντότητες. Τρεις Κύκλωπες βοηθούσαν τον Ήφαιστο: ο πρώτος ήταν ο Βροντής, ο οποίος εκπροσωπούσε τον θόρυβο της βροντής, ο δεύτερος ήταν ο Αστερόπηξ, ο οποίος αντιπροσώπευε την κίνηση του κεραυνού και ο τρίτος ήταν ο Αργής, ο οποίος εκπροσωπούσε την εκτυφλωτική φωτιά που συνοδεύει τον κεραυνό.

Την απομυθοποίηση του φαινομένου ήρθε στα μέσα του 18ου αιώνα να επιτύχει ο αμερικάνος πολιτικός, ερευνητής και εφευρέτης Βενιαμίν Φραγκλίνος (Benjamin Franklin 1706-1790). Το 1746 ξεκίνησε τα εργαστηριακά του πειράματα με την ηλεκτρική ενέργεια, το 1749 περιέγραψε τις ομοιότητες μεταξύ του κεραυνού και των εργαστηριακών σπινθήρων που είχε δημιουργήσει και το 1750 δημοσίευσε το σχέδιο ενός πειράματος που περιελάμβανε κάθετες μεταλλικές ράβδους μονωμένες από τη Γη με σκοπό να αναδείξει ότι ο κεραυνός ήταν ηλεκτρικό φαινόμενο και να αποκλείσει κάθε θεοκεντρική θεωρία. Αυτό το πείραμα εκτελέστηκε για πρώτη φορά με επιτυχία στη Γαλλία τον Μάιο του 1752 και έτσι αποδείχθηκε πως ο κεραυνός αποτελεί μια ηλεκτρική εκκένωση [1].

Με τον όρο ηλεκτρική εκκένωση αναφερόμαστε στη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ενός μέσου του οποίου έχουν καταρρεύσει οι μονωτικές ικανότητες λόγω της εφαρμογής επαρκώς υψηλής τάσης. Μια ηλεκτρική εκκένωση περιλαμβάνει την ταχεία κίνηση φορτισμένων σωματιδίων, ηλεκτρονίων ή ιόντων, και συνοδεύεται συνήθως από λάμψη, ήχο και θερμότητα [1].

Από την ανακάλυψη του Βενιαμίν Φραγκλίνου και έκτοτε έχει διεξαχθεί σημαντικό ερευνητικό έργο για την διερεύνηση των φυσικών μηχανισμών του φαινομένου και των τρόπων με τους οποίους ο άνθρωπος μπορεί να προστατεύσει τη ζωή και την περιουσία του από τις επιπτώσεις του κεραυνού. Κομμάτι αυτού του ερευνητικού έργου αποτελεί και η εν λόγω διπλωματική εργασία, που έχει ως στόχο την αποτελεσματικότερη προστασία εγκαταστάσεων χαμηλής τάσης από υπερτάσεις.

## 1.2 Συνθήκες Δημιουργίας Ατμοσφαιρικών Εκκενώσεων

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι η γη παρουσιάζει μόνιμη φόρτιση με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο περίπου  $5 \cdot 10^5$  C. Αυτή η φόρτιση δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια της γης, κατά τη διάρκεια καλοκαιρινών συνθηκών, με κατεύθυνση από την ατμόσφαιρα προς τη γη και ένταση περίπου 0.13 kV/m. Η αρνητική αυτή φόρτιση οφείλεται στην ύπαρξη ενός στρώματος στην ιονόσφαιρα, γνωστό ως στρώμα ή ζώνη Heaviside, περίπου 90 έως 150 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης, που είναι κατειλημμένο από θετικά φορτία τα οποία κατανέμονται στην ατμόσφαιρα, με μεγαλύτερη πυκνότητα στα χαμηλότερα στρώματα. Η παρουσία αυτής της κατανεμημένης θετικής φόρτισης έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση του ηλεκτρικού πεδίου της γης καθώς ανεβαίνουμε σε υψόμετρο. Λόγω αυτού του κάθετου πεδίου, η γη βρίσκεται σε συνεχή τάση 300 kV σε σχέση με τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας [2] [3].

Ο κεραυνός είναι μια υψηλή τρέχουσα ηλεκτρική εκκένωση που μετριέται σε χιλιόμετρα (km), παρουσιάζεται όταν μια περιοχή της ατμόσφαιρας αποκτά μια σημαντική ηλεκτρική φόρτιση. Η αυξημένη φόρτιση δημιουργεί ηλεκτρικά πεδία ικανά να προκαλέσουν την διάσπαση του αέρα. Οι κεραυνοί συνήθως εμφανίζονται σε νέφη καταιγίδας, αλλά μπορεί επίσης να παρουσιαστούν σε χιονοθύελλες, νέφη από ηφαίστεια και ακόμη και σε αίθριους ουρανοί [4].

Καταλαβαίνουμε, λοιπόν, ότι η ηλεκτρική φόρτιση των νεφών διαδραματίζει σημαντικό παράγοντα στην δημιουργία κεραυνών. Με τον όρο «ηλεκτρική φόρτιση» νέφους απευθυνόμαστε, όπως θα δούμε και παρακάτω, στον διαχωρισμό φορτίου που λαμβάνει χώρα εντός του νέφους.

Οι ακριβείς μηχανισμοί πίσω από την φόρτιση των νεφών εξακολουθούν να μην είναι πλήρως κατανοητοί και αποτελούν αντικείμενο συνεχούς επιστημονικής έρευνας. Υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικές θεωρίες: εκείνη που βασίζεται στη φόρτιση σταγονιδίων του νέφους που συμβαίνει μόλις αρχίσει η πτώση τους προς τη γη και σε εκείνη που βασίζεται στη μεταφορά φορτίων σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας με ανοδικά ρεύματα που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές. Η φόρτιση, στις θεωρίες αυτές, οφείλεται στις συγκρούσεις και τις συνενώσεις των σταγονιδίων νερού ή των κρυστάλλων πάγου που έχουν ως αποτέλεσμα τα μικρότερα σωματίδια να αποκτούν ή να χάνουν ηλεκτρόνια [2] [4].

Οι σύνθετες και πολύπλοκες διεργασίες που εξελίσσονται εντός των νεφών περιγράφονται από τρία φαινόμενα που μπορεί να υποτεθεί ότι παίζουν κάποιο ρόλο στον διαχωρισμό των φορτίων:

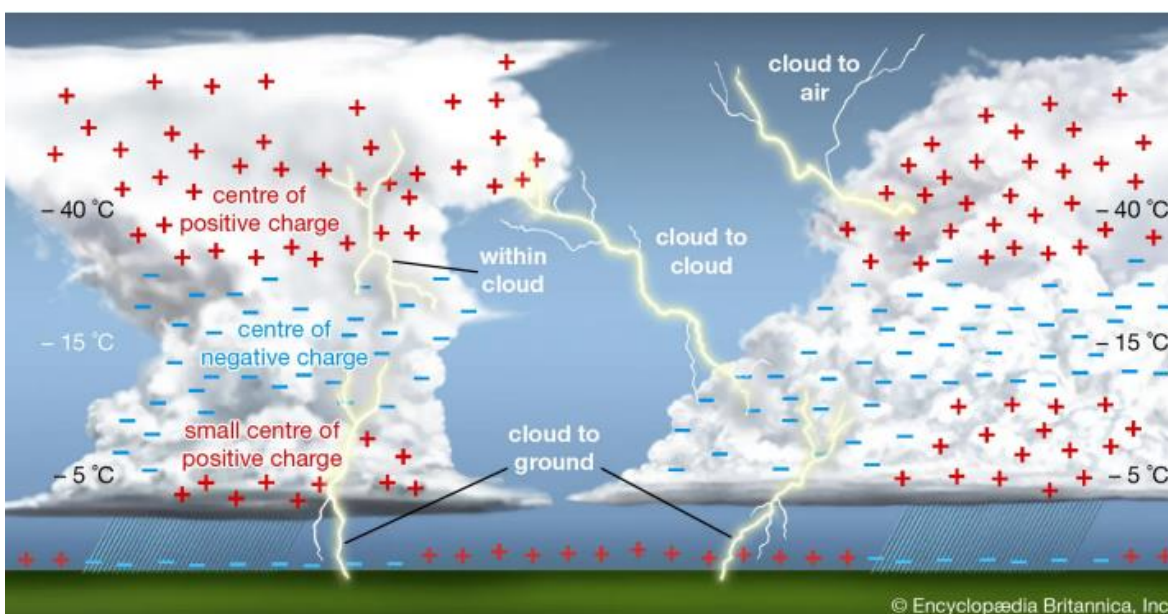
- Το φαινόμενο της διασποράς.
- Το φαινόμενο της ισχυρής ψύξεως.
- Το φαινόμενο της διαρρήξεως.

Σύμφωνα με τα φαινόμενα αυτά και συνοψίζοντας τα πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρισμένου νέφους έχουμε τα εξής:

- Ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο περιέχει ηλεκτρικά φορτία και των δύο πολικότητων σε ίσες ποσότητες, με τα φορτία κάθε πολικότητας να καταλαμβάνουν διαφορετικές περιοχές. Κατά

το 80% των περιπτώσεων παρουσιάζουν στο κατώτερο τμήμα τους ένα σημαντικό αρνητικό φορτίο της τάξης των δεκάδων έως και εκατοντάδων Coulomb και ένα φορτίο θετικής πολικότητας στο πάνω μέρος τους. Έτσι μεταξύ σύννεφου και γης αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές καταλήγουν στην γη πάνω σε επαγόμενα φορτία αντίθετης πολικότητας.

- Η πυκνότητα και η διασπορά των φορτίων και των δύο πολικότητων δημιουργούν μία συγκεχυμένη εικόνα μέσα στο νέφος, οποία διαρκώς μεταβάλλεται, γεγονός που εμποδίζει τη συστηματική ταξινόμηση των ηλεκτρικών καταστάσεων που μπορούν να επικρατήσουν μέσα σένα ηλεκτρισμένο νέφος[2]
- Ο διαχωρισμός των φορτίων εντός του νέφους συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (μερικά λεπτά έως μισή ώρα) [2] .



Εικόνα 1.1: Η ηλεκτρική φόρτιση των νεφών – ο διαχωρισμός φορτίων και οι πιθανές ατμοσφαιρικές εκκενώσεις που δύναται να συμβούν [5] .

Ο διαχωρισμός φορτίου και το αυξημένο πεδίο μεταξύ του νέφους και του εδάφους σε συνδυασμό με τη χαμηλή πυκνότητα του αέρα και άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, προκαλούν ιονισμό των μορίων του αέρα δημιουργώντας τις συνθήκες εμφάνισης ατμοσφαιρικών εκκενώσεων.

### 1.3 Κατηγορίες Κεραυνικών Εκκενώσεων

Παγκοσμίως λαμβάνουν χώρα από δεκάδες έως εκατοντάδες κεραυνικές εκκενώσεις το δευτερόλεπτο με τα  $\frac{3}{4}$  αυτών να μην συμπεριλαμβάνουν το έδαφος [6] .

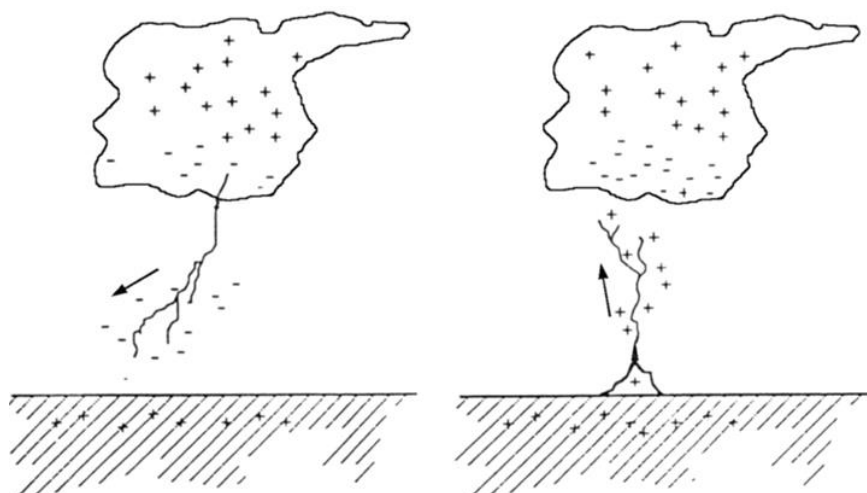
Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 1.1) οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες (όπως αναλύονται και στην [6] ):

- Κεραυνός ανάμεσα σε δύο διαφορετικά νέφη.
- Κεραυνός εντός του ίδιου νέφους.
- Κεραυνός μεταξύ του νέφους και του αέρα.
- Κεραυνός μεταξύ του νέφους και της γης.

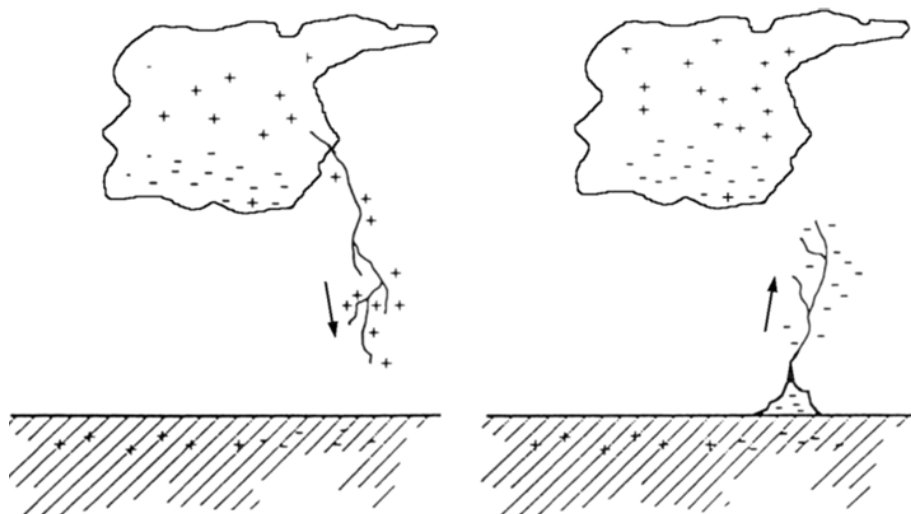
Οι κεραυνοί μεταξύ νέφους και γης, αν και αποτελούν το 25% των ατμοσφαιρικών εκκενώσεων, είναι η πιο επικίνδυνη μορφή κεραυνού και παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ασφάλεια και την ακεραιότητα των κτιρίων και των κατασκευών. Ανάλογα με το πρόσημο του ηλεκτρικού φορτίου που μεταφέρεται και της κατεύθυνση διάδοσης του κεραυνού (η κατεύθυνση διάδοσης του κεραυνού ταυτίζεται με την κατεύθυνση προς την οποία παρατηρούνται οι διακλαδώσεις του κεραυνού) διακρίνουμε τους κεραυνούς μεταξύ νέφους και γης σε τέσσερις υποκατηγορίες:

- Κατερχόμενος αρνητικός κεραυνός.
- Ανερχόμενος θετικός κεραυνός.
- Κατερχόμενος θετικός κεραυνός.
- Ανερχόμενος αρνητικός κεραυνός.

Υπολογίζεται πως οι κατερχόμενοι αρνητικοί κεραυνοί απαρτίζουν τουλάχιστον το 90% των κεραυνών μεταξύ νέφους και γης, ενώ οι κατερχόμενοι θετικοί κεραυνοί το πολύ το 10%. Από την άλλη, οι ανερχόμενοι κεραυνοί, τόσο οι θετικοί όσο και οι αρνητικοί, μεταξύ νέφους και γης είναι σχετικά σπάνια φαινόμενα και ξεκινούν από βουνοκορφές, από κατασκευές μέτριου ύψους που βρίσκονται σε βουνοκορφές και από υψηλές κατασκευές προς τις φορτισμένες περιοχές του νέφους [1] [6].



Εικόνα 1.2: Κατερχόμενος αρνητικός κεραυνός στα αριστερά και ανερχόμενος θετικός κεραυνός στα δεξιά [1].



Εικόνα 1.3: Κατερχόμενος θετικός κεραυνός στα αριστερά και ανερχόμενος αρνητικός κεραυνός στα δεξιά [1].

#### 1.4 Στάδια Κεραυνικών Εκκενώσεων

Επειδή όπως είδαμε παραπάνω η πιο συνηθής και ενδιαφέρουσα κατηγορία κεραυνού είναι οι κατερχόμενοι αρνητικοί κεραυνοί, όταν αναφερόμαστε σε κεραυνούς στην συνέχεια της ανάλυσης εννοούμε κατερχόμενους και κατά κύριο λόγο αρνητικούς και όπου διευκρινίζεται θετικούς κεραυνούς.

Τα στάδια μίας κεραυνικής εκκένωσης μεταξύ νέφους και γης είναι τρία:

- Προεκκένωση

Το ηλεκτρικό νέφος λόγω του διαχωρισμού των φορτίων παρουσιάζεται ως ηλεκτρικό δίπολο με επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο της τάξης των  $5\text{kV/m}$ , το οποίο γίνεται πολύ πιο έντονο στο κάτω στρώμα του νέφους. Έτσι τα μόρια του αέρα ιοντίζονται, καθώς συγκρούονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που επιταχύνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αέρα. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ νέφους και γης, στα «ίχνη» των δυναμικών γραμμών του σχηματίζεται ο «οδηγός οχετός προεκκένωσης», δημιουργώντας μία αγώγιμη διαδρομή εντός του πεδίου που τροφοδοτείται από το φορτίο του νέφους. Παράλληλα, ο οδηγός οχετός εμφανίζει διακλαδώσεις που λόγω ανεπάρκειας φορτίου δεν φτάνουν στην γη. Η ταχύτητα ανάπτυξης του οδηγού οχετού υπολογίζεται στα  $25\text{ m}/\mu\text{s}$  [4].

- Εκκένωση Αντίθετης Φοράς

Ο οχετός προεκκένωσης εμφανίζεται σαν μια μεταλλική προεξοχή που επεκτείνεται από το σύννεφο προς το έδαφος. Καθώς ο οχετός κατέρχεται αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο της γης και συνεπάγεται την δημιουργία ανερχόμενης εκκένωσης που θα τείνει να τον συναντήσει [2]

- Κύρια Εκκένωση

Τέλος, όταν ο οχετός προεκκένωσης και η εκκένωση αντίθετης φοράς συναντηθούν υπάρχει πλήρης αγωγή μεταξύ νέφους και γης. Κατά την κύρια εκκένωση, προς εξουδετέρωση του φορτίου του νέφους, μετακινούνται προς αυτό ηλεκτρικά φορτία από τη γη με ταχύτητα που κυμαίνεται από 20 έως 150 m/μs [4] .

Αξίζει, επίσης, να αναφέρουμε ότι τον κεραυνό αρνητικής πολικότητας ενδέχεται να ακολουθήσει δεύτερη, τρίτη ακόμη και τέταρτη εκφόρτιση έπειτα την κύρια εκκένωση, μικρότερου εύρους. Αντιθέτως, οι θετικοί κεραυνοί αποτελούνται από μία μόνο κύρια εκκένωση, με πιο υψηλές τιμές μέγιστου ρεύματος, σε σύγκριση με τους κεραυνούς αρνητικής πολικότητας, ενώ έχουν και μεγαλύτερη διάρκεια.

### 1.5 Χαρακτηριστικά και Παράμετροι Κεραυνών

Ο κεραυνός χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Μέγιστη Τιμή Ρεύματος  $I_{max}$

Προκαλεί υπερπήδηση μονωτήρων και καταστροφή των μονωτικών υλικών, ανυψώνοντας το δυναμικό πληγέντων σημείων ανάλογα με την αντίσταση που θα αναγκαστεί να διαρρεύσει. Καθορίζει την πιθανότητα διάσπασης της μόνωσης.

- Μέγιστη Κλίση Κεραυνικού Ρεύματος  $\frac{di}{dt} max$

Καθορίζει τι επαγόμενες τάσεις σε βρόγχους κυκλωμάτων και τάσεις που αναπτύσσονται λογικά κυκλώματα και σε ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών.

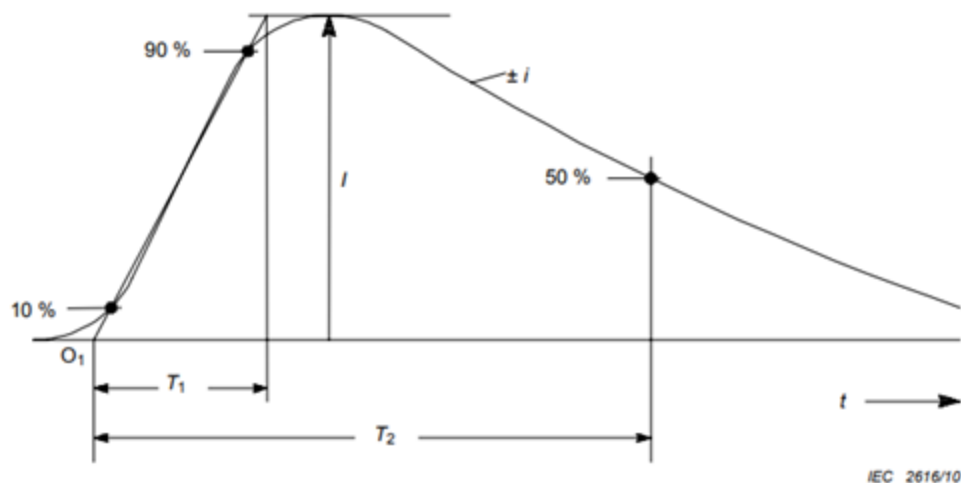
- Συνολικό Μεταφερόμενο Φορτίο  $\int_0^{\infty} i(t) \cdot dt$

Προκαλεί τοπική τήξη και διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.

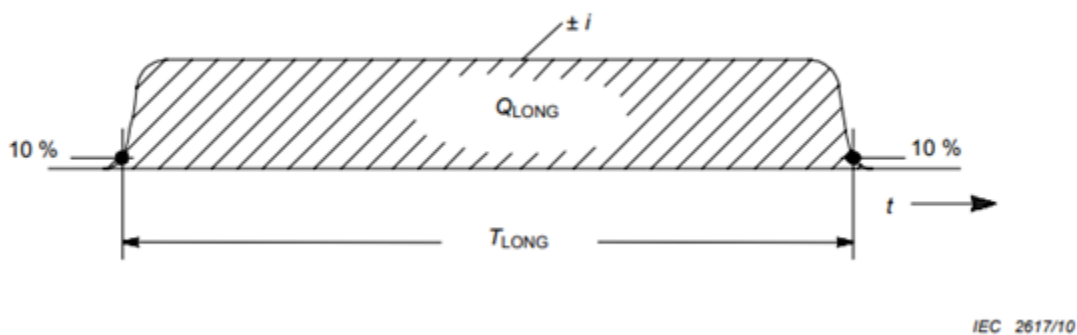
- Ειδική Ενέργεια  $\int_0^{\infty} i^2(t) \cdot dt$

Είναι ανάλογο της εκλυόμενης ενέργειας του κεραυνού που προκαλεί θερμικά φαινόμενα όπως η τήξη μετάλλων, η έναρξη εύφλεκτων ατμών και αερίων. Είναι η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη ροή του ρεύματος του κεραυνού σε μοναδιαία αντίσταση εκφράζοντας την ηλεκτρική εκκένωση του σε A<sup>2</sup>s ή J/Ω.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-1 «Protection Against Lightning - Part 1: General Principles» [7] το ρεύμα των κεραυνικών εκκενώσεων είναι είτε κρουστικό ρεύμα με διάρκεια μικρότερη από 2 ms (Εικόνα 3), είτε μακριάς εκφόρτισης με διάρκεια μεγαλύτερη από 2 ms (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Κεραυνικό κρουστικό ρεύμα - τυπικά  $T_2 < 2 \text{ ms}$  [7] .



Εικόνα 1.5: Κεραυνικό ρεύμα μακριάς εκφόρτισης - τυπικά  $2 \text{ ms} < T_2 < 1 \text{ s}$  [7] .

Όπου:

- $O_1$

Είναι η εικονική αρχή του κρουστικού ρεύματος, στο σημείο τομής του άξονα του χρόνου με την ευθεία γραμμή που σχηματίζουν τα σημεία πάνω στο «μέτωπο» του κρουστικού ρεύματος με τιμή 10% και 90% του μέγιστου ρεύματος.

- $T_1$

Είναι ο χρόνος μετώπου, ίσος με 1.25 το χρονικό διάστημα μεταξύ των στιγμών που επιτυγχάνεται το 10% και το 90% της τιμής κορυφής.

- $T_2$

Είναι ο χρόνος ημίσεος εύρους, ίσος με το χρονικό διάστημα μεταξύ του  $O_1$  και την χρονική στιγμή του σημείου πάνω στην «ουρά» του κρουστικού ρεύματος που η τιμή του είναι 50% του μέγιστου ρεύματος.

- $T_{LONG}$

Είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ των σημείων ενός μακράς διάρκειας κεραυνικού ρεύματος όπου το ρεύμα είναι 10% της μέγιστης τιμής. Το πρώτο σημείο βρίσκεται στην πλευρά όπου το μέτρο του ρεύματος αυξάνεται, ενώ το δεύτερο στην πλευρά που το μέτρο του ρεύματος μειώνεται.

- $Q_{LONG}$

Είναι το φορτίο που μεταφέρει ένας κεραυνός μακράς διάρκειας, ίσο με το ολοκλήρωμα του ρεύματος στο πεδίο του χρόνου.

Εδώ αξίζει να διευκρινίσουμε ότι με τον όρο «μέτωπο» αναφερόμαστε στην περιοχή που το μέτρο του ρεύματος αυξάνεται και με τον όρο «ουρά» στην περιοχή που το μέτρο του ρεύματος μειώνεται.

## 1.6 Επιπτώσεις Κεραυνού

### 1.6.1 Βλάβες σε Κατασκευές

Οι κεραυνοί που πλήττουν τις κατασκευές προκαλούν ζημιές είτε στην ίδια την κατασκευή είτε στους ανθρώπους, τα αντικείμενα και τις συσκευές εντός της κατασκευής. Οι ζημιές και οι αστοχίες μπορούν να παρατηρηθούν και στον περιβάλλοντα χώρο μιας πληγούσας από κεραυνό κατασκευής. Η κλίμακα των καταστροφών εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής όσο και του κεραυνού.

Τα χαρακτηριστικά της κατασκευής που επηρεάζουν την κλίμακα των καταστροφών είναι:

- Κατασκευαστικά υλικά (ξύλο, τούβλο, σκυρόδεμα, οπλισμένο σκυρόδεμα, ατσάλινες κατασκευές κ.τ.λ.).
- Τρόπος χρήσης κατασκευής (κατοικία, γραφείο, φάρμα, θέατρο, ξενοδοχείο, σχολείο, νοσοκομείο, μουσείο, εκκλησία, φυλακή, τράπεζα, εργοστάσιο, γήπεδο κ.τ.λ.).
- Ένοικοι και περιεχόμενο (άνθρωποι και ζώα, εύφλεκτα και μη υλικά, εκρηκτικά και μη υλικά, ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές με χαμηλή αντοχή σε υψηλή τάση κ.τ.λ.).
- Συνδεδεμένες γραμμές (γραμμές ισχύος, τηλεπικοινωνιακές γραμμές, αγωγοί κ.τ.λ.).



- Υφιστάμενα ή παρεχόμενα μέτρα προστασίας (συστήματα προστασίας περιορισμού φυσικών ζημιών, συστήματα προστασίας για αστοχία του εσωτερικού συστήματος της κατασκευής κ.τ.λ.).
- Κλίμακα επέκτασης του κινδύνου (κατασκευές με δυσκολία εκκένωσης ή που μπορεί να επικρατήσει πανικός, κατασκευή επικίνδυνη για τον περιβάλλοντα χώρο, κατασκευή επικίνδυνη για το περιβάλλον κ.τ.λ.) [7] .

### 1.6.2 Αιτίες και Τύποι Ζημιών σε Κατασκευές

Οι ζημιές των κατασκευών που προκαλούνται από κεραυνικό ρεύμα διακρίνονται ανάλογα με το σημείο που προσπίπτει ο κεραυνός:

- S1: κεραυνοί απευθείας στις κατασκευές.
- S2: κεραυνοί κοντά στις κατασκευές.
- S3: κεραυνοί στις γραμμές που συνδέονται με τις κατασκευές.
- S4: κεραυνοί κοντά στις γραμμές που συνδέονται με τις κατασκευές.

Οι τύποι ζημιών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

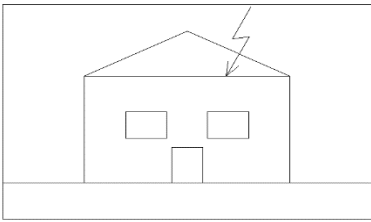
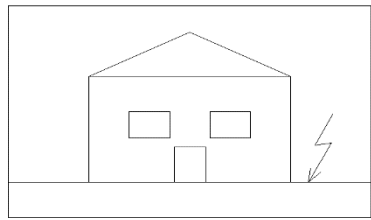
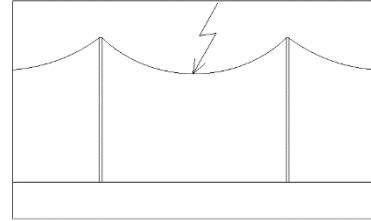
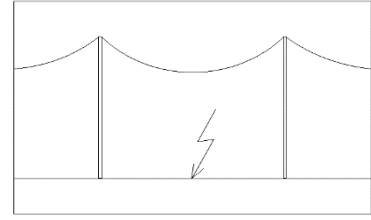
- D1: ηλεκτροπληξία ζώων και ανθρώπων.
- D2: φυσική καταστροφή (φωτιά, έκρηξη, μηχανικές βλάβες) λόγω του κεραυνικού ρεύματος και των σπινθήρων.
- D3: αστοχία εσωτερικού συστήματος λόγω ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων (L.E.M.P.).

Ως L.E.M.P. (Lightning Electromagnetic Impulse) ορίζουμε όλες τις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις του κεραυνικού ρεύματος μέσω ωμικής, επαγωγικής και χωρητικής σύζευξης, που δημιουργεί υπερτάσεις και ακτινοβολούμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία [7] .

### 1.6.3 Τύποι Απωλειών

- L1: απώλεια ανθρώπινης ζωής (συμπεριλαμβανομένου μόνιμων τραυματισμών).
- L2: απώλεια δημόσιων υπηρεσιών.
- L3: απώλεια πολιτιστικής κληρονομιάς.
- L4: απώλεια οικονομικής αξίας [7] .

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1) παρουσιάζονται οι ζημιές και οι απώλειες που σχετίζονται με μια κατασκευή σύμφωνα με διαφορετικά σημεία χτυπήματος κεραυνού, όπως παρουσιάζεται στο πρότυπο IEC 62305-1 [7].

Σημείο Πρόσπτωσης Κεραυνού		Πηγή Ζημιάς	Τύπος Ζημιάς	Τύπος Απωλειών
Στην Κατασκευή		S1	D1 D2 D3	L1, L4 <sup>α</sup> L1, L2, L3, L4 L1 <sup>β</sup> , L2, L4
Κοντά στην Κατασκευή		S2	D3	L1 <sup>β</sup> , L2, L4
Σε Συνδεδεμένη Γραμμή		S3	D1 D2 D3	L1, L4 <sup>α</sup> L1, L2, L3, L4 L1 <sup>β</sup> , L2, L4
Κοντά σε Συνδεδεμένη Γραμμή		S4	D3	L1 <sup>β</sup> , L2, L4
<p>α) Μόνο για κατασκευές όπου ενδέχεται να υπάρξουν απώλειες ζώων.</p> <p>β) Μόνο για κατασκευές που το ρίσκο έκρηξης και για νοσοκομεία ή άλλες κατασκευές όπου η αστοχία του εσωτερικού συστήματος θέτει άμεσα σε κίνδυνο ανθρώπινη ζωή.</p>				

Πίνακας 1.1: Ζημιές και απώλειες που σχετίζονται με μια κατασκευή σύμφωνα με διαφορετικά σημεία χτυπήματος κεραυνού όπως παρουσιάζονται στο IEC 62305-1 [7] .

#### 1.6.4 Επιπτώσεις στον Άνθρωπο

Τα κεραυνικά πλήγματα στον άνθρωπο διακρίνονται σε απευθείας πλήγματα, πλήγματα λόγω αναστροφής διάσπασης, δηλαδή κεραυνικό πλήγμα σε κάποιο αντικείμενο που συνεπάγεται την ανύψωση του δυναμικού του, την διάσπαση του αέρα, υπερπήδηση (ηλεκτρικό τόξο) και τελικώς πλήγμα στον άνθρωπο, πλήγματα λόγω της αναπτυσσόμενης στο έδαφος βηματικής

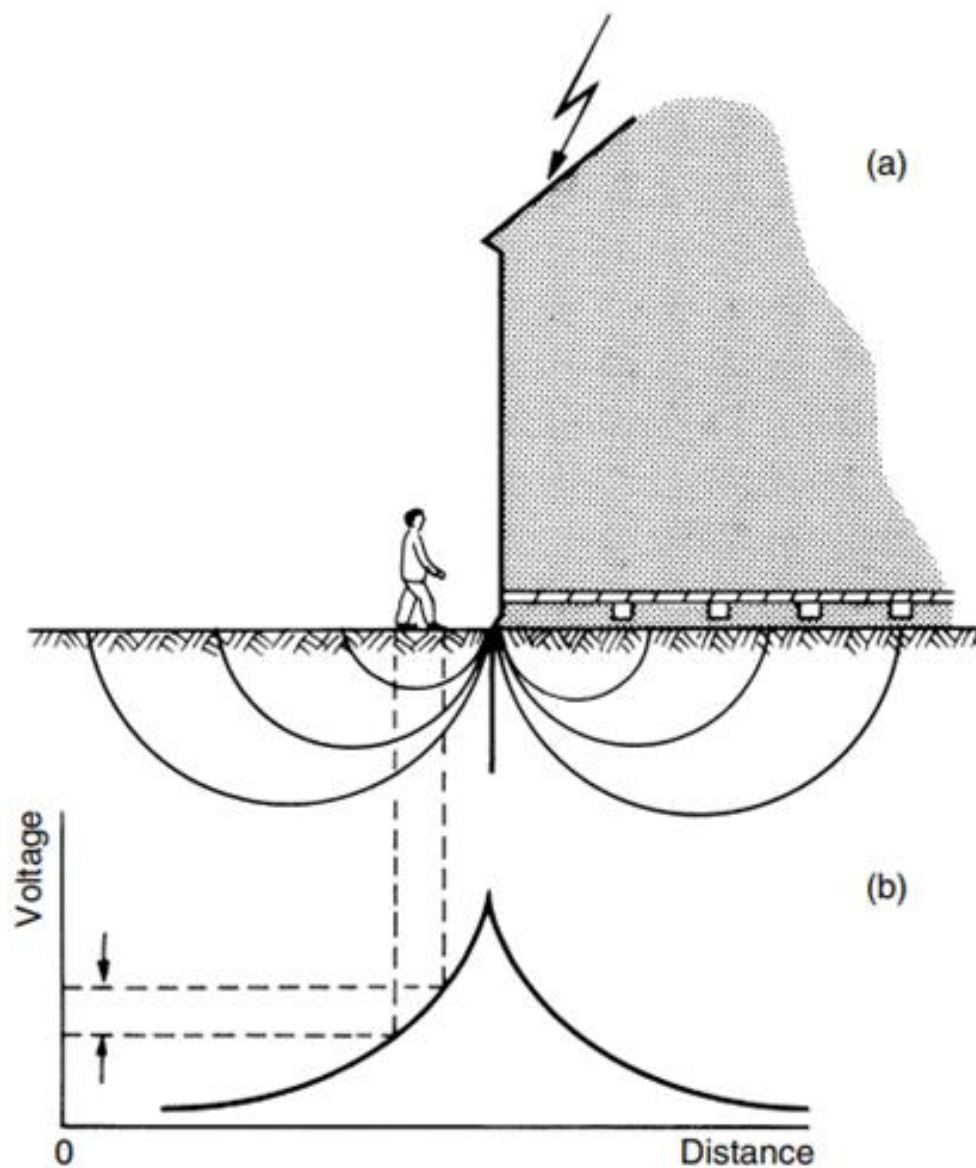
τάσης και πλήγματα λόγω ενός έντονου ηλεκτρικού πεδίου που μπορεί να επάγει θανατηφόρα ρεύματα. [8] [4] .

Οι συνέπειες του κεραυνού στον άνθρωπο συνοψίζονται σε:

- Καρδιοπνευμονικές επιπλοκές.
- Αναπνευστικές επιπλοκές.
- Απώλεια συνείδησης.
- Παραπληγία, τετραπληγία.
- Κώμα.
- Εσωτερική αιμορραγία.
- Αρτηριακοί σπασμοί.
- Εγκαύματα.
- Αλλοίωση κερατοειδούς.
- Αποκόλληση αμφιβληστροειδούς.
- Βλάβη του οπτικού νεύρου.
- Διάτρηση τύμπανου.
- Προσωρινή απώλεια ακοής.

Απευθείας κεραυνικά πλήγματα στον άνθρωπο, αξίζει να σημειώσουμε, σπάνια συναντώνται, καθώς ψηλότερες κατασκευές παρέχουν «γρηγορότερη» διαδρομή του φορτίου του κεραυνού προς την γη. Οι περισσότερες περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων σε ανθρώπους σχετίζονται με βηματικής τάσεις. Έτσι, ενώ σε κλειστούς χώρους δεν υφίσταται κατά κανόνα κίνδυνος, στην ύπαιθρο, σε περίπτωση καταιγίδας καλό είναι να αποφεύγεται η παραμονή κάτω από ψηλά δέντρα ή ψηλούς τοίχους. Επίσης καλό είναι να μη στέκεται κανείς όρθιος, καθώς το πεδίο στο ανθρώπινο σώμα είναι αυξημένο και μπορεί να προσελκύσει κεραυνό, όπως και τα πόδια να παραμένουν κλειστά προς αποφυγή βηματικών τάσεων [4]

Στην ακόλουθη εικόνα της επόμενης σελίδας (Εικόνα 1.6) απεικονίζεται ποιοτικά η κατανομή ρεύματος στο έδαφος και η κατανομή τάσης κατά μήκος του έδαφος που εκτείνεται προς τα έξω από την άκρη ενός κτιρίου που χτυπήθηκε από κεραυνό. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ποδιών του ατόμου θα είναι μέγιστη αν αυτά διαχωρίζονται κατά μήκος μιας ακτινικής γραμμής από την πηγή τάσης και θα είναι αμελητέα αν κινείται σε μία κάθετη γωνία ως προς μια τέτοια ακτινική γραμμή. Στην τελευταία περίπτωση το άτομο θα ήταν ασφαλές λόγω του στοιχείου της τύχης [8]



Εικόνα 1.6: Κατανομή ρεύματος και τάσης εντός εδάφους λόγω κεραυνικού πλήγματος σε ένα κτήριο [8]

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

# Υπερτάσεις που Καταπονούν Εγκαταστάσεις ΧΤ

### 2.1 Εισαγωγή

Οι υπερτάσεις που καταπονούν τις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης διακρίνονται σε εξωτερικές και εσωτερικές. Οι εξωτερικές υπερτάσεις οφείλονται στο φαινόμενο του κεραυνού, ενώ οι εσωτερικές υπερτάσεις οφείλονται σε φαινόμενα είτε μεταβατικά είτε λειτουργικά που λαμβάνουν χώρα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.2 Εξωτερικές Υπερτάσεις Καταπόνησης Εγκαταστάσεων ΧΤ

Κατά τη διάρκεια καταιγίδων, οι κεραυνοί μπορούν να χτυπήσουν απευθείας τις εγκαταστάσεις προκαλώντας αρνητικές συνέπειες τόσο στο ίδιο το κτίριο και τον εξοπλισμό που διαθέτει, όσο και στους ανθρώπους και τα ζώα που το χρησιμοποιούν, προκαλώντας ακόμη και την απώλεια ζωής όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1.

Παράλληλα, οι κεραυνοί μπορεί πρώτα να πλήξουν γραμμές μεταφοράς και διανομής και να δημιουργήσουν υπερτάσεις που μεταφέρονται ως οδεύοντα κύματα στις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης που ηλεκτροδοτούνται από τις γραμμές αυτές. Οι ατμοσφαιρικές – εξωτερικές υπερτάσεις συνήθως εμφανίζονται αρχικά σε γραμμές μεταφοράς και έπειτα διαδίδονται στο υπόλοιπο δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν τρεις περιπτώσεις δημιουργίας υπέρτασης λόγω κεραυνού σε μία γραμμή μεταφοράς ή διανομής:

- Απευθείας Κεραυνοπληξία μιας Γραμμής

Όταν ένας κεραυνός πλήττει έναν ενεργό αγωγό φάσης τότε λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας του φαινομένου το ρεύμα του κεραυνού συμπεριφέρεται ως οδεύον κύμα. Αν ο κεραυνός πλήξει το άκρο της γραμμής τότε παράλληλα με το οδεύον κύμα που οφείλεται στο συνολικό ρεύμα του κεραυνού  $i(t)$  δημιουργείται και ένα οδεύον κύμα τάσης ίσο με  $Z \cdot i(t)$ , όπου  $Z$  αποτελεί χαρακτηριστικό στοιχείο μιας γραμμής, έχει διαστάσεις αντίστασης ( $\Omega$ ), εξαρτάται από την αυτεπαγωγή  $L$  (H/km) και την χωρητικότητα  $C$  (F/km) της γραμμής, ονομάζεται κυματική ή χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής και προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα του λόγου  $L/C$ . Αν ο κεραυνός πλήξει σημείο κατά μήκος της γραμμής, τότε το συνολικό ρεύμα διαμοιράζεται σε δύο ίσα μέρη ( $i(t)/2$ ) και δημιουργεί δύο όμοια οδεύοντα κύματα τάσης αντίθετης κατεύθυνσης ίσα με  $Z \cdot i(t)/2$  [2] [4].

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- Κεραυνοπληξία στον Αγωγό Προστασίας της γραμμής και Ανάστροφη Διάσπαση

Για την προστασία των ενεργών αγωγών σε μία γραμμή μεταφοράς από απευθείας κεραυνοπληξία, τοποθετούμε έναν ή δύο αγωγούς προστασίας πάνω από τους αγωγούς φάσης. Οι αγωγοί προστασίας βρίσκονται σε αγώγιμη επαφή κατά την στήριξή τους από τους μεταλλικούς πυλώνες οι οποίοι καταλήγουν σε θεμελιακή γείωση. Όταν ένας αγωγός προστασίας πληγεί από κεραυνό, προστατεύοντας τις φάσεις της γραμμής, ένα οδεύον κύμα ρεύματος και ένα οδεύον κύμα τάσης, ανάλογο του κεραυνικού ρεύματος και της κυματικής αντίστασης του αγωγού προστασίας, κατευθύνονται προς τους δύο πυλώνες που στηρίζουν τον αγωγό. Καθώς η υπέρταση οδεύει προς έναν πυλώνα ακολουθεί η ανύψωση δυναμικού του πυλώνα, καθώς μέρος του κεραυνικού ρεύματος θα οδεύσει μέσω του μεταλλικού ικρίωματος και της γείωσης στην γη. Παράλληλα δημιουργούνται δύο διαθλώμενα οδεύοντα κύματα στον αγωγό προστασίας με κατεύθυνση προς τον επόμενο πυλώνα (ένα κύμα τάσης και ένα κύμα ρεύματος) και δύο ανακλώμενα οδεύοντα κύματα στον αγωγό προστασίας που θα οδεύσουν προς τον προηγούμενο πυλώνα. Κατά την ανύψωση του δυναμικού του πυλώνα είναι πιθανό να επιτευχθεί η τάση διάσπασης της μόνωσης, δηλαδή των μονωτήρων στήριξης ή ανάρτησης που μονώνουν και συνδέουν μηχανικά αγωγούς φάσης και πυλώνα. Έτσι, ένα ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται μεταξύ πυλώνα και φάσης με αποτέλεσμα την όδευση μέρους του κεραυνικού ρεύματος του πυλώνα προς την φάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «ανάστροφη διάσπαση». Η ανύψωση του δυναμικού του πυλώνα μπορεί να προέλθει και με την απευθείας κεραυνοπληξία του [2] [4].

- Επαγόμενες Υπερτάσεις

Στην περίπτωση πτώσης κεραυνού κοντά στη γραμμή τόσο η γραμμή όσο και το έδαφος δρουν ως φορτισμένοι πυκνωτές με φορτίο αντίθετο από εκείνο του κεραυνού. Όταν ο οδηγός οχετός μίας ατμοσφαιρικής εκκένωσης κατέρχεται επάγει την δημιουργία - συσσωρευση αντίθετου φορτίου σε κοντινές σε αυτόν περιοχές της γραμμής. Εάν ωστόσο ο οδηγός οχετός καταλήξει σε μία κύρια εκκένωση εκτός της γραμμής, τότε το συσσωρευμένο φορτίο «αποδεσμεύεται» και διαχέεται με τη μορφή δύο αντίθετων οδεύοντων κυμάτων ρεύματος  $I$  προς τις απομακρυσμένες περιοχές της γραμμής από όπου είχε προηγουμένως επέλθει. Έτσι, παράλληλα με το οδεύον κύμα ρεύματος δημιουργείται και ένα οδεύον κύμα τάσης ίσο με  $Z \cdot I$ , όπου  $Z$  κυματική αντίσταση της γραμμής. Αξίζει να σημειώσουμε ότι το επαγόμενο φορτίο της γραμμής είναι σημαντικά μικρότερο από εκείνο του κεραυνού. Επομένως οι επαγόμενες τάσεις είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με τις υπερτάσεις λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας. Για αυτόν τον λόγο οι επαγόμενες τάσεις δεν αποτελούν κίνδυνο για τα δίκτυα μεταφοράς υψηλής τάσης και διανομής μέσης τάσης καθώς έχουν σχεδιαστεί ώστε η μόνωση τους να αντέχει κεραυνικές υπερτάσεις και εσωτερικές διακοπτικές υπερτάσεις (βλέπε κεφάλαιο 2.3). Αντιθέτως, απειλούν τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης όπου το επίπεδο τάσης αντοχής της μόνωσής τους είναι συγκρίσιμο με εκείνο των επαγόμενων τάσεων. Αξίζει να σημειωθεί πως επαγόμενες υπερτάσεις παράγονται στις «υγιείς» φάσεις και κατά την απευθείας κεραυνοπληξία μίας φάσης.

Ωστόσο, σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο η καταπόνηση είναι αρκετά μεγαλύτερη στην φάση που δέχτηκε το πλήγμα και για αυτό δεν εξετάζουμε τις επαγόμενες [2] [4] .

### 2.3 Εσωτερικές Υπερτάσεις Καταπόνησης Εγκαταστάσεων ΧΤ

Οι εσωτερικές υπερτάσεις που αναπτύσσονται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο καθορίζονται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του, τη δομή του και τον τρόπο εκμετάλλευσής του. Προέρχονται από εσωτερικά αίτια, για αυτό και τις αποκαλούμε εσωτερικές υπερτάσεις, καταπονούν τις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης μέσω των γραμμών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και διακρίνονται σε παροδικές υπερτάσεις και υπερτάσεις χειρισμών.

Οι παροδικές ή δυναμικές υπερτάσεις έχουν σχετικά μικρό εύρος, δηλαδή χαμηλές τιμές μέγιστης τιμής τάσης, αλλά μεγάλη διάρκεια (από τα 10ms έως και αρκετά λεπτά της ώρας) και διακρίνουμε τέσσερις αιτίες εμφάνισής τους:

- Απόρριψη Φορτίου

Κατά την απότομη απόρριψη ενός φορτίου μηδενίζεται ή μειώνεται (ανάλογα με το αν το φορτίο συνδέεται σε αποκλειστική γραμμή) η πτώση τάσης πάνω σε μία γραμμή, στους μετασχηματιστές και στην εσωτερική αντίσταση των γεννητριών. Έτσι οι γεννήτριες επιταχύνονται έως ότου οι ρυθμιστές ταχύτητας - στροφών να επενεργήσουν και να επαναφέρουν τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας μειώνοντας την μηχανική ροπή που επιβάλλεται στην γεννήτρια, καθώς η προηγούμενη ρύθμισή τους εξυπηρετούσε τις ανάγκες του φορτίου. Επειδή, όμως, αυτή η διαδικασία δεν είναι ακαριαία η τάση στο δίκτυο τείνει προς τη σημαντικά μεγαλύτερη εσωτερική ηλεκτρεγερτική δύναμη των γεννητριών. Οι εμφανιζόμενες υπερτάσεις είναι το πολύ της τάξεως του 40%, δηλαδή είναι μικρότερες από 1.4 ανά μονάδα της βασικής τάσης λειτουργίας του δικτύου [4] [9] .

- Φαινόμενο Ferranti

Σε μία αφόρτιστη γραμμή μεταφοράς με ανοιχτό το ένα της άκρο ή σε μία ασθενώς φορτισμένη γραμμή μεταφοράς, παρατηρείται ανύψωση της τάσης στο πέρας της γραμμής. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο ότι το ρεύμα φόρτισης της γραμμής είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα του φορτίου και ονομάζεται φαινόμενο Ferranti. Η εμφανιζόμενη ανύψωση τάσης είναι το πολύ της τάξεως του 10%, δηλαδή είναι μικρότερες από 1.1 ανά μονάδα της βασικής τάσης λειτουργίας του δικτύου. Για την καταπολέμηση του φαινομένου τόσο στα δίκτυα χαμηλής τάσης όσο και στα δίκτυα υψηλής χρησιμοποιούνται εγκάρσιες επαγωγικές αντισταθμίσεις στην άφιξη των γραμμών ή μειώνεται η τάση στην αναχώρηση των γραμμών [2] [4] .

- Βραχυκύκλωμα ως προς Γη

Όταν λαμβάνει χώρα σφάλμα μίας ή δύο φάσεων προς γη ανυψώνεται η τάση στις εναπομείναντες υγιείς φάσεις. Οι υψηλότερες τάσεις τέτοιου τύπου παρουσιάζονται για μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη. Το συγκεκριμένο φαινόμενο ονομάζεται και μετατόπιση ουδετέρου κόμβου. Εκτός από τη θέση του βραχυκυκλώματος ο τρόπος γείωσης του ουδετέρου του συστήματος επηρεάζει σημαντικά την ανύψωση της τάσης των υγιών

τάσεων. Έτσι σε συστήματα με άμεση γείωση του ουδέτερου, η υπέρταση είναι χαμηλότερη από την πολική τάση, ενώ σε συστήματα με αμείωτο τον ουδέτερο, η τάση ως προς γη των υγειών φάσεων μπορεί να υπερβεί και την πολική τάση του δικτύου [2] [4].

- Κορεσμός Μαγνητικών Κυκλωμάτων

Σύνηθες φαινόμενο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ύπαρξη αρμονικών ταλαντώσεων. Η σχέση ανάμεσα στο ρεύμα μαγνήτισης και την εφαρμοζόμενη τάση σε ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει πυρήνες σιδήρου, όπως ένας μετασχηματιστής, δεν είναι γραμμική όταν ο πυρήνας πλησιάζει τον κορεσμό. Κατά συνέπεια, το ρεύμα μαγνήτισης που προκύπτει από μια ημιτονοειδή τάση δεν είναι ημιτονοειδές, αλλά περιλαμβάνει αρμονικές συνιστώσες. Λόγω της παρουσίας αυτεπαγωγών και χωρητικοτήτων σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν κυκλώματα με συχνότητα συντονισμού που είναι παρόμοια με μία από τις αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος, με αποτέλεσμα να προκαλούνται υψηλές τάσεις. Κύριες πηγές αρμονικών συχνοτήτων σε ένα δίκτυο υψηλής τάσης είναι οι μετασχηματιστές ισχύος ή οργάνων και οι αυτεπαγωγές αντιστάθμισης [4] [10].

Οι υπερτάσεις χειρισμών ή μεταβατικές υπερτάσεις έχουν σχετικά μεγάλο εύρος (έως και 7.5 ανά μονάδα), δηλαδή υψηλές τιμές μέγιστης τιμής τάσης, και μικρή διάρκεια (από εκατοντάδες ms έως λίγα ms) και διακρίνουμε τέσσερις αιτίες εμφάνισής τους:

- Ζεύξη, Απόζευξη και Επανάζευξη μιας Γραμμής

Υπερτάσεις παρουσιάζονται κατά την ζεύξη, απόζευξη και επανάζευξη μιας γραμμής σε δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης λόγω της απότομης μεταβολής του ρεύματος ( $di/dt$  υψηλό). Αυτές οι υπερτάσεις έχουν ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης και της εξάπλωσης του οδεύοντος κύματος τάσης κατά την ενεργοποίηση μιας αφόρτιστης γραμμής. Η κλίση του μπροστινού μέρους του κύματος τάσης είναι πιο απότομη όσο πιο ισχυρό είναι το δίκτυο τροφοδοσίας της γραμμής. Κατά τη διάδοση του οδεύοντος κύματος τάσης μέσω της γραμμής, υπόκειται σε φαινόμενα μετασχηματισμού και απόσβεσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της γραμμής. Κατά την ενεργοποίηση μιας γραμμής με ανοικτό άκρο, εμφανίζεται ένα οδεύον κύμα τάσης που υφίσταται ολική ανάκλαση στο άκρο της γραμμής, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται υπέρταση ίση με 2 ανά μονάδα βασικής τάσης. Σε περιπτώσεις όπου η γραμμή φέρει δεσμευμένο φορτίο πριν τη ζεύξη της, κάτι που συμβαίνει όταν έχουμε απόζευξη και ταχεία επανάζευξη, και λόγω του ότι οι διακόπτες των φάσεων κατά την ζεύξη ενδέχεται να μην ταυτοχρονίζονται μπορεί να παρουσιαστούν υπερτάσεις έως και 4 ανά μονάδα βασικής τάσης [2] [4] [9].

Η συμπεριφορά του κυκλώματος στιγμιαία, αμέσως μετά την ενεργοποίηση μιας γραμμής με ωμικά, χωρητικά και επαγωγικά στοιχεία που αντιπροσωπεύονται σαν συγκεντρωμένα στοιχεία  $R$ ,  $C$  και  $L$ , ή την απόρριψη ενός φορτίου, μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$V_S = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^{\infty} i(t) \cdot dt$$



- Διακοπή Μικρών Επαγωγικών Ρευμάτων

Οι διακόπτες ισχύος, αν και έχουν σχεδιαστεί ώστε να αποκόπτουν μεγάλο ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά την διέλευσή του από το μηδέν, όταν χρησιμοποιούνται για την διακοπή μικρών επαγωγικών ρευμάτων, όπως το ρεύμα μαγνήτισης ενός αφόρτιστου μετασχηματιστή, είναι δυνατόν να το διακόψουν πριν από τον μηδενισμό του. Καθώς το επαγωγικό ρεύμα δεν μπορεί να μηδενιστεί ακαριαία με το άνοιγμα του διακόπτη η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που είναι αποθηκευμένη στον μετασχηματιστή, μετατρέπεται σε ενέργεια ηλεκτροστατικού πεδίου, που αποθηκεύεται στην παράσιτη χωρητικότητα του τυλίγματος. Στη συνέχεια ο διακόπτης κλείνει, 'αντιλαμβάνεται' ότι το ρεύμα δεν έχει μηδενιστεί και ξανανοίγει, με αποτέλεσμα ταλαντώσεις της αποθηκευμένης ενέργειας του μετασχηματιστή μεταξύ παράσιτης χωρητικότητας και αυτεπαγωγής, έως ότου μηδενιστεί το ρεύμα τροφοδότησης του κλάδου μαγνήτισης του μετασχηματιστή και τελική απόζευξη του. Η τιμή της παράσιτης χωρητικότητας είναι μικρή και για αυτό η φόρτιση γίνεται σε υψηλές τάσεις με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υπερτάσεις έως και 660 kV [2] [4] [9] .

- Διακοπή Ρευμάτων Βραχυκύκλωσης

Ένας τριφασικός διακόπτης ισχύος διακόπτει ρεύματα βραχυκύκλωσης αποκόπτοντας κάθε φάση όταν το μεγάλο ρεύμα βραχυκύκλωσης περάσει από το μηδέν. Επειδή στα τριφασικά δίκτυα δεν μηδενίζεται ταυτόχρονα το ρεύμα κάθε φάσης δημιουργείται μια υπέρταση βιομηχανικής συχνότητας μεταξύ των φάσεων. Παράλληλα, κατά την διακοπή του ρεύματος βραχυκύκλωσης εμφανίζεται μία δεύτερη συνιστώσα υπέρτασης λόγω της μεταβατικής συμπεριφοράς του δικτύου [2] [4] [9] .

- Διακοπή Χωρητικού Ρεύματος (γραμμή μεταφοράς ή αφόρτιστο καλώδιο, πυκνωτές)

Η απόζευξη χωρητικού φορτίου έχει ιδιαίτερη σημασία, γιατί στην πράξη τη συναντάμε σε εγκαταστάσεις αντιστάθμισης των καταναλωτών για την ρύθμιση του συντελεστή ισχύος, αλλά και σε υποσταθμούς. Καθώς η υπέρταση που δύναται να δημιουργηθεί είναι αρκετά μεγάλη, λόγω της συσσωρευμένης στον πυκνωτή ηλεκτρικής ενέργειας, η απόζευξη χωρητικού φορτίου χρειάζεται ο διακόπτης που χρησιμοποιείται να προδιαγραφεται ειδικά για χωρητικό φορτίου [2] [7] .



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

# Προστασία Εγκαταστάσεων ΧΤ από Υπερτάσεις

### 3.1 Εισαγωγή

Όπως έγινε αντιληπτό στο κεφάλαιο 2, οι εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης καταπονούνται από υπερτάσεις, που είτε έχουν ατμοσφαιρική προέλευση είτε οφείλονται στην λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συχνά παρατηρούμε την μετάδοση υπερτάσεων μέσω των γραμμών που ηλεκτροδοτούν τους καταναλωτές. Ωστόσο και η απευθείας κεραυνοπληξία της εγκατάστασης είναι πιθανή, ειδικά σε περιοχές με αρκετές ημέρες καταιγίδας και για κατασκευές ψηλότερες των γειτονικών τους. Για τον λόγο αυτόν είναι αναγκαίο όπου απαιτείται οι εγκαταστάσεις να διαθέτουν συστήματα προστασίας έναντι υπερτάσεων.

### 3.2 Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ)

Όταν ένας κεραυνός πλήττει απευθείας μια εγκατάσταση, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στο ηλεκτρολογικό σύστημα και τον εξοπλισμό, στους ανθρώπους και τα ζώα εντός της εγκατάστασης αλλά και στην ίδια την κατασκευή. Για αυτό κρίνεται απαραίτητη η σχεδίαση, όπου απαιτείται, ενός αποτελεσματικού Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ).

Το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας αποτελείται από δύο ενότητες: εξωτερική και εσωτερική προστασία. Πολλές φορές με τον όρο Συστήματα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) αναφερόμαστε στο εξωτερικό σύστημα προστασίας. Ο σκοπός της εξωτερικής προστασίας είναι να οδηγηθεί η εκκένωση του κεραυνού μακριά από την υπό προστασία εγκατάσταση σε ορισμένα σημεία όπως σε μεταλλικές ράβδους, τεντωμένα συρματόσχοινα, μεταλλικούς κλωβούς και ακολούθως το ρεύμα να περάσει ελεγχόμενα στο έδαφος μέσω μιας εγκατάστασης γείωσης. Η εσωτερική προστασία γίνεται για να προστατευτούν αντικείμενα από υπερτάσεις και επιτυγχάνεται με την χρήση απαγωγών υπερτάσεων, με την τήρηση των κατάλληλων αποστάσεων από μεταλλικά στοιχεία που προβλέπεται η ανύψωση του δυναμικού τους κατά την κεραυνοπληξία και με την δημιουργία ισοδυναμικών συνδέσεων [4] [12] [11] [15]

#### 3.2.1 Εξωτερική Προστασία

Για να εκτιμήσει κανείς την αναγκαιότητα εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας μπορεί να ακολουθήσει τις οδηγίες του προτύπου IEC 62305-2 [13]. Στο πρότυπο αυτό, περιγράφεται ένας αλγόριθμος που ανάλογα με το ρίσκο R1 «απώλειας ανθρώπινης ζωής», το ρίσκο R2 «απώλειας δημόσιας υπηρεσίας» και το ρίσκο R3 «απώλειας πολιτιστικής κληρονομιάς» υπολογίζει αν χρειάζονται ή όχι μέτρα προστασία. Πιο συγκεκριμένα, η

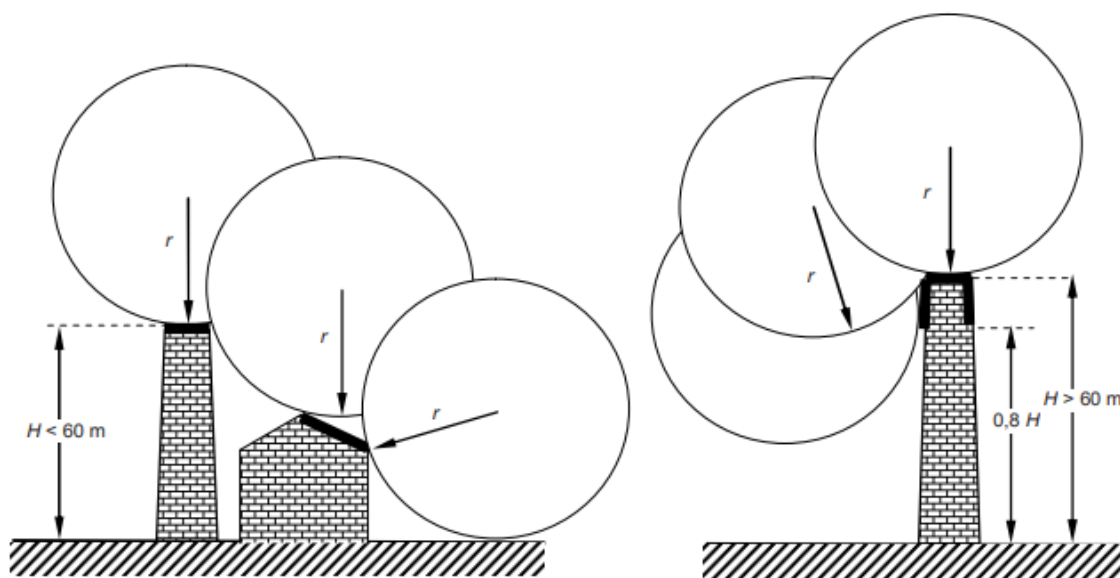
διαδικασία αυτή προσδιορίζει την στάθμη προστασίας που πρέπει να επιτυγχάνει το υπό σχεδιασμό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, καθώς οι απαιτήσεις σε αντικεραυνική προστασία ομαδοποιούνται σε τέσσερις ομάδες (I, II, III, IV στάθμες προστασίας) με την στάθμη I να είναι η πιο αυστηρή. Εκτός από την ανάγκη αντικεραυνικής προστασίας, μπορεί να είναι χρήσιμο να εξακριβωθούν και τα οικονομικά οφέλη από την εγκατάσταση μέτρων προστασίας προκειμένου να μειωθεί η οικονομική απώλεια (L4) [13] [14] .

Αφού υπολογιστεί η απαιτούμενη στάθμη προστασίας της εγκατάστασης, προσδιορίζεται η περιοχή προστασίας. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν τρεις ισοδύναμες μέθοδοι βάσει του προτύπου IEC 62305-3[12] :

- Η Μέθοδος της Κυλιόμενης Σφαίρας

Ανάλογα με την στάθμη προστασίας της εγκατάστασης προκύπτει η ακτίνα μιας νοητής σφαίρας. Η νοητή αυτή σφαίρα, καθώς κυλιέται στην υπό προστασία κατασκευή εφάπτεται σε κάποια σημεία της. Τα σημεία αυτά αποτελούν τις περιοχές που πρέπει να προφυλαχτούν από κεραυνοπληξία τοποθετώντας τα κατάλληλα συλλεκτήρια συστήματα όπως θα δούμε στην συνέχεια [4] [12] [11] .

Στάθμη Προστασίας	Ακτίνα $r$ (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60



Εικόνα 3.1: Εφαρμογή της μεθόδου της κυλιόμενης σφαίρας και προσδιορισμός του συλλεκτήριου συστήματος [12] .

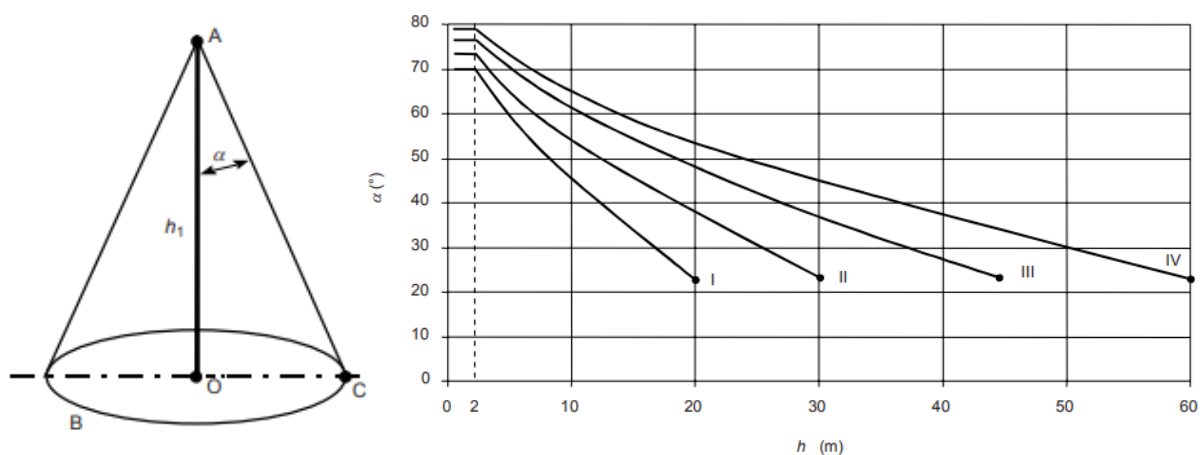
- Η Μέθοδος του Πλέγματος

Ένα μεταλλικό πλέγμα, με το άνοιγμα μικρότερης διάστασης  $w$  να προσδιορίζεται βάση της απαιτούμενης στάθμης προστασίας, προστατεύει ό,τι βρίσκεται στο εσωτερικό του [12].

Στάθμη Προστασίας	Μέγεθος Πλέγματος $w$ (m)
I	5 · 5
II	10 · 10
III	15 · 15
IV	20 · 20

- Η Μέθοδος της Γωνίας Προστασίας

Η μέθοδος αυτή, αποτελεί μία απλοποίηση της μεθόδου της κυλιόμενης σφαίρας. Ανάλογα το ύψος του άνω άκρου (άκρο A) μίας κατακόρυφης συλλεκτήριας μεταλλικής ράβδου, ως προς το επιπέδου αναφοράς, και της στάθμης προστασίας της υπό προστασία εγκατάστασης, προκύπτει η γωνία του νοητού κώνου, που αποτελεί την περιοχή προστασίας της συγκεκριμένης ράβδου. Ο πίνακας προσδιορισμού της γωνίας προστασίας  $\alpha$ ( $^\circ$ ) κατά IEC 62305-3 φαίνεται παρακάτω [4] [12] [11].



Εικόνα 3.2: Εφαρμογή της μεθόδου της γωνίας προστασίας και προσδιορισμός της περιοχής προστασίας μίας ράβδου [12].

Τα βασικά στοιχεία μιας εξωτερικής διάταξης αντικεραυνικής προστασίας κτιρίου βάση του προτύπου IEC 62305-3 [12] είναι:

- Το Σύστημα Συλλήψεως των Κεραυνικών Εκκενώσεων

Ένα συλλεκτήριο σύστημα, που κοινώς ονομάζεται και «αλεξικέραυνο», έχει σκοπό να ελκύει και να συλλέγει τους κεραυνούς, οδηγώντας τους μακριά από το υπό προστασία αντικείμενο. Το συλλεκτήριο σύστημα αποτελείται από κατακόρυφες ράβδους, που ενδέχεται να ενώνονται με ένα μεταλλικό πλέγμα μεταξύ τους, είτε από μεταλλικές αλυσίδες που κρέμονται από μεταλλικούς αγωγούς, είτε από μεταλλικό πλέγμα, που ενδέχεται να εφάπτεται της σκεπής ή να αναρτάται πάνω από αυτήν, είτε οποιοσδήποτε

συνδυασμός των παραπάνω. Σε κάθε περίπτωση το συλλεκτήριο σύστημα πρέπει να καλύπτει την αναγκαία περιοχή προστασίας [12] [14] [11] .

- Το Σύστημα Αγωγών Καθόδου

Πρόκειται για αγωγούς που συνδέονται με το συλλεκτήριο σύστημα και έχουν στόχο να οδηγήσουν τον κεραυνικό ρεύμα από το συλλεκτήριο σύστημα στην γείωση. Θα πρέπει να τοποθετούνται εξωτερικά της κατασκευής και να είναι ευθείς και κατακόρυφοι ώστε να εξασφαλίζεται η πιο σύντομη σύνδεση, εντός πρακτικών περιορισμών. Όσο περισσότεροι οι αγωγοί καθόδου τόσο περισσότερο μοιράζεται μεταξύ τους το κεραυνικό ρεύμα. Πολλές φορές στο σύστημα αγωγών καθόδου εντάσσονται ακόμη και οι μεταλλικές εγκαταστάσεις (όπως κιγκλιδώματα, σωλήνες νερού, όχι όμως σωλήνες που μεταφέρουν εύφλεκτα υλικά, και άλλα) ή ο μεταλλικός σκελετός της κατασκευής. Τέλος, προϋπόθεση για την δημιουργία ενός αξιόπιστου συστήματος αγωγών καθόδου είναι η ύπαρξη τουλάχιστον δύο αγωγίμων δρόμων διέλευσης κεραυνικού ρεύματος προς την γείωση και η δημιουργία ισοδυναμικών συνδέσεων όπου είναι απαραίτητο (όπως θα δούμε στην συνέχεια) [4] [11] [12] [14] .

- Το Σύστημα Γείωσης

Γείωση είναι η αγωγή με τη γη, το δυναμικό της οποίας θεωρείται συμβατικά ίσο με μηδέν. Ο σκοπός της γείωσης είναι να εξασφαλίζει αγωγή διαδρομή για την απαγωγή και την εκτόνωση στη γη των τυχόντων ρευμάτων σφάλματος, ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη προστασία. Για την κατασκευή ενός συστήματος γείωσης αξιοποιούνται συνδεδεμένα ηλεκτρόδια γείωσης όπως μεταλλικές ράβδοι, μεταλλικά πλέγματα και μεταλλικές πλάκες που τοποθετούνται είτε κατακόρυφα είτε οριζόντια, σε κατάλληλο βάθος εντός του εδάφους. Το πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020 [15] ορίζει ως διατάξεις γείωσης όλες τις ηλεκτρικές συνδέσεις, τα υλικά και τις συσκευές που απαρτίζουν τη γείωση ενός συστήματος, μιας εγκατάστασης ή γενικότερα εξοπλισμού. Τα ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να διατηρούν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και να προστατεύονται από διάβρωση και μηχανικές καταπονήσεις, ενώ δεν θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους διαφορετικά ηλεκτρόδια εντός του εδάφους, αλλά και οι αγωγοί σύνδεσής τους δεν πρέπει να είναι από διαφορετικό υλικό. Έχοντας κατασκευάσει ένα σύστημα γείωσης, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να επιτυγχάνεται αγωγή ένωση της εγκατάστασης μας με την γη. Αυτό εκφράζεται με την αντίσταση γείωσης. Για την ορθή λειτουργία του συστήματος γείωσης προτείνεται επίτευξη χαμηλής αντίστασης γείωσης και συγκεκριμένα μικρότερη από 10 Ω, όταν μετράται σε χαμηλή συχνότητα [4] [11] [12] [14] .

Τα παραπάνω μεμονωμένα στοιχεία του εξωτερικού συστήματος προστασίας θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κατάλληλα εξαρτήματα που συμμορφώνονται με το πρότυπο IEC 62561-1 «Lightning Protection System Components (LPSC) - Part 1: Requirements for Connection Components». Αυτό θα εξασφαλίσει ότι σε περίπτωση κεραυνικού ρεύματος, ο σωστός σχεδιασμός και η επιλογή των εξαρτημάτων θα ελαχιστοποιήσει οποιαδήποτε πιθανή ζημιά [14] .

### 3.2.2 Εσωτερική Προστασία

Ο θεμελιώδης ρόλος του εσωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι να διασφαλίζει την αποφυγή επικίνδυνων σπινθηρισμών εντός της υπό προστασία δομής. Οι σπινθηρισμοί ενδέχεται να προκύψουν ως επακόλουθο μιας κεραυνικής εκκένωσης, το ρεύμα της οποίας ρέει στο εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ή σε άλλα αγωγίμα μέρη της κατασκευής, ανυψώνοντας το δυναμικό τους. Η ανύψωση του δυναμικού, δηλαδή, ενδέχεται να δημιουργήσει υπερπηδήσεις σε μεταλλικά στοιχεία στο εσωτερικό της εγκατάστασης. Παράλληλα, το εσωτερικό σύστημα προστασίας αποτρέπει τη διάδοση του κεραυνικού ρεύματος στα επιμέρους τμήματα του εσωτερικού της εγκατάστασης και δεν επιτρέπει την ανάπτυξη υπερτάσεων μεγαλύτερων της διηλεκτρικής αντοχής κάθε τμήματος της εγκατάστασης.

Η εσωτερική προστασία επιτυγχάνεται με τις κατάλληλες ισοδυναμικές συνδέσεις ή διατηρώντας τις απαραίτητες αποστάσεις ώστε να είναι ηλεκτρικά μονωμένα διαφορετικά μεταλλικά στοιχεία της εγκατάστασης. Οι ισοδυναμικές συνδέσεις είναι απλώς οι αγωγιμες διασυνδέσεις μεταλλικών εξαρτημάτων της εγκατάστασης, έτσι ώστε σε περίπτωση κεραυνού, οι μεταλλικές επιφάνειες να βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό και να αποφευχθούν οι υπερπηδήσεις. Επίσης, οι ισοδυναμικές συνδέσεις μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση διατάξεων προστασίας από υπερτάσεις, όπου οι άμεσες συνδέσεις των μεταλλικών επιφανειών δεν είναι δυνατές [12] [14] [11] [15] .

Τέλος, υποχρεωτική με βάση τα πρότυπα ΕΛΟΤ 62305-3 ΕΛΟΤ 60364:2020, καθίσταται η χρήση απαγωγών υπερτάσεων σε εγκαταστάσεις που διαθέτουν εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για την αποτροπή της διάδοσης του κεραυνικού ρεύματος στα επιμέρους τμήματα του εσωτερικού της εγκατάστασης και την μείωση των εμφανιζόμενων υπερτάσεων που θα έβλαπταν ευαίσθητο εξοπλισμό.

Οι απαγωγοί υπερτάσεων, γνωστοί και ως καθοδικά αλεξικέραυνα, είναι διατάξεις προστασίας από υπερτάσεις και στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται ως SPD (Surge Protective Devices) [4] .

### 3.3 Μελέτη Διακινδύνευσης για Προστασία έναντι Μεταβατικής Υπέρτασης

Για τις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης απαιτείται μελέτη αξιολόγησης προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει ανάγκη ή όχι για προστασία έναντι μεταβατικής υπέρτασης λόγω ατμοσφαιρικής προέλευσης ή λόγω χειρισμών.

Οι υπερτάσεις λόγω χειρισμών υπερκαλύπτονται από τις υπερτάσεις λόγω ατμοσφαιρικής προέλευσης καθώς στα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης έχουν μεγαλύτερο πλάτος. Για αυτό και η μελέτη διακινδύνευσης γίνεται βάση υπερτάσεων λόγω κεραυνοπληξίας.

Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται το κρίσιμο επίπεδο κινδύνου CRL (Critical Risk Level)

$$CRL = \frac{f_{env}}{L_p \cdot N_g}$$

όπου  $f_{env}$  είναι ένας περιβαλλοντικός παράγοντας,  $L_p$  το μήκος αξιολόγησης διακινδύνευσης και  $N_g$  η συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος ανά  $\text{km}^2$  και έτος, σε σχέση με τη θέση της εγκατάστασης και της γραμμής που την τροφοδοτεί.

Για τον περιβαλλοντικό παράγοντα ισχύει:

- Για αραιοδομημένο και προαστιακό περιβάλλον

$$f_{env} = 85 \cdot F$$

- Για αστικό περιβάλλον

$$f_{env} = 850 \cdot F$$

όπου  $F$  ένας συντελεστής που θα πρέπει να θεωρείται για την Ελλάδα ίσος με 1.

Το μήκος αξιολόγησης διακινδύνευσης  $L_p$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_p = 2 \cdot L_{PAL} + L_{PCL} + 0.4 \cdot L_{PAH} + 0.2 \cdot L_{PCH}, \text{ σε km}$$

όπου:

$L_{PAL}$ : το συνολικό μήκος της εναέριας γραμμής XT σε km.

$L_{PCL}$ : το συνολικό μήκος του υπόγειου καλωδίου XT σε km.

$L_{PAH}$ : το συνολικό μήκος της εναέριας γραμμής MT σε km.

$L_{PCH}$ : το συνολικό μήκος του υπόγειου καλωδίου MT σε km.

Το μήκος που λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό του  $L_p$  είναι το πολύ το πρώτο χιλιόμετρο του δικτύου διανομής από το σημείο εισόδου στην εγκατάσταση. Αν στο δίκτυο υπάρχει διάταξη προστασίας έναντι υπερτάσεων, ο υπολογισμός γίνεται μέχρι το σημείο αυτό. Αν δεν είναι γνωστά τα διάφορα μήκη του δικτύου, για τον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη το γνωστό μήκος του παροχικού καλωδίου.

Για τη συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων ισχύει:

$$N_g = 0.1 \cdot T_d$$

όπου  $T_d$  είναι οι ημέρες καταιγίδας ανά έτος στην εξεταζόμενη περιοχή. Στην Ελλάδα οι ημέρες καταιγίδας ανά έτος είναι 15 κατ' ελάχιστο και 90 κατά μέγιστο όπως αναφέρεται από την TE82 – Τεχνική Επιτροπή σύνταξης του προτύπου ΕΛΟΤ 60364. Για αναλυτικότερες πληροφορίες σχετικά με τις ημέρες καταιγίδας ανά περιοχή της ελληνικής επικράτειας, προτείνεται η αναζήτηση του ισοκεραυνικού χάρτη Ελλάδας, όπως παρουσιάζεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020.

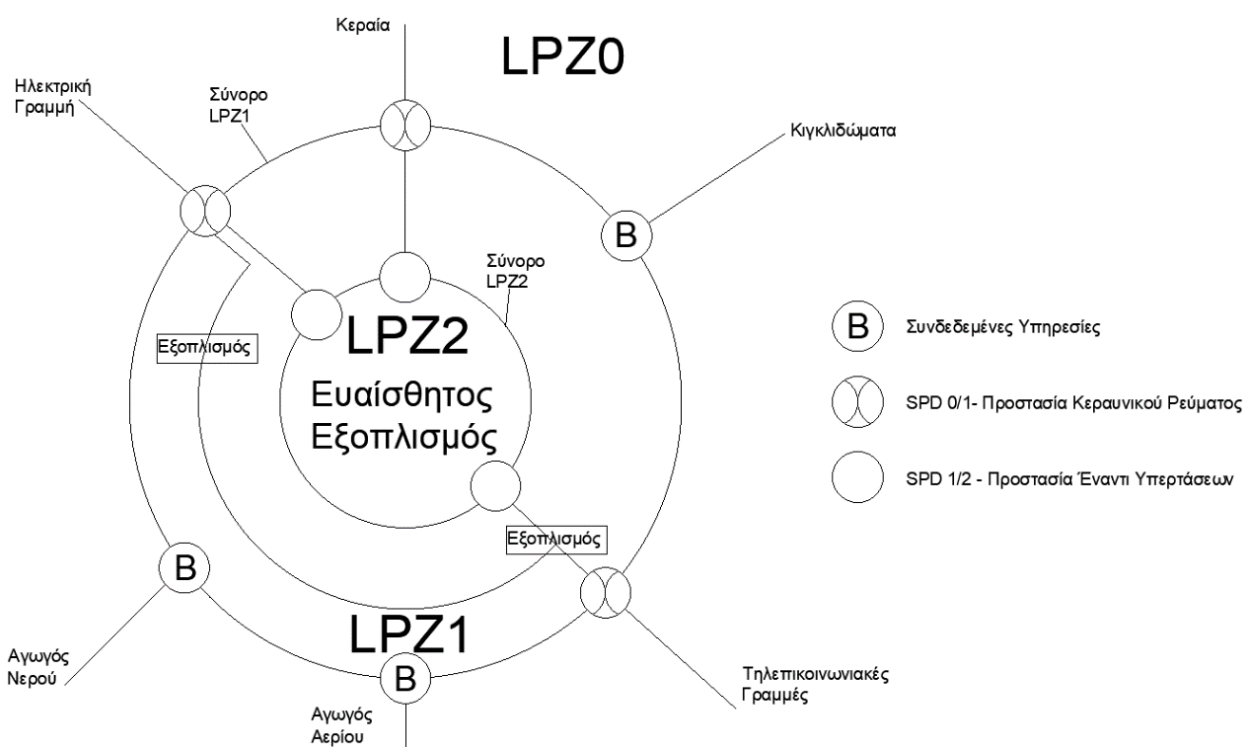


Εάν από τον υπολογισμό προκύψει  $CRL$  μικρότερο του 1000, απαιτείται προστασία έναντι υπερτάσεων και τοποθέτηση κατάλληλων διατάξεων απαγωγών υπερτάσεων (SPD) [15].

### 3.4 Προστασία Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Συσκευών

Το φυσικό μέγεθος των ηλεκτρονικών στις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης, έχει μειωθεί τόσο ώστε και η ενέργεια που χρειάζεται για να προκληθεί ζημιά να έχει μειωθεί. Για τον λόγο αυτό, το πρότυπο IEC 62305-4 προβλέπει την ειδική προστασία του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού από τις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις του κεραυνού που δημιουργεί υπερτάσεις και ακτινοβολούμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο ορίζει τον διαχωρισμό της υπό προστασία εγκατάστασης σε ζώνες προστασίας (LPZ- Lightning Protection Zones).



Εικόνα 3.3: Βασικός σχεδιασμός των ζωνών προστασίας [12].

**Ζώνη Προστασίας 0A (LPZ 0A):** Πρόκειται για την εξωτερική περιοχή που υπόκειται σε άμεση κεραυνοπληξία. Συνήθως είναι η στέγη της κατασκευής.

**Ζώνη Προστασίας 0B (LPZ 0B):** Πρόκειται για την εξωτερική περιοχή που δεν υπόκειται σε άμεση κεραυνοπληξία. Συνήθως πλευρικά της κατασκευής.

**Ζώνη Προστασίας 1 (LPZ 1):** Πρόκειται για την εσωτερική περιοχή που υπόκειται σε μειωμένα κεραυνικά ρεύματα, λόγω του διαμοιρασμού τους ή με της χρήση SPDs. Συνήθως είναι η

περιοχή όπου εισέρχονται υπηρεσίες στην εγκατάσταση ή όπου βρίσκεται ο κύριος πίνακας ισχύος.

Ζώνη Προστασίας 2...v (LPZ 2...v): Πρόκειται για περιοχές περαιτέρω εσωτερικά της εγκατάστασης, όπου κεραυνικά ρεύματα και μεταβατικές υπερτάσεις παρουσιάζονται ακόμη πιο μειωμένα. Συνήθως είναι περιοχές όπου βρίσκεται κάποιος υπό πίνακας ισχύος με κρίσιμο εξοπλισμό.

Για την προστασία, λοιπόν, του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, το πρότυπο προτείνει την χρήση ισοδυναμικών συνδέσεων, μαγνητικής θωράκισης των εσωτερικών χώρων και συντονισμένη χρήση απαγωγών υπερτάσεων, σε εξισορρόπηση πάντα με την οικονομική αναγκαιότητα.

Η συντονισμένη χρήση των SPD επιτυγχάνεται όταν οι διατάξεις προστασίας λειτουργούν αποτελεσματικά μαζί ως ένα διαδοχικό σύστημα για την προστασία του εξοπλισμού στο περιβάλλον τους έναντι υπερτάσεων, μειώνοντας τις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις σε ασφαλές επίπεδα. Επομένως, στην είσοδο μίας εγκατάστασης, μπορεί να υπάρχει ένα SPD βαρέως τύπου, που θα χειρίζεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας μιας υπέρτασης, με την αντίστοιχη παροδική υπέρταση να ελέγχεται σε ασφαλή επίπεδα. Στην συνέχεια, εάν κρίνεται απαραίτητο περαιτέρω μείωση της δημιουργούμενης υπέρτασης και των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων για την προστασία μιας ευαίσθητης συσκευής, τοποθετείται δεύτερο SPD, ειδικά διαστασιολογημένο. Γενικά, πρέπει να το τοποθετούνται κατάλληλοι απαγωγοί υπερτάσεων κατά την μετάβαση από μία ζώνη προστασίας στην επόμενη.

Τέλος, το επίπεδο προστασίας της τάσης ή η παραμένουσα τάση των εγκατεστημένων απαγωγών υπερτάσεων, πρέπει να συντονίζονται με την τάση αντοχής της μόνωσης των τμημάτων της εγκατάστασης και την τάση αντοχής του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Οι απαγωγοί υπερτάσεων (SPD) αναλύονται περισσότερο στο επόμενο κεφάλαιο.

[14] [20]

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

# Απαγωγείς Υπερτάσεων (*Surge Protective Devices – SPDs*)

### 4.1 Εισαγωγή

Όπως έγινε αντιληπτό από τα προηγούμενα κεφάλαια, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια των ανθρώπων, η προστασία του εξοπλισμού και σε κάποιο βαθμό η συνεχής λειτουργία μιας εγκατάστασης, χρησιμοποιούνται απαγωγείς υπερτάσεων ή διατάξεις προστασίας έναντι κρουστικών υπερτάσεων ή SPDs (*Surge Protective Devices*) όπως αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία.

Πιο συγκεκριμένα, οι απαγωγοί υπερτάσεων είναι συσκευές που συνδέονται παράλληλα σε μία εγκατάσταση και σκοπό έχουν να εκτρέψουν κρουστικά ρεύματα μακριά από την εγκατάσταση και να τα οδηγήσουν προς τη γη. Έτσι, μειώνουν και καταστέλλουν το πλάτος των υπερτάσεων σε επίπεδο που να μην είναι επικίνδυνο για τον άνθρωπο και τον εξοπλισμό [15] [23] .

Σημειώνεται ότι οι διατάξεις προστασίας έναντι κρουστικών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης, θα πρέπει να είναι σύμφωνες με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61643-11 και του Προτύπου ΕΛΟΤ 60364:2020 [18] [20] [21] [15] .

Ιδανικά, ένας απαγωγέας υπέρτασης, δεν άγει καθόλου ρεύμα όσο η τάση τροφοδοσίας της εγκατάστασης είναι εντός φυσιολογικών και ονομαστικών ορίων. Όταν, όμως, η τάση τροφοδοσίας ξεπεράσει κάποιο ασφαλές όριο, ακαριαία απορροφά το μεγαλύτερο μέρος ενός κρουστικού ρεύματος που δημιουργεί την υπέρταση, διατηρώντας την εμφανιζόμενη τάση στα υπό προστασία φορτία της εγκατάστασης σε επιτρεπτά όρια. Τέλος, όταν επέλθει το μεταβατικό φαινόμενο και η τάση τροφοδοσίας επιστρέψει σε ονομαστικές τιμές, τότε επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση όπου δεν επηρεάζει την λειτουργία της εγκατάστασης.

Οι συσκευές προστασίας έναντι υπερτάσεων, περιέχουν τουλάχιστον ένα μη γραμμικό στοιχείο. Οι πιο συνηθισμένες συσκευές περιέχουν είτε σπινθηριστές διακένου αερίων (*Gas Discharge Tubes - GDTs*), είτε διόδους καταστολής υπερτάσεων (*Silicon Avalanche Diodes*), είτε μη γραμμικές αντιστάσεις (*Metal Oxide Varistors - MOVs*). Συνήθως, διατίθενται στην αγορά συσκευές που αποτελούνται από δύο ή περισσότερες μη γραμμικές συνιστώσες. Επιπλέον, μπορεί περιλαμβάνει άλλα εξαρτήματα, όπως ασφάλειες, αποζεύκτες, ενδείξεις, πηνία, πυκνωτές και άλλα εξαρτήματα [15] .

Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα παραπάνω στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των διατάξεων προστασίας από υπερτάσεις, ενδέχεται να περιλαμβάνονται σε ορισμένες ηλεκτρικές

συσκευές χαμηλής τάσης, ιδιαίτερα όταν περιέχουν ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό (όπως μια τηλεόραση) [23] .

## 4.2 Λειτουργική Κατηγοριοποίηση Απαγωγών Υπερτάσεων

Μία κατηγοριοποίηση των απαγωγών υπερτάσεων γίνεται βάση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μη γραμμικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται και διακρίνονται σε:

- Στοιχεία Μεταγωγής Τάσης.
- Στοιχεία Περιορισμού Τάσης [23] .

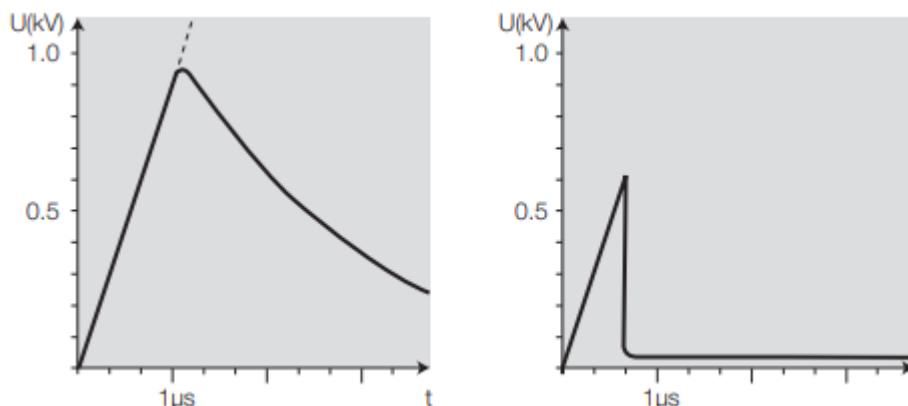
### 4.2.1 Στοιχεία Μεταγωγής Τάσης

Τα στοιχεία μεταγωγής τάσης λειτουργούν με ακαριαία εναλλαγή από την κατάσταση υψηλής αντίστασης σε πολύ χαμηλή αντίσταση καθώς η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα τους ξεπερνάει την τάση διάσπασης (μία ορισμένη οριακή τιμή). Πρακτικά, όταν η τάση στα άκρα ξεπεράσει την τάση διάσπασης, συμπεριφέρονται σαν βραχυκλώματα. Τέτοια στοιχεία είναι τα ακόλουθα:

- Διάκενα Αέρος (Spark Gaps)

Το διάκενο αέρος, που είναι γνωστό και σαν «σπινθηριστής», είναι ιστορικά το πρώτο στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε για την προστασία έναντι υπερτάσεων. Ουσιαστικά, αυτό το εξάρτημα αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια με ένα διάκενο αέρα μεταξύ τους. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων καθορίζει κατά κύριο λόγο την τάση διάσπασης. Η τάση διάσπασης εξαρτάται, επίσης, από την μορφή των ηλεκτροδίων, συνήθως ακίδα – ακίδα ή ακίδα – πλάκα, τη μορφή και πολικότητα της επιβαλλόμενης τάσης και τις επικρατούσες συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας. Όταν η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων υπερβεί αυτή την τάση, τότε έχουμε την διάσπαση του μονωτικού αέρα μεταξύ των ηλεκτροδίων, τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου και τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων. Λόγω της δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου, τα διάκενα αέρος δεν πρέπει να τοποθετούνται κοντά σε εύφλεκτα υλικά, για να την αποφυγή πρόκλησης πυρκαγιάς.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των στοιχείων είναι η δυνατότητα διαχείρισης κρουστικών ρευμάτων μεγάλης ενέργειας και έντασης, αλλά και το χαμηλό κόστος. Ωστόσο, το κύριο αρνητικό χαρακτηριστικό των διακένων αέρος εμφανίζεται αφού επέλθει η υπέρταση. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ένα ακόλουθο ρεύμα, λόγω του ήδη ιονισμένου αέρα μεταξύ των ηλεκτροδίων, που παρεμποδίζει την άμεση επαναφορά της εγκατάστασης σε κανονική λειτουργία και απαιτεί απομόνωση του σπινθηριστή για την σβέση του ηλεκτρικού τόξου [17] [23] .



Εικόνα 4.1: Εισερχόμενη Κρουστική Υπέρταση (στα αριστερά) και Αποκοπή Υπέρτασης από Διάκενο Αέρος (στα δεξιά) [17] .

- Σωλήνες Εκκένωσης Αερίου (Gas Discharge Tubes - GDTs)

Οι σωλήνες εκκένωσης αερίου αποτελούνται συνήθως από δύο ή τρία ηλεκτρόδια, εντός γυάλινου ή κεραμικού σφραγισμένου περιβλήματος, που περιέχει ειδικό μείγμα αδρανών αερίων (συνήθως νέον Ne ή αργό Ar). Το αέριο βρίσκεται υπό χαμηλή πίεση και τα ηλεκτρόδια βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Όταν χρησιμοποιούνται τρία ηλεκτρόδια, το μεσαίο βρίσκεται μεταξύ των άλλων δύο, που βρίσκονται στην άκρη του σωλήνα, και διαθέτει μία μικρή τρύπα που επιτρέπει την ροή ρεύματος (υπό κατάλληλες συνθήκες) μεταξύ των δύο ακριανών ηλεκτροδίων. Καθώς εφαρμόζεται στα ακραία ηλεκτρόδια μια κρουστική υπέρταση, όταν ξεπεραστεί η τάση διάσπασης του αερίου εντός του σωλήνα, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό τόξο και άγεται το κρουστικό ρεύμα.

Όπως και τα διάκενα αέρος, οι σωλήνες εκκένωσης αερίου μπορούν να διαχειριστούν ρεύματα υψηλής έντασης και ενέργειας. Σημαντική βελτίωση, όμως, αποτελεί το ότι δεν επηρεάζονται από ατμοσφαιρικές συνθήκες λόγω του σφραγισμένου σωλήνα που περιέχει το αέριο και τα ηλεκτρόδια. Ωστόσο, ένα σημαντικό αρνητικό τους αποτελεί η συνέχιση της αγωγής του αφότου επέλθει η υπέρταση. Τέλος, κατά την εγκατάσταση ενός σωλήνα εκκένωσης αερίου, θα πρέπει να προστατεύεται από την έκθεση σε φωτεινή ακτινοβολία, που προκαλεί μείωση της τάσης ενεργοποίησής του [17], [23].

#### 4.2.2 Στοιχεία Περιορισμού Τάσης

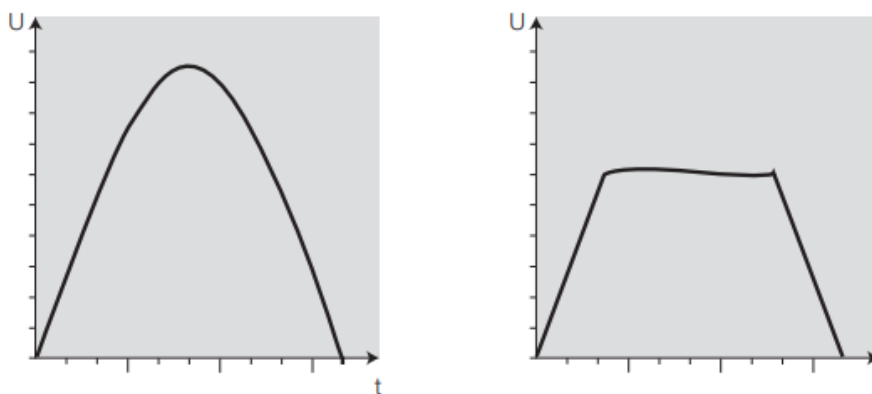
Τα στοιχεία περιορισμού τάσης παρουσιάζουν μία υψηλή αντίσταση κατά την απουσία υπερτάσεων, την οποία μειώνουν σύμφωνα με μία μη γραμμική αλλά συνεχή χαρακτηριστική ρεύματος τάσης I-V, καθώς αυξάνεται η τάση στα άκρα τους. Τέτοια στοιχεία είναι τα ακόλουθα:

- Βαρίστορ Μεταλλικών Οξειδίων (Metal Oxide Varistors - MOVs)

Τα βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων αποτελούν κύριο στοιχείο των διατάξεων προστασίας έναντι μεταβατικών υπερτάσεων. Όταν η τάση στα άκρα αυτών των στοιχείων είναι εντός των προκαθορισμένων ορίων, τότε παρουσιάζει υψηλή αντίσταση, ενώ μόλις παρουσιαστεί

μία υπέρταση, μειώνεται η αντίστασή τους σε πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό συμβαίνει λόγω της κατασκευαστικής του δομής. Πιο συγκεκριμένα, ένα MOV είναι συνήθως κεραμικό και κατασκευάζεται από συμπιεσμένους κόκκους οξειδίων μετάλλου, συνήθως οξείδια ψευδαργύρου (ZnO) με κατάλληλα πρόσθετα, που σχηματίζουν έναν κύλινδρο. Η διάμετρος του κυλίνδρου καθορίζει το ρεύμα που τον διαρρέει, το ύψος του καθορίζει την τάση κανονικής λειτουργίας και ο όγκος του την ικανότητα ενεργειακής εκφόρτισης. Σημειώνεται ότι οι απαγωγείς υπερτάσεων ενδέχεται να διαθέτουν σε σειρά αρκετά από αυτά τα στοιχεία επιτυγχάνοντας καλύτερες ηλεκτρικές ιδιότητες.

Τα βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων έχουν ικανότητα διαχείρισης ρευμάτων μέσης προς υψηλής έντασης και ενέργειας. Η παραμένουσα τάση, επίσης, στα άκρα των στοιχείων αυτών, είναι σχετικά μικρότερη από εκείνη των σπινθηριστών, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερο επίπεδο προστασίας. Ωστόσο τα κύρια αρνητικά τους χαρακτηριστικά είναι το ακόλουθο ρεύμα μετά το πέρας της υπέρτασης, αλλά και η εμφάνιση ενός ρεύματος διαρροής κατά την κανονική τους λειτουργία [17], [23].



Εικόνα 4.2: Εισερχόμενη Κρουστική Υπέρταση (στα αριστερά) και Αποκοπή Υπέρτασης από ένα MOV (στα δεξιά) [17] .

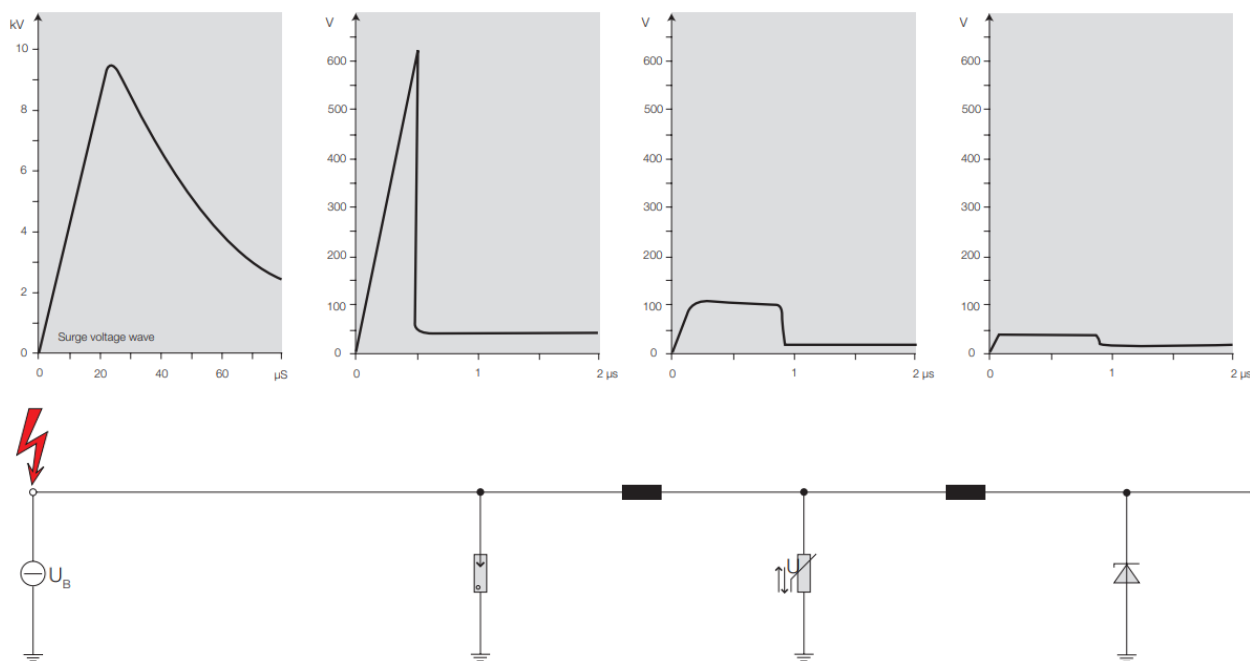
- Δίοδοι Καταστολής Υπερτάσεων (Transient Voltage Suppression Diodes - TVS Diodes)

Οι δίοδοι καταστολής υπερτάσεων ή δίοδοι κατάρρευσης πυριτίου (Silicon Avalanche Diodes – SAD), είναι δίοδοι τύπου Zener και μπορούν να ανταποκριθούν σε υπερτάσεις πιο γρήγορα από κάθε άλλο εξάρτημα προστασίας έναντι μεταβατικών υπερτάσεων. Ο χρόνος απόκρισης, μάλιστα, μπορεί να φτάνει και το ένα picosecond. Τα στοιχεία αυτά, συμπεριφέρονται ως ανοιχτοκυκλώματα όταν η τάση στα άκρα τους έχει ονομαστικές τιμές. Ωστόσο, μόλις ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο βραχυκυκλώνουν, οδηγώντας έτσι το κρουστικό ρεύμα μίας υπέρτασης μακριά από την υπό προστασία συσκευή. Αξίζει να σημειωθεί, πως οι δίοδοι καταστολής υπερτάσεων δεν έχουν την ικανότητα να διαχειριστούν ρεύματα υψηλής έντασης και ενέργειας και για αυτό τοποθετούνται πλησίον της συσκευής αφού προηγηθεί κάποια πρωτεύουσα προστασία που θα διαχειριστεί το μεγαλύτερο ενεργειακό μέρος μίας υπέρτασης [17], [23].

Συνδυάζοντας τα παραπάνω στοιχεία, κατασκευάζονται αποτελεσματικές διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων που θα πληρούν τις απαιτήσεις των εκάστοτε εφαρμογών. Επιπλέον των

προαναφερθέντων στοιχείων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν θυρίστορ και διατάξεις παθητικών φίλτρων [23] .

Ένα παράδειγμα συνδυασμού απαγωγέων υπερτάσεων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.3). Αρχικά μία έχουμε εισερχόμενη υπέρταση μέγιστης τιμής 10kV και ρυθμό ανόδου 1kV/μs. Το μεγαλύτερο μέρος του κρουστικού ρεύματος διοχετεύεται στην γη μέσω της ενεργοποίησης του σωλήνα εκκένωσης αερίου, περιορίζοντας παράλληλα την εμφανιζόμενη υπέρταση. Έπειτα, ένα βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων και μία δίοδος καταστολής υπερτάσεων περιορίζουν περαιτέρω την υπέρταση [17] .



Εικόνα 4.3: Συνδυασμός απαγωγέων υπερτάσεων και περιορισμός κρουστικής υπέρτασης [17] .

### 4.3 Τύποι Απαγωγέων Υπερτάσεων

Οι διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων, ανάλογα με την κατηγορία δοκιμών που υπόκεινται, διακρίνονται σε τρεις τύπους:

- Τύπος T1

Ο τύπος T1 είναι κατάλληλος για προστασία από άμεσα κεραυνικά πλήγματα και τοποθετείται στην είσοδο μίας εγκατάστασης όταν υπάρχει κίνδυνος άμεσης κεραυνοπληξίας είτε στο ίδιο το κτίριο είτε στην εναέρια γραμμή τροφοδοσίας. Τα SPDs τύπου T1 έχουν την ικανότητα εκτροπής κρουστικών ρευμάτων υψηλής έντασης και ενέργειας. Δοκιμάζονται, επίσης, από ρεύματα μορφής 10/350 μs και υπόκεινται στην κατηγορία δοκιμών I, που έχει ως αναφορά το κρουστικό ρεύμα εκφόρτισης  $I_{imp}$ . Το κρουστικό ρεύμα εκφόρτισης  $I_{imp}$  είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης διαμέσου της διάταξης προστασίας με προκαθορισμένη μεταφορά φορτίου Q και προκαθορισμένη ειδική ενέργεια W/R σε προκαθορισμένο χρόνο [18] [24] .

- Τύπος T2

Ο τύπος T2 είναι κατάλληλος για τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης που βρίσκονται σε αστικό περιβάλλον, όπου η πιθανότητα απευθείας κεραυνοπληξίας είναι αρκετά μικρή. Τα SPDs τύπου T2 τοποθετούνται στους ηλεκτρικούς πίνακες και προστατεύουν τα φορτία έναντι υπερτάσεων έμμεσου κεραυνικού πλήγματος και μεταβατικών υπερτάσεων χειρισμών. Υπόκεινται στην κατηγορία δοκιμών II, που έχει ως αναφορά το ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης  $I_n$ , που αποτελεί την μέγιστη τιμή ρεύματος που διέρχεται μέσω μίας διάταξης προστασίας έναντι υπερτάσεων με κυματομορφή ρεύματος 8/20  $\mu$ s..

Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις τα SPDs τύπου T2 εγκαθίστανται σε ηλεκτρικούς υπό πίνακες διανομής, κατάντη των SPDs τύπου T1 που τοποθετούνται στον κύριο πίνακα διανομής στην είσοδο της υπηρεσίας [18] [24] .

- Τύπος T3

Ο τύπος T3 είναι κατάλληλος για την προστασία ευαίσθητου εξοπλισμού και τοποθετείται κατάντη του συσκευών τύπου T2, καθώς έχει μικρή ικανότητα εκφόρτισης. Συνήθως τοποθετείται κοντά στα υπό προστασία φορτία. Τα SPDs τύπου T3 υπόκεινται στην κατηγορία δοκιμών III, που ως αναφορά έχει την τάση ανοικτού κυκλώματος  $U_{oc}$  στο σημείο σύνδεσης μίας συσκευής. Οι δοκιμαστικοί παλμοί που χρησιμοποιούνται είναι 1.2/50  $\mu$ s και 8/20 $\mu$ s. Στόχος αυτού του τύπου απαγωγών υπερτάσεων, είναι η μείωση των υπολειπόμενων τάσεων από τα SPDs τύπου 1 και 2 που τοποθετούνται ανάντη των τύπου T3 [18] [24] .

Οι κρουστικές κυματομορφές που χρησιμοποιούνται για τις δοκιμές των απαγωγών υπερτάσεων χαρακτηρίζονται από δύο χρόνους T1/T2 σε  $\mu$ s, όπου με T1 συμβολίζεται ο χρόνος μετώπου και με T2 συμβολίζεται ο χρόνος ημίσειας εύρους.

#### 4.4 Χαρακτηριστικά Απαγωγών Υπερτάσεων

Χαρακτηριστικά των SPDs όλων των τύπων είναι:

- Ονομαστική Τάση  $U_N$ :

Πρόκειται για την ονομαστική τάση της εγκατάστασης στην οποία τοποθετούνται οι απαγωγοί υπερτάσεων. Για παράδειγμα η ονομαστική τάση τριφασικών συστημάτων στις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης στην Ελλάδα είναι 230/400V AC.

- Μέγιστη Τάση Συνεχούς Λειτουργίας  $U_c$ :

Είναι η τιμή τάσης κάτω από την οποία η διάταξη προστασίας δεν ενεργοποιείται. Η επιλογή της εξαρτάται από το σύστημα τροφοδοσίας και θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10% υψηλότερη από την ονομαστική τάση  $U_N$ .



- Ονομαστικό Ρεύμα Εκφόρτισης  $I_n$ :

Είναι η μέγιστη τιμή της κυματομορφής 8/20  $\mu\text{s}$ , που η διάταξη είναι ικανή να εκφορτίσει επιτυχώς 15 φορές.

- Στάθμη Προστασίας  $U_p$ :

Είναι η μέγιστη τιμή της τάσης στα άκρα της διάταξης προστασίας όταν αυτή ενεργοποιείται και αντιστοιχεί σε ρεύμα ίσο με το ρεύμα εκφόρτισης  $I_n$ . Η στάθμη προστασίας πρέπει να είναι μικρότερη από την υπέρταση που αντέχει ο εξοπλισμός της εγκατάστασης, προκειμένου να τον προστατεύει.

- Χρόνος Απόκρισης  $t_R$ :

Πρόκειται για τον χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που επιδρά ένα κρουστικό ρεύμα στο σύστημα και της στιγμής που ενεργοποιείται μία διάταξη προστασίας έναντι υπερτάσεων [15] [23] [21] [18].

Ο εξοπλισμός μίας εγκατάστασης, αξίζει να σημειώσουμε, κατατάσσεται σε κατηγορίες κρουστικών υπερτάσεων  $U_w$  (ονομαστικές I έως IV) ανάλογα με την διηλεκτρική του αντοχή, σύμφωνα με τον Πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020 όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα [15] :

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

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες κρουστικών υπερτάσεων αντοχής  $U_w$  (ονομαστικές I έως IV) ανάλογα με την διηλεκτρική αντοχή, σύμφωνα με τον Πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020 [15].

Κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά ανάλογα με τον τύπο απαγωγών υπερτάσεων είναι:

- Κρουστικό Ρεύμα Εκφόρτισης  $I_{imp}$ :

Οι διατάξεις τύπου T1 χαρακτηρίζονται επίσης από το κρουστικό ρεύμα εκφόρτισης  $I_{imp}$ , που είναι η μέγιστη τιμή κυματομορφής 10/350  $\mu s$ , που διάταξη είναι ικανή να εκφορτίσει 5 φορές.

- Ακόλουθο Ρεύμα Αποκοπής  $I_{fi}$ :

Οι διατάξεις απαγωγών υπερτάσεων χαρακτηρίζονται επίσης από το ακόλουθο ρεύμα αποκοπής  $I_{fi}$  (μόνο για διατάξεις με σπινθηριστή) που είναι η τιμή του ρεύματος που η διάταξη μπορεί να διακόψει και θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το εν δυνάμει ρεύμα βραχυκυκλώματος στο σημείο σύνδεσης της διάταξης.

- Μέγιστο Ρεύμα Εκφόρτισης  $I_{max}$ :

Οι διατάξεις τύπου T2 χαρακτηρίζονται επίσης από το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης  $I_{max}$ , που είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος κυματομορφής 8/20  $\mu s$  που η διάταξη είναι ικανή να εκφορτίσει επιτυχώς μία φορά.

- Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος  $U_{oc}$ :

Οι διατάξεις τύπου T3 χαρακτηρίζονται επίσης από την τάση ανοικτού κυκλώματος [15] [23] [21] [18].

#### 4.5 Εγκατάσταση και Συνδεσμολογία

Η προστασία έναντι κρουστικών υπερτάσεων διακρίνεται σε προστασία κοινού κόμβου, όπου η προστασία παρέχεται μεταξύ ενεργών αγωγών και αγωγού προστασίας (PE) και διαφορική προστασία, όπου η προστασία παρέχεται μεταξύ ενεργών αγωγών. Όταν μια υπέρταση ξεπεράσει την προκαθορισμένη τιμή της διάταξης προστασίας, στην περίπτωση του κοινού κόμβου, η ενέργεια της υπέρτασης οδηγείται από τη διάταξη προστασίας στη γη, ενώ στην περίπτωση διαφορικής προστασίας, μοιράζεται μεταξύ όλων των ενεργών αγωγών [15].

Η αναγκαιότητα για την προστασία έναντι υπερτάσεων πρέπει να εξετάζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ 60364. Αν απαιτείται η εγκατάσταση SPDs, τότε [15]:

- Η προστασία κοινού κόμβου είναι υποχρεωτική.
- Η διαφορική προστασία μεταξύ φάσεων και ουδετέρου συνίσταται για την προστασία του εξοπλισμού.
- Η διαφορική προστασία μεταξύ φάσεων, σε περίπτωση πολυφασικού συστήματος, είναι προαιρετική.

Οι τύποι σύνδεσης είναι δύο:

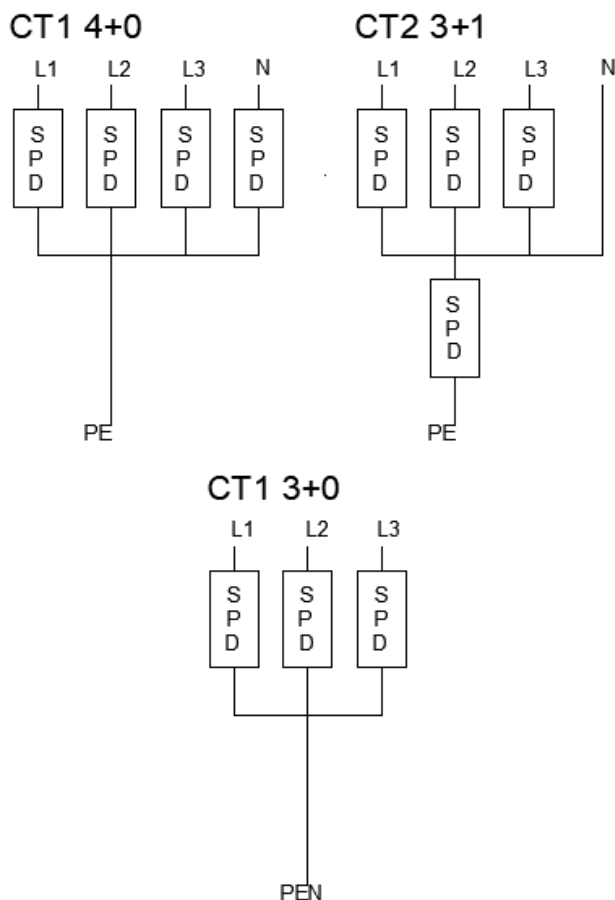
- CT1: Για προστασία κοινού κόμβου.
- CT2: Για συνδυασμό διαφορικής προστασίας και προστασίας κοινού κόμβου.

Για τριφασικά συστήματα, για τον τύπο CT1, υπάρχουν δύο τρόποι διαμόρφωσης:

- Διαμόρφωση 4+0: Σύνδεση μεταξύ κάθε ενεργού αγωγού (τρεις φάσεις και ουδέτερος) και αγωγού PE.
- Διαμόρφωση 3+0: Σύνδεση μεταξύ αγωγών φάσεων (εάν ο ουδέτερος δεν είναι διαθέσιμος) και του αγωγού PEN.

Για τριφασικά συστήματα, για τον τύπο CT2, υπάρχει ένας τρόπος διαμόρφωσης:

- Διαμόρφωση 3+1: Σύνδεση μεταξύ κάθε αγωγού φάσης και ουδετέρου και σύνδεση μεταξύ του ουδετέρου και του αγωγού PE.



Σχήμα 4.1: Διαμορφώσεις CT1 4+0 πάνω αριστερά, CT2 3+1 πάνω δεξιά και CT1 3+0 κάτω.

Αντίστοιχα για τα μονοφασικά συστήματα υπάρχουν διαμορφώσεις 2+0 για τον τύπο CT1 και 1+1 για τον τύπο CT2.

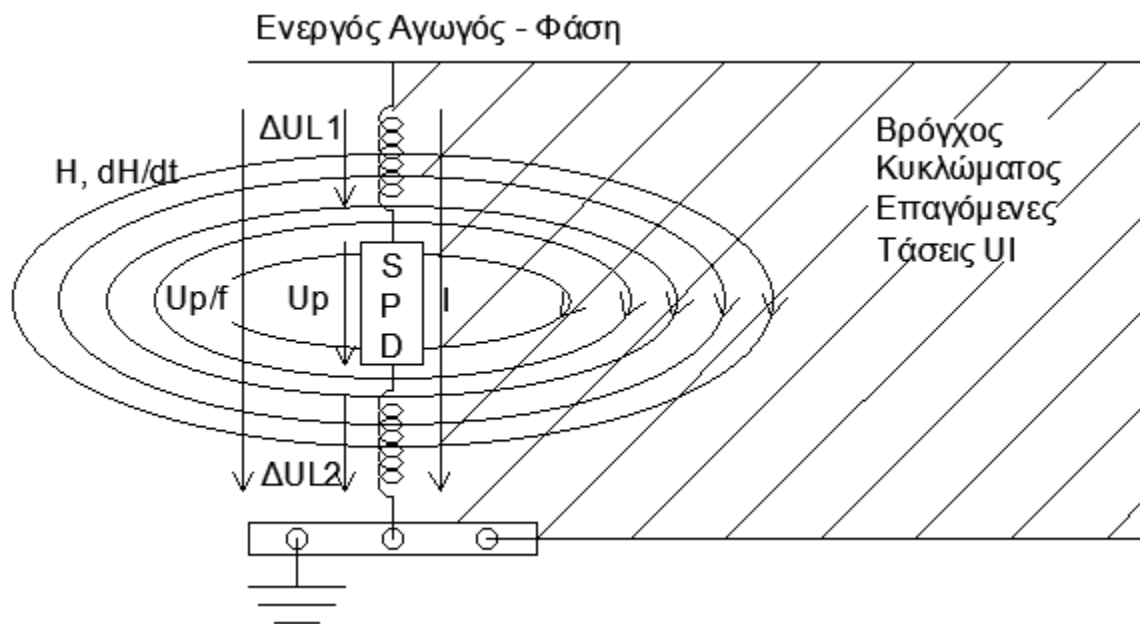
Αξίζει, επίσης, να σημειώσουμε ότι ανάλογα με τις οδηγίες του κατασκευαστή των SPD, δύναται να χρησιμοποιήσουμε μία ασφάλεια τήξεως για την προστασία της διάταξης από βραχυκυκλώματα.

Τέλος, λόγω του μικρού ρεύματος διαρροής ορισμένων διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων, προτείνεται να εγκαθίσταται ανάντη της διάταξης προστασίας διαφορικού ρεύματος [15].

#### 4.6 Επιλογή Διατάξεων Προστασίας έναντι Υπερτάσεων

Ο εξοπλισμός προστατεύεται όταν η ονομαστική κρουστική τάση αντοχής του εξοπλισμού  $U_w$  είναι μεγαλύτερη από την εμφανιζόμενη τάση μεταξύ φάσεων και γης. Σε κάθε άλλη περίπτωση, είναι αναγκαία η τοποθέτηση SPD [20].

Ένα SPD θα προστατεύει τον εξοπλισμό εάν η αποτελεσματική στάθμη προστασίας  $U_{P/F}$ , η οποία ορίζεται ως το άθροισμα της στάθμης προστασίας  $U_p$  και της επαγωγικής πτώσης τάσης  $\Delta U$  των αγωγών σύνδεσης του SPD, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.2), είναι χαμηλότερη από την διηλεκτρική του αντοχή  $U_w$  του εξοπλισμού [20].



- $I$  Μερικό Κρουστικό Ρεύμα
- $U_I$  Επαγόμενη Υπέρταση
- $H$  Ένταση Μαγνητικού Πεδίου
- $U_{P/F} = U_P + \Delta U_{L1} + \Delta U_{L2}$

Σχήμα 4.2: Η αποτελεσματική στάθμη προστασίας  $U_{P/F}$  όπως παρουσιάζεται και στο πρότυπο IEC-62305-4 [20].

Πρέπει να σημειωθεί ότι εάν το ρεύμα εκφόρτισης που εμφανίζεται στο σημείο εγκατάστασης του SPD υπερβαίνει το  $I_n$  που ορίζεται στο SPD, το επίπεδο προστασίας  $U_p$  θα είναι υψηλότερο και το  $U_{P/F}$  μπορεί να υπερβαίνει το επίπεδο αντοχής εξοπλισμού  $U_w$ . Σε αυτή την περίπτωση ο εξοπλισμός δεν προστατεύεται πλέον. Για αυτό το λόγο το ονομαστικό ρεύμα  $I_n$  του SPD θα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το κρουστικό ρεύμα που αναμένεται σε αυτό το σημείο εγκατάστασης [20].

Όταν το SPD εγκαθίσταται στην είσοδο της εγκατάστασης,  $\Delta U=1\text{kV}$  ανά μέτρο διασύνδεσης. Όταν το μήκος των αγωγών σύνδεσης είναι μικρότερο ή ίσο του μισού μέτρου, μπορεί να θεωρηθεί ότι  $U_{P/F} = 1.2 \cdot U_p$  [20].

Κατά την λειτουργία ενός SPD, η τάση στα άκρα στη θέση εγκατάστασής του είναι, όπως είδαμε,  $U_{P/F}$ . Αν το μήκος του κυκλώματος μεταξύ της θέσης τοποθέτησης του SPD και του υπό προστασία εξοπλισμού είναι μεγάλο, τότε η υπέρταση οδεύει στα καλώδια διασύνδεσης του εξοπλισμού. Ως αποτέλεσμα, ενδέχεται να εμφανιστούν φαινόμενα ταλάντωσης (ανάκλασης οδεύοντος κύματος). Στην περίπτωση, ακόμη, ανοιχτοκυκλωμένου φορτίου, τα κυματικά φαινόμενα μπορεί να δημιουργήσουν διπλασιασμό της εμφανιζόμενης υπέρτασης στους ακροδέκτες του φορτίου ( $2 \cdot U_{P/F}$ ). Συνεπώς, ακόμη και αν η αποτελεσματική στάθμη προστασίας  $U_{P/F}$  είναι μικρότερη από το επίπεδο αντοχής του εξοπλισμού  $U_w$ , ενδέχεται να έχουμε βλάβη στον εξοπλισμό [20].

Παράλληλα, το μεγάλο μήκος καλωδιώσεων του εξοπλισμού συνεπάγεται την αύξηση των επαγόμενων τάσεων  $U_I$  στον βρόχο του εξοπλισμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2, που οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν κεραυνικά πλήγματα στην ίδια την κατασκευή ή πλησίον αυτής. Αυτή η επαγόμενη υπέρταση προστίθεται στην αποτελεσματική στάθμη προστασίας  $U_{P/F}$  και υπονομεύει την λειτουργία των SPD.

Επομένως, κατά την επιλογή διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-4 ([20]), θα πρέπει να πληρείται μία εκ των τριών ακόλουθων προϋποθέσεων:

1.  $U_{P/F} \leq U_w$  όταν το μήκος κυκλώματος μεταξύ του SPD και του εξοπλισμού είναι αμελητέο (συνήθης περίπτωση SPD εγκατεστημένου σε τερματικά εξοπλισμού).
2.  $U_{P/F} \leq 0.8 U_w$ : όταν το μήκος κυκλώματος δεν είναι μεγαλύτερο από δέκα μέτρα (συνήθης περίπτωση SPD εγκατεστημένο σε δευτερεύοντα πίνακα διανομής ή σε πρίζα).

Σημείωση: Όπου η αστοχία σε εσωτερικά συστήματα μπορεί να προκαλέσει απώλεια ανθρώπινων ζωών ή απώλεια υπηρεσιών προς το δημόσιο, ο διπλασιασμός της τάσης λόγω ταλαντώσεων θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και να τηρείται το κριτήριο  $U_{P/F} \leq U_w/2$ .

3.  $U_{P/F} \leq (U_w - U_I) / 2$ : όταν το μήκος κυκλώματος είναι μεγαλύτερο από δέκα μέτρα (συνήθης περίπτωση SPD εγκαθίσταται στην είσοδο της γραμμής στην κατασκευή ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, στη δευτερεύουσα πίνακα διανομής).

Εάν απαιτείται προστασία έναντι υπερτάσεων, τότε το ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης  $I_n$  της διάταξης, βάσει του οποίου υπολογίζεται και η στάθμη προστασίας  $U_p$  του SPD, επιλέγεται σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020 [15], ανάλογα με το σύστημα τροφοδοσίας και τον τύπο σύνδεσης, αλλά και το αν το κτίριο διαθέτει εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Σε σύστημα TN, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο τύπος σύνδεσης CT1 (διαμόρφωση 3 + 0 ή 4 + 0) και ο CT2 (διαμόρφωση 3 + 1). Όταν επιλέγεται ο CT1, το SPD μεταξύ του ουδέτερου και του PE μπορεί να παραληφθεί, όταν η απόσταση ανάμεσα στο σημείο διαχωρισμού του PE με τον N και τη θέση των εγκαταστημένων SPDs είναι μικρότερη του 0.5 μέτρου ή εάν το σημείο διαχωρισμού και οι SPDs βρίσκονται στον ίδιο πίνακα διανομής. Δηλαδή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε διαμόρφωση 3 + 0 είτε η διαμόρφωση 4 + 0. Σε TT συστήματα, χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο τύπος CT2 με διαμόρφωση 3 + 1 [15].

Η επιλογή του ονομαστικού ρεύματος εκφόρτισης των SPD επιλέγεται σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020 ως ακολούθως:

$I_n$ σε kA σε κτίριο χωρίς εξωτερικό ΣΑΠ – Τύπου T2 (ή T1)				
Τροφοδοσία	Μονοφασική		Τριφασική	
Τύπος Σύνδεσης	CT1	CT2	CT1	CT2
L-N		10		10
L-PE	10		10	
N-PE	10	20	10	40

Πίνακας 4.2: Ονομαστικού ρεύμα εκφόρτισης των SPD σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020 [15]

$I_{imp}$ σε kA σε κτίριο με εξωτερικό ΣΑΠ – Τύπου T1				
Τροφοδοσία	Μονοφασική		Τριφασική	
Τύπος Σύνδεσης	CT1	CT2	CT1	CT2
L-N		12.5		12.5
L-PE	12.5		12.5	
N-PE	12.5	25	12.5	50

Πίνακας 4.3: Ονομαστικού ρεύμα εκφόρτισης των SPD σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020 [15].

[15]

#### 4.7 Συστήματα Γείωσης

Όπως έγινε κατανοητό παραπάνω, το σύστημα γείωσης της ηλεκτρικής εγκατάστασης επηρεάζει την επιλογή και εγκατάσταση διατάξεων προστασίας. Σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020 [15] για τις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης τα πιθανά συστήματα γείωσης είναι:

- Σύστημα TN-S

Σε αυτό το σύστημα γείωσης, ένα σημείο του μετασχηματιστή διανομής γειώνεται απευθείας, συνήθως το ουδέτερο σημείο. Ο ουδέτερος αγωγός (N) και ο αγωγός προστασίας

(PE) οδηγούνται στο σύστημα του καταναλωτή σε ξεχωριστούς αγωγούς. Μια τριφασική τροφοδοσία αποτελείται από τους πέντε αγωγούς L1, L2, L3, N και PE.

- Σύστημα TN-C

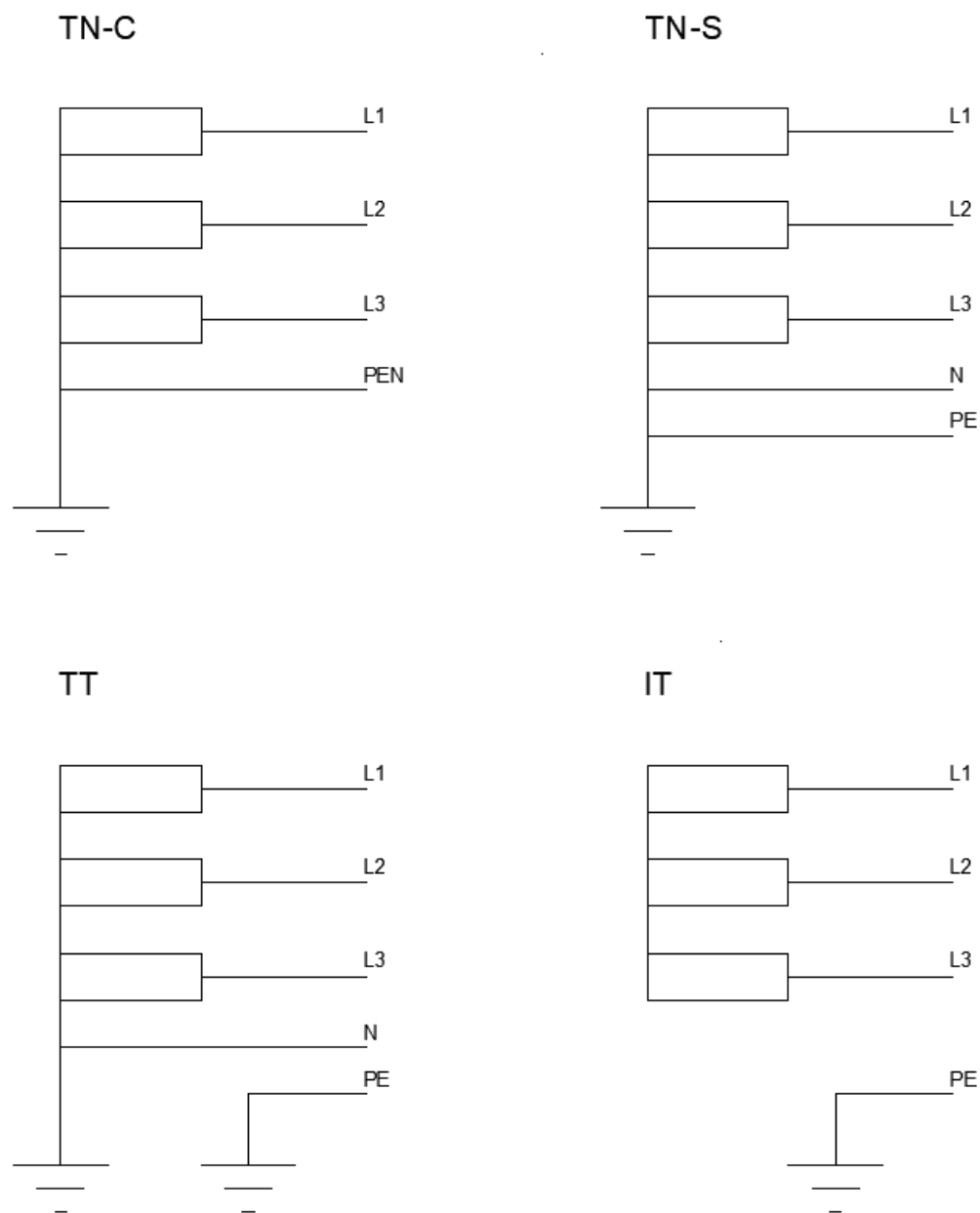
Σε αυτό το σύστημα γείωσης, το ουδέτερο σημείο του μετασχηματιστή διανομής γειώνεται απευθείας. Ο ουδέτερος αγωγός και ο αγωγός προστασίας οδηγούνται στο σύστημα του καταναλωτή σε έναν αγωγό προστασίας γείωσης (PEN). Μια τριφασική τροφοδοσία αποτελείται από τους τέσσερις αγωγούς L1, L2, L3 και PEN.

- Σύστημα TT

Σε αυτό το σύστημα γείωσης, το γειωμένο σημείο του μετασχηματιστή καθοδηγείται στο σύστημα του καταναλωτή μόνο ως ουδέτερος αγωγός. Τα μέρη της ηλεκτρικής εγκατάστασης συνδέονται σε ένα τοπικό σύστημα γείωσης που είναι ξεχωρισμένο από το γειωμένο σημείο του μετασχηματιστή. Ο ουδέτερος αγωγός και ο τοπικός αγωγός προστασίας οδηγούνται στο σύστημα του καταναλωτή σε ξεχωριστούς αγωγούς. Μια τριφασική τροφοδοσία αποτελείται από τους πέντε αγωγούς L1, L2, L3, N και τοπικό PE.

- Σύστημα IT

Το σύστημα αυτό εφαρμόζεται σε ειδικές εγκαταστάσεις και όχι στις συνήθεις κτιριακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Το ουδέτερο σημείο του μετασχηματιστή διανομής δεν γειώνεται, ή γειώνεται μόνο μέσω υψηλής αντίστασης. Τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη της εγκατάστασης συνδέονται σε ένα τοπικό σύστημα γείωσης. Αν υπάρχει και ένας ουδέτερος αγωγός που οδηγείται από το ουδέτερο σημείο του μετασχηματιστή διανομής, αυτός οδηγείται ξεχωριστά από τον τοπικό προστατευτικό αγωγό. Μια τριφασική τροφοδοσία αποτελείται από τους τέσσερις ή πέντε αγωγούς L1, L2, L3, αν είναι απαραίτητο, N και τοπικό PE.



Σχήμα 4.3: Τα διάφορα συστήματα γειώσεων.



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

# Επίδραση του Μήκους Καλωδιώσεων στην Ορθή Λειτουργία των Απαγωγών Υπερτάσεων

### 5.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, με την αύξηση του μήκους καλωδιώσεων μεταξύ των απαγωγών υπερτάσεων και του υπό προστασία φορτίου υπονομεύεται (υποβαθμίζεται) η ορθή λειτουργία των διατάξεων προστασίας από υπερτάσεις. Αυτό οφείλεται στα φαινόμενα όδευσης που λαμβάνουν χώρα αλλά και στις επαγόμενες τάσεις που εμφανίζονται με την αύξηση του μήκους καλωδιώσεων. Παράλληλα, η ορθή λειτουργία επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του υπό προστασία φορτίου και των SPDs που χρησιμοποιούνται. Τέλος, εάν το υπό προστασία φορτίο βρίσκεται εκτός της αποτελεσματικής απόστασης προστασίας του SPD, προτείνεται η χρήση δεύτερης διάταξης προστασίας πλησίον του φορτίου, που σε συντονισμό με την ανάντη διάταξη θα παρέχουν αποτελεσματικής προστασία από υπερτάσεις [20] [22] .

### 5.2 Το Φαινόμενο Όδευσης

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] , εάν το μήκος του κυκλώματος μεταξύ του SPD και του εξοπλισμού είναι πολύ μεγάλο, η διάδοση των κυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο ταλάντωσης. Το φαινόμενο όδευσης, ενδέχεται να δημιουργήσει ανακλώμενα κύματα που σε υπέρθεση με το προσπίπτον καταπονούν το υπό προστασία φορτία. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ανοιχτοκυκλωμένο, μάλιστα, ενδέχεται να εμφανιστούν και υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας  $U_{P/F}$  του απαγωγού υπερτάσεων ( $2 \cdot U_{P/F}$ ).

Ουσιαστικά, όταν η καλωδίωση είναι μεγάλη, συμπεριφέρεται σαν μία γραμμή με κυματική αντίσταση και ταχύτητα όδευσης της τάξης της ταχύτητας του φωτός. Ο χρόνος όδευσης πάνω στην καλωδίωση, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται έως ότου μία υπέρταση να οδεύσει πάνω στην καλωδίωση (από το SPD έως την υπό προστασία συσκευή), είναι ανάλογος του μήκους της και αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας όδευσης. Αντιθέτως, όταν η καλωδίωση είναι πολύ μικρή, συμπεριφέρεται σαν ένα συγκεντρωμένο στοιχείο που αποτελείται από ένα ωμικό και ένα επαγωγικό στοιχείο σε σειρά και δεν εμφανίζει όδευση, αλλά ακαριαίο καταμερισμό.

Όπως αναφέρεται, μάλιστα, στη δημοσίευση «Evaluation of the Effective Protection Distance of Low-Voltage SPD to Equipment» [25] , 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. Στην ίδια μελέτη, επίσης, που προσομοιώνεται, σε ένα λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής μεταβατικής ανάλυσης, η συμπεριφορά μιας διάταξης προστασίας έναντι υπερτάσεων, για τρεις διαφορετικές καλωδιώσεις και πέντε διαφορετικά φορτία, στην περίπτωση της καλωδίωσης μήκους 1 μέτρου, το καλώδιο αναπαρίσταται ως συγκεντρωμένο στοιχείο, με ένα ωμικό και ένα επαγωγικό στοιχείο σε σειρά, ενώ για μήκος 10m και 100m αναπαρίσταται με μία κυματική αντίσταση. Τέλος, ένα από τα συμπεράσματα της μελέτης είναι ότι παρά τα χαρακτηριστικά των φορτίων, με την αύξηση του μήκους του καλωδίου σύνδεσης μεταξύ των SPD και του εξοπλισμού, η κυματομορφή υπέρτασης τόσο στο SPD όσο και στο φορτίο ταλαντώνεται όλο και πιο δραματικά.

Στην πραγματικότητα δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε μετά από ποιο μήκος αλλάζει η συμπεριφορά της καλωδίωσης, αλλά μπορούμε να φανταστούμε ότι έχει μια «διττή» φύση συγκεντρωμένου στοιχείου – γραμμής. Με την αύξηση του μήκους της προσεγγίζεται η συμπεριφορά γραμμής και αντιστρόφως. Για αυτό και τόσο το πρότυπο IEC 62305-4 [20] όσο και το IEC 61643-12 [22] δεν παρέχουν διεξοδική αναλυτική περιγραφή της επίδρασης που έχει η αύξηση του μήκους καλωδιώσεων μεταξύ των απαγωγών υπερτάσεων και του υπό προστασία φορτίου. Έτσι κρίνεται σκόπιμη η παρούσα διπλωματική εργασία.

### 5.3 Επαγόμενες Τάσεις

Οι κεραυνοί που πλήττουν την ίδια την κατασκευή ή σημείο κοντά στην κατασκευή επάγουν υπερτάσεις στο κύκλωμα βρόχου σύνδεσης του υπό προστασίας φορτίου και του SPD, που προστίθενται στην αποτελεσματική στάθμη προστασίας  $U_{PF}$  του SPD.

Το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο έντασης  $H$  που παράγεται από το κεραυνικό ρεύμα  $i$  δημιουργεί αυτές τις επαγόμενες τάσεις, που είναι ανάλογες του ρυθμού μεταβολής  $dH/dt$  του. Μάλιστα, η μέγιστη επαγόμενη υπέρταση εμφανίζεται παράλληλα με την μέγιστη τιμή του ρυθμού μεταβολής του κρουστικού ρεύματος  $di/dt$ . Επειδή, λοιπόν, το κεραυνικό ρεύμα είναι πιο απότομο στον χρόνο μετώπου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το φαινόμενο αυτό διαρκεί όσο και ο χρόνος μετώπου του κρουστικού ρεύματος.

Οι επαγόμενες τάσεις, εκτός αυτού, είναι πιο επικίνδυνες όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις του βρόχου του κυκλώματος μεταξύ του SPD και του προστασία φορτίου. Για τον λόγο αυτό, με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης οι επαγόμενες τάσεις υπονομεύουν την ορθή λειτουργία των απαγωγών υπερτάσεων. Για τον σωστό σχεδιασμό της προστασίας έναντι υπερτάσεων, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-4 [20], θα πρέπει να συνυπολογίζουμε τις επαγόμενες τάσεις για μήκη καλωδίωσης άνω των 10 μέτρων.

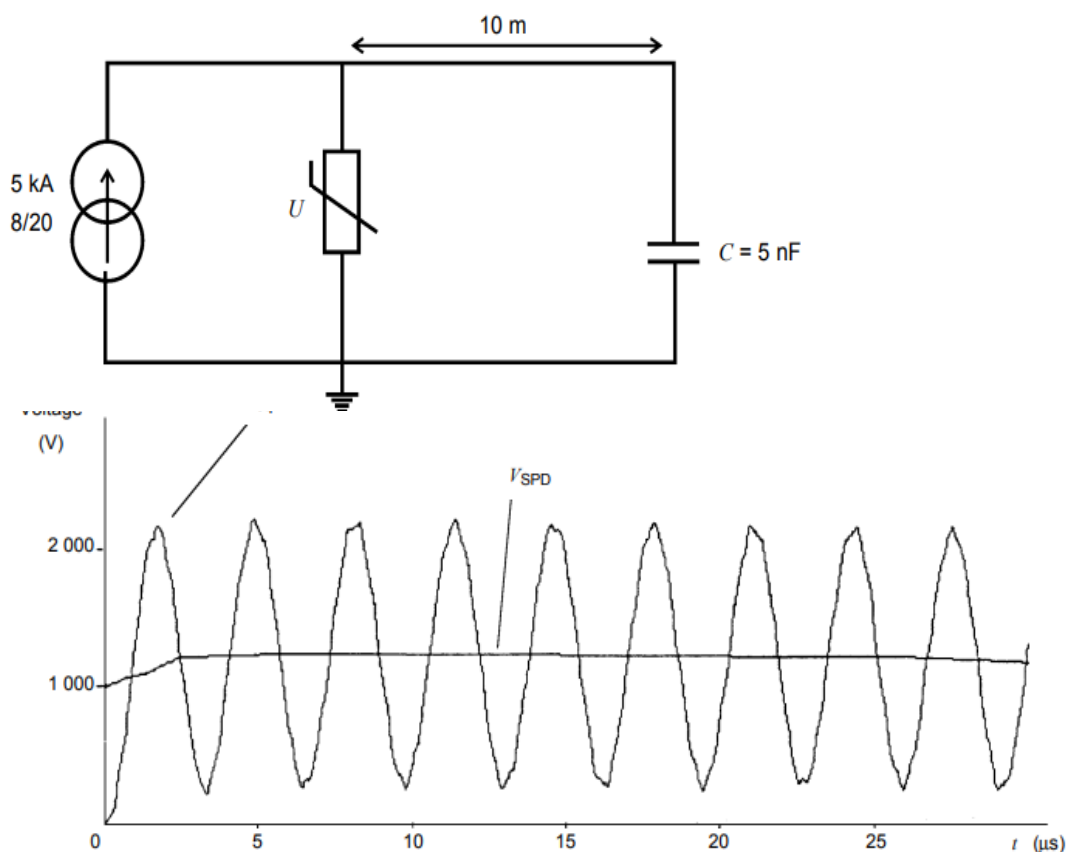
Έχοντας κατανοήσει το φαινόμενο όδευσης και την δημιουργία επαγόμενων τάσεων μπορούμε να κατανοήσουμε τις οδηγίες του προτύπου IEC 62305-4 [20], όπως παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια (1, 2, 3).

### 5.4 Η Επίδραση του Φορτίου

Στην περίπτωση όπου μία υπέρταση οδεύει πάνω στην καλωδίωση μεταξύ του SPD και του υπό προστασία φορτίου, η εμφάνιση ταλαντώσεων εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, ο διπλασιασμός της τάσης είναι πιθανός για φορτία υψηλής σύνθετης αντίστασης ή για ανοιχτοκυκλωμένο εξοπλισμό. Ένα παράδειγμα ανοιχτοκυκλωμένου

φορτίου είναι μία τηλεόραση που είναι συνδεδεμένη σε έναν ρευματοδότη, αλλά ανοιχτοκυκλωμένη από τον διακόπτη που η διαθέτει εσωτερικά (σβησμένο το χαρακτηριστικό λαμπάκι λειτουργίας της τηλεόρασης).

Όπως φαίνεται στο παράδειγμα K.9 - K.10 της παραγράφου K.1.2 του προτύπου IEC 61643-12 [22] , στην περίπτωση ενός καθαρά χωρητικού φορτίου με μήκος καλωδίωσης 10 μέτρα, η τάση στους ακροδέκτες του εξοπλισμού που προστατεύεται μπορεί να φτάσει το διπλάσιο της τάσης του SPD.



Εικόνα 5.1: Το κύκλωμα που προσομοιώνεται και ο διπλασιασμός της τάσης στον εξοπλισμό [22] .

Σύμφωνα με την μελέτη που προαναφέρθηκε [25] , όσο μεγαλύτερο είναι το ωμικό στοιχείο του φορτίου από την κυματική αντίσταση του καλωδίου, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το πλάτος της ταλάντωσης. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος καλωδίωσης. Για διαφορετικού τύπου φορτία, το SPD έχει διαφορετική αποτελεσματική απόσταση προστασίας, δηλαδή η μέγιστη απόσταση μεταξύ SPD και εξοπλισμού κατά την οποία ο εξοπλισμός προστατεύεται, διαφέρει ανάλογα τον εξοπλισμό. Στο ίδιο συμπέρασμα σχετικά με την αποτελεσματική απόσταση προστασίας καταλήγει και η μελέτη «Effective Protection Distances of Low-Voltage SPD With Different Voltage Protection Levels» [28] .

Τα συμπεράσματα των δύο μελετών σχετικά με την επίδραση του τύπου του φορτίου στην αποτελεσματική απόσταση προστασίας για μία συσκευή κατηγορίας στάθμης προστασίας I

( $U_w=1.5$  kV), με ανάλογη επιλεγμένη διάταξη προστασίας έναντι υπερτάσεων, μπορούν να περιληφθούν ως εξής:

- Ωμικό Φορτίο

Για ωμική αντίσταση μικρότερη ή λίγο μεγαλύτερη από την κυματική αντίσταση της καλωδίωσης, η αποτελεσματική απόσταση προστασίας είναι απεριόριστη. Καθώς, όμως, αυξάνεται η διαφορά της ωμικής αντίστασης του φορτίου από την κυματική αντίσταση του καλωδίου, η αποτελεσματική απόσταση προστασίας είναι κάτω από τα δέκα μέτρα.

- Χωρητικό Φορτίο

Για ένα καθαρά χωρητικό φορτίο εμφανίζονται ισχυρές ταλαντώσεις στην τάση των ακροδεκτών του και η αποτελεσματική απόσταση προστασίας υπολογίζεται για φορτία διάφορων χωρητικότητων κοντά στα 3 μέτρα. Με την αύξηση της χωρητικότητας η αποτελεσματική απόσταση προστασίας μειώνεται και η εμφανιζόμενες ταλαντώσεις γίνονται πιο ισχυρές.

- Επαγωγικό Φορτίο

Για ένα καθαρά επαγωγικό η ταλάντωση είναι πιο ασθενής και για αρκετές τιμές αυτεπαγωγής η αποτελεσματική απόσταση προστασίας είναι απεριόριστη. Ωστόσο, αξίζει αν σημειωθεί ότι η μελέτη [28] υπογραμμίζει πως για μεγάλες τιμές αυτεπαγωγής, η αποτελεσματική απόσταση προστασίας είναι περίπου μικρότερη από 4 μέτρα ή μεγαλύτερη από 40. Δηλαδή ο εξοπλισμός θα προστατεύεται αν εγκατασταθεί είτε σχετικά κοντά είτε σχετικά μακριά από το SPD, αλλά όχι σε ενδιάμεση απόσταση.

- Ωμικό και Επαγωγικό Φορτίο σε Σειρά ή Ωμικό και Χωρητικό Φορτίο Παράλληλα

Στο ωμικό και χωρητικό παράλληλο φορτίο ή στο ωμικό και επαγωγικό σειριακό φορτίο, οι κανόνες αλλαγής τάσης είναι παρόμοιοι με εκείνους του καθαρά ωμικού φορτίου. Δηλαδή καθώς η ισοδύναμη αντίσταση του φορτίου αυξάνεται, η τάση υπέρτασης στο φορτίο θα ταλαντώνεται πιο έντονα και η αποτελεσματική απόσταση προστασίας θα είναι μικρότερη. Για μεγάλες τιμές χωρητικότητας για παράδειγμα η αποτελεσματική απόσταση προστασίας θα είναι πολύ μικρή ανεξαρτήτως του ωμικού στοιχείου, ενώ για μικρό ωμικό στοιχείο και μικρή αυτεπαγωγή θα είναι απεριόριστη.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τη δημοσίευση «Discussion on Worst Distance Between SPD and Protected Device» [26], υπάρχει ένα χείριστο μήκος καλωδίωσης μεταξύ του SPD και του υπό προστασία φορτίου και ότι δεν ισχύει πως όσο πιο μεγάλο το μήκος τόσο χειρότερα προστατεύεται ένα φορτίο. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στην περίπτωση καθαρά επαγωγικού φορτίου που, όπως αναφέραμε παραπάνω, η αποτελεσματική απόσταση προστασίας είναι μικρότερη από ένα όριο και μεγαλύτερη από ένα άλλο όριο.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

# Πειραματικό Μέρος: Εξοπλισμός, Διάταξη και Διαδικασία

### 6.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, με την αύξηση του μήκους καλωδιώσεων μεταξύ των απαγωγών υπερτάσεων και του υπό προστασία φορτίου υπονομεύεται η ορθή λειτουργία των διατάξεων προστασίας από υπερτάσεις. Αυτό το φαινόμενο, θέλουμε να το παρατηρήσουμε διεξάγοντας δύο πειράματα, όπου για διαφορετικά μήκη καλωδίωσης, εξετάζουμε την εμφανιζόμενη υπέρταση σε έναν ρευματοδότη (υπό προστασία ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο), που προστατεύεται με ένα SPD τύπου T1 ή με συνδυασμό δύο SPD τύπων T1 και T2 αντίστοιχα, εγχέοντας κρουστικό ρεύμα διαφορετικών μέγιστων τιμών.

### 6.2 Εξοπλισμός Πειραματικής Διάταξης

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων αποτελείται από:

- Κρουστική Γεννήτρια Ρεύματος «HILO/TEST: EMC-2004»

Η γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων HILO/TEST:EMC-2004 είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) για τη δημιουργία κρουστικών ρευμάτων, απεικονίζοντας διάφορες ηλεκτρικές διαταραχές, που μπορούν να επηρεάσουν ηλεκτρονικές συσκευές ή συστήματα. Η HILO/TEST:EMC-2004 μπορεί να παράγει διάφορα είδη κρουστικών ρευμάτων, με διαφορετικές χαρακτηριστικές και παραμέτρους, ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος ή των προδιαγραφών που απαιτούνται για την αξιολόγηση της συμβατότητας μιας συσκευής.

Η γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων HILO-TEST:EMC-2004 ρυθμίστηκε, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο «συρτάρι», ώστε να παράγει κρουστικά ρεύματα με κυματομορφή διάρκειας 8/20μs και μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_b$  έως 25 kA. Μέσω ενός καταμεριστή με αναλογία 1000:1, παράγει την έξοδο ρεύματος και τάσης, που είναι κατάλληλα για μέτρηση από τον παλμογράφο. Αυτό σημαίνει ότι ένα πραγματικό ρεύμα εξόδου των 5kA αντιστοιχεί σε έξοδο της γεννήτριας και, επομένως, στον παλμογράφο, της τάξης των 5V→5A.

Η γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων HILO-TEST:EMC-2004 διαθέτει δημιουργία, επεξεργασία και εκτέλεση αυτόματων διαδικασιών (Test Procedure) και εκτέλεση χειροκίνητων δοκιμών (Manual Test). Για την διεξαγωγή των απαιτούμενων μετρήσεων θα χρησιμοποιήσουμε τις χειροκίνητες δοκιμές.

LCD μονάδα ελεγχόμενη από μικροεπεξεργαστή	8·40 χαρακτήρες
Parallel printer interface for on-line documentation	25-way 'D' υποδοχή
Οπτική διεπαφή για απομακρυσμένο έλεγχο της γεννήτριας	Ενσωματωμένο
Εξωτερική είσοδος ενεργοποίησης	10V στα 1kΩ
Εξωτερική έξοδος ενεργοποίησης	10V στα 1 kΩ
Μέγιστη τιμή τάσης φόρτισης, προσαρμόσιμη	0.2 – 10kV ±2%
Πολικότητα παλμού εξόδου	POS/NEG/ALT
Μέγιστη αποθηκευόμενη ενέργεια	1500 J
Πυκνωτής αποθήκευσης ενέργειας, Standard έκδοση	30 μF/ 10 kV
Χρόνος φόρτισης	<20 sec
Υποδοχή για εξωτερικό safety interlock loop και εξωτερικές πράσινες και κόκκινες προειδοποιητικές ενδείξεις σύμφωνα με VDE 0104	24 V = 230V, 60W
Κύρια παροχή	230 V, 50/60 Hz
Διαστάσεις πλαισίου W · H · D	556·470·600 mm <sup>2</sup>
Βάρος	65 kg
Plug-in κρουστικού ρεύματος	8/20 μs, 25 kA
Κρουστικό ρεύμα εξόδου, ρυθμιζόμενο μέσω της τάσης φόρτισης	2-25 kA ± 5%
Κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος εξόδου, σύμφωνα με IEC 60	8 / 20 μs ± 20%
Κυμάτωση ("ringing")	< 30 %
Αντίσταση μέτρησης ρεύματος, ενσωματωμένη	1 mΩ, 20 MHz

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά κρουστικής γεννήτριας ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004 [32] .



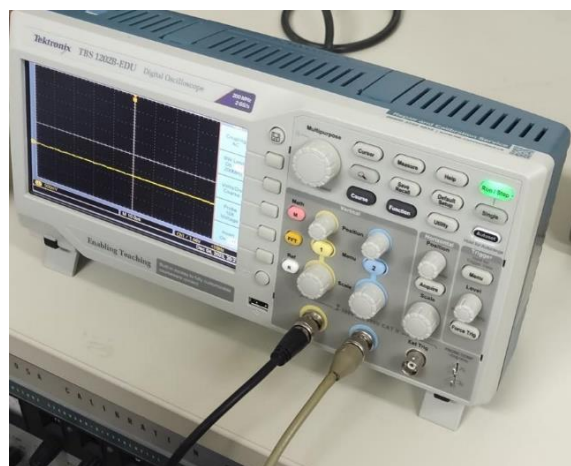
Εικόνα 6.1: Η κρουστική γεννήτρια ρεύματος «HILO/TEST: EMC-2004».

- Παλμογράφος «Tektronix TBS 1202B-EDU»

Ο παλμογράφος που θα χρησιμοποιήσουμε διαθέτει δύο κανάλια, στα οποία θα οδηγείται το μετρούμενο κρουστικό ρεύμα που παράγει η κρουστική γεννήτρια και η προς μέτρηση τάση που αναπτύσσεται στο υπό προστασία φορτίο, όπως θα δούμε αργότερα.

Εύρος Ζώνης	200 MHz
Κανάλια	2
Ρυθμός Δειγματοληψίας σε κάθε Κανάλι	2.0 GS/s
Μήκος Εγγραφής	2500 σημεία σε όλες τις βάσεις χρόνου
Κάθετη Ανάλυση	8 bits
Κάθετη Ευαισθησία Εισόδου	2mV σε 5V/div σε όλα τα μοντέλα με βαθμονομημένη κυματομορφή
Κάθετη Ακρίβεια DC	±3% από 10mV/div έως 5V/div
Κάθετη Εστίαση (zoom)	Κατακόρυφη ανάπτυξη ή σύμπτυξη σε τρέχουσα ή σταματημένη κυματομορφή
Μέγιστη Τάση Εισόδου	300 V <sub>rms</sub> CAT II, υποβαθμισμένη στα 20Db/dec πάνω από 100kHz έως 13 V <sub>p</sub> -p AC στα 3MHz
Εύρος Θέσης	2 mV to 200 mV/div; at 1.8 V >200 mV to 5 V/div; ±45 V
Όριο Εύρους Ζώνης	20 MHz
Σύζευξη Εισόδου (coupling)	AC, DC, Ground
Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου	1MΩ παράλληλα με έναν πυκνωτή 20pF
Εύρος Βάσης Χρόνου	5 ns σε 50 s/div
Ακρίβεια Βάσης Χρόνου	50 ppm
Οριζόντια Εστίαση (zoom)	Οριζόντια ανάπτυξη ή σύμπτυξη σε τρέχουσα ή σταματημένη κυματομορφή

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά παλμογράφου Tektronix TBS 1202B-EDU [31] .



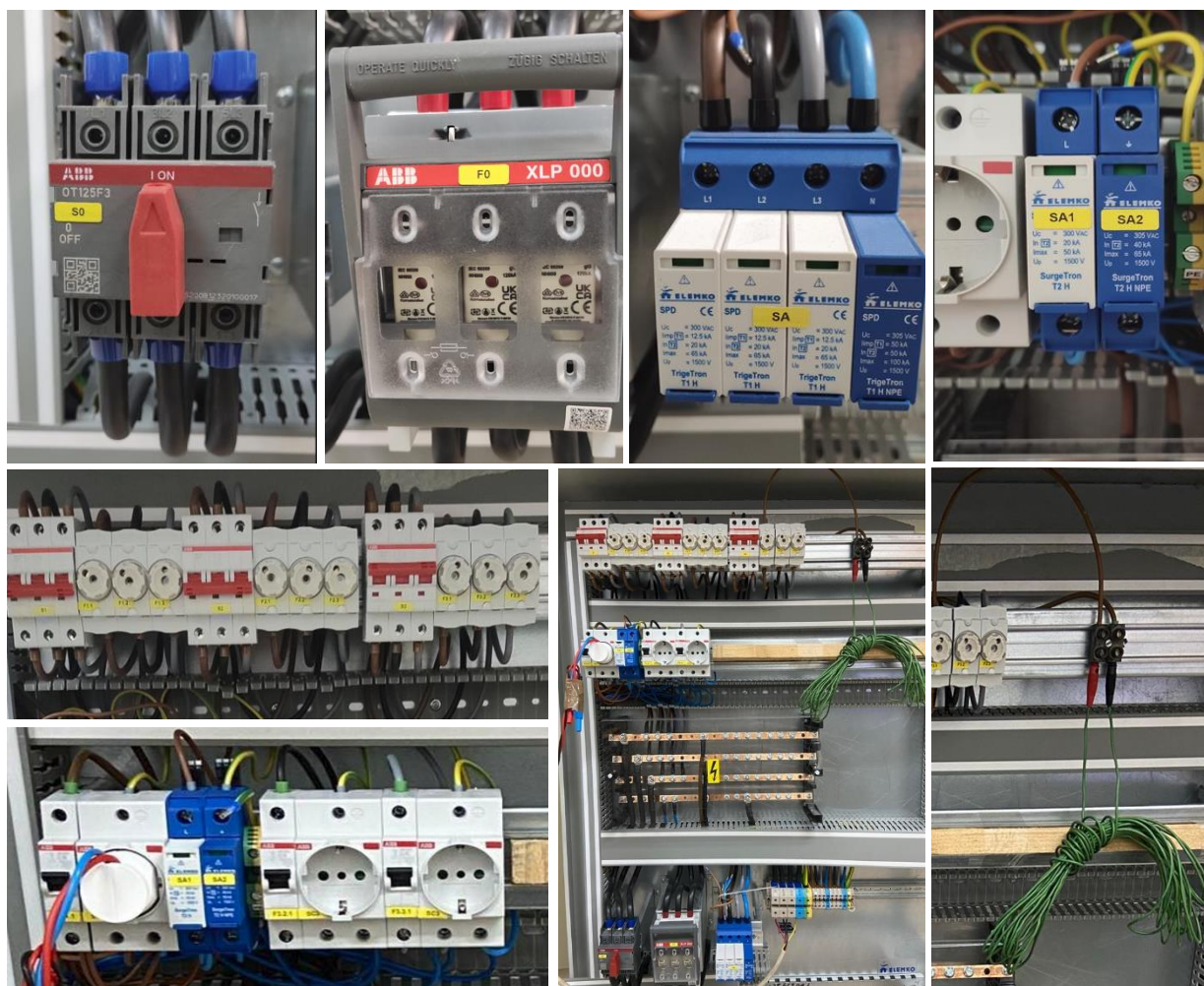
Εικόνα 6.2: Ο παλμογράφος «Tektronix TBS 1202B-EDU».



- Ηλεκτρικός Πίνακας Χαμηλής Τάσης (3Φ/400V/AC/50Hz)

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων, χρησιμοποιήσαμε έναν πίνακα που αναπαριστά μία τριφασική εγκατάσταση χαμηλής τάσης (3Φ/400V/AC/50Hz). Η κατασκευή του πίνακα έγινε από την εταιρεία ΕΛΕΜΚΟ και τροποποιήθηκε κατάλληλα με την βοήθεια του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ο πίνακας διαθέτει έναν κύριο πίνακα διανομής, όπου δύναται να συνδεθεί η τριφασική παροχή της εγκατάστασης χαμηλής τάσης, και τρεις υποπίνακες. Ο κύριος πίνακας διανομής προστατεύεται με έναν τριφασικό αποζεύκτη φορτίου, έναν τριφασικό ασφαλειοαποζεύκτη, για προστασίας έναντι υπερεντάσεων, βραχυκυκλωμάτων αλλά και απόξευξη και απομόνωση, και ένα SPD κλάσης T1 και διαμόρφωσης CT1 3+1 για προστασία έναντι υπερτάσεων. Οι τρεις τριφασικοί υποπίνακες προστατεύονται με τριπολικό αποζεύκτη φορτίου και 3 ασφάλειες τήξεως. Ο υποπίνακας 3, πιο συγκεκριμένα, τροφοδοτεί ένα φορτίο (ρευματοδότης) στη φάση L1, που προστατεύεται έναντι υπερτάσεων με ένα επιπλέον SPD κλάσης T2 διαμόρφωσης CT2 1+1 σε συνδυασμό με το T1 του κύριου πίνακα διανομής, και άλλα δύο φορτία στις φάσεις L2 και L3 αντίστοιχα.



Εικόνα 6.3: Στοιχεία του ηλεκτρικού πίνακα όπως περιγράφηκαν παραπάνω.



- Καλώδια Χαμηλής Τάσης

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 6.3), έχει γίνει μια τροποποίηση του πίνακα έτσι ώστε να είναι δυνατή η εναλλαγή του μήκους της καλωδίωσης μεταξύ του SPD T1 στην είσοδο της εγκατάστασης και του υπό προστασία φορτίου. Με την προσθήκη μίας κλέμματος δύο υποδοχών, συνδέουμε από την μία πλευρά την γενική ασφάλεια του τρίτου υποπίνακα και τον μικροαυτόματο του υπό μελέτη ρευματοδότη και από την άλλη εισάγουμε καλώδια διαφορετικού μήκους. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν καλώδια ίδιου τύπου, διατομής  $2.5 \text{ mm}^2$  και μήκους 20cm, 6.5m, 7m, 9m, 16m 22.5m, 100m.

- Ομοαξονικό Καλώδιο

Για τη σύνδεση της πειραματικής διάταξης με το κανάλι CH1 παλμογράφου, χρησιμοποιήθηκε ομοαξονικό καλώδιο τύπου RG 58/U 50 Ω.

- SPD κλάσης T1 και διαμόρφωσης CT1 3+1

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή (ΕΛΕΜΚΟ), ο τετραπολικός απαγωγός T1 (Class I), σε συνδεσμολογία 3+1 (3Φ + N) είναι κατάλληλος για συστήματα TT, TN S και TN CS. Διαθέτει 3 στοιχεία προστασίας καινοτόμου σχεδιασμού, συνδυάζοντας έναν ημιαγωγό βαρέως τύπου εν σειρά με διάταξη σπινθηριστή (μεταξύ L – N) παρέχοντας υψηλή απόδοση έναντι υπερτάσεων μεγάλης διάρκειας περιορίζοντας και τη διαρροή από τους αγωγούς φάσεων προς ουδέτερο. Επίσης διαθέτει και ένα στοιχείο σπινθηριστή ευγενούς αερίου βαρέως τύπου μεταξύ ουδέτερου και αγωγού γείωσης (PE) ώστε να μην επιτρέπει καθόλου ρεύμα διαρροής προς τη γείωση επιτρέποντας την εγκατάστασή του πριν από ΔΔΡ ακόμα και για συστήματα TT, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει και μέγιστη προστασία ακόμα και έναντι υπερτάσεων μεγάλης διάρκειας προερχόμενες από σφάλματα στο δίκτυο διανομής. Έχει την ικανότητα εκφόρτισης κεραυνικού ρεύματος 12.5kA ανά πόλο (10/350μs), 50kA/4pole (10/350μs) προσφέροντας προστασία σε εγκαταστάσεις που διαθέτουν εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας στάθμης III και IV. Παράλληλα προστατεύει από επαγωγικά κρουστικά ρεύματα έως και 65kA ανά πόλο (8/20μs). Ο απαγωγός έχει παραμένουσα τάση ανά πόλο μικρότερη από 1.5kV υπό ρεύμα 25kA επιτυγχάνοντας ολοκληρωμένη προστασία προς συσκευές όλων των κατηγοριών μόνωσης IV, III, II & I [33].

Επωνυμία προϊόντος	TrigeTron T1 H
Κωδικός	68 25 412
Αριθμός Πόλων	4
Σύνδεση μεταξύ πόλων	L <sub>1</sub> – N, L <sub>2</sub> – N, L <sub>3</sub> – N, N – PE
Εγκατάσταση σε	TN S, TN CS, TT
Ονομαστική τάση λειτουργίας, U <sub>N</sub>	230/400 V, 50Hz
Μέγιστη τάση λειτουργίας, U <sub>c</sub>	300V (L-N) / 305V (N-PE), 50Hz
I <sub>imp</sub> , “class I” test, (10/350μs), 1P	12.5kA (L-N) / 50kA (N-PE)
I <sub>max</sub> , “class II” test, (8/20μs), 1P	65kA (L-N) / 100kA (N-PE)
I <sub>n</sub> , “class II” test, (8/20μs), 1P	20kA (L-N) / 50kA (N-PE)
U <sub>p</sub> , (σε I <sub>n</sub> )	<1.5kV (L-N) / <1.5kV (N-PE)
Χρόνος απόκρισης, t <sub>A</sub>	<25ns (L-N) / <100ns (N-PE)
Μέγιστη ασφάλεια	315A gG fuse

Ικανότητα σε βραχυκύκλωμα, $I_{scorr}$	50kA / 50Hz
Ακόλουθο ρεύμα (N-PE), $I_f$	100A rms
Υπέρταση μεγάλης διάρκειας TOV 120min L-N	442V withstand
Υπέρταση μεγάλης διάρκειας TOV 200ms N-PE	1200V withstand
Θερμική προστασία και οπτική ένδειξη καλής λειτουργίας	NAI
Ρεύμα διαρροής, $I_{PE}$	< 5 $\mu$ A
Θέση εγκατάστασης	Σε εσωτερικό χώρο
Στάθμη προστασίας περιβλήματος	IP20
Διαστάσεις ΠxΥxB (mm)	72x106x87
Θερμοκρασία λειτουργίας,	-40°C ... 80°C
Σχετική υγρασία	DIN-3 (TS-35/EN50022)
Μέγιστη υποδοχή ακροδεκτών	35mm <sup>2</sup>
Μέγιστη υποδοχή ακροδεκτών βοηθητικής επαφής	1.5mm <sup>2</sup>
Ισοδύναμη προσφερόμενη προστασία σύμφωνα με TS 61643 – 12 & IEC 61643 -12	T1 (CAT IV) + T2 (CAT II & CAT III) + T3 (CAT I)
Πιστοποίηση	VDE, CE
Δήλωση συμμόρφωσης	LVD 2014/35/EU
Εγκατάσταση από αδειούχο ηλεκτρολόγο	IEC 60417 – 6182
Διαχείριση Ποιότητας, Περιβάλλοντος και Ασφάλειας	ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά SPD κλάσης T1 και διαμόρφωσης CT1 3+1 [33] .



Εικόνα 6.4: SPDs κλάσης T1 και διαμόρφωσης CT1 3+1 και T2 και διαμόρφωσης CT2 1+1 [33].

- SPD κλάσης T2 και διαμόρφωσης CT2 1+1

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή (ΕΛΕΜΚΟ), ο μονοπολικός απαγωγός T2 (Class II) είναι κατάλληλος για συνδεσμολογία μεταξύ L – N και L - PEN σε συστήματα TT, TN S, TN CS & TN C. Διαθέτει 1 στοιχείο προστασίας καινοτόμου σχεδιασμού συνδυάζοντας έναν ημιαγωγό εν σειρά με διάταξη σπινθηριστή (μεταξύ L – N) παρέχοντας υψηλή απόδοση έναντι υπερτάσεων μεγάλης διάρκειας περιορίζοντας και τη διαρροή από τους αγωγούς φάσεων προς ουδέτερο. Συνδυάζοντας και ένα στοιχείο σπινθηριστή SurgeTron T2 NPE 0+1 κωδικού ΕΛΕΜΚΟ 68 50 151 μεταξύ ουδέτερου και αγωγού γείωσης (PE), η εγκατάστασή του μπορεί να γίνει πριν από το ΔΔΡ ακόμα και για συστήματα TT, συνδυάζοντας μέγιστη προστασία ακόμα και έναντι υπερτάσεων μεγάλης διάρκειας προερχόμενες από σφάλματα στο δίκτυο διανομής. Έχει την ικανότητα εκφόρτισης κρουστικού ρεύματος 50kA ανά πόλο (8/20μs), 200kA/ 4pole (8/20μs) προσφέροντας προστασία σε εγκαταστάσεις από επαγωγικά κρουστικά ρεύματα. Ο απαγωγός έχει παραμένουσα τάση ανά πόλο μικρότερη από 1.5kV υπό ρεύμα 20kA επιτυγχάνοντας ολοκληρωμένη προστασία προς συσκευές όλων των κατηγοριών μόνωσης IV, III, II & I [33].

Επωνυμία προϊόντος	SurgeTron T2 H 1+0	SurgeTron T2 H NPE 0+1
Κωδικός	68 50 150	68 50 151
Αριθμός Πόλων	1	1
Σύνδεση μεταξύ πόλων	L – N / L – PEN	N – PE
Εγκατάσταση σε	TN S, TN CS, TN C, TT	TN S, TN CS, TT
Ονομαστική τάση λειτουργίας, $U_N$	230/400 V, 50Hz	230/400 V, 50Hz
Μέγιστη τάση λειτουργίας, $U_c$	300V (L-N), 50Hz	305V (N-PE), 50Hz
$I_{imp}$ , “class I” test, (10/350μs), 1P	-	-
$I_{max}$ , “class II” test, (8/20μs), 1P	50kA	65kA
$I_n$ , “class II” test, (8/20μs), 1P	20kA	40kA
$U_p$ , (σε $I_n$ )	<1.5kV	<1.5kV
Χρόνος απόκρισης, $t_A$	<25ns	<100ns
Μέγιστη ασφάλεια	315A gG fuse	-
Ικανότητα σε βραχυκύκλωμα, $I_{scsr}$	25kA / 50Hz	-
Ακόλουθο ρεύμα (N-PE), $I_f$	-	100A rms
Υπέρταση μεγάλης διάρκειας TOV 120min L-N	442V withstand	-
Υπέρταση μεγάλης διάρκειας TOV 200ms N-PE	-	1200V withstand
Θερμική προστασία και οπτική ένδειξη καλής λειτουργίας	NAI	NAI
Ρεύμα διαρροής, $I_{PE}$	< 5 $\mu$ A	< 5 $\mu$ A
Θέση εγκατάστασης	Σε εσωτερικό χώρο	Σε εσωτερικό χώρο
Στάθμη προστασίας περιβλήματος	IP20	IP20
Διαστάσεις ΠxΥxΒ (mm)	17.5x106x70	17.5x106x70
Θερμοκρασία λειτουργίας,	-40°C ... 80°C	-40°C ... 80°C
Σχετική υγρασία	DIN-3(TS-35/EN50022)	DIN-3(TS-35/EN50022)

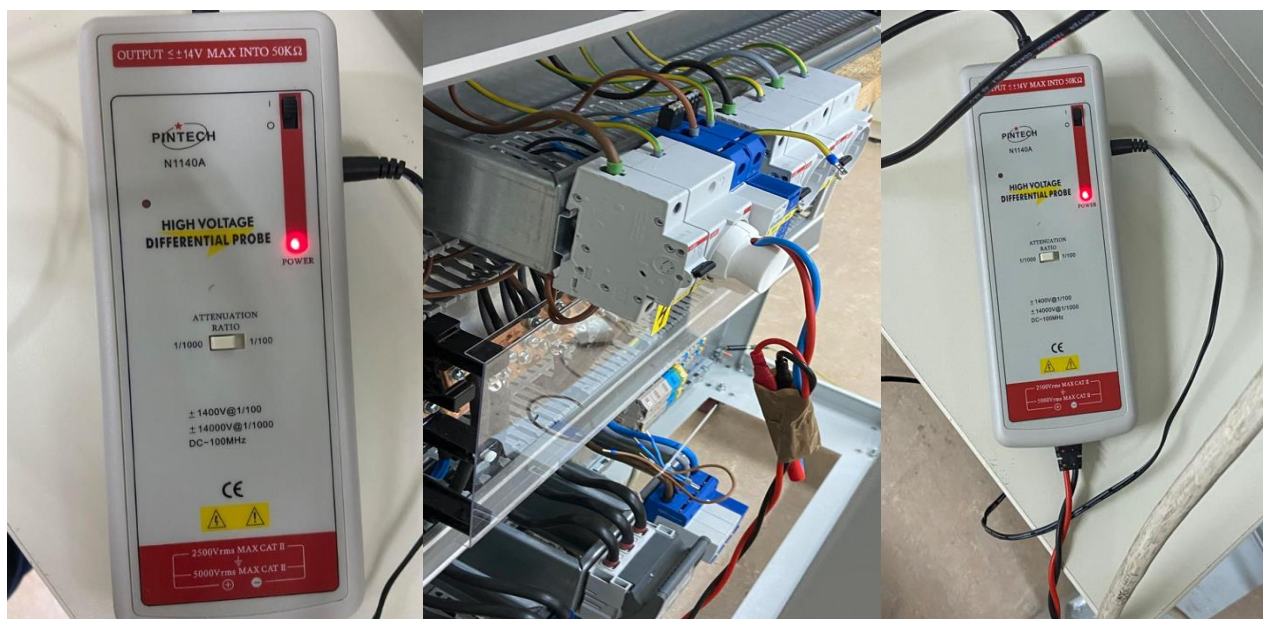
Μέγιστη υποδοχή ακροδεκτών	35mm <sup>2</sup>	35mm <sup>2</sup>
Μέγιστη υποδοχή ακροδεκτών βοηθητικής επαφής	1.5mm <sup>2</sup>	1.5mm <sup>2</sup>
Ισοδύναμη προσφερόμενη προστασία σύμφωνα με TS 61643 – 12 & IEC 61643 -12	T2 (CAT IV, CAT III & CAT II) + T3 (CAT I)	T2 (CAT IV, CAT III & CAT II) + T3 (CAT I)
Πιστοποίηση	VDE, CE	VDE, CE
Δήλωση συμμόρφωσης	LVD 2014/35/EU	LVD 2014/35/EU
Εγκατάσταση από αδειούχο ηλεκτρολόγο	IEC 60417 – 6182	IEC 60417 – 6182
Διαχείριση Ποιότητας, Περιβάλλοντος και Ασφάλειας	ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001	ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά SPD κλάσης T2 και διαμόρφωσης CT2 1+1 [33] .

Ουσιαστικά τα SPD μεταξύ αγωγού φάσης και ουδετέρου (L-N) αποτελούνται από ένα βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων σε σειρά με έναν σωλήνα εκκένωσης αερίου, ενώ τα SPD μεταξύ αγωγού γείωσης και ουδετέρου PE – N αποτελούνται από έναν σωλήνα εκκένωσης αερίου.

- Διαφορικό Probe

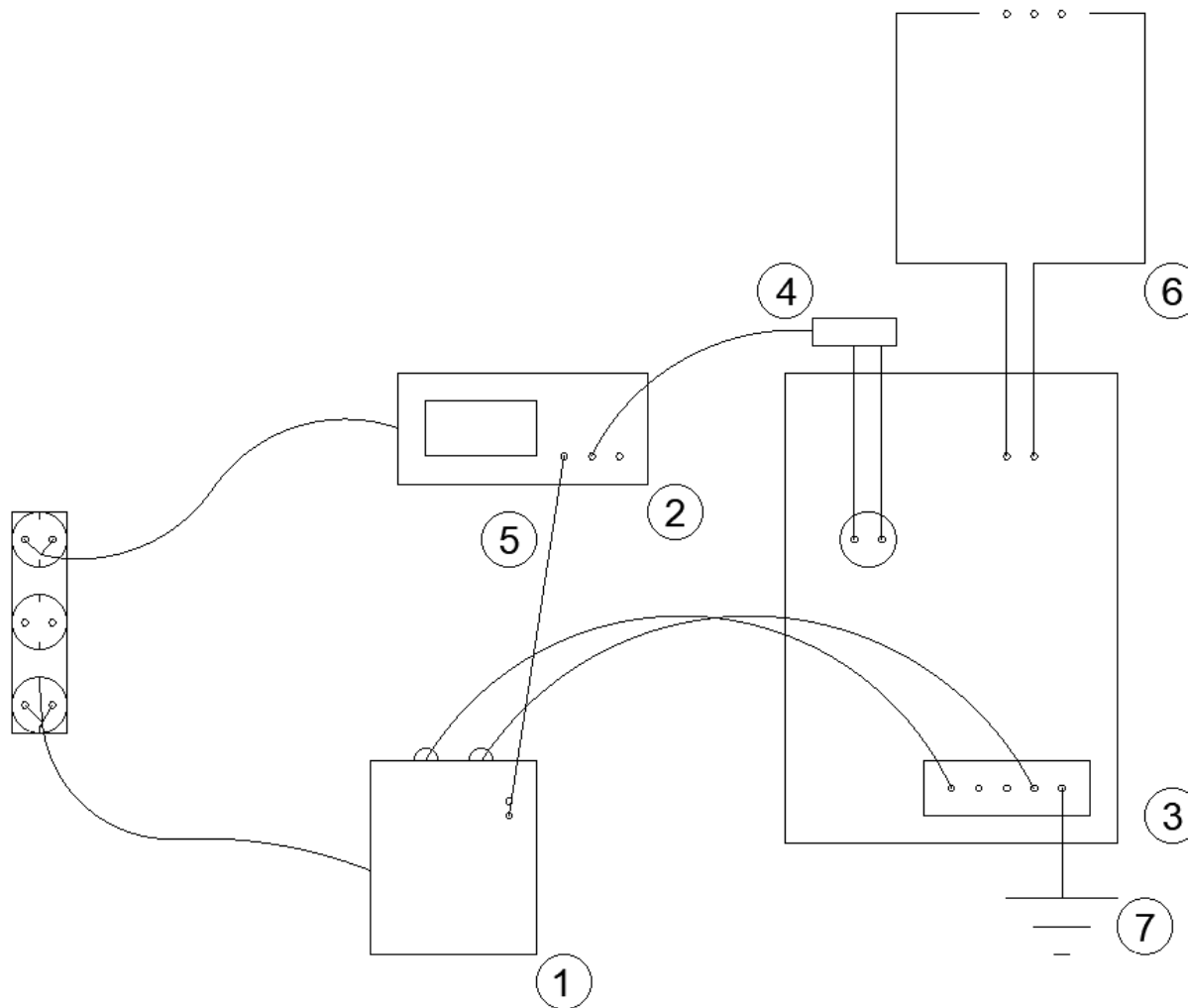
Για την ακριβέστερη μέτρηση τάσης, θεωρείται προτιμότερη η χρήση ενός διαφορικού probe, που τοποθετείται στους ακροδέκτες του υπό μέτρηση φορτίου (ακροδέκτες ρευματοδότη) και μεταφέρει την αναπτυσσόμενη τάση στον παλμογράφο με αναλογία 1/1000.



Εικόνα 6.5: Διαφορικό Probe.

### 6.3 Πειραματική Διάταξη

Η διάταξη για τα πειράματα που θα διεξαχθούν διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.1: Η διάταξη των πειραμάτων.

- 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.

Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόδια έγχυσης κρουστικού ρεύματος που βρίσκονται στο πάνω μέρος της γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων (1), συνδέονται με τον ηλεκτρικό πίνακα χαμηλής τάσης που αντιπροσωπεύει μία τριφασική εγκατάσταση χαμηλής τάσης (3). Το ένα ηλεκτρόδιο συνδέεται με την φάση L1 του πίνακα και το δεύτερο συνδέεται με τον ουδέτερο N του πίνακα. Επομένως, η κρούση γίνεται μεταξύ φάσης και ουδετέρου.

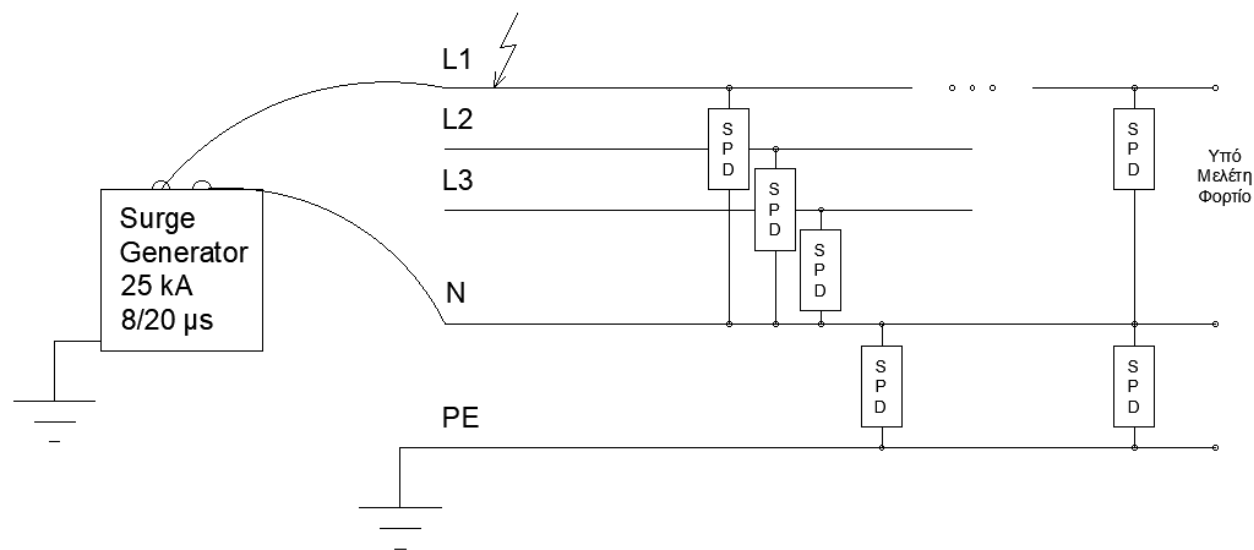
Ο αγωγός γείωσης και το μεταλλικό σασί του πίνακα (3) συνδέονται με την γείωση λειτουργίας (7) του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ, για την ασφάλεια των παραβρισκόμενων στο χώρο των μετρήσεων, αλλά και για την ακριβέστερη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας των απαγωγών υπερτάσεων.

Ο παλμογράφος (2) συνδέεται σε έναν μονοφασικό ρευματοδότη του εργαστηρίου, χωρίς την σύνδεση γείωσης. Αυτό γίνεται για να αποτραπεί η επιστροφή ρεύματος στην γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων μέσω του παλμογράφου. Η γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων (1), από την άλλη, συνδέεται σε έναν μονοφασικό ρευματοδότη του εργαστηρίου με επιπλέον σύνδεση γείωσης.

Στο πρώτο κανάλι (ch1) του παλμογράφου (2), οδηγείται μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου (5) το κρουστικό ρεύμα έγχυσης της γεννήτριας, με κλίμακα 1/1000. Στο δεύτερο κανάλι (ch2) του παλμογράφου (2), οδηγείται μέσω ενός διαφορικού probe (4) η τάση μεταξύ φάσης και ουδετέρου (L1 – N) του υπό μελέτη φορτίου.

Τέλος, όπως προαναφέραμε έχει γίνει μια τροποποίηση του πίνακα (3) έτσι ώστε να είναι δυνατή η εναλλαγή του μήκους της καλωδίωσης (6) μεταξύ του SPD T1 στην είσοδο της εγκατάστασης και του υπό προστασία φορτίου. Με την προσθήκη μίας κλέμμας δύο υποδοχών, συνδέουμε από την μία πλευρά την γενική ασφάλεια του τρίτου υποπίνακα και τον μικροαυτόματο του υπό μελέτη ρευματοδότη και από την άλλη εισάγουμε καλώδια διαφορετικού μήκους.

Κυκλωματικά η γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων και ο πίνακας που μελετάμε με τις διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων διακρίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 6.2: Η κυκλωματική διάταξη των πειραμάτων.

## 6.4 Πειραματική Διαδικασία

Αφού έχουμε στήσει και ελέγξει την πειραματική διάταξη προχωρούμε στην διεξαγωγή των απαιτούμενων κρούσεων και την λήψη μετρήσεων.

Αρχικά, ενεργοποιούμε τον παλμογράφο από το χαρακτηριστικό κουμπί ενεργοποίησης και τον ρυθμίζουμε κατάλληλα. Στα δύο πειράματα η κυματομορφή που εγχέεται είναι η 8/20  $\mu\text{s}$ . Και στα δύο πειράματα οδηγούμε στον παλμογράφο από την γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων το εγχέόμενο ρεύμα (κανάλι 1) και την εμφανιζόμενη τάση στο υπό μελέτη φορτίο (κανάλι 2), με κλίμακα 1/1000. Για αυτό το λόγο, καθορίζουμε την χρονική κλίμακα του παλμογράφου στα 10  $\mu\text{s}/\text{div}$ , επιλέγουμε κλίμακα στα κανάλια του παλμογράφου  $\times 1000$  για να μας εμφανίζονται οι πραγματικές τιμές τάσης και ρεύματος. Οι κλίμακες ρεύματος και τάσης στον παλμογράφο καθορίζονται σε 50~1000 A/div και 200~500 V/div, ανάλογα το εγχέόμενο ρεύμα της εκάστοτε μέτρησης. Τέλος, αξίζει να σημειώσουμε ότι πριν από κάθε κρούση που θέλουμε να λάβουμε μετρήσεις στον παλμογράφο, επιλέγουμε από το πάνω δεξιά μέρος του το “Single” για να καταγράψει το απαραίτητο στιγμιότυπο.

Θέτουμε σε κλίμακα 1/1000 το διαφορικό probe και το έπειτα το ενεργοποιούμε.

Στη συνέχεια, ενεργοποιούμε την γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων χρησιμοποιώντας το κλειδί ενεργοποίησης που βρίσκεται κάτω αριστερά στην πρόσοψη της γεννήτριας. Κατά την ενεργοποίηση της γεννήτριας θα πρέπει να αποφύγουμε την προσέγγιση του άνω μέρους της όπου βρίσκονται τα ηλεκτρόδια έγχυσης, καθώς και την επαφή με τον ηλεκτρικό πίνακα με τον οποίο έχουμε συνδέσει την γεννήτρια, για λόγους ασφαλείας. Όταν η γεννήτρια είναι αφόρτιστη ή φορτισμένη ανάβουν χαρακτηριστικά ένας πράσινος και ένας κόκκινος λαμπτήρας αντίστοιχα, στο άνω μέρος της γεννήτριας. Μόλις ενεργοποιηθεί η γεννήτρια, επιλέγουμε από το κεντρικό μενού “Manual Test”, δηλαδή την διεξαγωγή δοκιμών χειροκίνητα. Έπειτα, καθορίζουμε την τάση φόρτισης της γεννήτριας, μέσω της ροδέλας, που ελέγχει το ρεύμα έγχυσης σε συνθήκες βραχυκύκλωσης των ηλεκτροδίων της γεννήτριας (έως 25kA). Το ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται στο κάτω δεξιά μέρος της οθόνης της γεννήτριας. Επιπλέον, ρυθμίζουμε το είδος της κυματομορφής όπου επιλέγουμε 8/20  $\mu\text{s}$ , την πολικότητα της κυματομορφής όπου επιλέγουμε θετική, τον αριθμό των παλμών όπου επιλέγουμε ένα παλμό και τον χρόνο μεταξύ των επαναλήψεων όπου είναι αδιάφορο το τι θα επιλέξουμε καθώς έχουμε έναν παλμό. Τέλος, πατώντας το “Start” ξεκινάει η φόρτιση της γεννήτριας και μόλις ολοκληρωθεί εμφανίζεται στην οθόνη η επιλογή “Trigger”. Μόλις, βεβαιωθούμε ότι ο παλμογράφος έχει ρυθμιστεί κατάλληλα και έχει επιλεγεί το “Single”, πατώντας το “Trig” της γεννήτριας γίνεται η έγχυση του κρουστικού ρεύματος στο ηλεκτρόδιο. Προσοχή, το κρουστικό ρεύμα έγχυσης δύναται να διαφέρει από το ρεύμα βραχυκύκλωσης που εμφανίζεται στην οθόνη της γεννήτριας ανάλογα την αντίσταση που θα εμφανίζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Έπειτα, εφόσον λάβουμε τις κατάλληλες μετρήσεις στον παλμογράφο, αποθηκεύουμε σε ένα USB Flash Drive τις μετρούμενες κυματομορφές υπό μορφής εικόνας και σε αρχείο excel για μετέπειτα επεξεργασία.

Εάν επιθυμούμε να παρέμβουμε και να τροποποιήσουμε την πειραματική διάταξη, πατάμε “ESC” στην γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων και γυρνάμε το κλειδί της για να την

απενεργοποιήσουμε. Για περεταίρω ασφάλεια μπορούμε να απομονώσουμε τον ηλεκτρικό πίνακα χρησιμοποιώντας το αποζεύκτη φορτίου που διαθέτει.

Στο πρώτο πείραμα εγχέουμε κρουστικό ρεύμα 8/20  $\mu$ s, με την μέγιστη τιμή βραχυκυκλώματος να κυμαίνεται από 1.8kA έως 3.8kA, με βήμα 400A, εξετάζοντας 7 διαφορετικά μήκη καλωδίωσης μεταξύ του SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα και του υπό μελέτη φορτίου, και δύο διαφορετικούς τρόπους προστασίας έναντι υπερτάσεων. Τα διαφορετικά μήκη καλωδίωσης είναι 20cm, 6.5m, 7m, 9m, 16m 22.5m, 100m, ενώ οι δύο τρόποι προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι η χρήση ενός SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα ή ενός SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα σε συνδυασμό με ένα SPD κλάσης T2 παράλληλο στο υπό μελέτη φορτίο. Επομένως, επέμβαση στον ηλεκτρικό πίνακα προβλέπεται για την αλλαγή του μήκους καλωδίωσης ή για την σύνδεση και αποσύνδεση του δεύτερο SPD κλάσης T2. Αξίζει να σημειώσουμε ότι το φορτίο που εξετάζουμε είναι ανοιχτοκυκλωμένο, που αποτελεί την χειρίστη περίπτωση, όπως σημειώθηκε στο θεωρητικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Οι μετρήσεις που λαμβάνουμε στον παλμογράφο, όπως προαναφέρθηκε, περιλαμβάνουν το εγγεόμενο κρουστικό ρεύμα στη διάταξη και η εμφανιζόμενη τάση στο υπό μελέτη φορτίο.

Στο δεύτερο πείραμα εγχέουμε κρουστικό ρεύμα 8/20  $\mu$ s, μεγαλύτερης μέγιστης τιμής βραχυκύκλωσης, που κυμαίνεται από 7kA έως 9kA με βήμα 2kA, εξετάζοντας 7 διαφορετικά μήκη καλωδίωσης μεταξύ του SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα και του υπό μελέτη φορτίου, και δύο διαφορετικούς τρόπους προστασίας έναντι υπερτάσεων. Τα διαφορετικά μήκη καλωδίωσης είναι 20cm, 6.5m, 7m, 9m, 16m, 22.5m, 100m, ενώ οι δύο τρόποι προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι η χρήση ενός SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα ή ενός SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα σε συνδυασμό με ένα SPD κλάσης T2 παράλληλο στο υπό μελέτη φορτίο. Επομένως, επέμβαση στον ηλεκτρικό πίνακα προβλέπεται για την αλλαγή του μήκους καλωδίωσης ή για την σύνδεση και αποσύνδεση του δεύτερο SPD κλάσης T2. Αξίζει να σημειώσουμε ότι το φορτίο που εξετάζουμε είναι ανοιχτοκυκλωμένο, που αποτελεί την χειρίστη περίπτωση, όπως σημειώθηκε στο θεωρητικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Οι μετρήσεις που λαμβάνουμε στον παλμογράφο, όπως προαναφέρθηκε, περιλαμβάνουν το εγγεόμενο κρουστικό ρεύμα στη διάταξη και η εμφανιζόμενη τάση στο υπό μελέτη φορτίο.



## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

# Πειραματικό Μέρος: Αποτελέσματα Πρώτου Πειράματος

### 7.1 Εισαγωγή

Στο πρώτο πείραμα εγχέουμε κρουστικό ρεύμα 8/20  $\mu\text{s}$ , με την μέγιστη τιμή βραχυκυκλώματος να κυμαίνεται από 1.8kA έως 3.8kA, με βήμα 400A, εξετάζοντας 7 διαφορετικά μήκη καλωδίωσης μεταξύ του SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα και του υπό μελέτη φορτίου, και δύο διαφορετικούς τρόπους προστασίας έναντι υπερτάσεων. Τα διαφορετικά μήκη καλωδίωσης είναι 20cm, 6.5m, 7m, 9m, 16m 22.5m, 100m, ενώ οι δύο τρόποι προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι η χρήση ενός SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα ή ενός SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα σε συνδυασμό με ένα SPD κλάσης T2 παράλληλο στο υπό μελέτη φορτίο. Στόχος του εν λόγω πειράματος είναι ο εντοπισμός ταλαντώσεων στην μετρούμενη τάση στο υπό μελέτη ανοιχ/μένο φορτίο με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης.

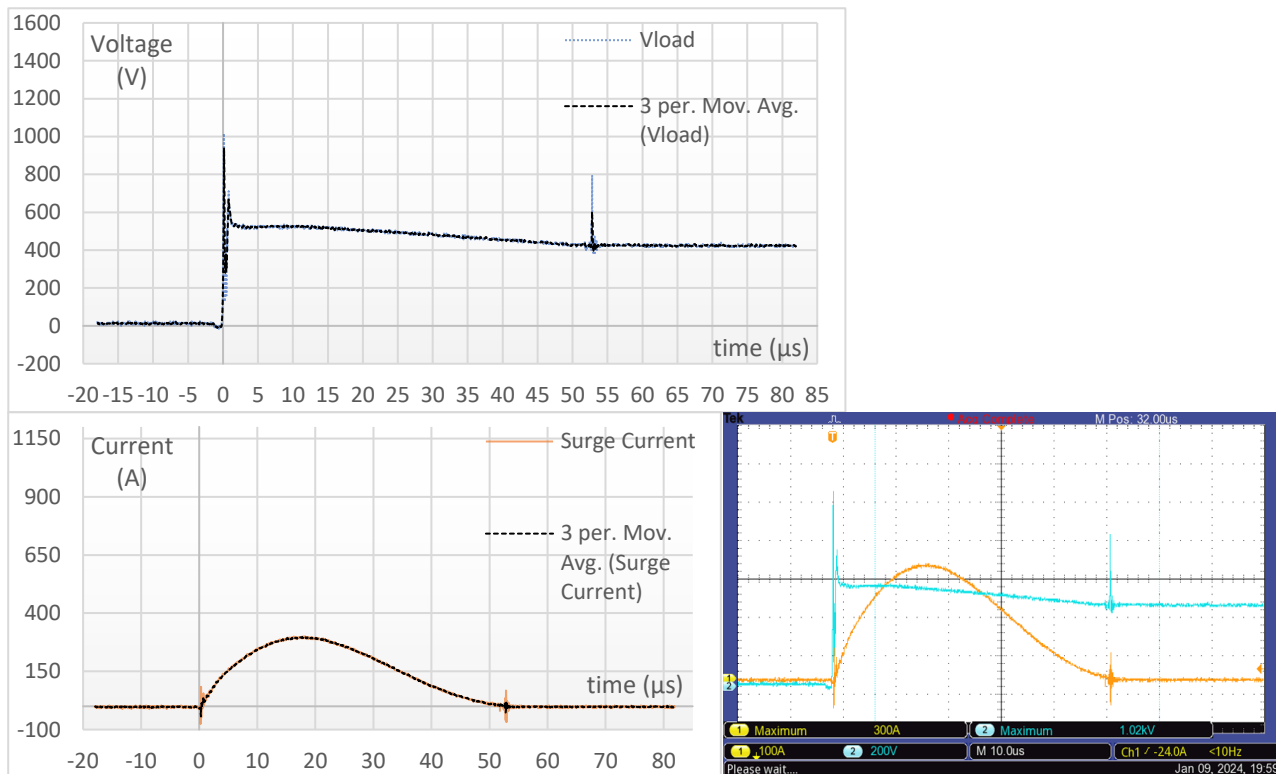
### 7.2 Παρουσίαση Μετρήσεων

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων αποθηκεύονται σε εξωτερικό USB Flash Drive από τον παλμογράφο σε μορφή Microsoft Excel και εικόνας. Η εικόνα απεικονίζει το παλμογράφημα που εμφανίζει ο παλμογράφος, ενώ σε μορφή Microsoft Excel λαμβάνουμε τις 2500 λήψεις που έχει αποθηκεύσει ο παλμογράφος, για κάθε κανάλι μέτρησης. Αφού επεξεργάστηκαν οι μετρήσεις παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο.

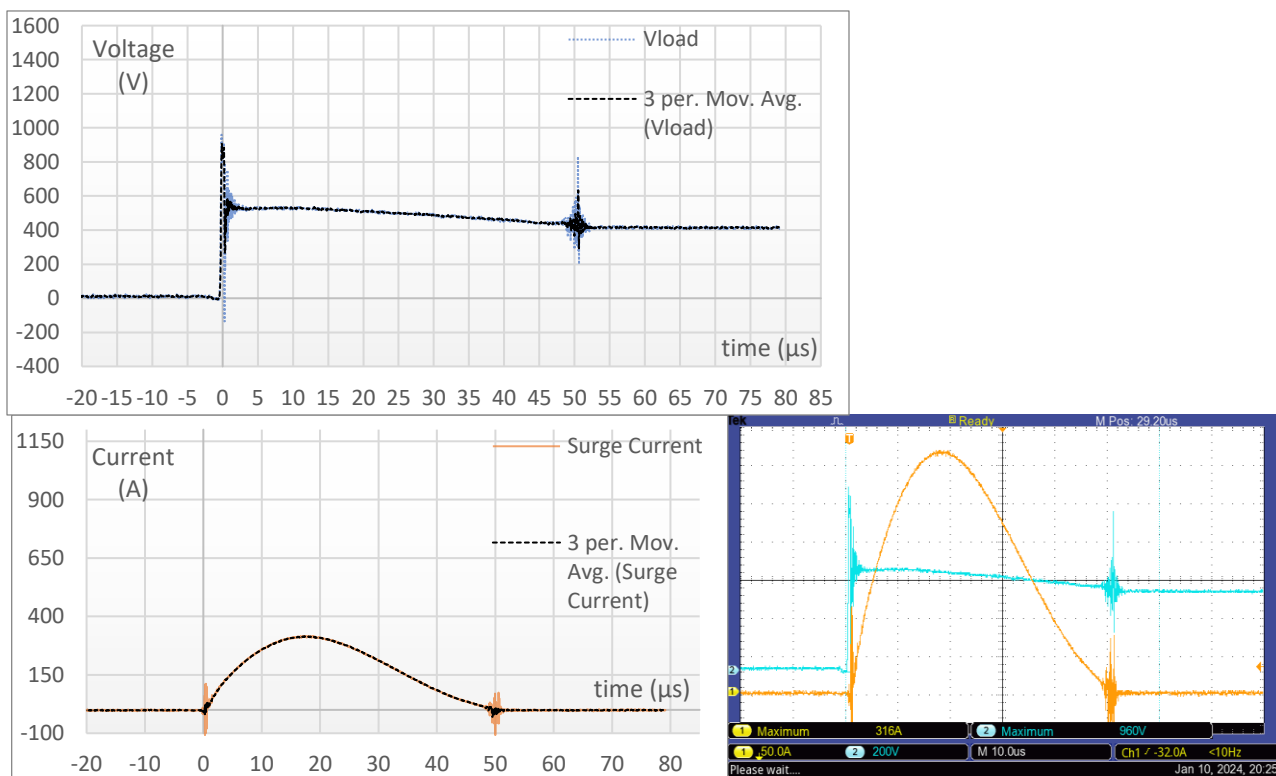
Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μέτρηση παρατίθεται ένα σχήμα που αποτελείται από την τάση που εμφανίζεται στο υπό μελέτη φορτίο (κανάλι 2 παλμογράφου), με χρώμα μπλε, και το κρουστικό ρεύμα έγχυσης (κανάλι 1 παλμογράφου), με χρώμα πορτοκαλί, όπως παράχθηκαν από τα 2500 σημεία που αποθήκευσε ο παλμογράφος για κάθε κανάλι μέτρησης σε μορφή Microsoft Excel. Παράλληλα, παρατίθεται στο ίδιο σχήμα και το παλμογράφημα της ίδιας μέτρησης. Τέλος, παράλληλα με της κυματομορφές τάσης και ρεύματος, όπως προκύπτουν από τα 2500 σημεία που αποθήκευσε ο παλμογράφος, παρατίθεται και μία εξομάλυνσή τους, με μαύρες κουκκίδες. Η εξομάλυνση αυτή προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου απλών κινητών μέσων όρων 3 σημείων. Αναλυτικότερα, κάθε σημείο του εξομαλυμένου σήματος προκύπτει από τον μέσο όρο τριών σημείων γύρω από την ίδια χρονική στιγμή του αρχικού σήματος. Αυτό γίνεται για να μειωθεί ο θόρυβος και τυχόν αβέβαιες λήψεις του παλμογράφου και να αποτυπωθεί η κύρια συνιστώσα του μετρούμενου μεγέθους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εν λόγω μετρήσεις. Κάθε σχήμα αποτελεί διαφορετική περίπτωση μήκους καλωδίωσης, διάταξης προστασίας και ρεύματος βραχυκύκλωσης της γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων.

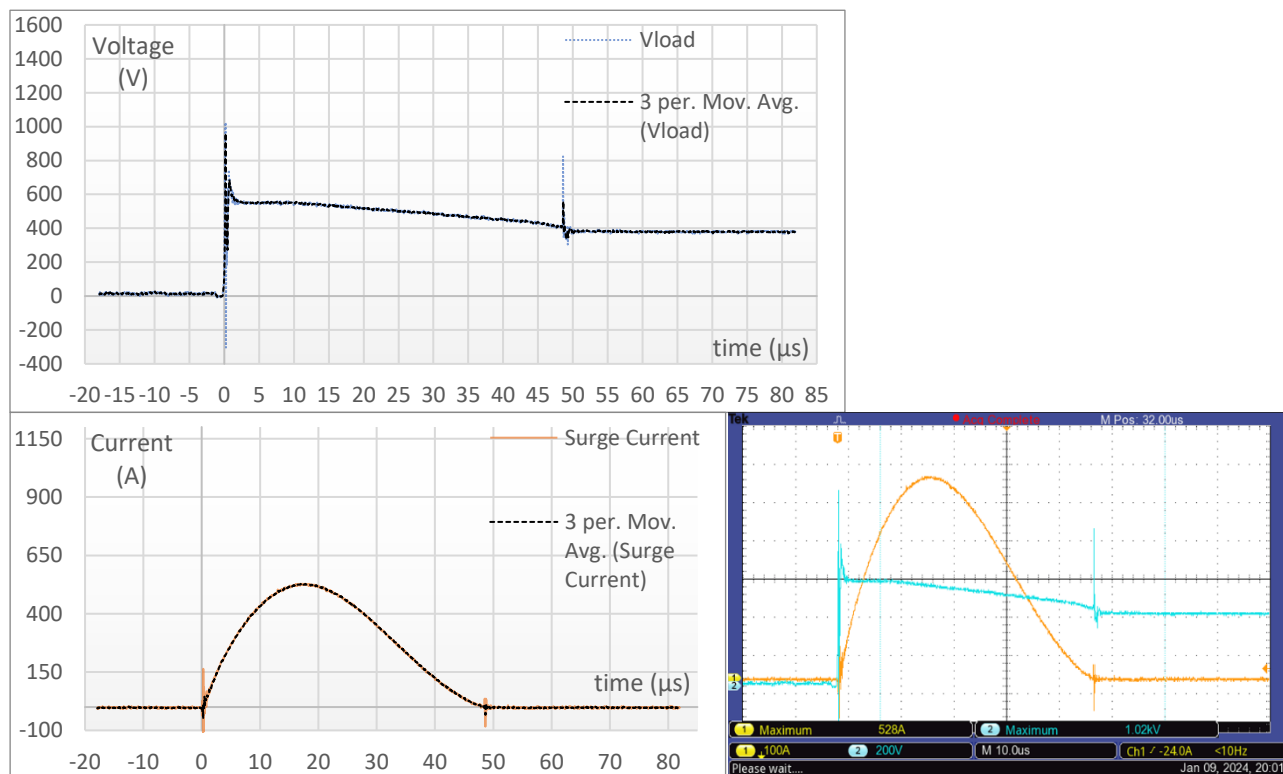
Σχήμα 7.1: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



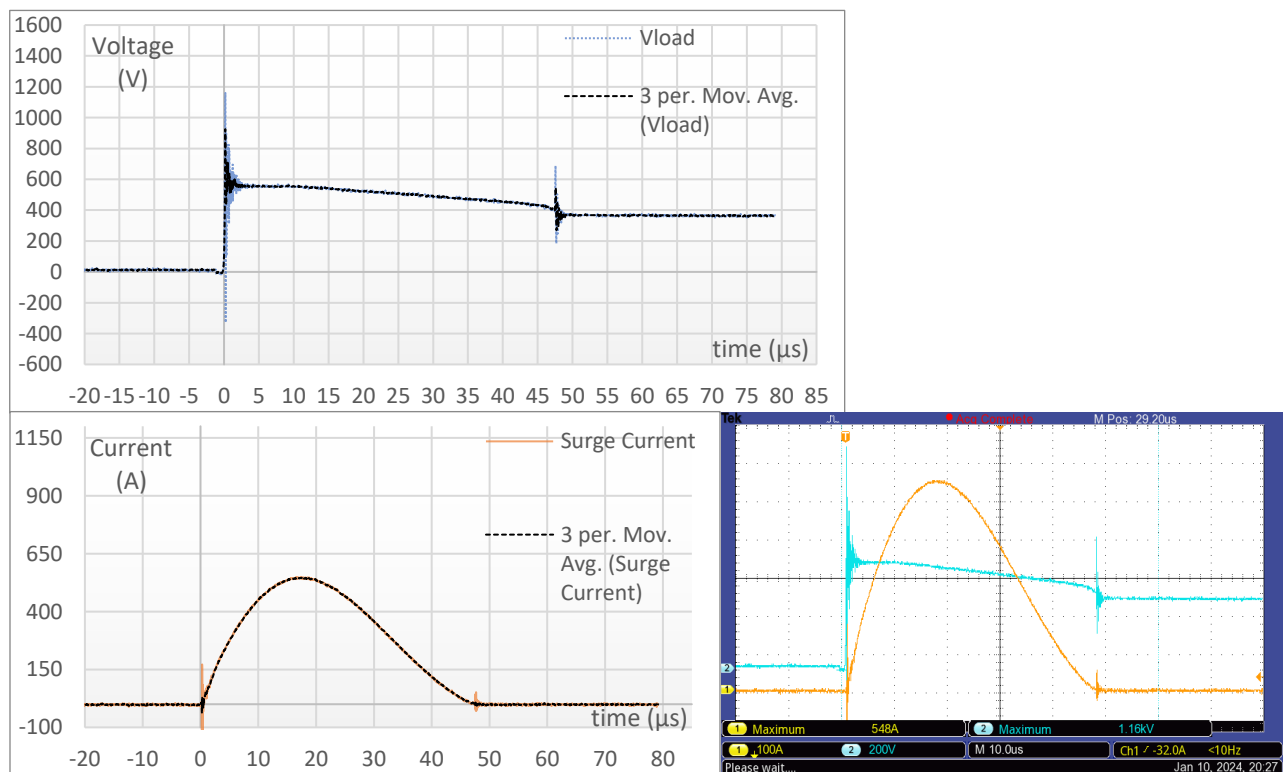
Σχήμα 7.2: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



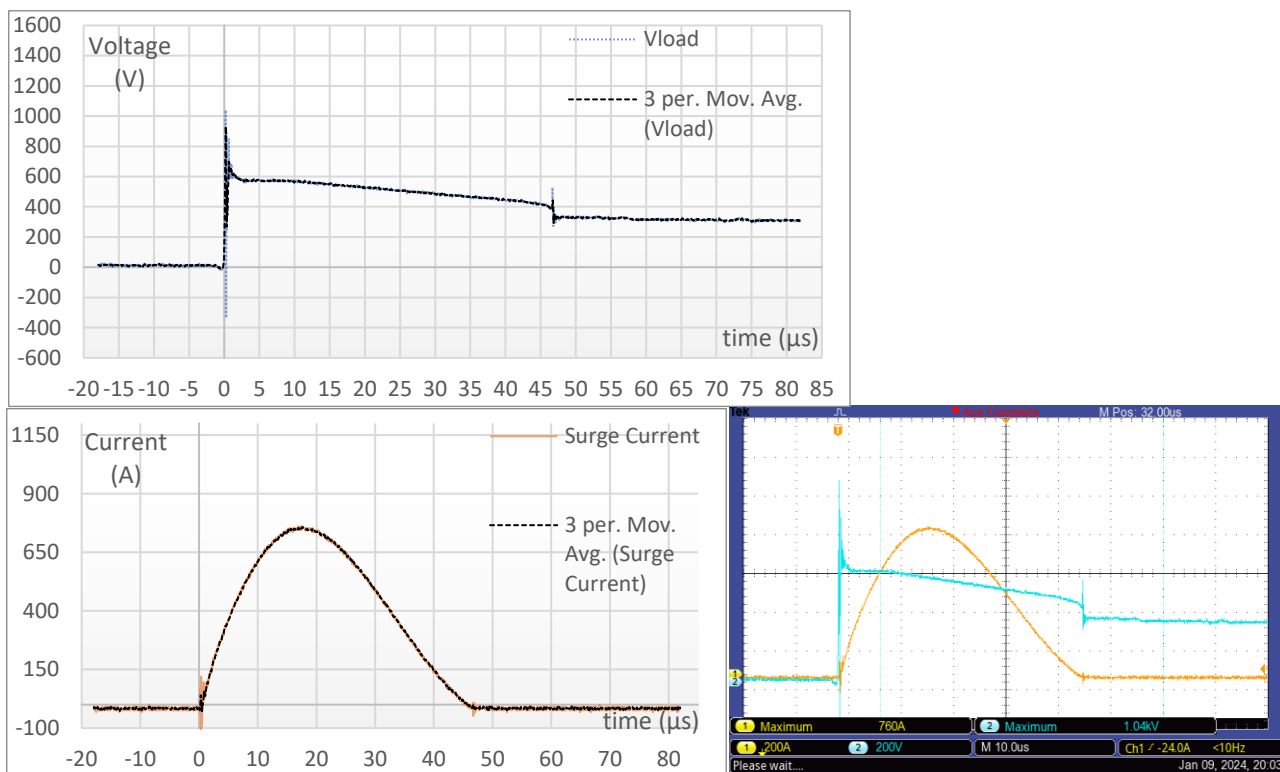
Σχήμα 7.3: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



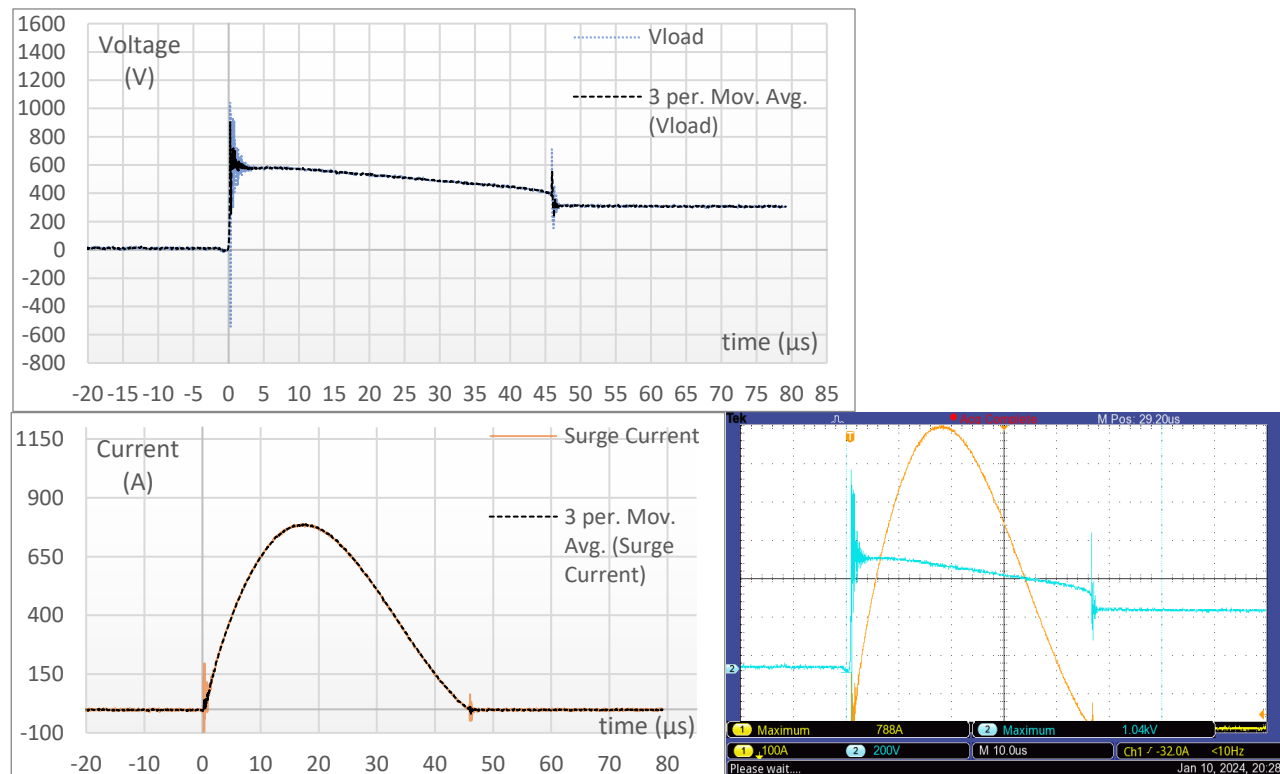
Σχήμα 7.4: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



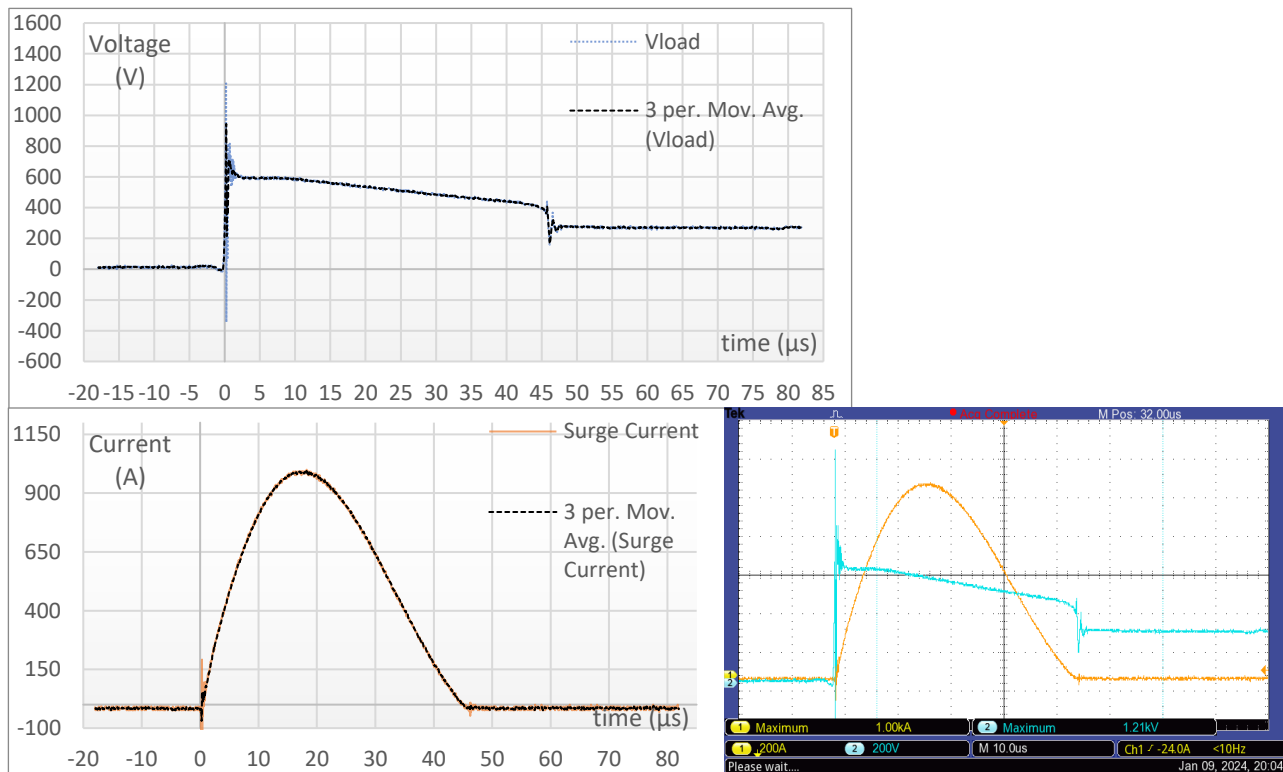
Σχήμα 7.5: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



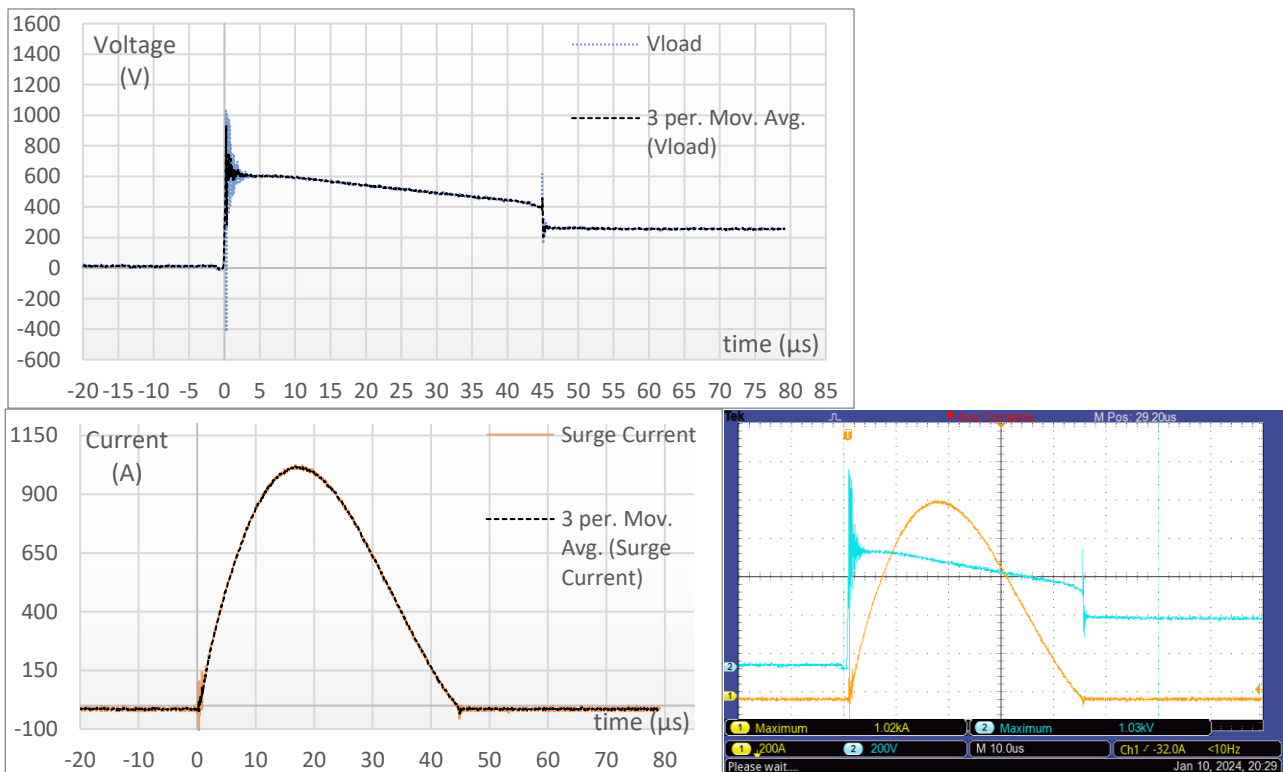
Σχήμα 7.6: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



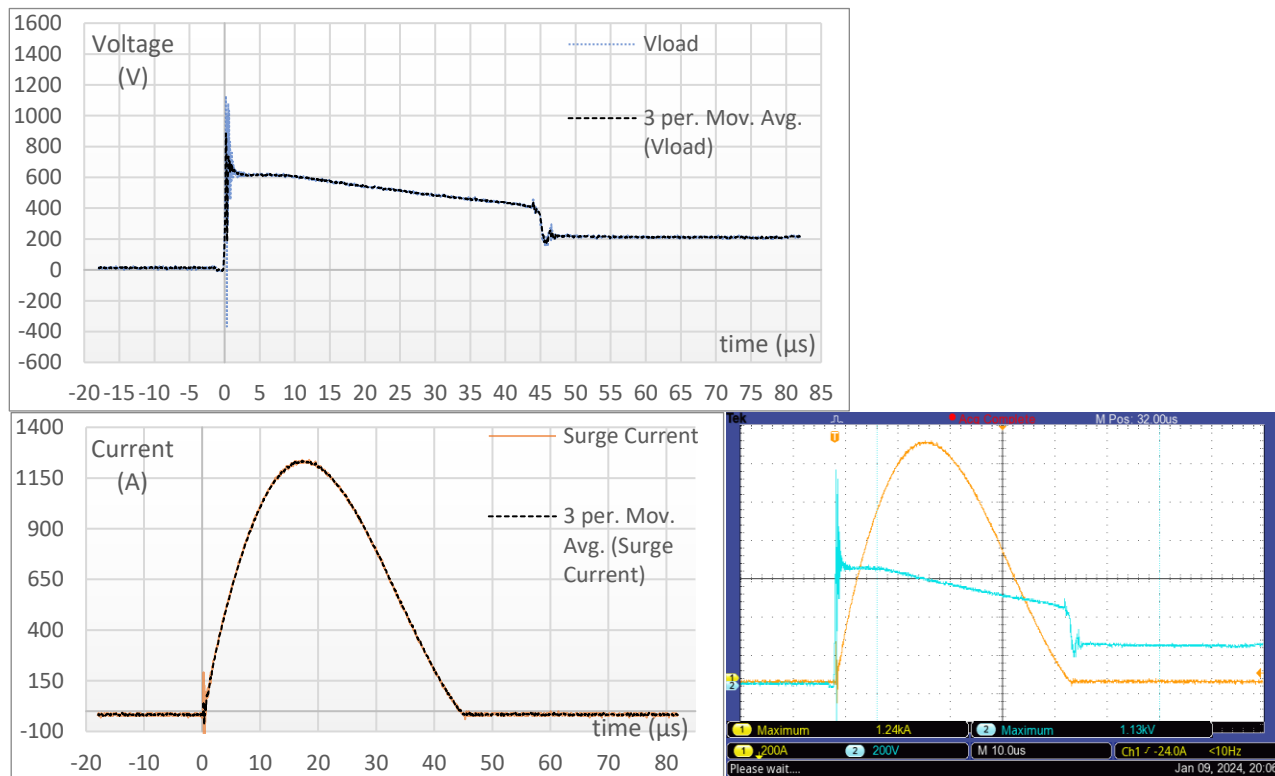
Σχήμα 7.7: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



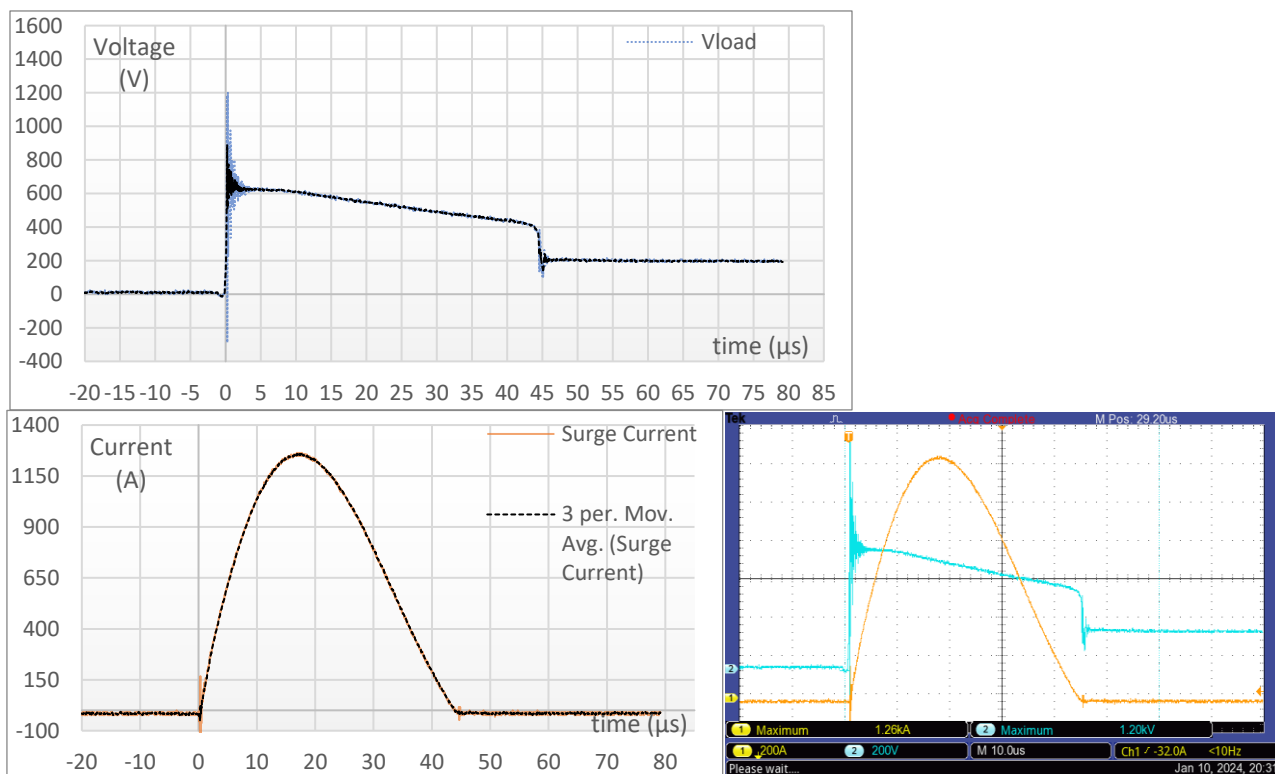
Σχήμα 7.8: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



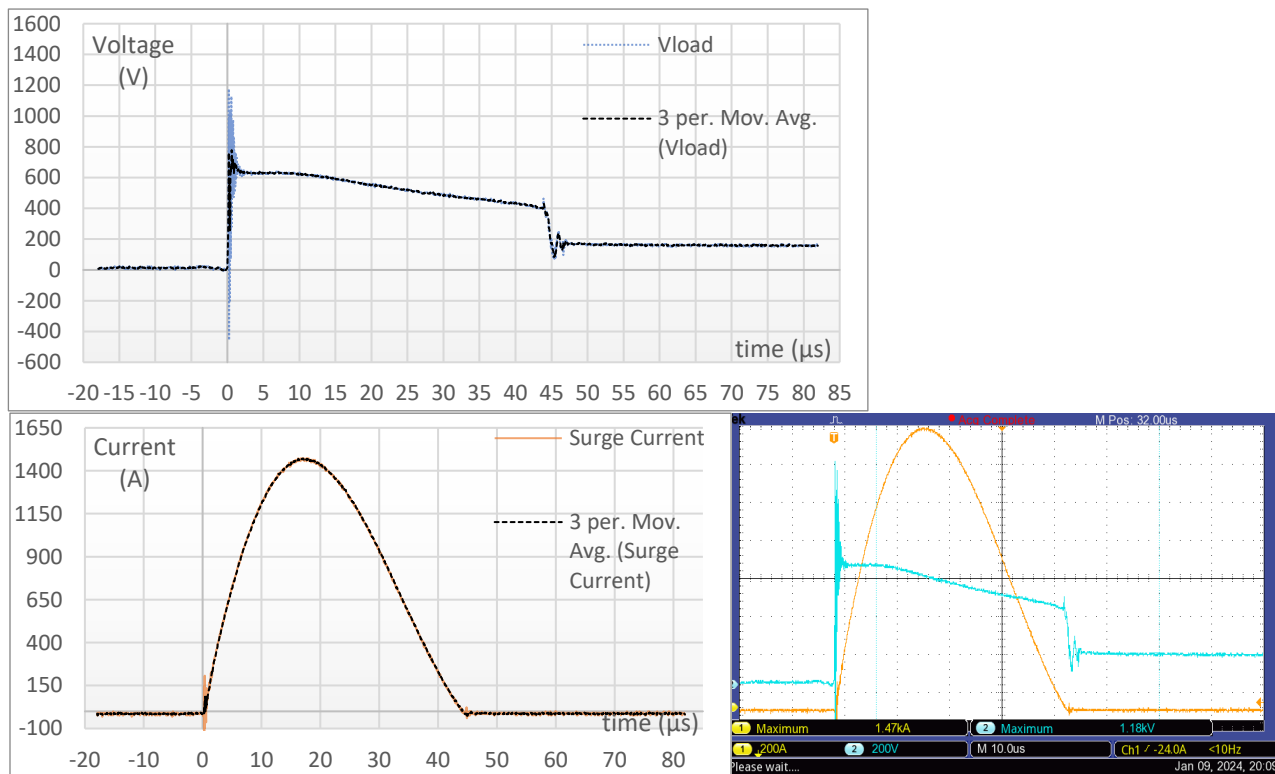
Σχήμα 7.9: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



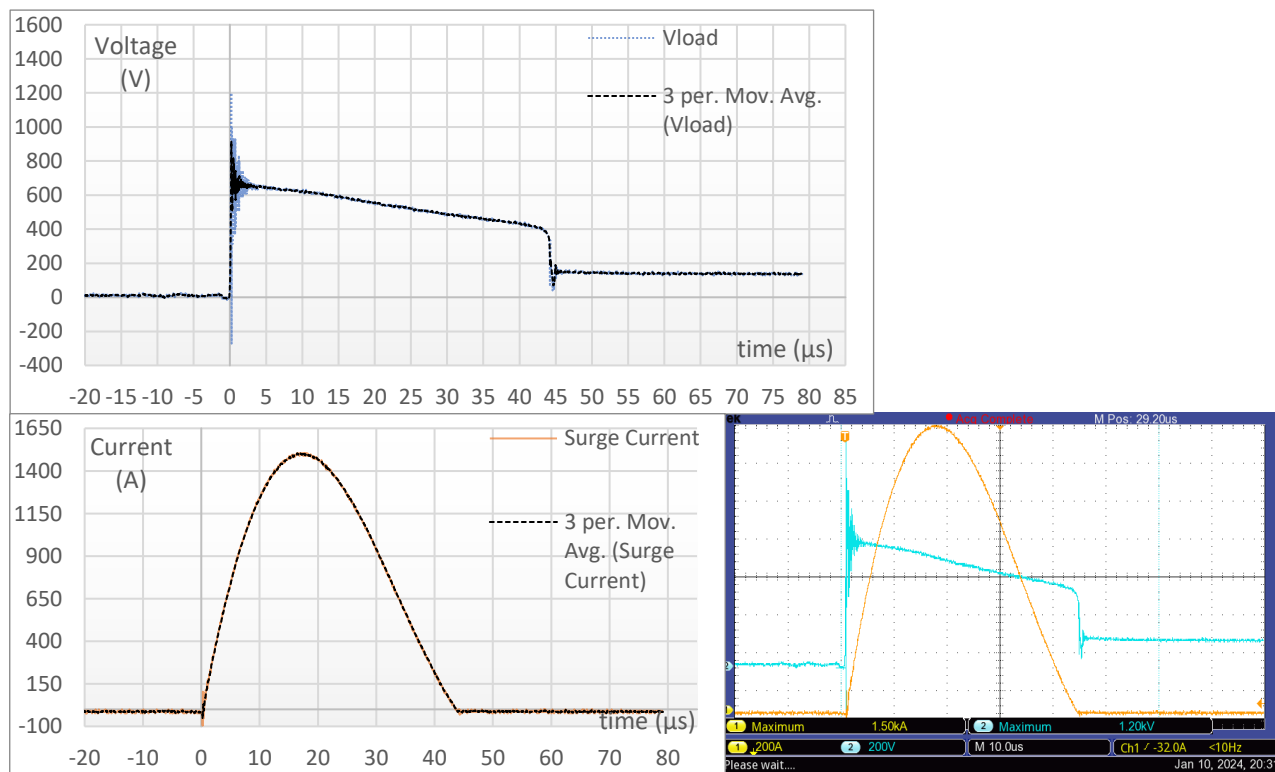
Σχήμα 7.10: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



Σχήμα 7.11: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



Σχήμα 7.12: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.

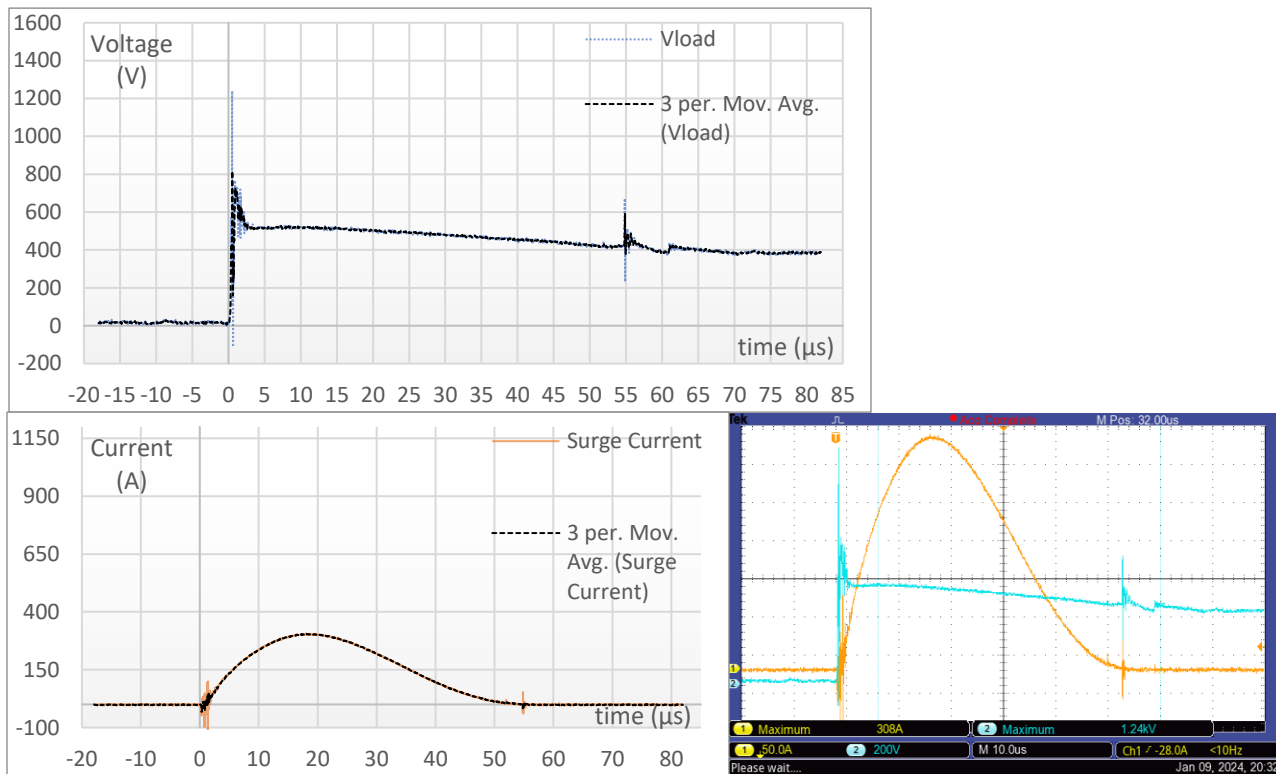


## Παρατηρήσεις

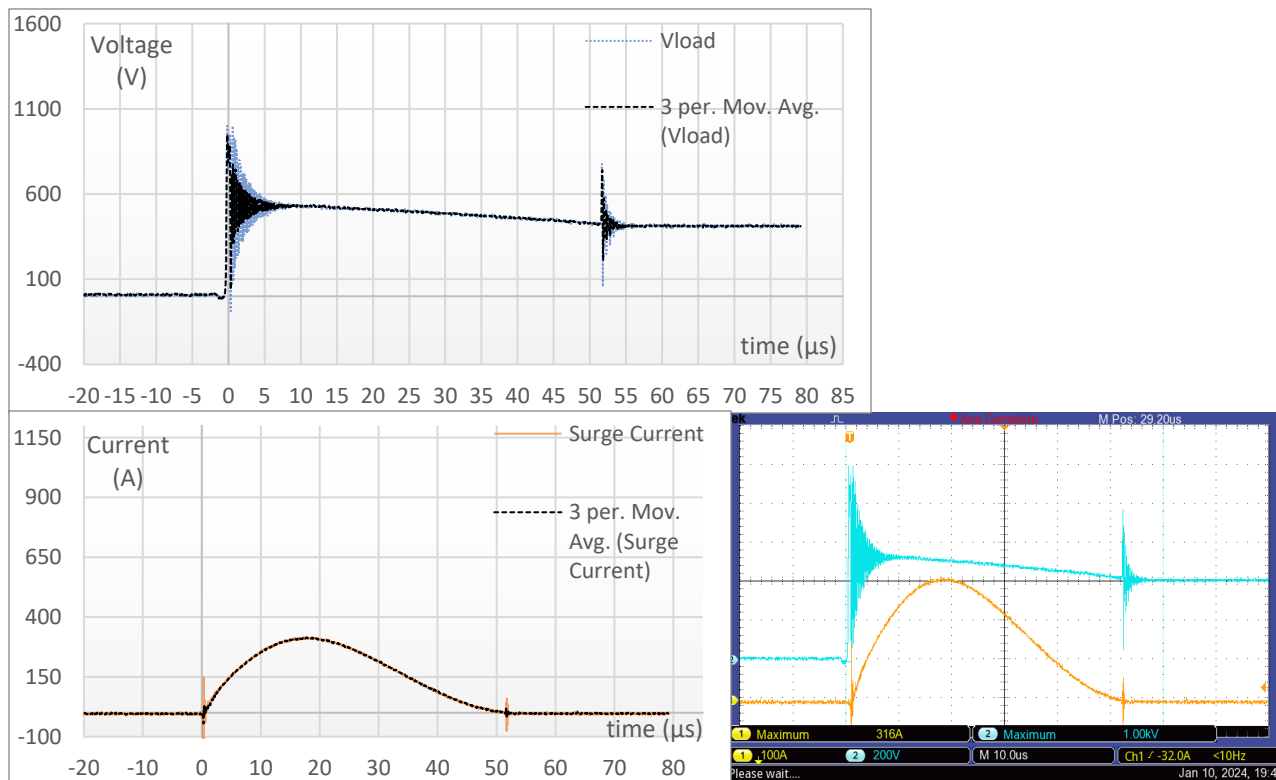
1. Αρχικά, παρατηρούμε πως οι κυματομορφές της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο με τις δύο διαφορετικές διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι παρόμοιες. Αυτό οφείλεται στο μικρό μήκος (20cm) που διαχωρίζει το υπό προστασία φορτίο και το δεύτερο SPD τύπου T2 (όταν είναι συνδεδεμένο), με το πρώτο SPD τύπου T1.
2. Ωστόσο, παρατηρούμε μια ταλάντωση της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο, μικρής διάρκειας και μικρής μέγιστης τιμής στην περίπτωση διάταξης προστασίας με SPD τύπου T1 μόνο.
3. Η παραμένουσα τάση μετά το πρωταρχικό spike που εμφανίζει, παρατηρούμε, λαμβάνει τιμές κοντά στα 600V και στις δύο περιπτώσεις προστασίας, δηλαδή T1+T2 και T1, παρουσιάζοντας μία ελαφριά αύξηση με την αύξηση του εγχυόμενου ρεύματος.
4. Παρατηρούμε ότι το εγχυόμενο ρεύμα παρουσιάζει μία ταλάντωση στην αρχή της κρούσης και ορισμένες φορές παρουσιάζει μία λιγότερο ισχυρή ταλάντωση στη σβέση της κρούσης. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην φόρτιση και εκφόρτιση των παράσιτων χωρητικοτήτων και αυτεπαγωγών της πειραματικής διάταξης κατά την μεταβατική κατάσταση της έγχυσης, όπου και οι πυκνωτές της γεννήτριας δεν εκ φορτίζονται συγχρονισμένα.
5. Παράλληλα παρατηρούμε μία μεγάλη, απότομη αιχμή της κυματομορφής της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο στην αρχή της κρούσης. Αυτό οφείλεται στον χρόνο απόκρισης του σωλήνα εκκένωσης αερίου (GDT) των απαγωγών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται. Το “spike” αυτό συμβαίνει στα πρώτα 25-100ns και σηματοδοτεί την ενεργοποίηση του σωλήνα εκκένωσης αερίου του SPD και στην συνέχεια, με την ενεργοποίηση του βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων που συνδέεται σε σειρά.
6. Τέλος, στην αρχή της κρούσης (το πρώτο 1.5μs) όπου το  $di/dt$  είναι μεγάλο και το ρεύμα εμφανίζει ορισμένες ταλαντώσεις λόγω των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, η τάση στα άκρα του πρώτου SPD T1 εμφανίζει μία ταλάντωση που ίσως οφείλεται στην αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσής του (μικρότερα από 0.5m). Αυτός ο θόρυβος μεταφέρεται και στη τάση στο υπό μελέτη φορτίο στο πρώτο 1.5μs.



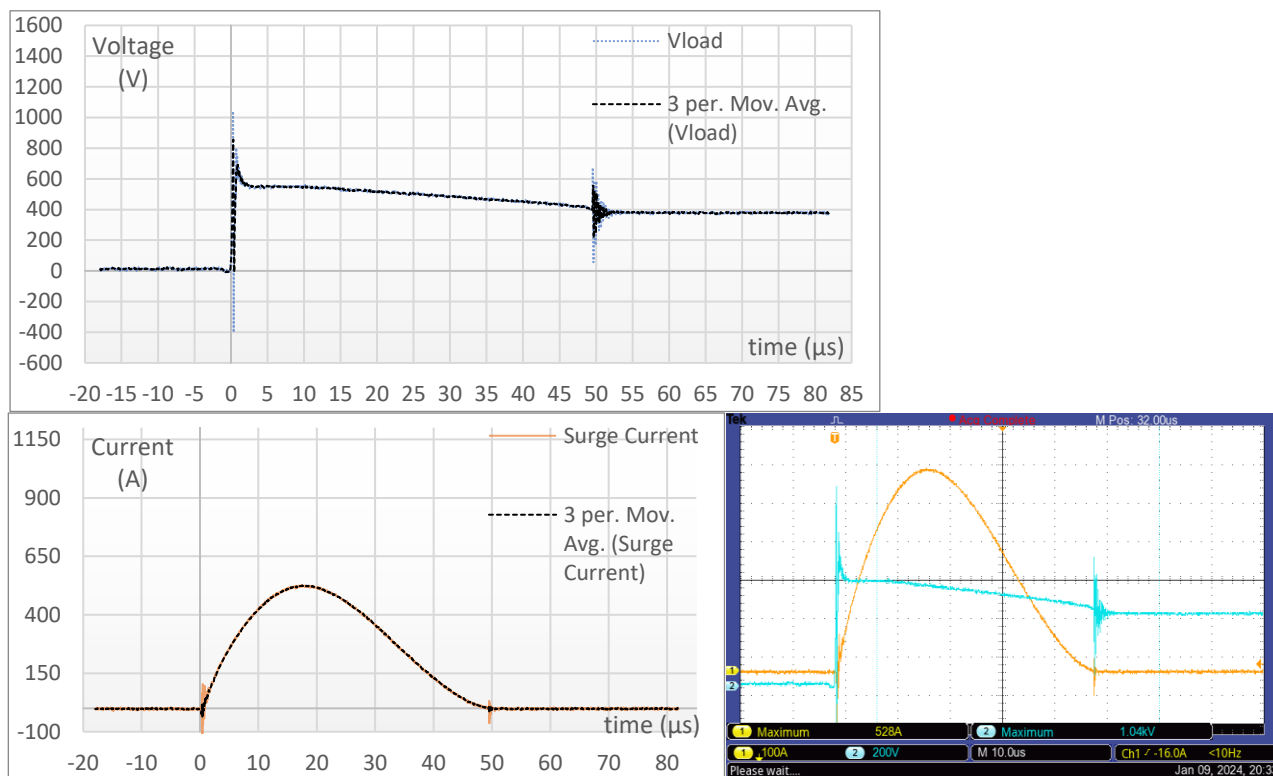
Σχήμα 7.13: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



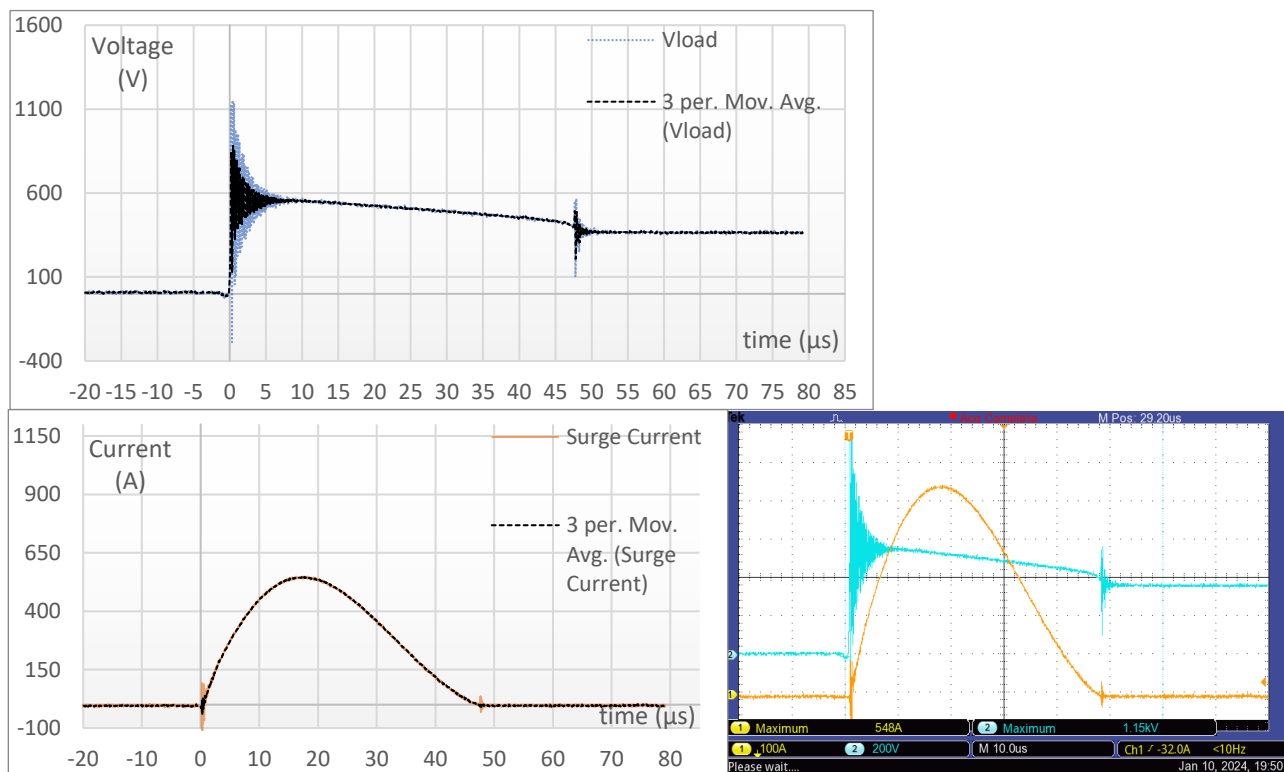
Σχήμα 7.14: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



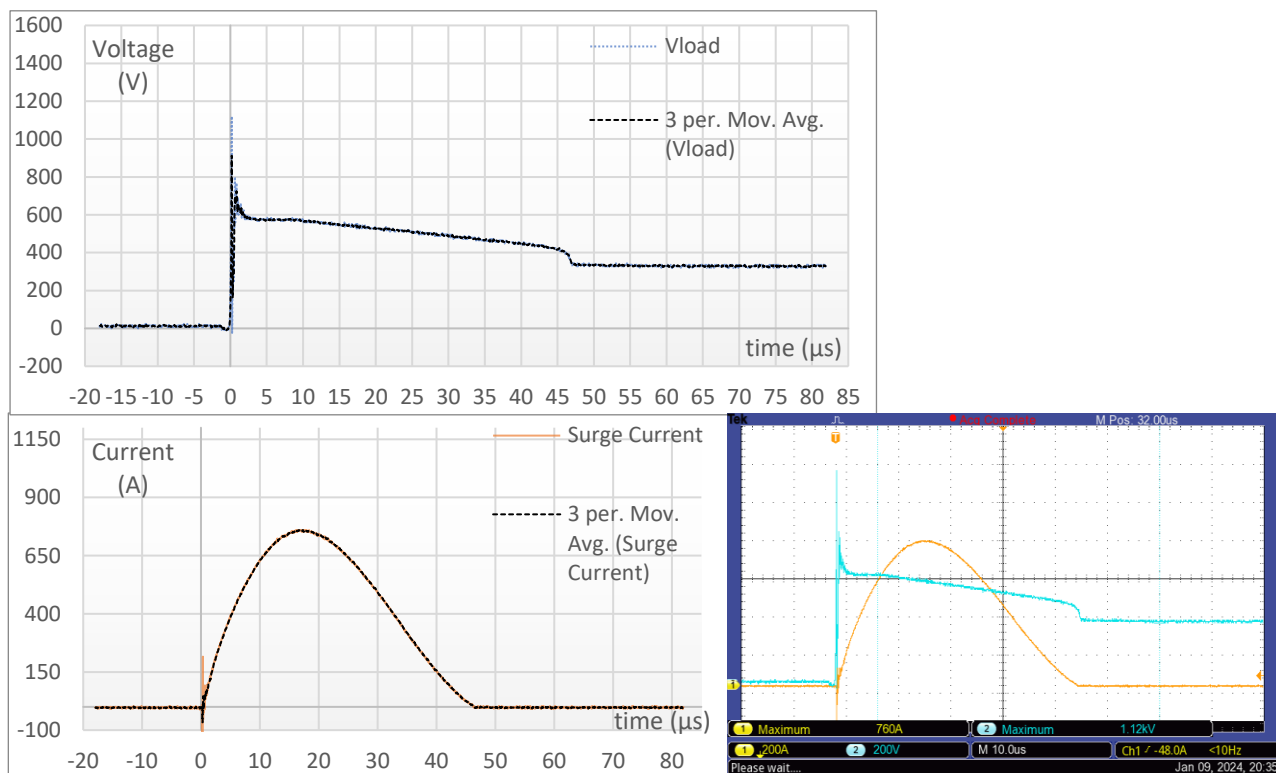
Σχήμα 7.15: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



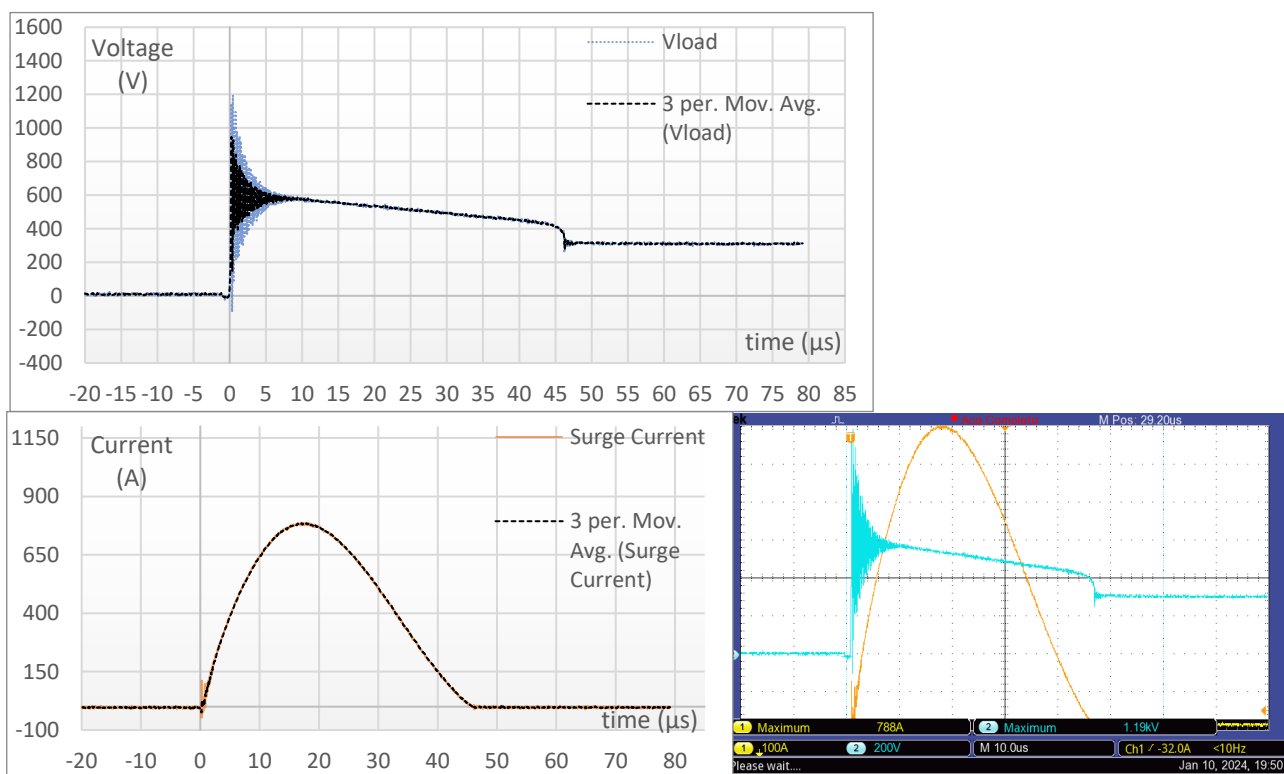
Σχήμα 7.16: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



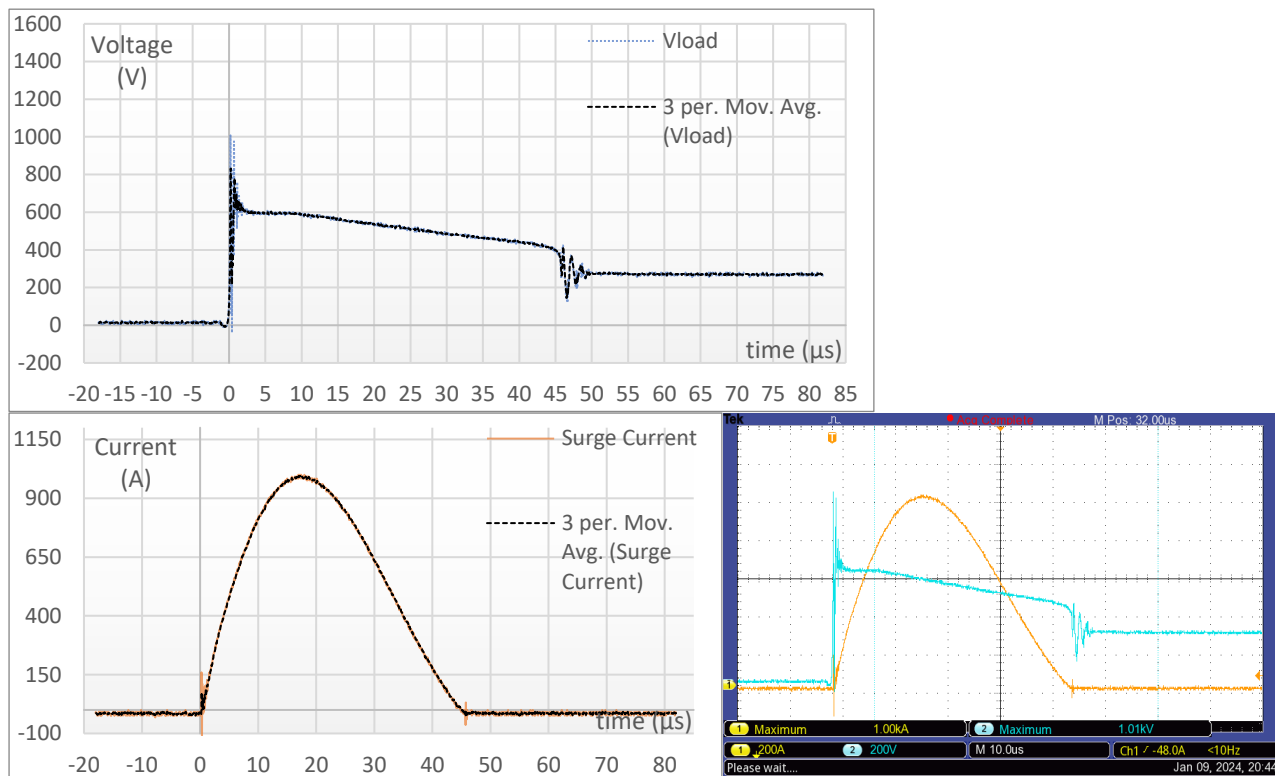
Σχήμα 7.17: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



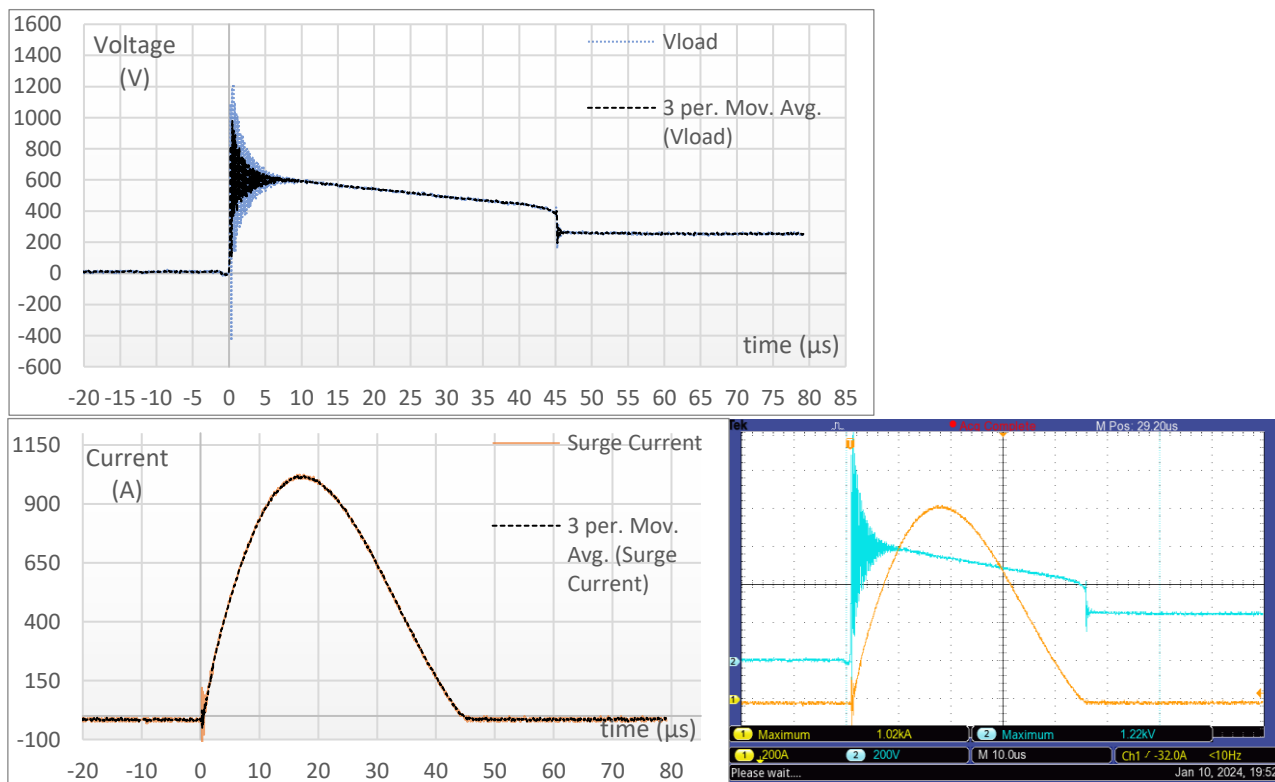
Σχήμα 7.18: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



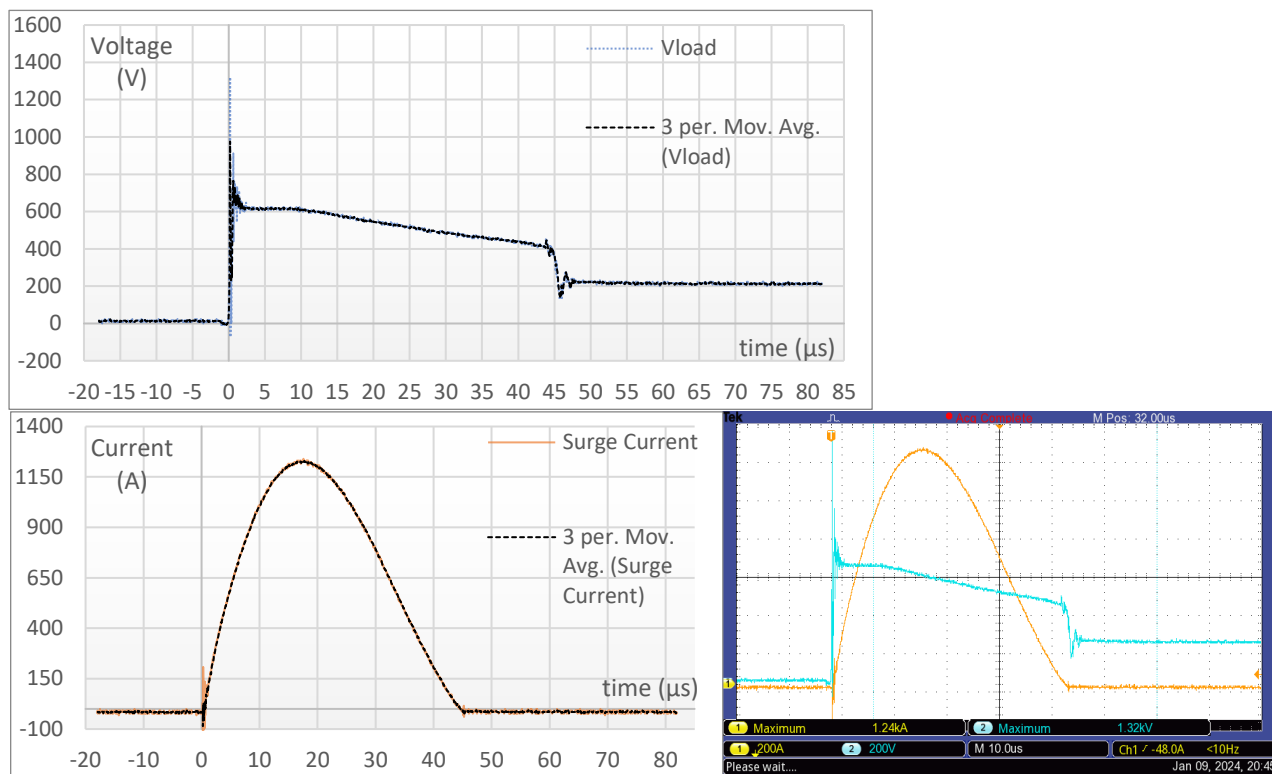
Σχήμα 7.19: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



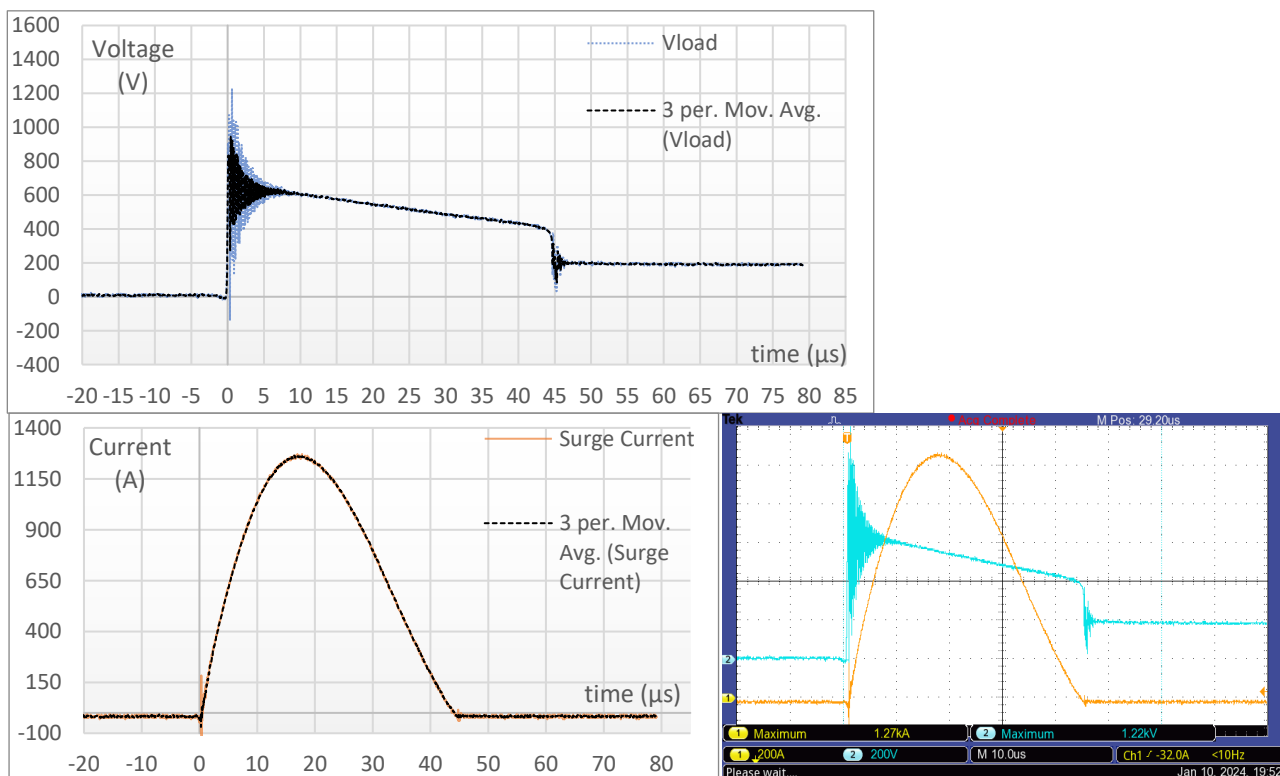
Σχήμα 7.20: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



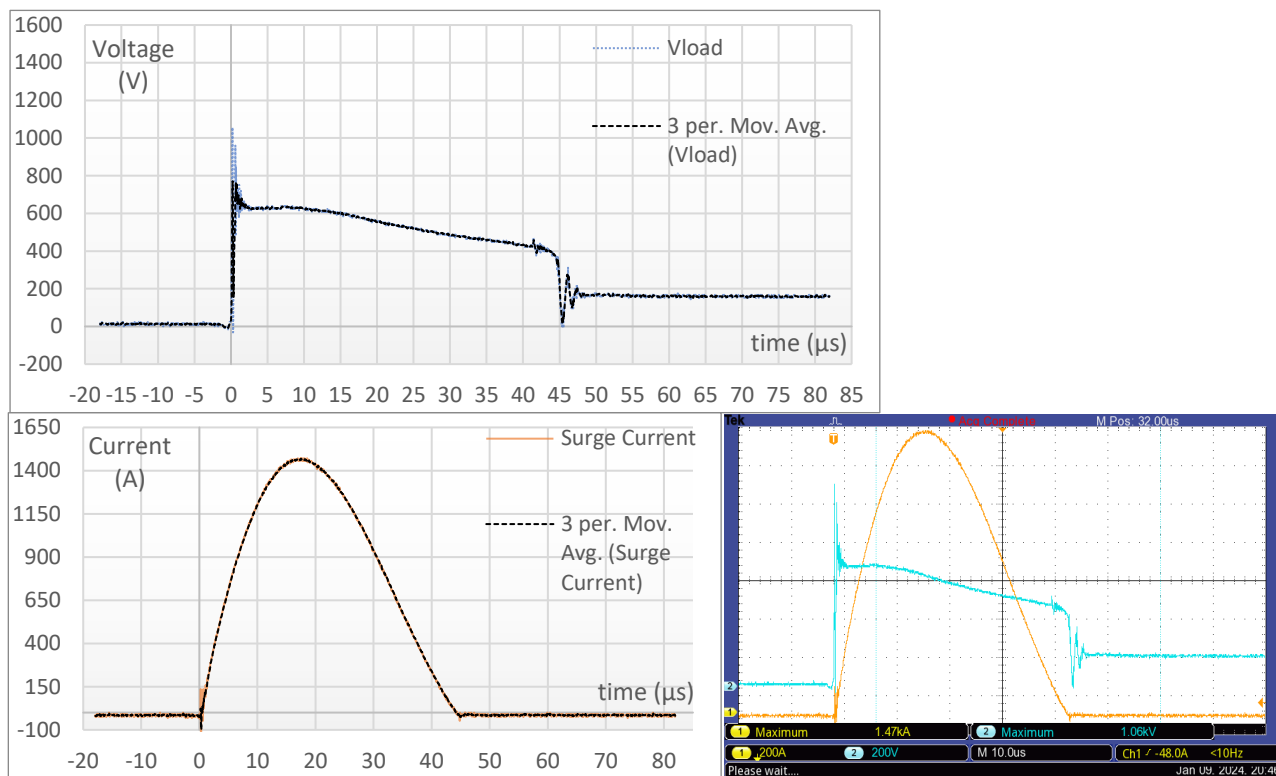
Σχήμα 7.21: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



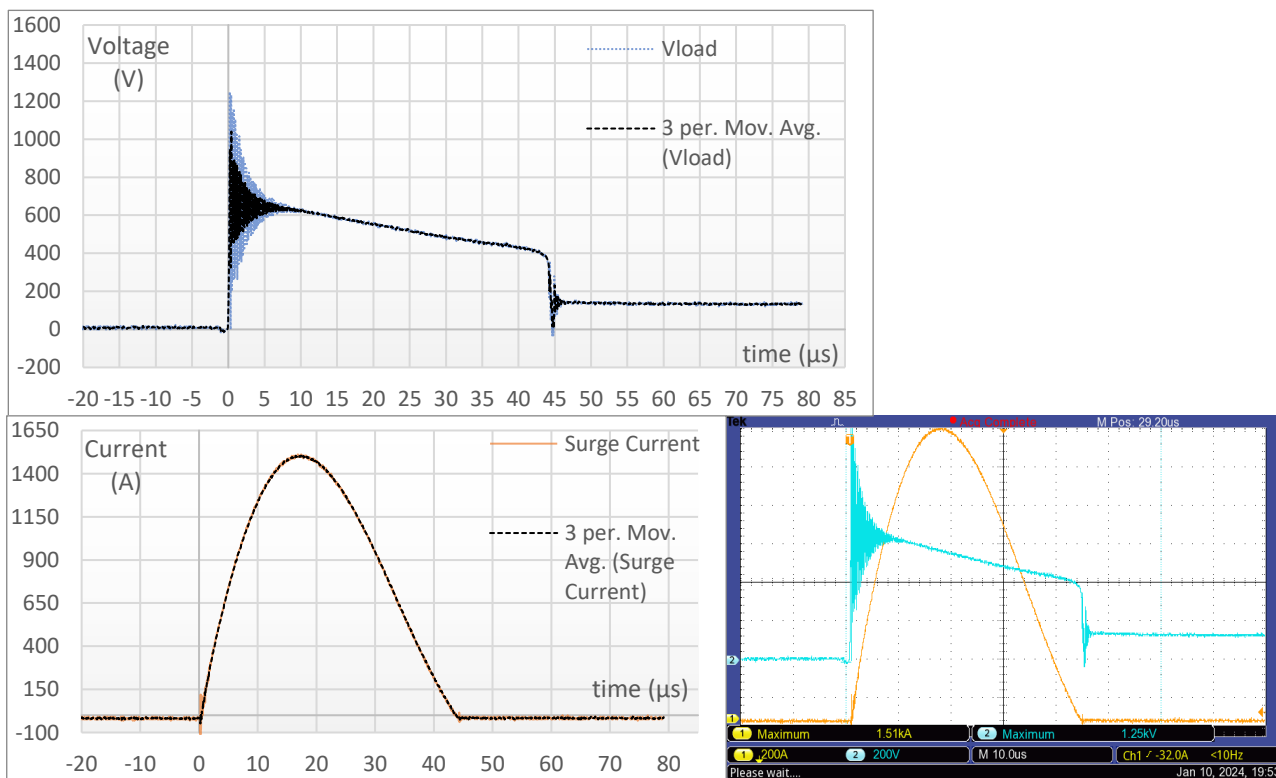
Σχήμα 7.22: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



Σχήμα 7.23: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



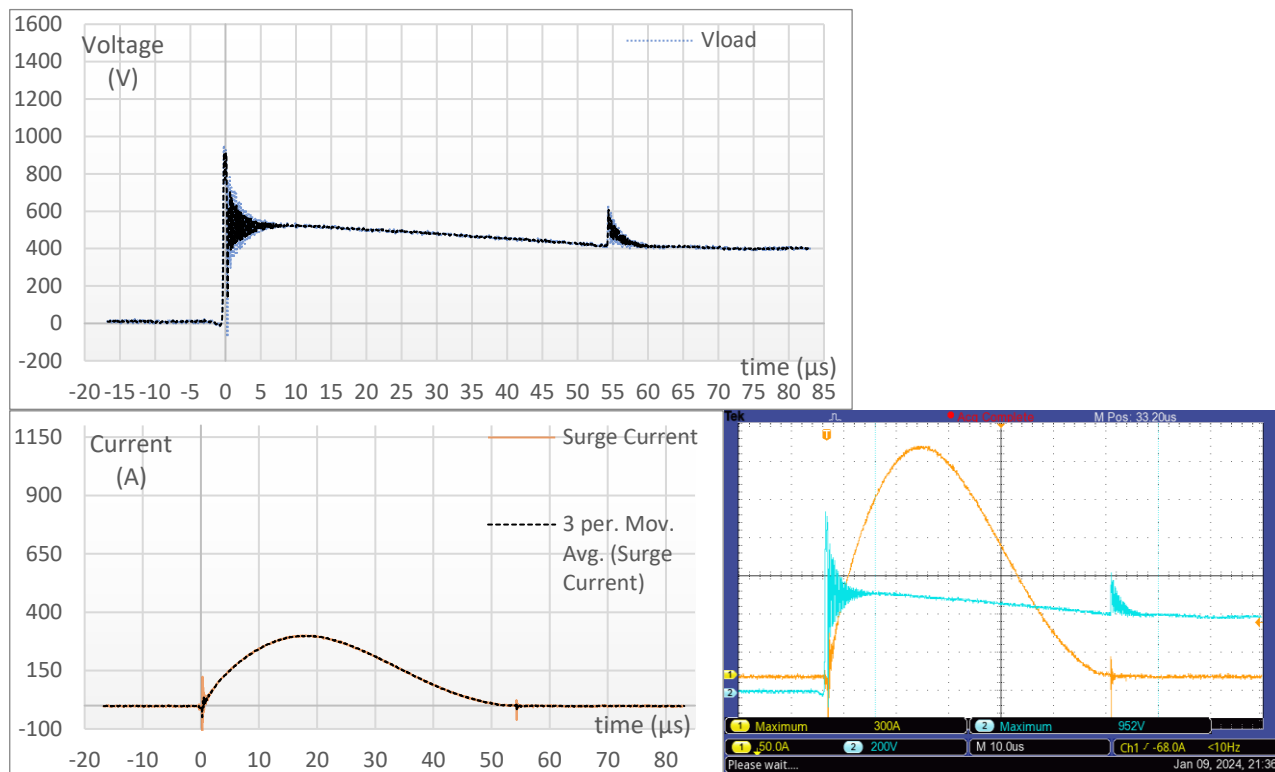
Σχήμα 7.24: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



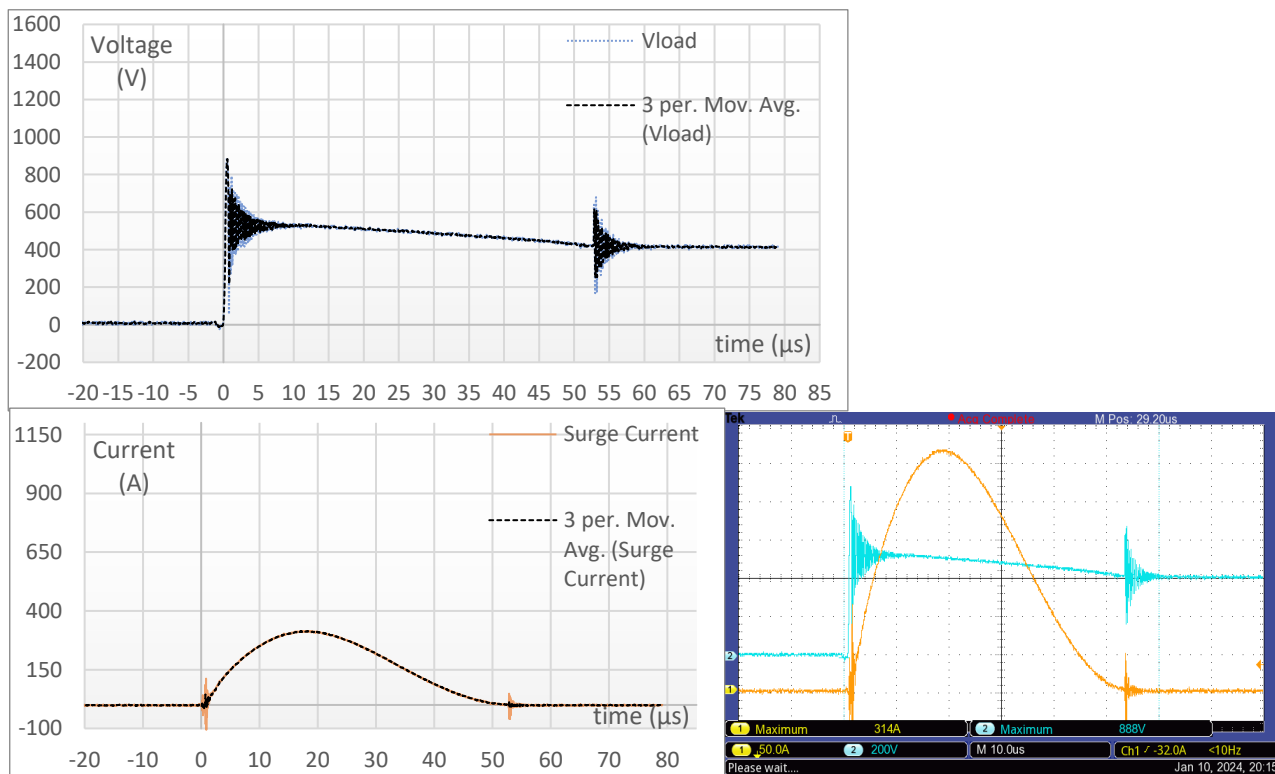
## Παρατηρήσεις

1. Αρχικά, παρατηρούμε πως με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης στα 6.5m, οι κυματομορφές της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο με τις δύο διαφορετικές διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι αρκετά διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο όδευσης που λαμβάνει χώρα, όπως περιεγράφηκε στο θεωρητικό κομμάτι της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Παρατηρούμε, δηλαδή, μια ισχυρή ταλάντωση της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο, που διαρκεί έως τα πρώτα 7-8  $\mu\text{s}$  της κρούσης και λαμβάνει μέγιστη τιμή έως 1kV στην περίπτωση διάταξης προστασίας με SPD τύπου T1 μόνο. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] 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». Είναι αντιληπτό ότι οι ταλαντώσεις που βλέπουμε δεν οφείλονται στον θόρυβο που εντάσσει η χαρακτηριστική του εγχυόμενου κρουστικού ρεύματος και τα καλώδια σύνδεσης των SPD των πρώτων 1.5 – 2  $\mu\text{s}$ , αλλά λόγω της διάδοσης της υπέρτασης.
2. Η παραμένουσα τάση μετά το πρωταρχικό spike που εμφανίζει η τάση, παρατηρούμε, λαμβάνει τιμές γύρω από τα 600V στην περίπτωση προστασίας με T1+T2. Όταν χρησιμοποιείται μόνο T1 η ταλάντωση που λαμβάνει χώρα γίνεται γύρω από το ίδιο επίπεδο τάσης. Και στις δύο περιπτώσεις προστασίας αυτό το επίπεδο τάσης αυξάνεται με την αύξηση του εγγεόμενου ρεύματος.
3. Παρατηρούμε ότι το εγγεόμενο ρεύμα παρουσιάζει μία ταλάντωση στην αρχή της κρούσης και ορισμένες φορές παρουσιάζει μία λιγότερο ισχυρή ταλάντωση στη σβέση της κρούσης. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην φόρτιση και εκφόρτιση των παράσιτων χωρητικοτήτων και αυτεπαγωγών της πειραματικής διάταξης κατά την μεταβατική κατάσταση της έγχυσης, όπου και οι πυκνωτές της γεννήτριας δεν εκφορτίζουν συγχρονισμένα.
4. Παράλληλα παρατηρούμε μία μεγάλη, απότομη αιχμή της κυματομορφής της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο στην αρχή της κρούσης. Αυτό οφείλεται στον χρόνο απόκρισης του σωλήνα εκκένωσης αερίου (GDT) των απαγωγών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται. Το “spike” αυτό συμβαίνει στα πρώτα 25-100ns και σηματοδοτεί την ενεργοποίησή του σωλήνα εκκένωσης αερίου του SPD και στην συνέχεια, με την ενεργοποίηση του βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων που συνδέεται σε σειρά.
5. Τέλος, στην αρχή της κρούσης (το πρώτο 1.5 $\mu\text{s}$ ) όπου το  $di/dt$  είναι μεγάλο και το ρεύμα εμφανίζει ορισμένες ταλαντώσεις λόγω των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, η τάση στα άκρα του πρώτου SPD T1 εμφανίζει μία ταλάντωση που ίσως οφείλεται στην αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσής του (μικρότερα από 0.5m). Αυτός ο θόρυβος μεταφέρεται και στη τάση στο υπό μελέτη φορτίο στο πρώτο 1.5 $\mu\text{s}$ .

Σχήμα 7.25: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.

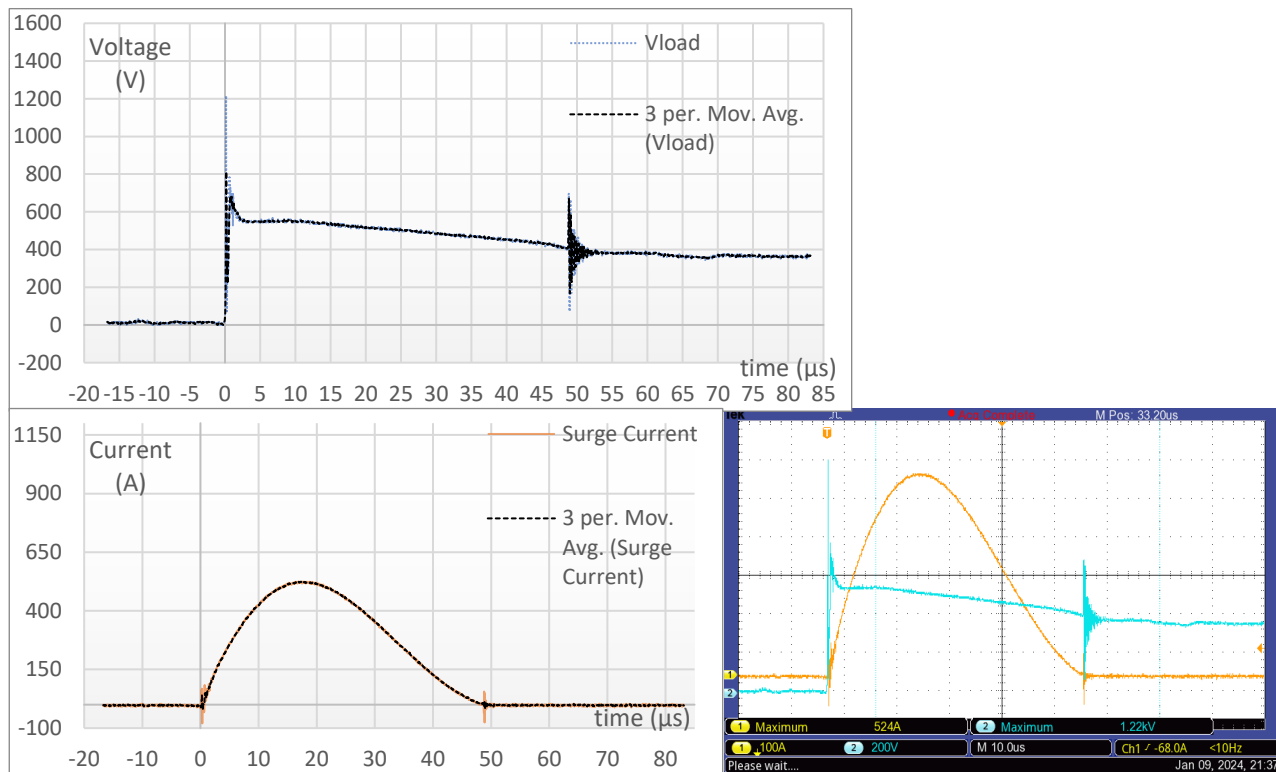


Σχήμα 7.26: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.

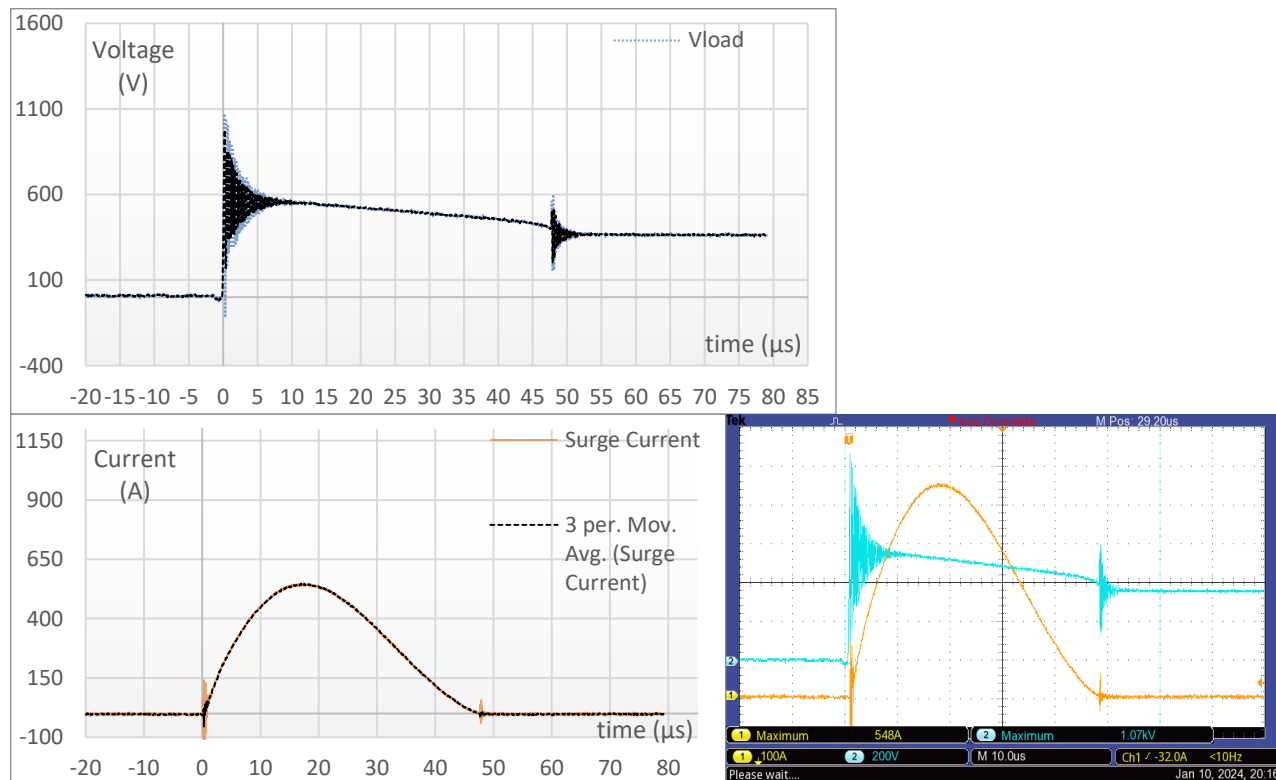




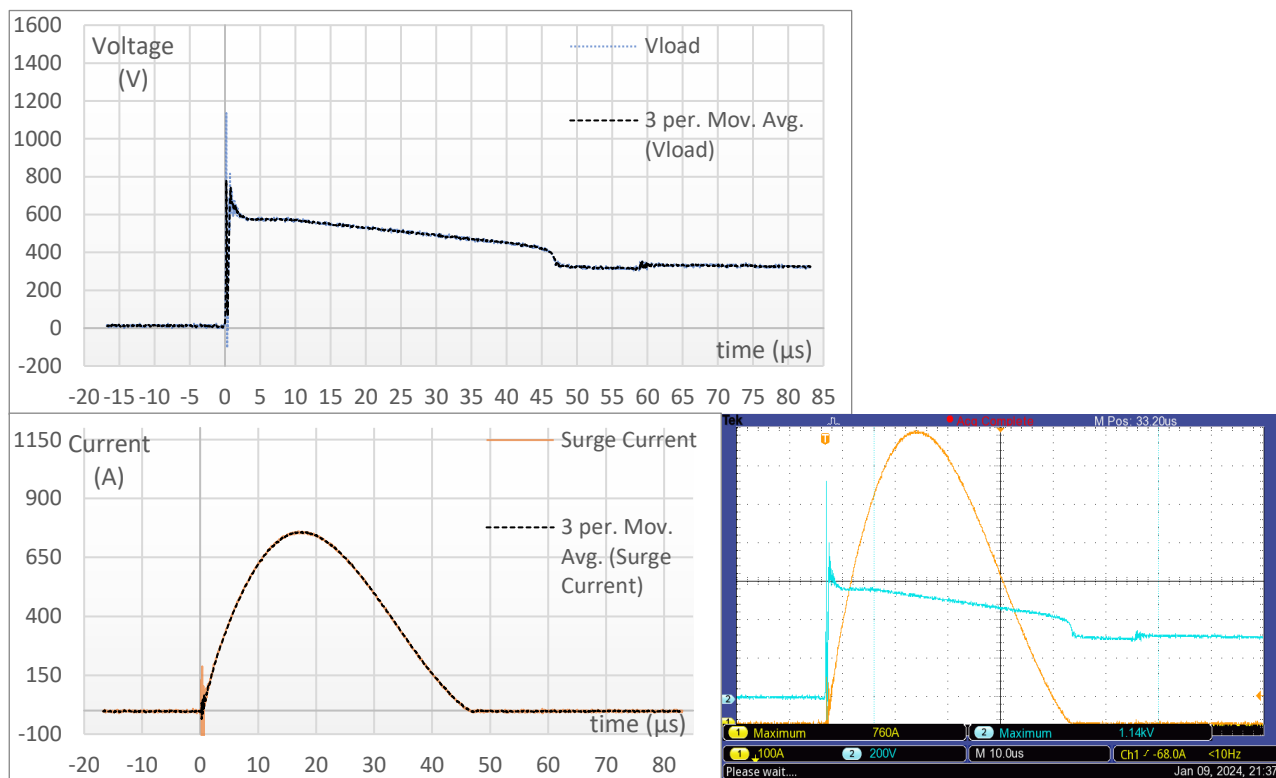
Σχήμα 7.27: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



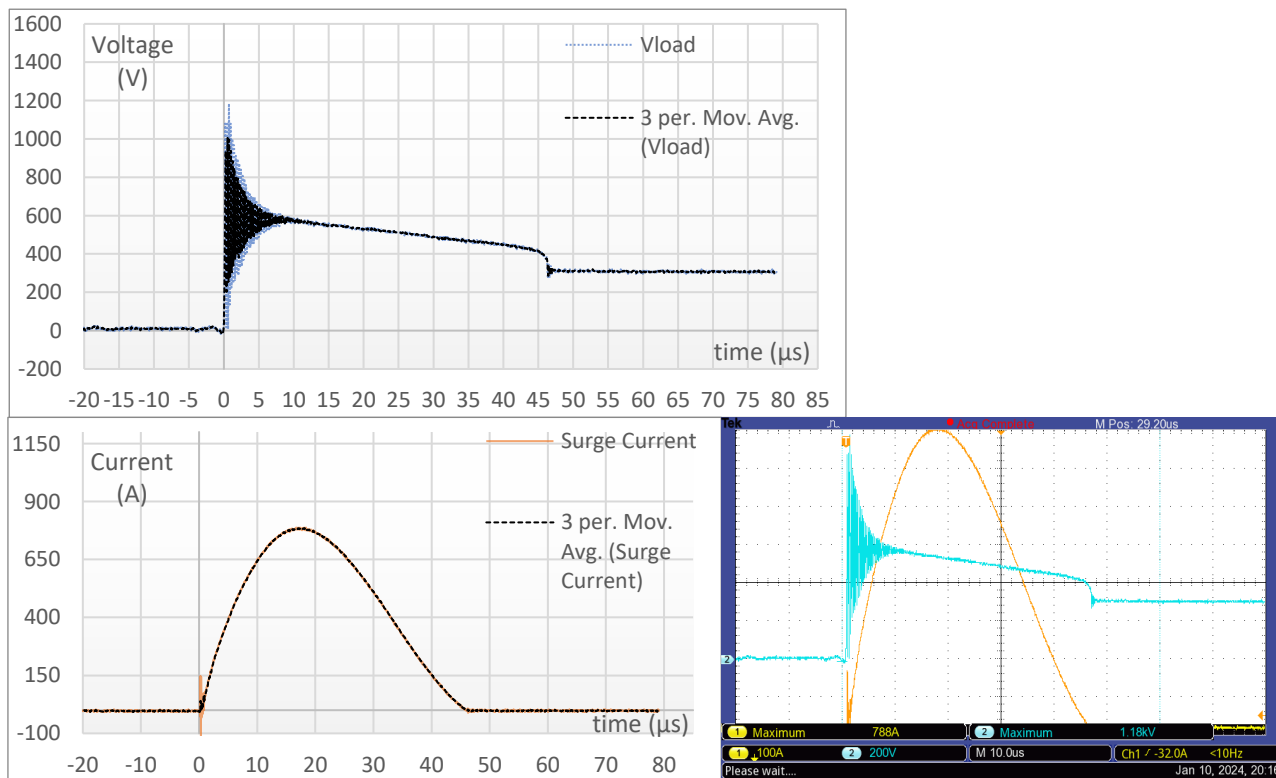
Σχήμα 7.28: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



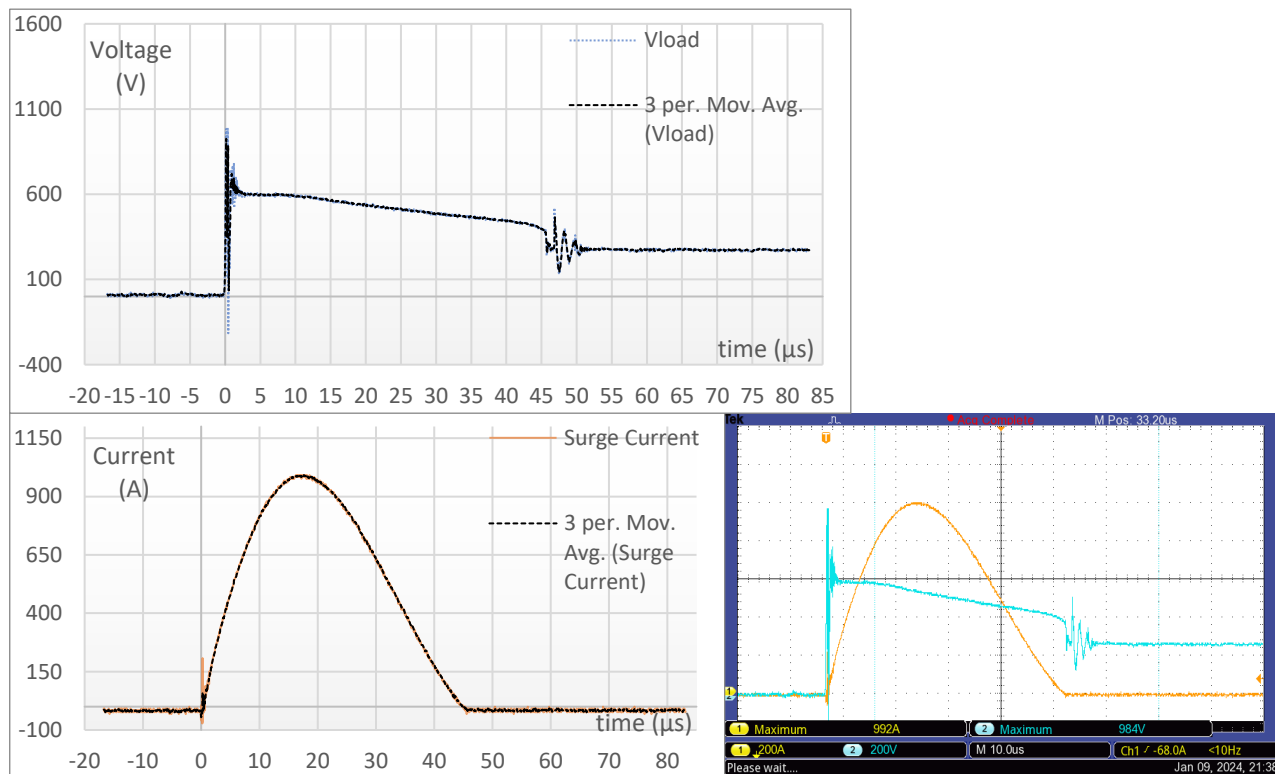
Σχήμα 7.29: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



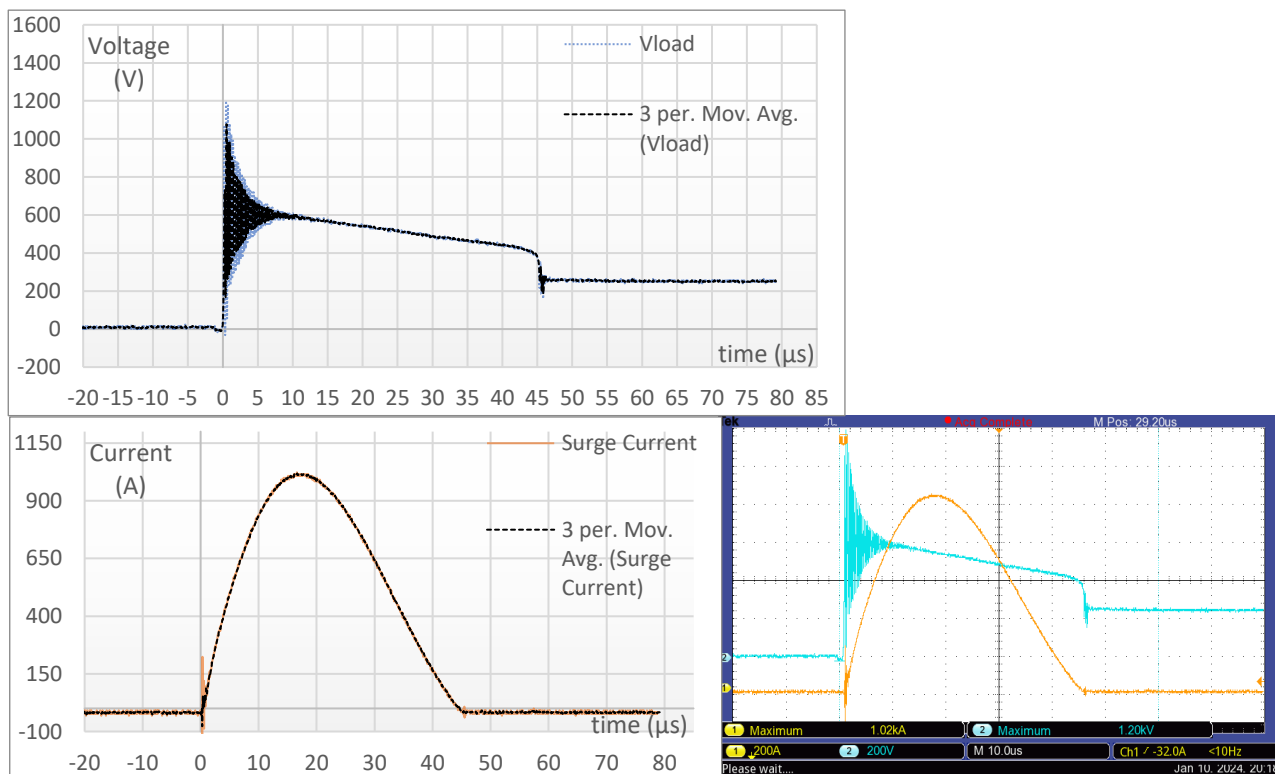
Σχήμα 7.30: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



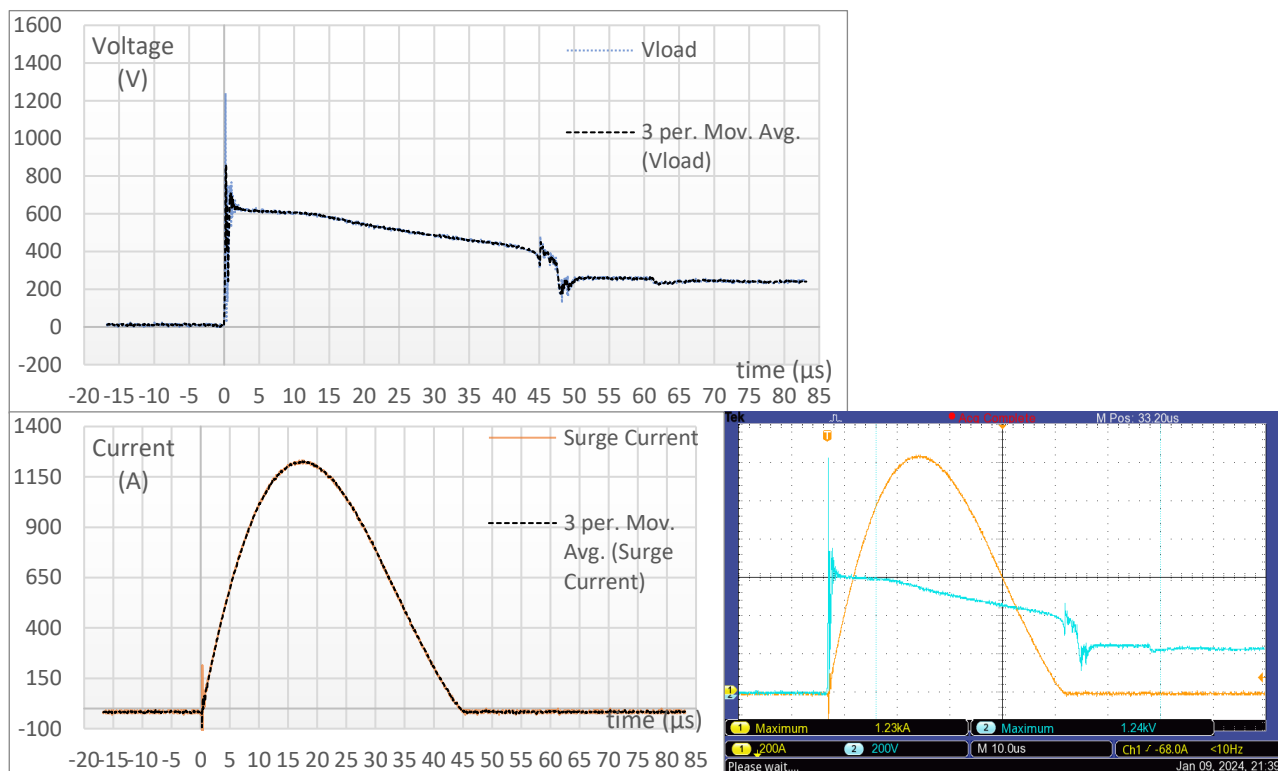
Σχήμα 7.31: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



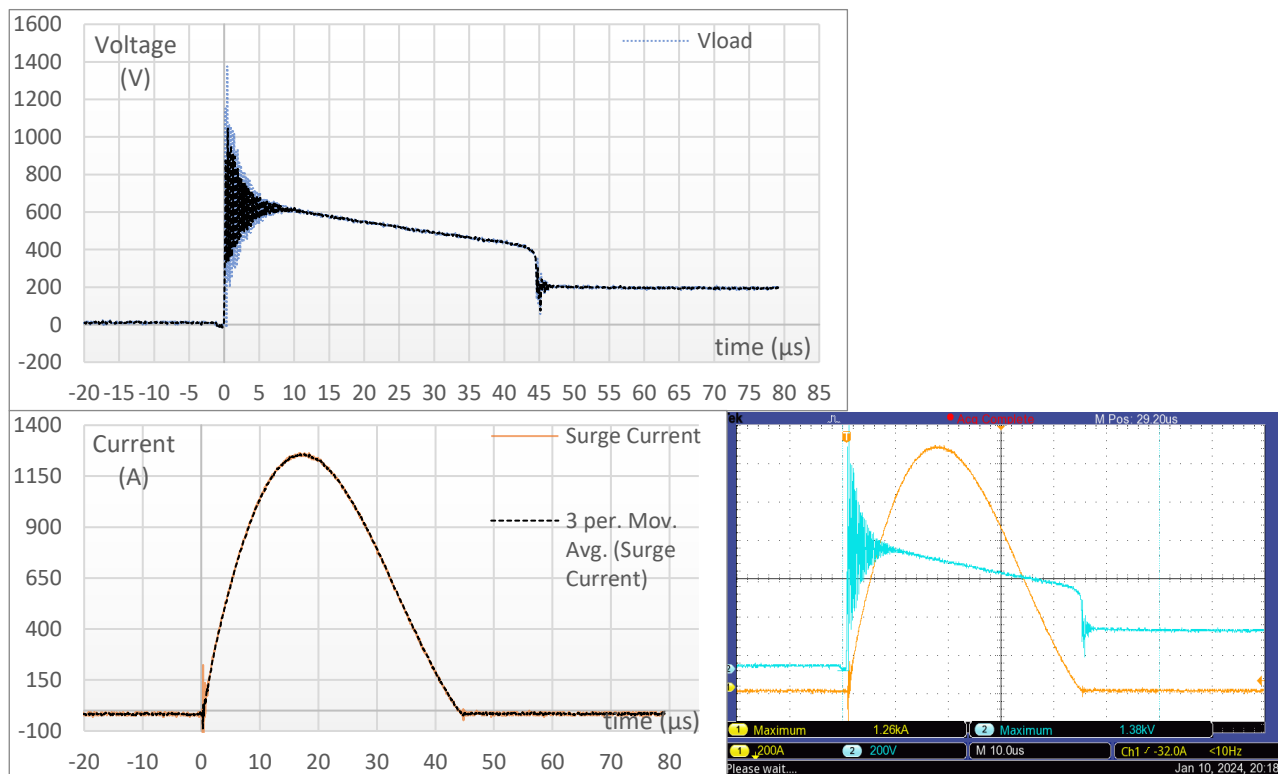
Σχήμα 7.32: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



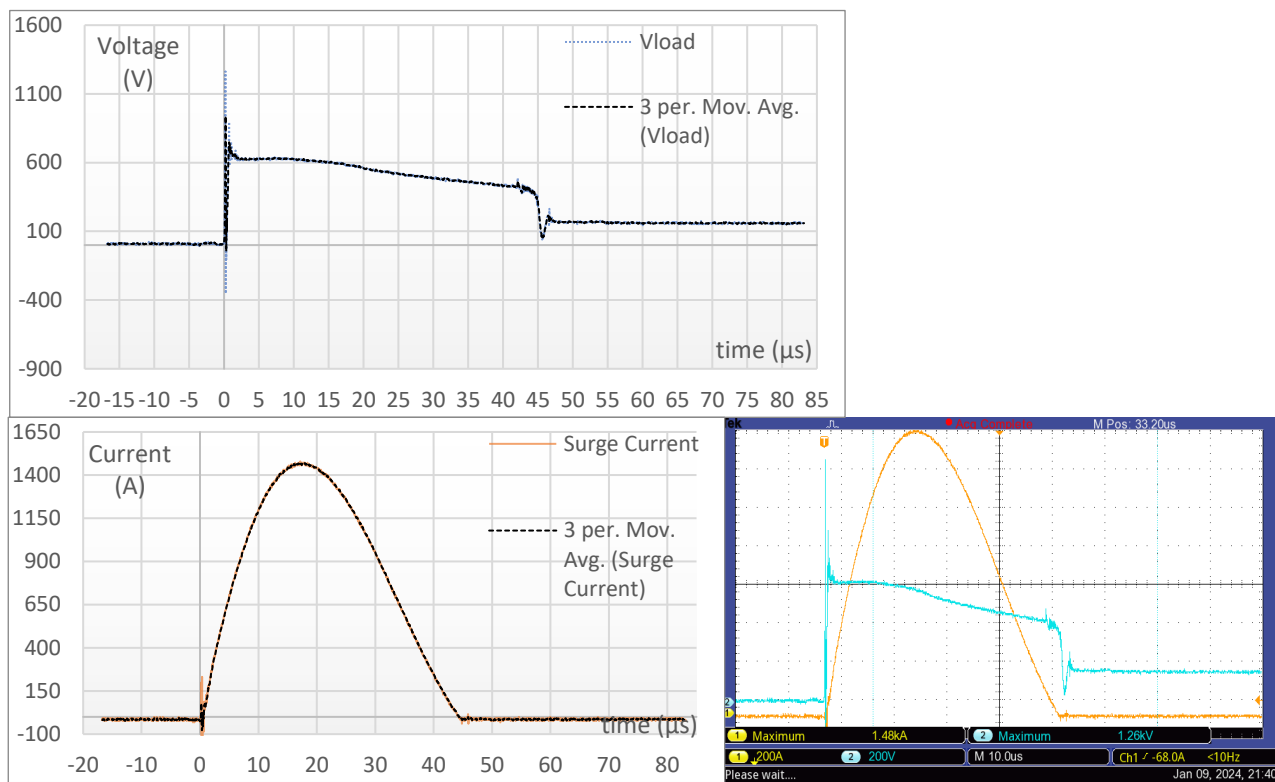
Σχήμα 7.33: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



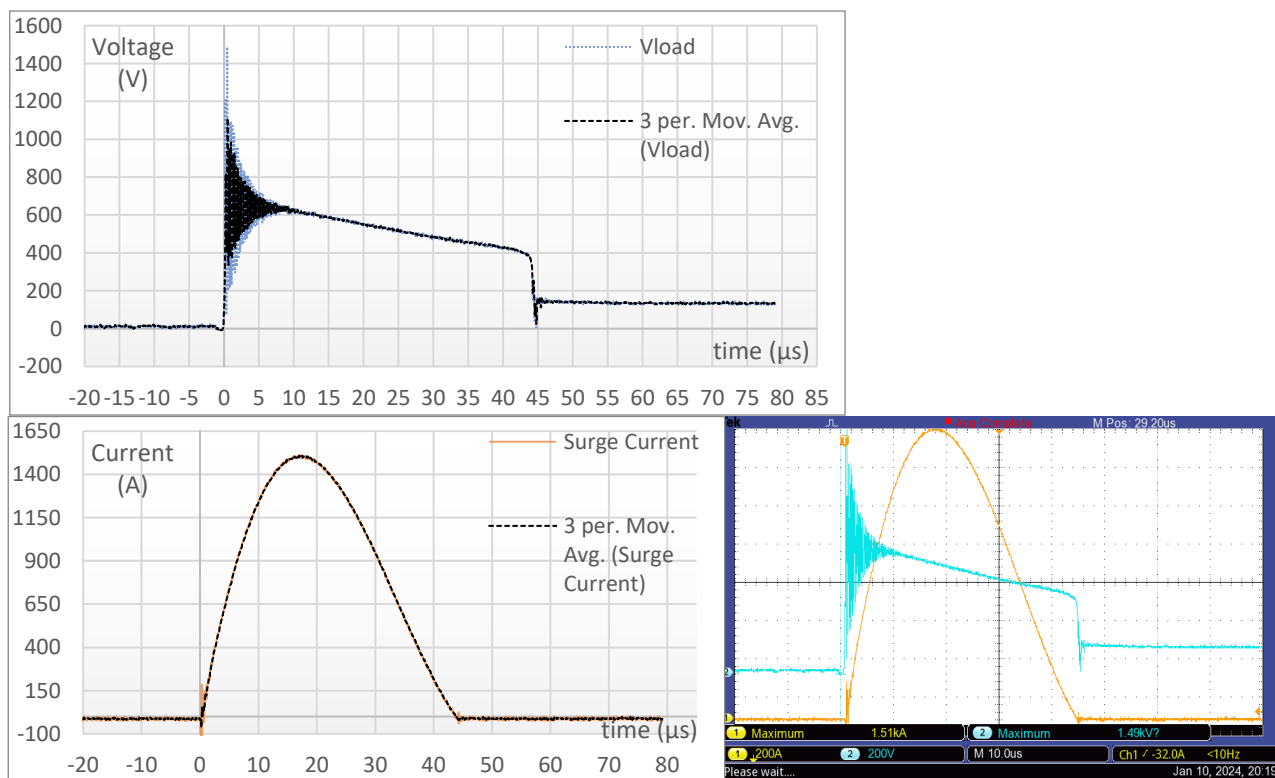
Σχήμα 7.34: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



Σχήμα 7.35: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



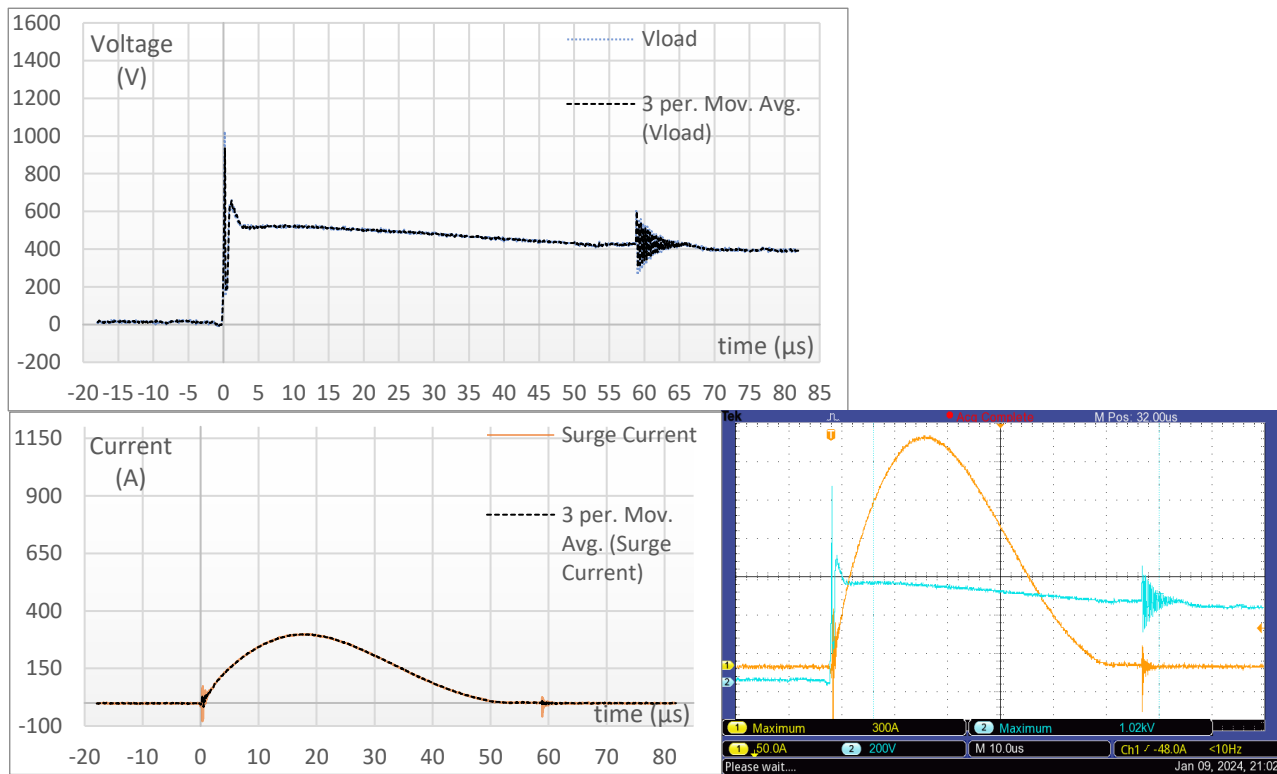
Σχήμα 7.36: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



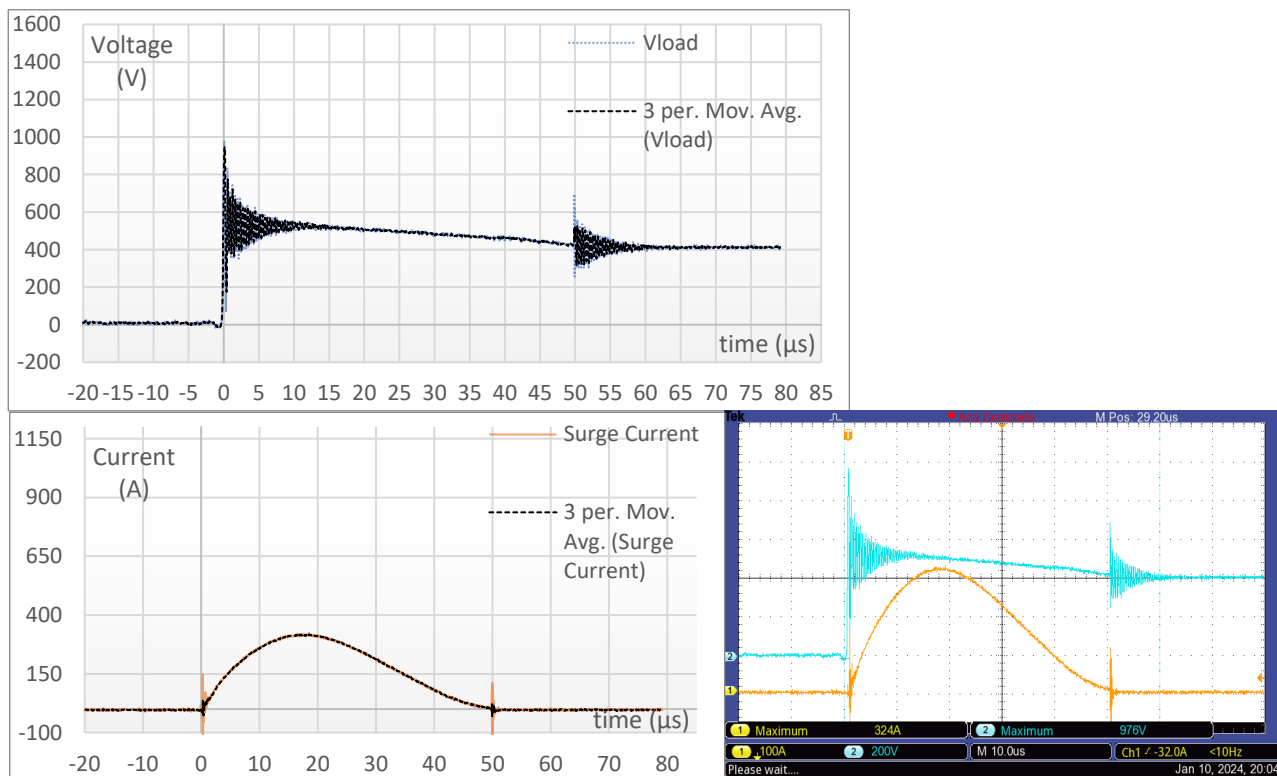
## Παρατηρήσεις

1. Αρχικά, παρατηρούμε πως με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης στα 7m, οι κυματομορφές της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο με τις δύο διαφορετικές διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι αρκετά διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο όδευσης που λαμβάνει χώρα, όπως περιεγράφηκε στο θεωρητικό κομμάτι της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Παρατηρούμε, δηλαδή, μια ισχυρή ταλάντωση της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο, που διαρκεί έως τα πρώτα 7-8 μs της κρούσης και λαμβάνει μέγιστη τιμή έως 1kV στην περίπτωση διάταξης προστασίας με SPD τύπου T1 μόνο. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] 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». Είναι αντιληπτό ότι οι ταλαντώσεις που βλέπουμε δεν οφείλονται στον θόρυβο που εντάσσει η χαρακτηριστική του εγχυόμενου κρουστικού ρεύματος και τα καλώδια σύνδεσης των SPD των πρώτων 1.5 – 2 μs, αλλά λόγω της διάδοσης της υπέρτασης.
2. Η παραμένουσα τάση μετά το πρωταρχικό spike, παρατηρούμε, λαμβάνει τιμές γύρω από τα 600V στην περίπτωση προστασίας με T1+T2. Όταν χρησιμοποιείται μόνο T1 η ταλάντωση που λαμβάνει χώρα γίνεται γύρω από το ίδιο επίπεδο τάσης. Και στις δύο περιπτώσεις προστασίας αυτό το επίπεδο τάσης αυξάνεται με την αύξηση του εγχυόμενου ρεύματος.
3. Αξίζει να σημειώσουμε, επίσης, πως για έγχυση ρεύματος βραχυκύκλωσης 1.8kA, η μέτρηση με προστασία T1+T2, είναι παρόμοια εκείνης με προστασία μόνο με T1. Αυτό οφείλεται στην μη ενεργοποίηση του κατάντη απαγωγέα υπερτάσεων τύπου T2, λόγω του χαμηλού ρεύματος που εγχύθηκε.
4. Παρατηρούμε ότι το εγχυόμενο ρεύμα παρουσιάζει μία ταλάντωση στην αρχή της κρούσης και ορισμένες φορές παρουσιάζει μία λιγότερο ισχυρή ταλάντωση στη σβέση της κρούσης. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην φόρτιση και εκφόρτιση των παράσιτων χωρητικοτήτων και αυτεπαγωγών της πειραματικής διάταξης κατά την μεταβατική κατάσταση της έγχυσης, όπου και οι πυκνωτές της γεννήτριας δεν εκ φορτίζουν συγχρονισμένα.
5. Παράλληλα παρατηρούμε μία μεγάλη, απότομη αιχμή της κυματομορφής της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο στην αρχή της κρούσης. Αυτό οφείλεται στον χρόνο απόκρισης του σωλήνα εκκένωσης αερίου (GDT) των απαγωγών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται. Το “spike” αυτό συμβαίνει στα πρώτα 25-100ns και σηματοδοτεί την ενεργοποίηση του σωλήνα εκκένωσης αερίου του SPD και στην συνέχεια, με την ενεργοποίηση του βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων που συνδέεται σε σειρά.
6. Τέλος, στην αρχή της κρούσης (το πρώτο 1.5μs) όπου το  $di/dt$  είναι μεγάλο και το ρεύμα εμφανίζει ορισμένες ταλαντώσεις λόγω των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, η τάση στα άκρα του πρώτου SPD T1 εμφανίζει μία ταλάντωση που ίσως οφείλεται στην αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσής του (μικρότερα από 0.5m). Αυτός ο θόρυβος μεταφέρεται και στη τάση στο υπό μελέτη φορτίο στο πρώτο 1.5μs.

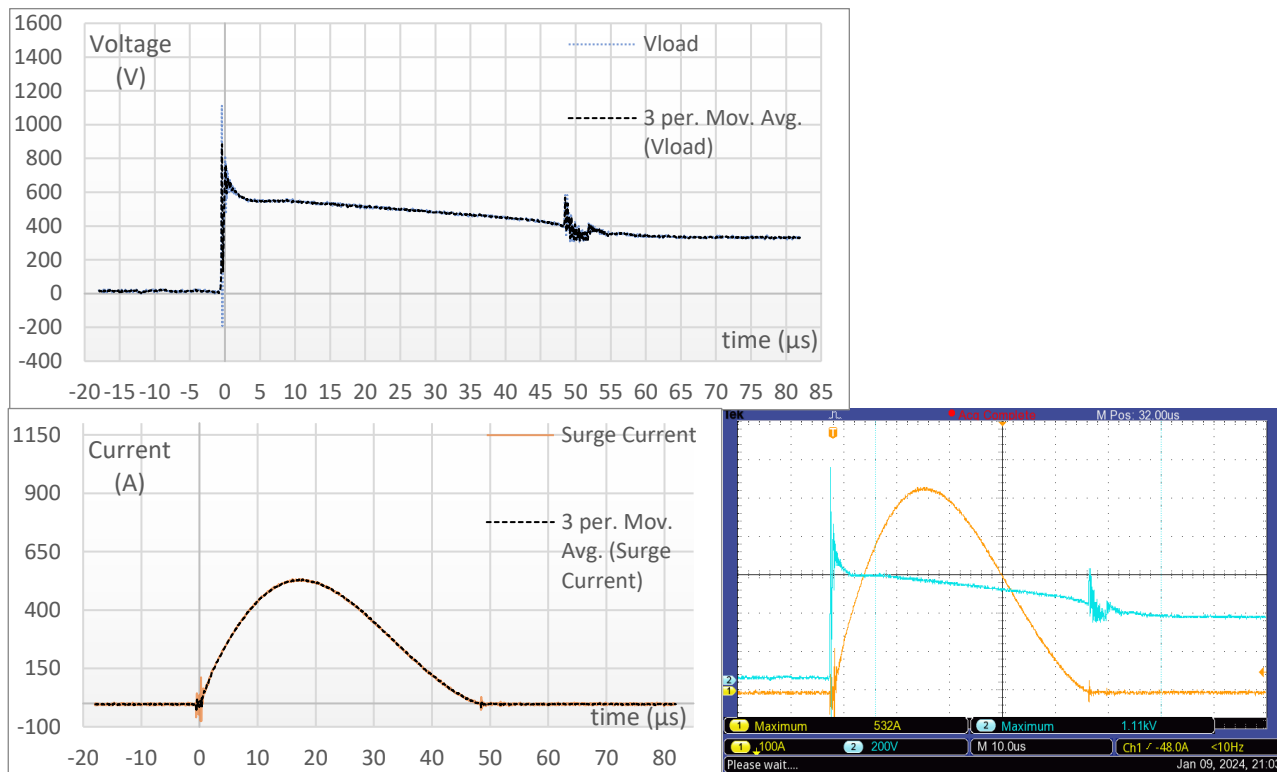
Σχήμα 7.37: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



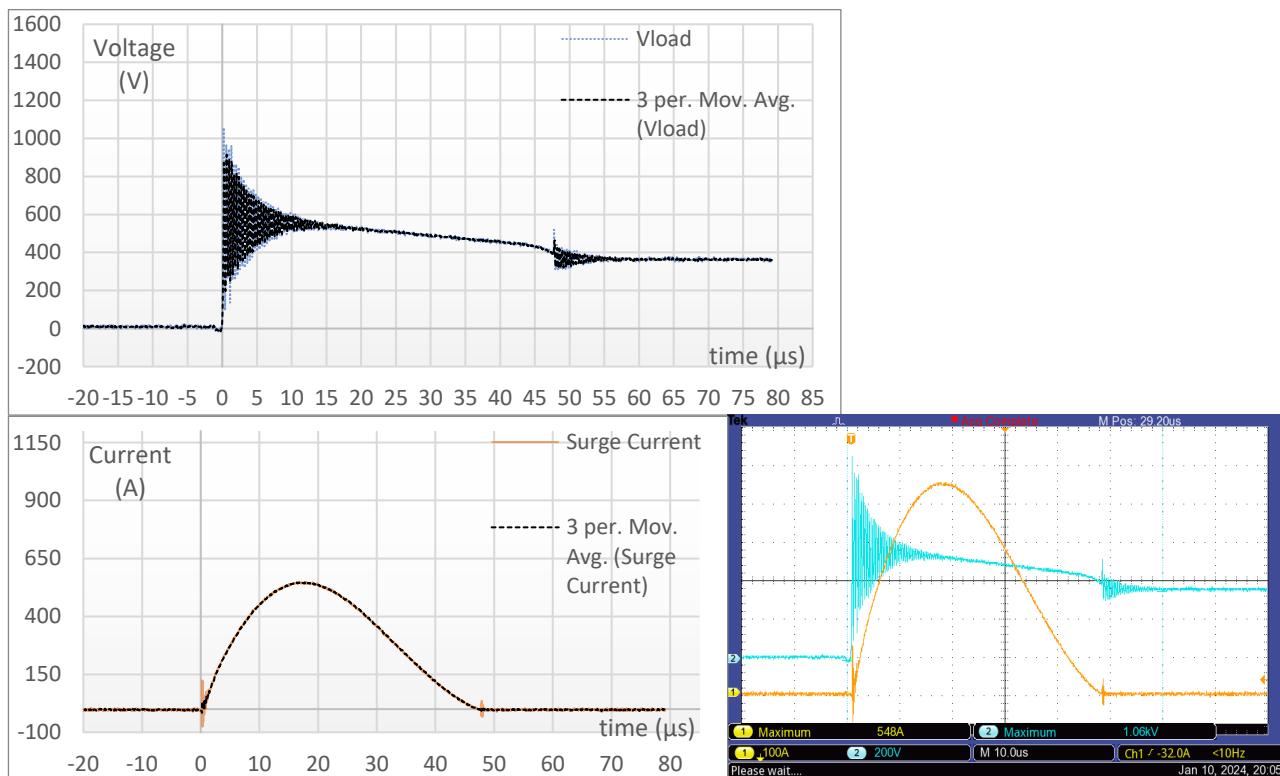
Σχήμα 7.38: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



Σχήμα 7.39: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.

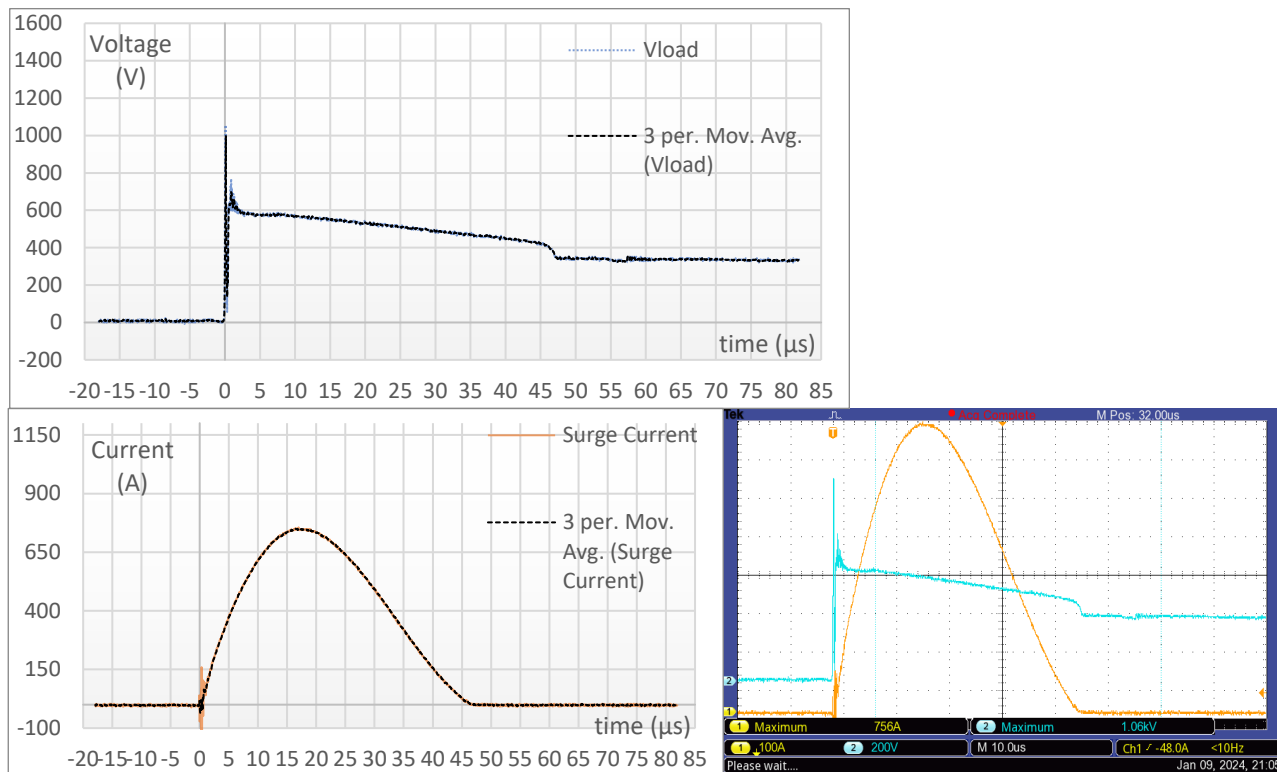


Σχήμα 7.40: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.

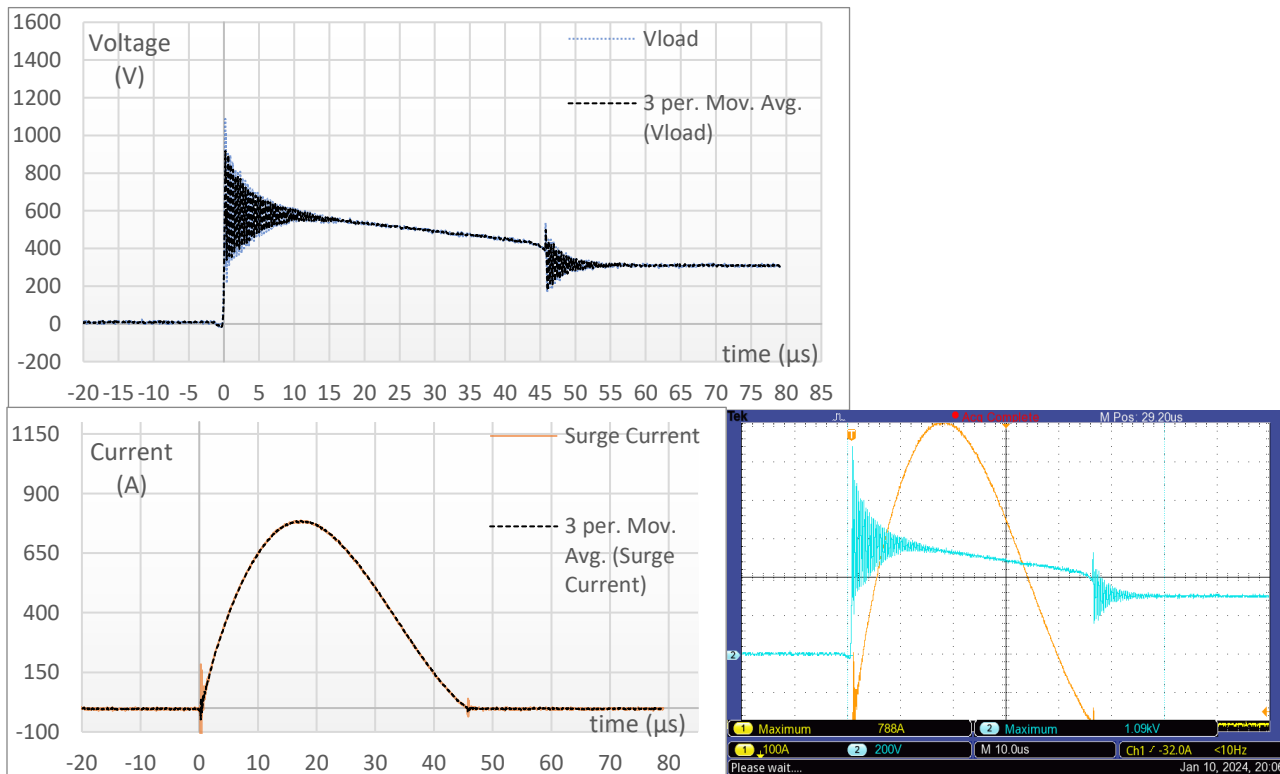




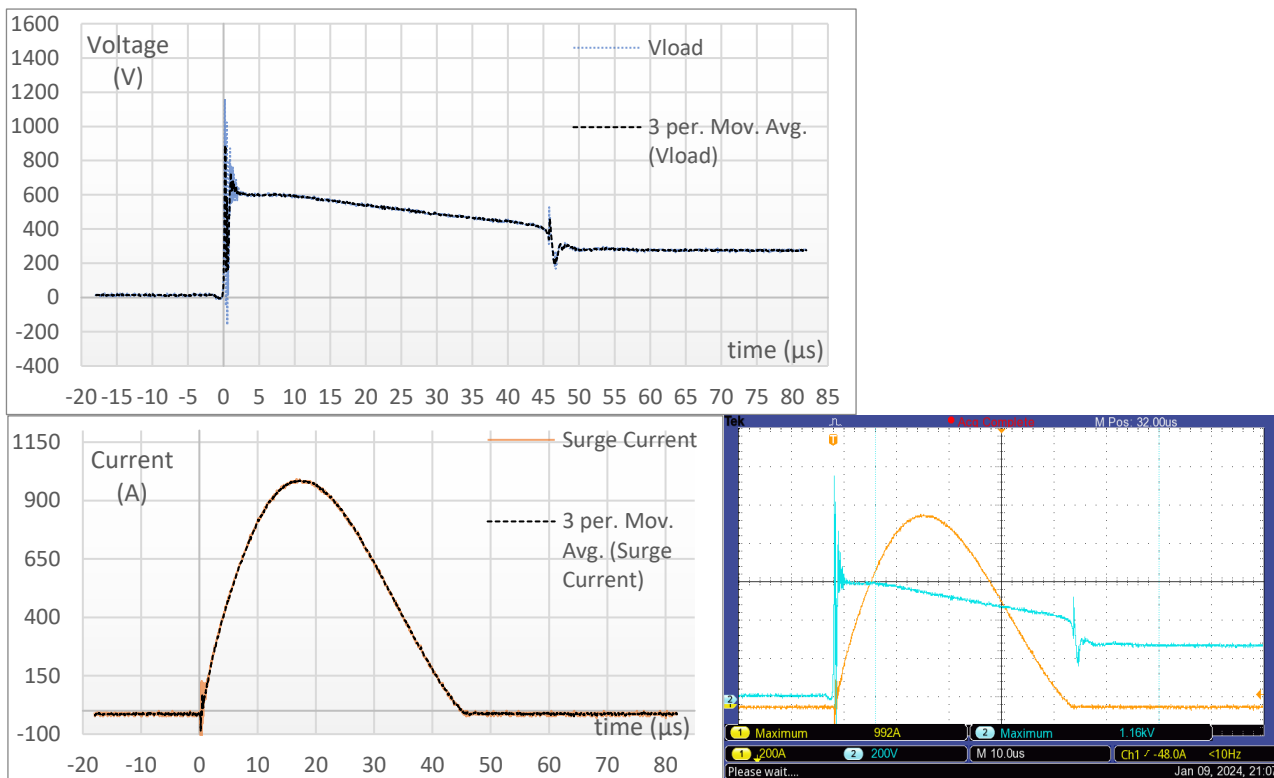
Σχήμα 7.41: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



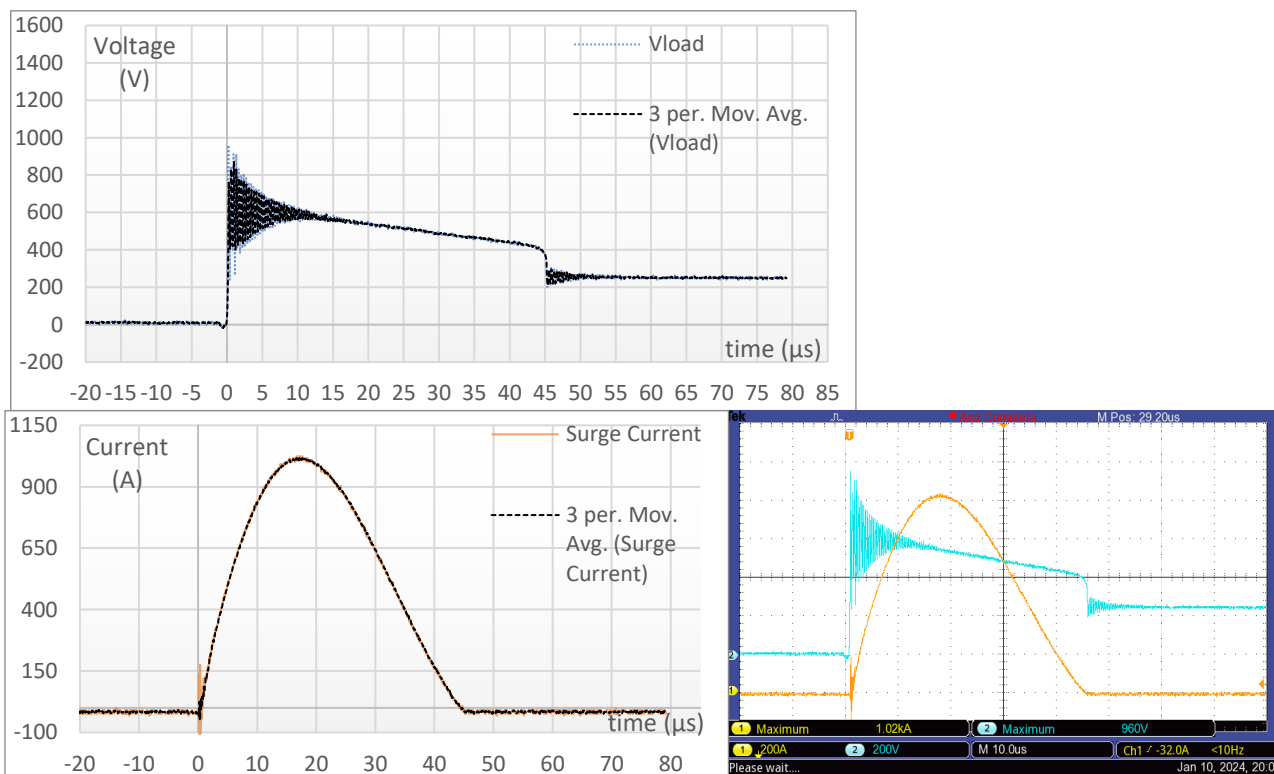
Σχήμα 7.42: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



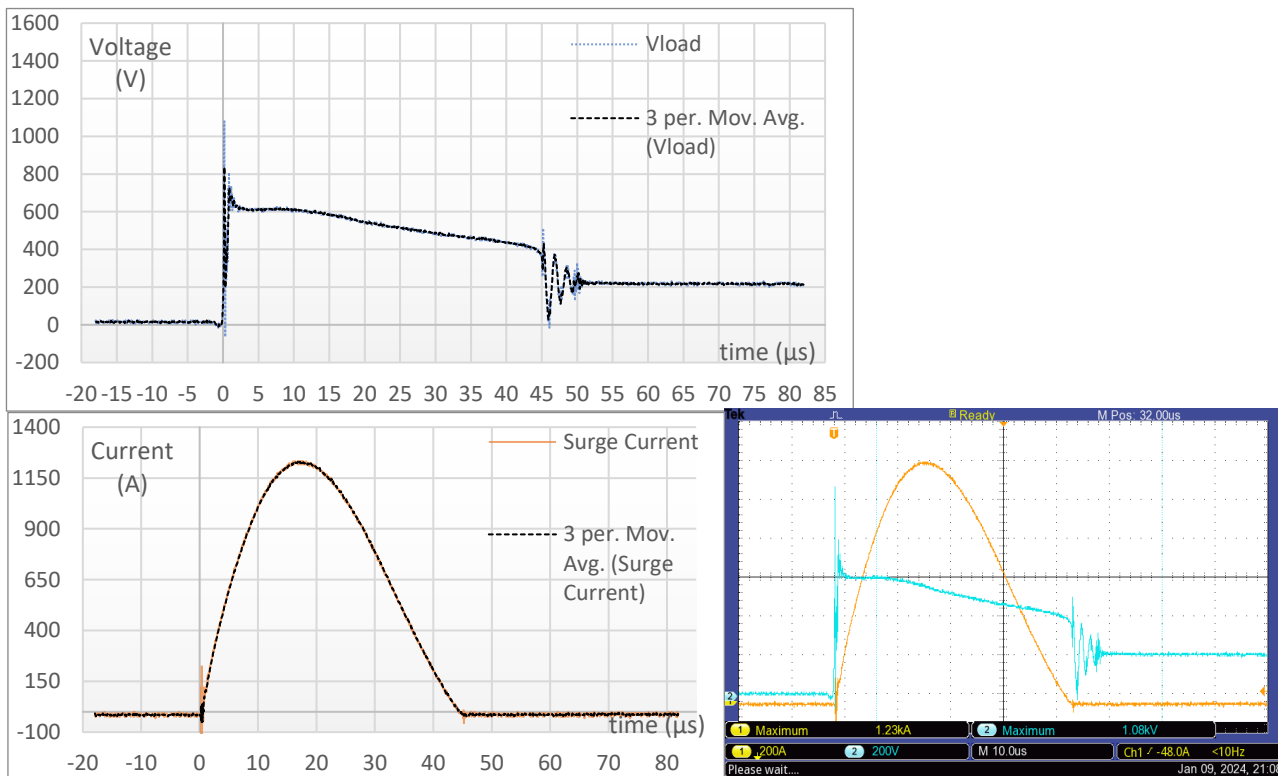
Σχήμα 7.43: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



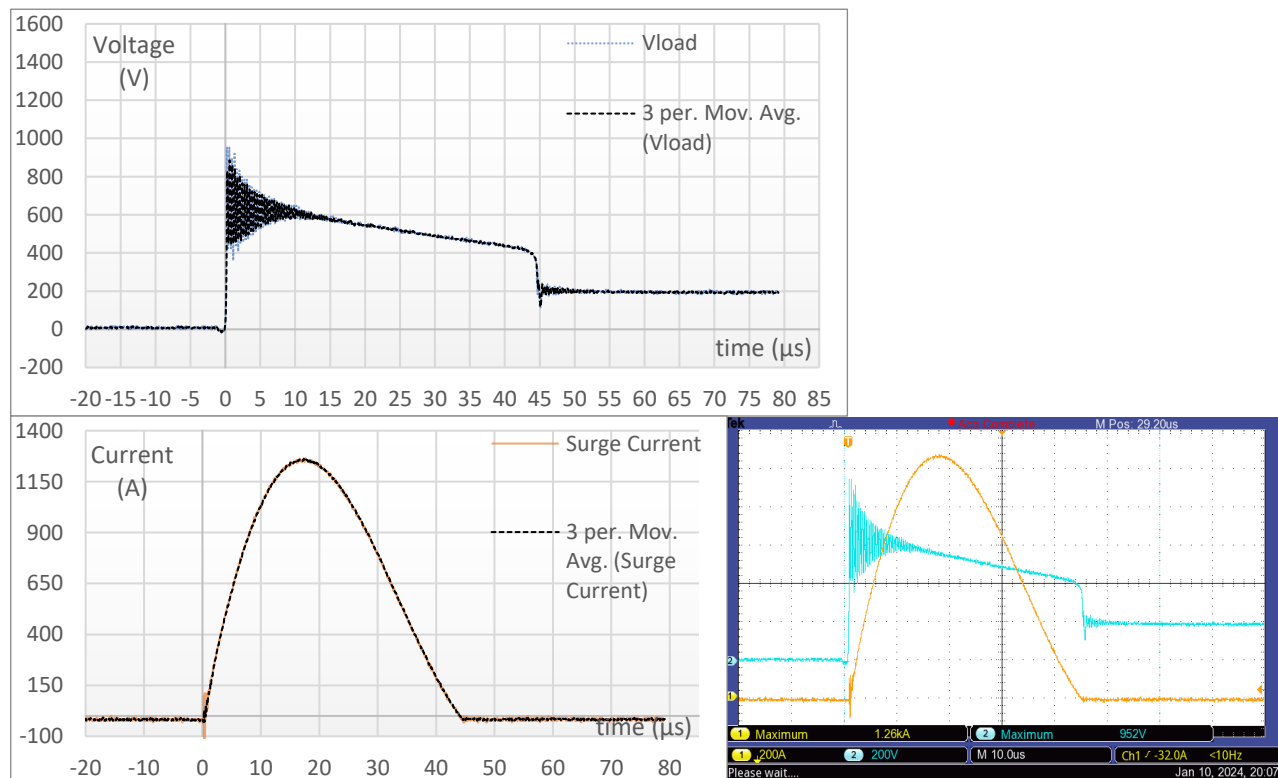
Σχήμα 7.44: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



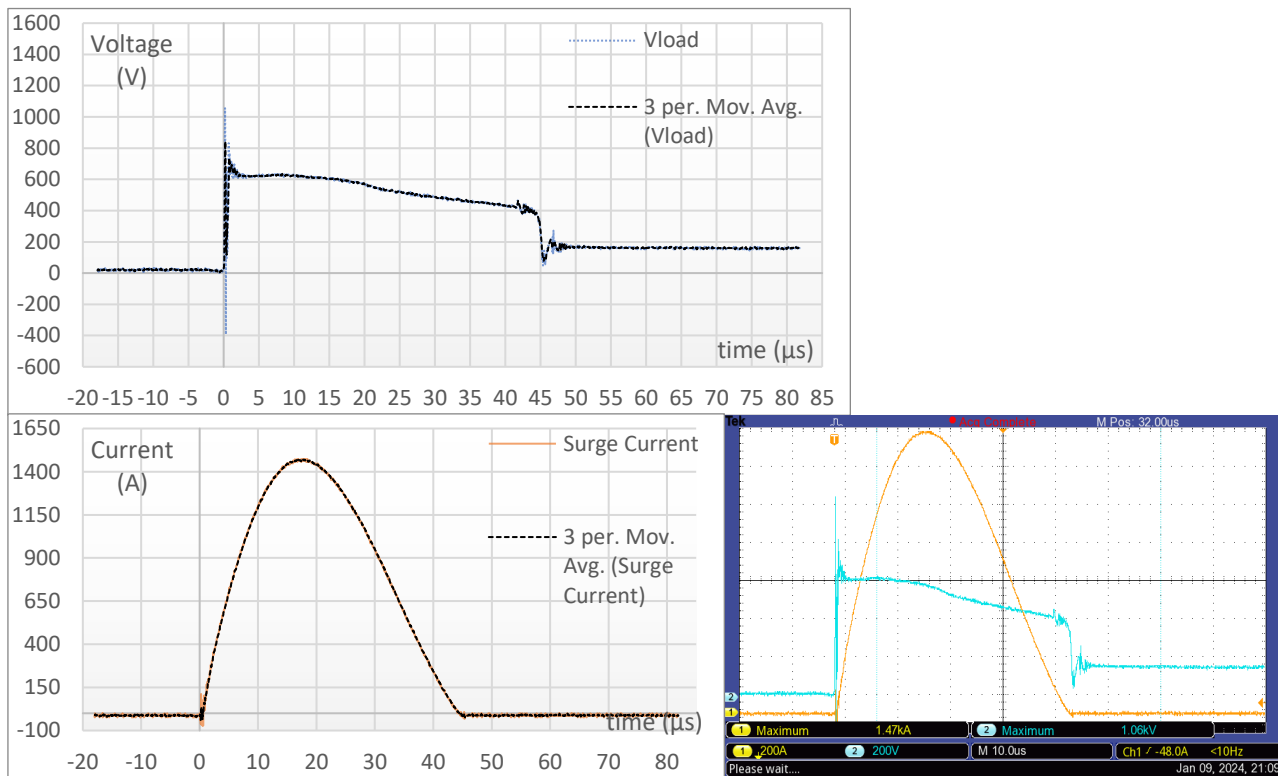
Σχήμα 7.45: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



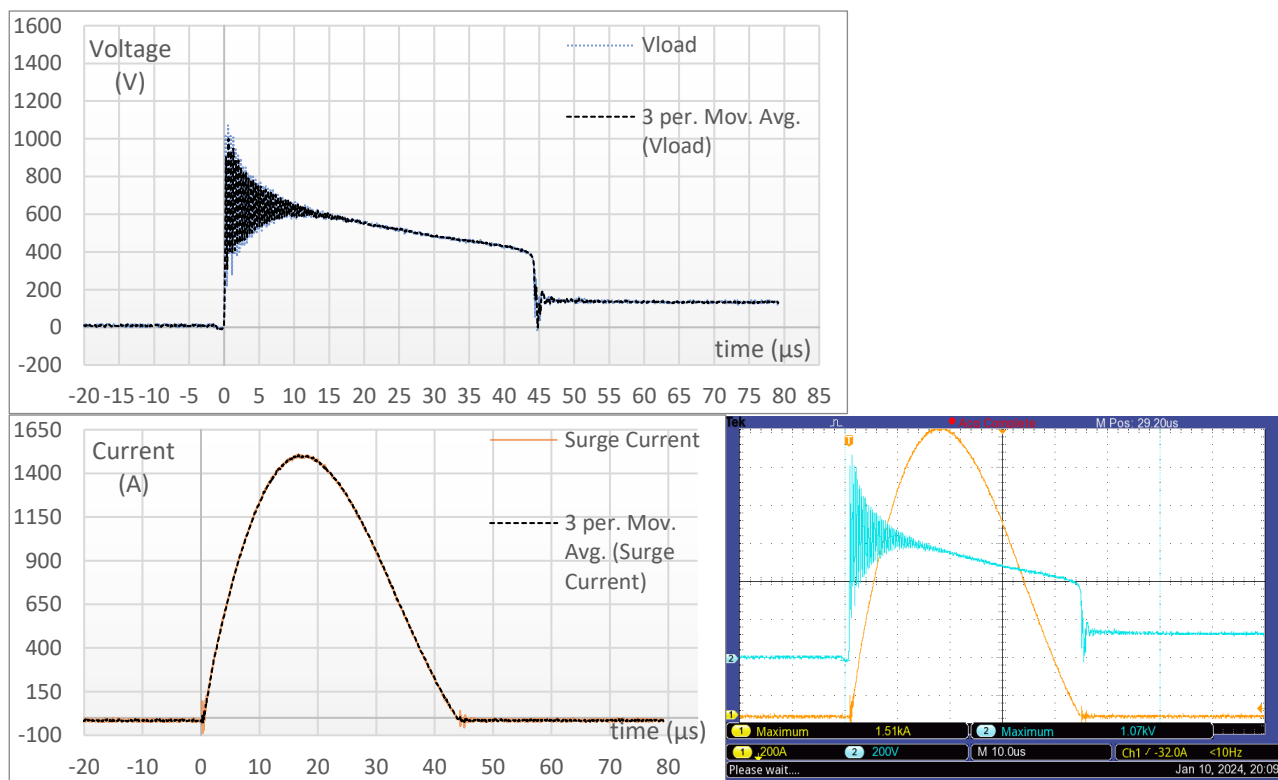
Σχήμα 7.46: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



Σχήμα 7.47: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



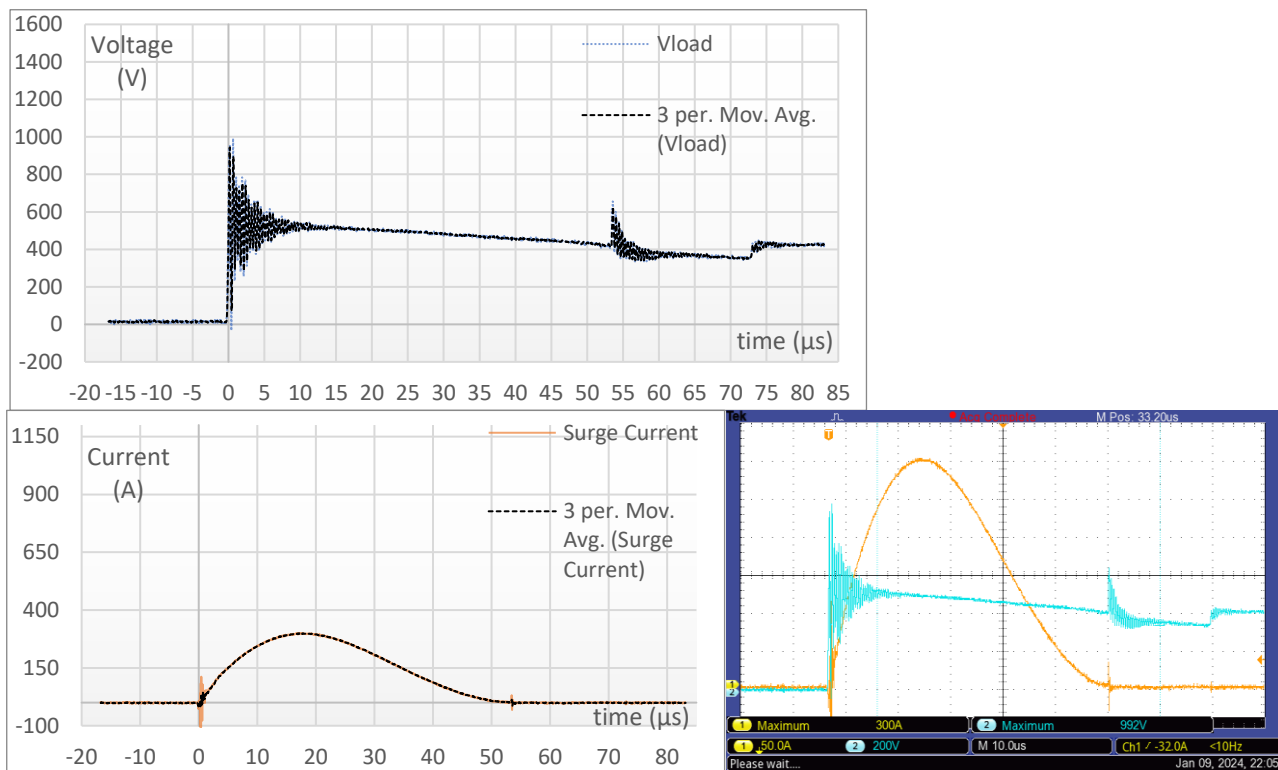
Σχήμα 7.48: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



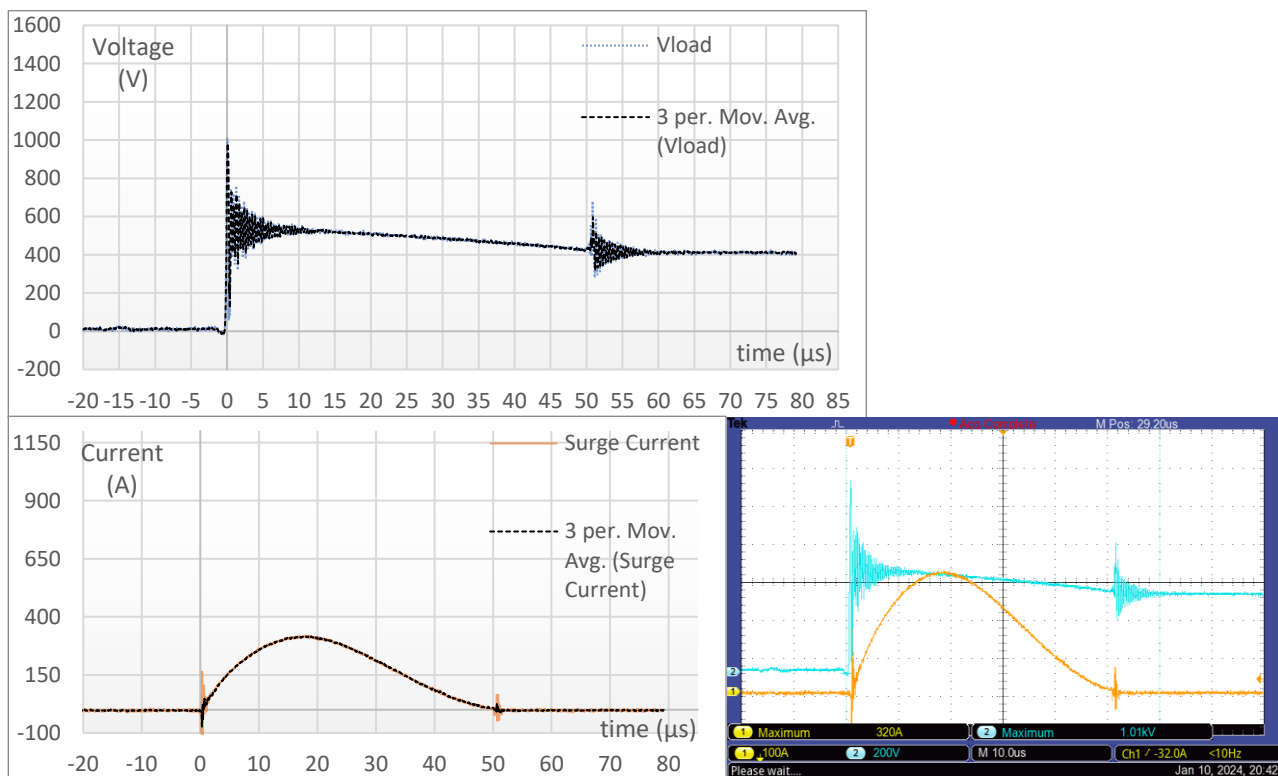
## Παρατηρήσεις

1. Αρχικά, παρατηρούμε πως με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης στα 9m, οι κυματομορφές της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο με τις δύο διαφορετικές διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι αρκετά διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο όδευσης που λαμβάνει χώρα, όπως περιεγράφηκε στο θεωρητικό κομμάτι της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Παρατηρούμε, δηλαδή, μια ισχυρή ταλάντωση της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο, που διαρκεί έως τα πρώτα 12-14μs της κρούσης και λαμβάνει μέγιστη τιμή ελαφρώς μικρότερης του 1kV, σε αντίθεση με ότι είδαμε στα 6.5m και 7m, στην περίπτωση διάταξης προστασίας με SPD τύπου T1 μόνο. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] 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». Είναι αντιληπτό ότι οι ταλαντώσεις που βλέπουμε δεν οφείλονται στον θόρυβο που εντάσσει η χαρακτηριστική του εγχυόμενου κρουστικού ρεύματος και τα καλώδια σύνδεσης των SPD των πρώτων 1.5 – 2 μs, αλλά λόγω της διάδοσης της υπέρτασης.
2. Η παραμένουσα τάση μετά το πρωταρχικό spike, παρατηρούμε, λαμβάνει τιμές γύρω από τα 600V στην περίπτωση προστασίας με T1+T2. Όταν χρησιμοποιείται μόνο T1 η ταλάντωση που λαμβάνει χώρα γίνεται γύρω από το ίδιο επίπεδο τάσης. Και στις δύο περιπτώσεις προστασίας αυτό το επίπεδο τάσης αυξάνεται με την αύξηση του εγχυόμενου ρεύματος.
3. Παρατηρούμε ότι το εγχυόμενο ρεύμα παρουσιάζει μία ταλάντωση στην αρχή της κρούσης και ορισμένες φορές παρουσιάζει μία λιγότερο ισχυρή ταλάντωση στη σβέση της κρούσης. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην φόρτιση και εκφόρτιση των παράσιτων χωρητικοτήτων και αυτεπαγωγών της πειραματικής διάταξης κατά την μεταβατική κατάσταση της έγχυσης, όπου και οι πυκνωτές της γεννήτριας δεν εκ φορτίζουν συγχρονισμένα.
4. Παράλληλα παρατηρούμε μία μεγάλη, απότομη αιχμή της κυματομορφής της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο στην αρχή της κρούσης. Αυτό οφείλεται στον χρόνο απόκρισης του σωλήνα εκκένωσης αερίου (GDT) των απαγωγών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται. Το “spike” αυτό συμβαίνει στα πρώτα 25-100ns και σηματοδοτεί την ενεργοποίησή του σωλήνα εκκένωσης αερίου του SPD και στην συνέχεια, με την ενεργοποίηση του βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων που συνδέεται σε σειρά.
5. Τέλος, στην αρχή της κρούσης (το πρώτο 1.5μs) όπου το  $di/dt$  είναι μεγάλο και το ρεύμα εμφανίζει ορισμένες ταλαντώσεις λόγω των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, η τάση στα άκρα του πρώτου SPD T1 εμφανίζει μία ταλάντωση που ίσως οφείλεται στην αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσής του (μικρότερα από 0.5m). Αυτός ο θόρυβος μεταφέρεται και στη τάση στο υπό μελέτη φορτίο στο πρώτο 1.5μs.

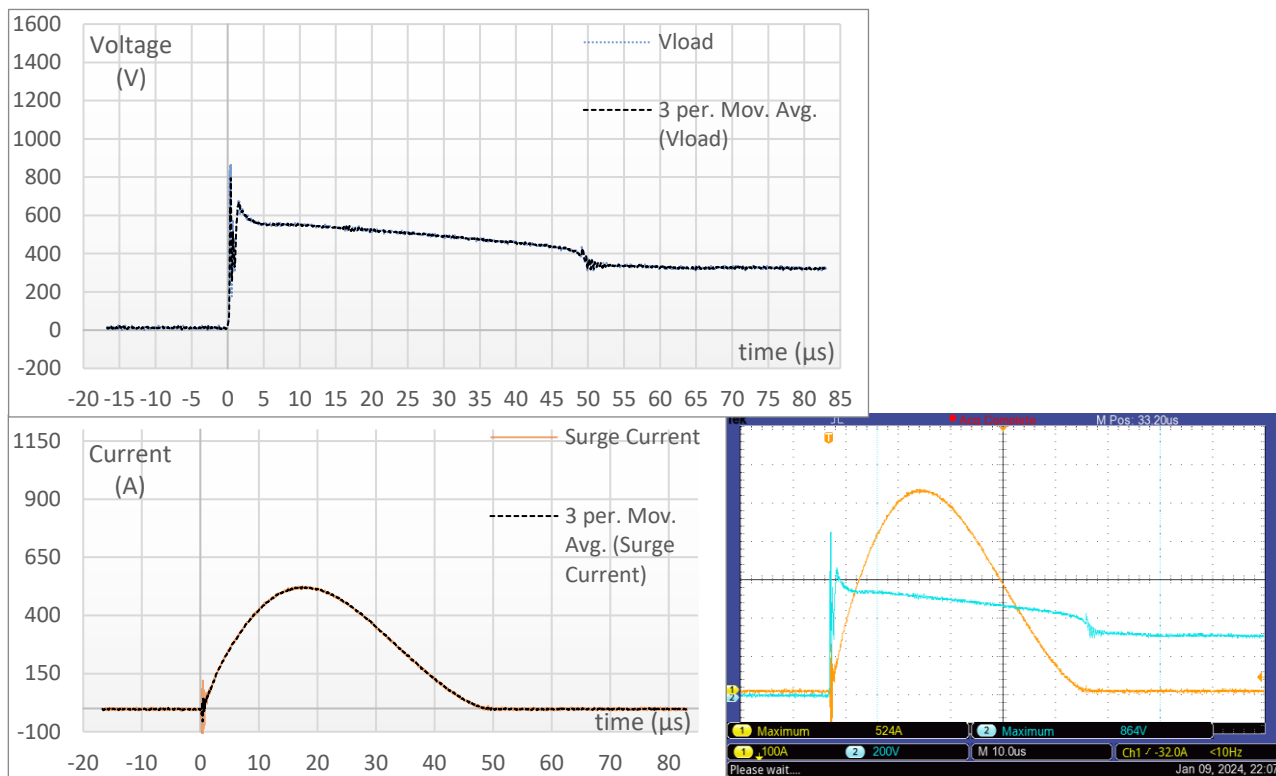
Σχήμα 7.49: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



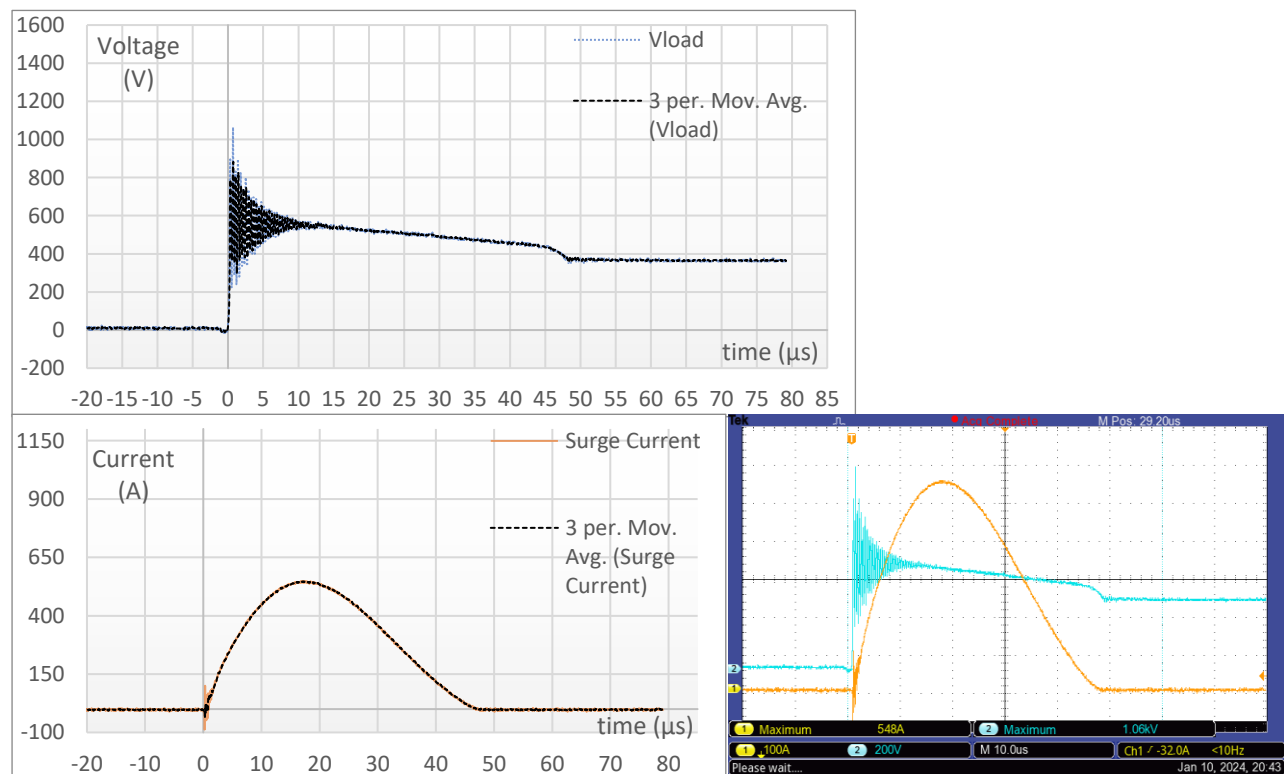
Σχήμα 7.50: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



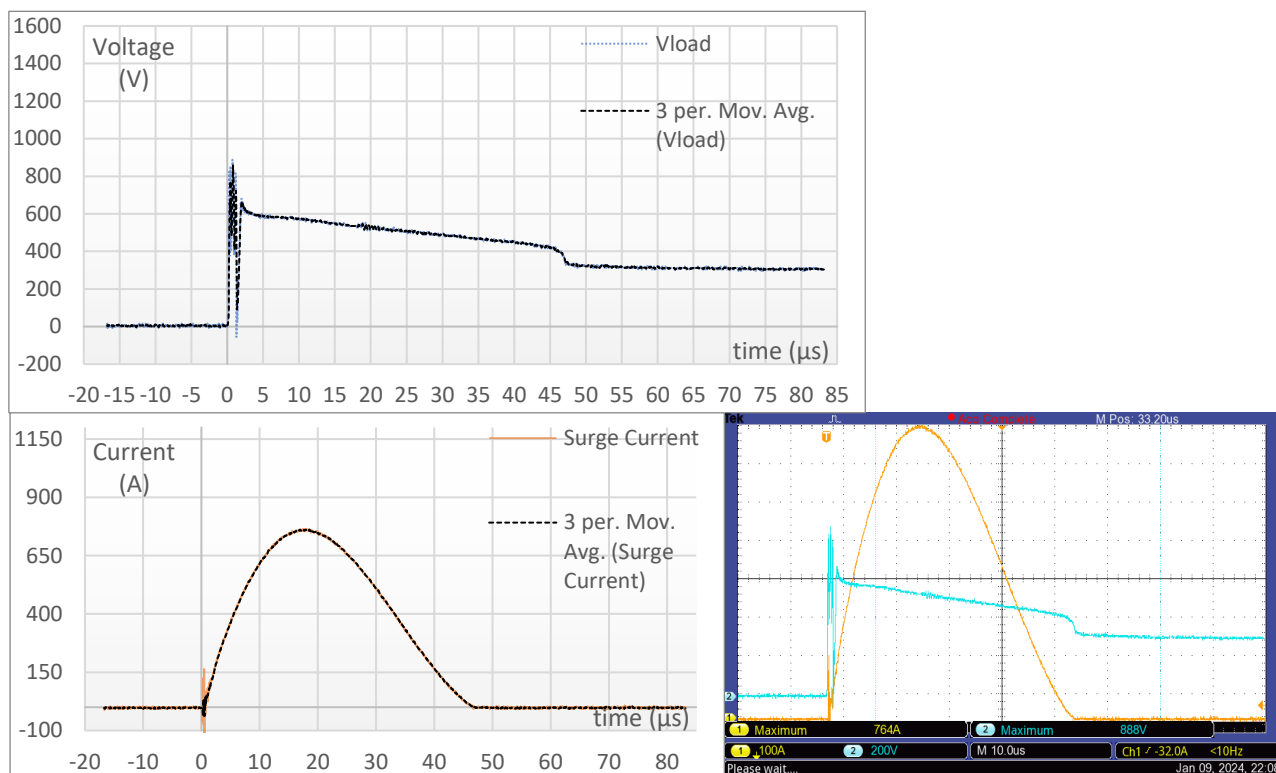
Σχήμα 7.51: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



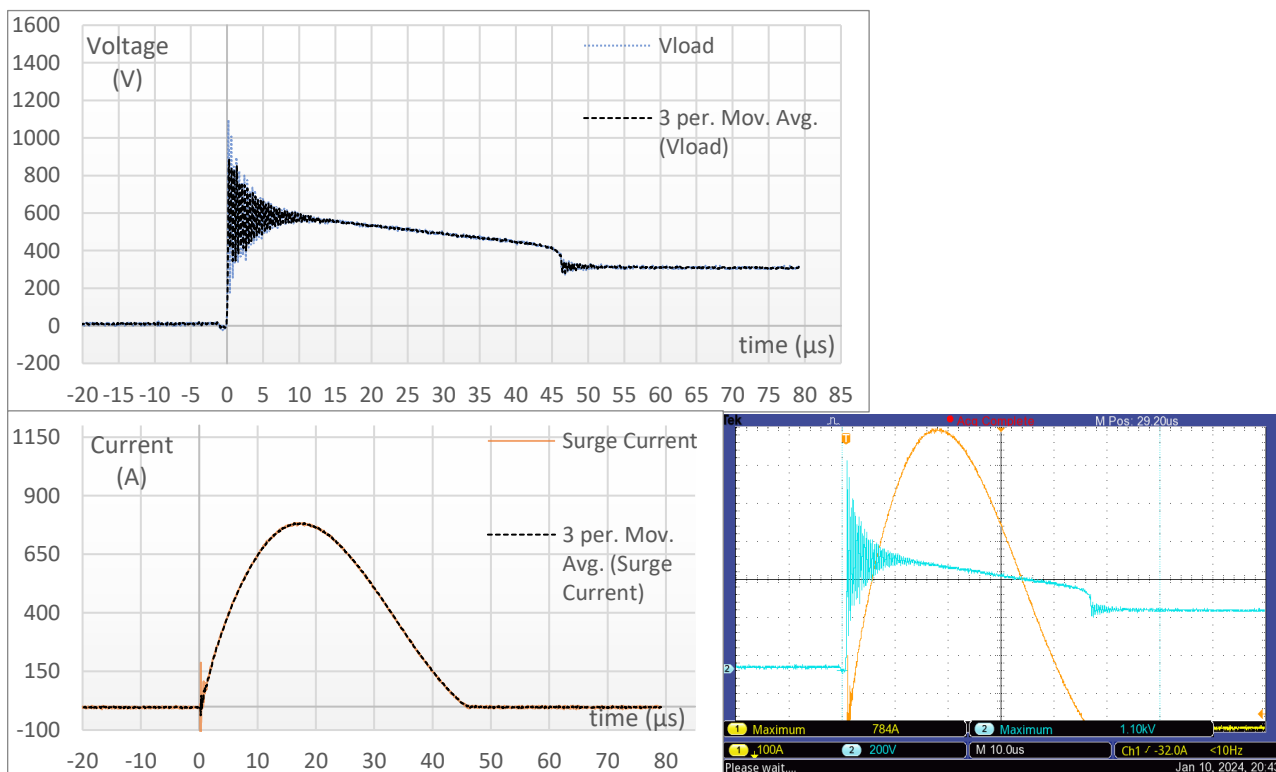
Σχήμα 7.52: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



Σχήμα 7.53: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.

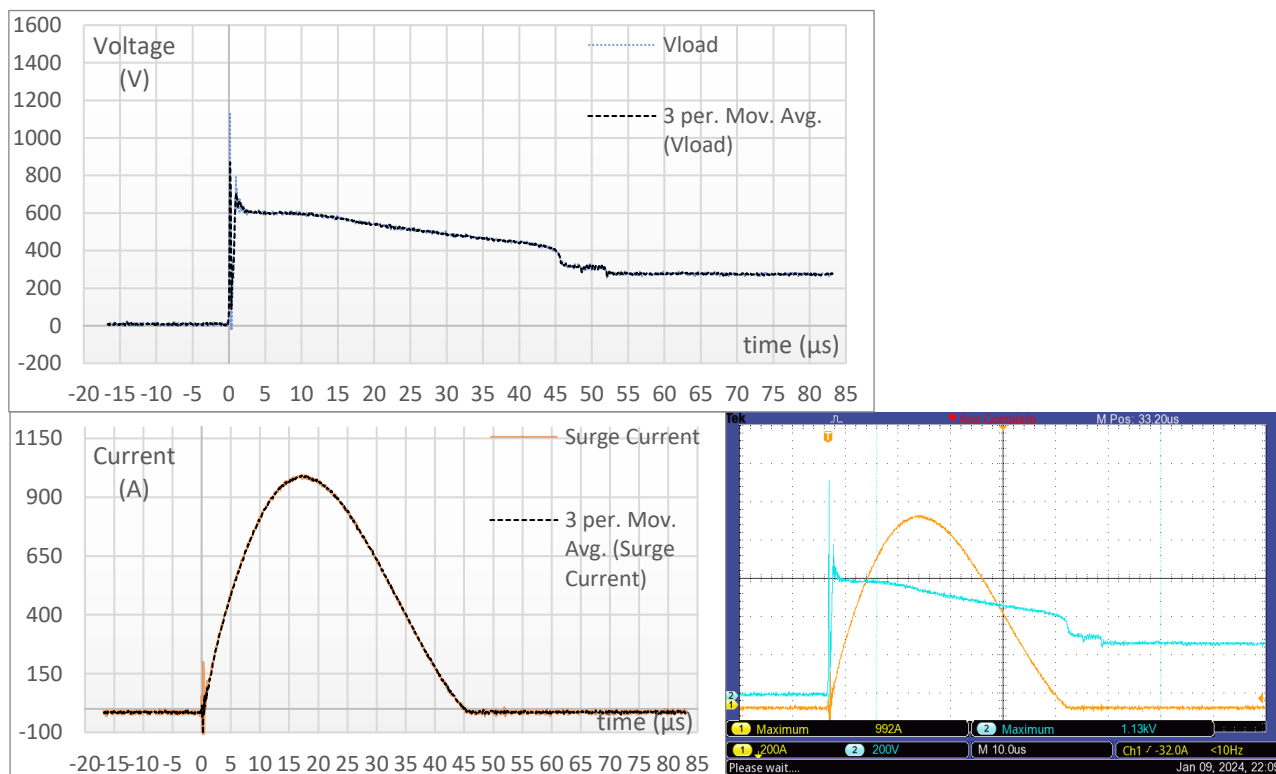


Σχήμα 7.54: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.

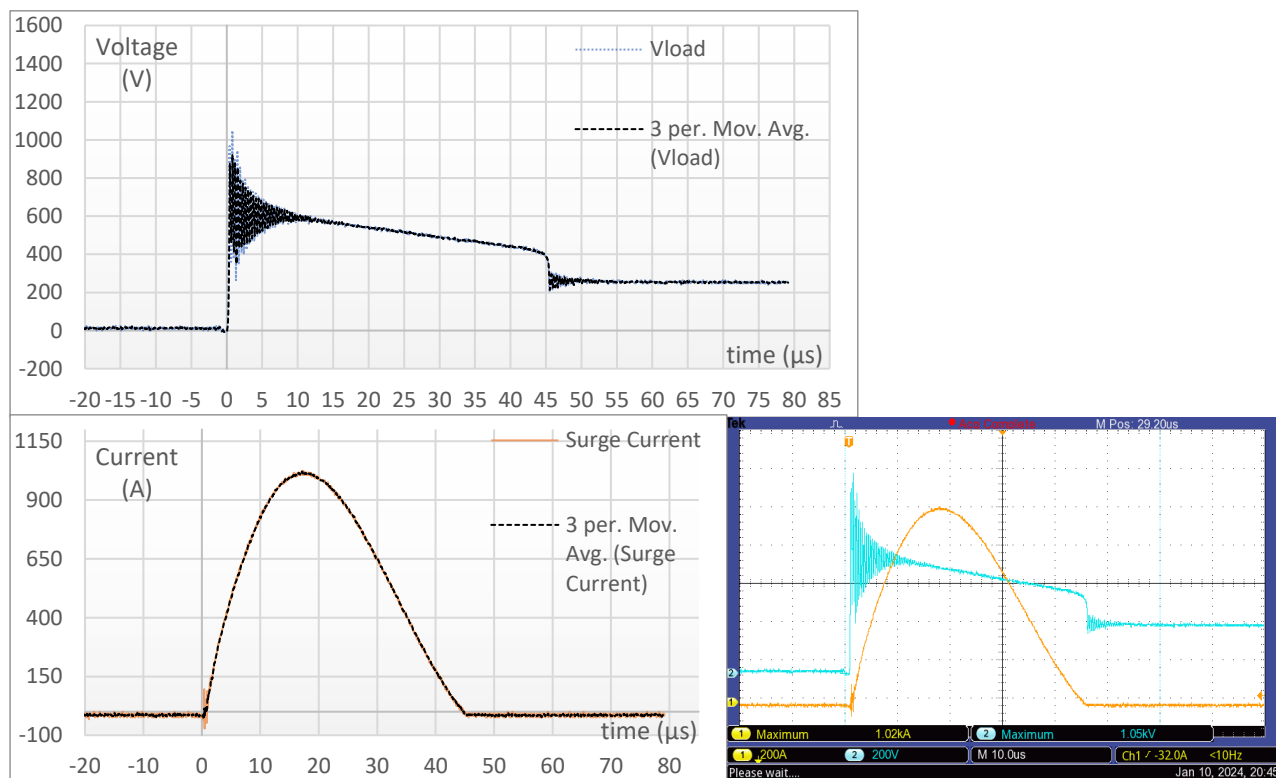




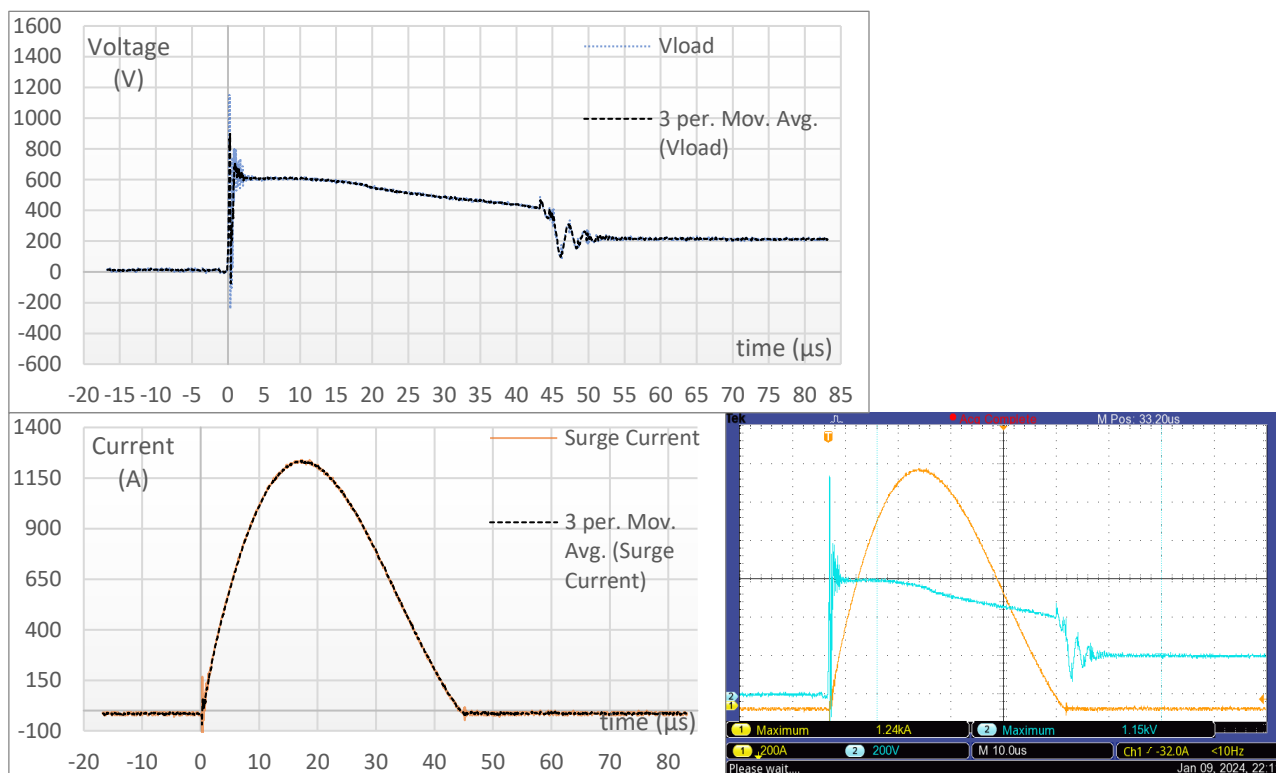
Σχήμα 7.55: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



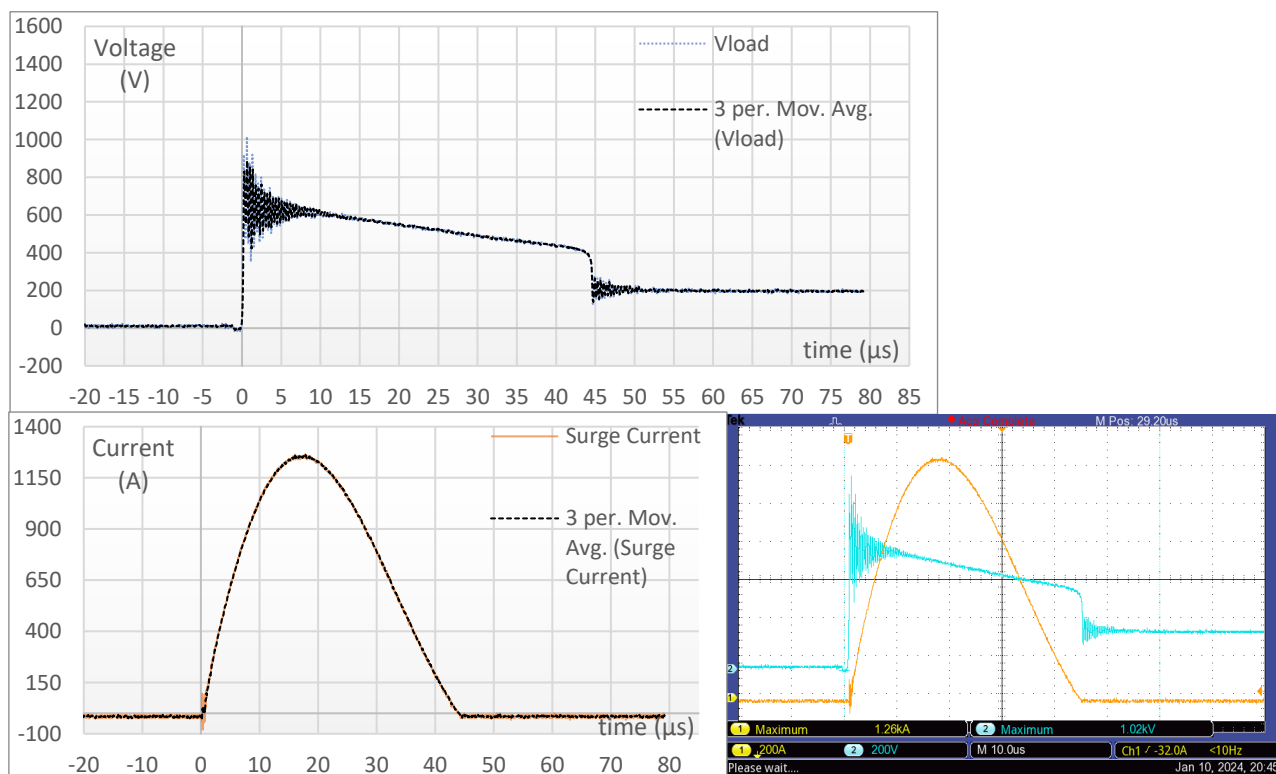
Σχήμα 7.56: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.



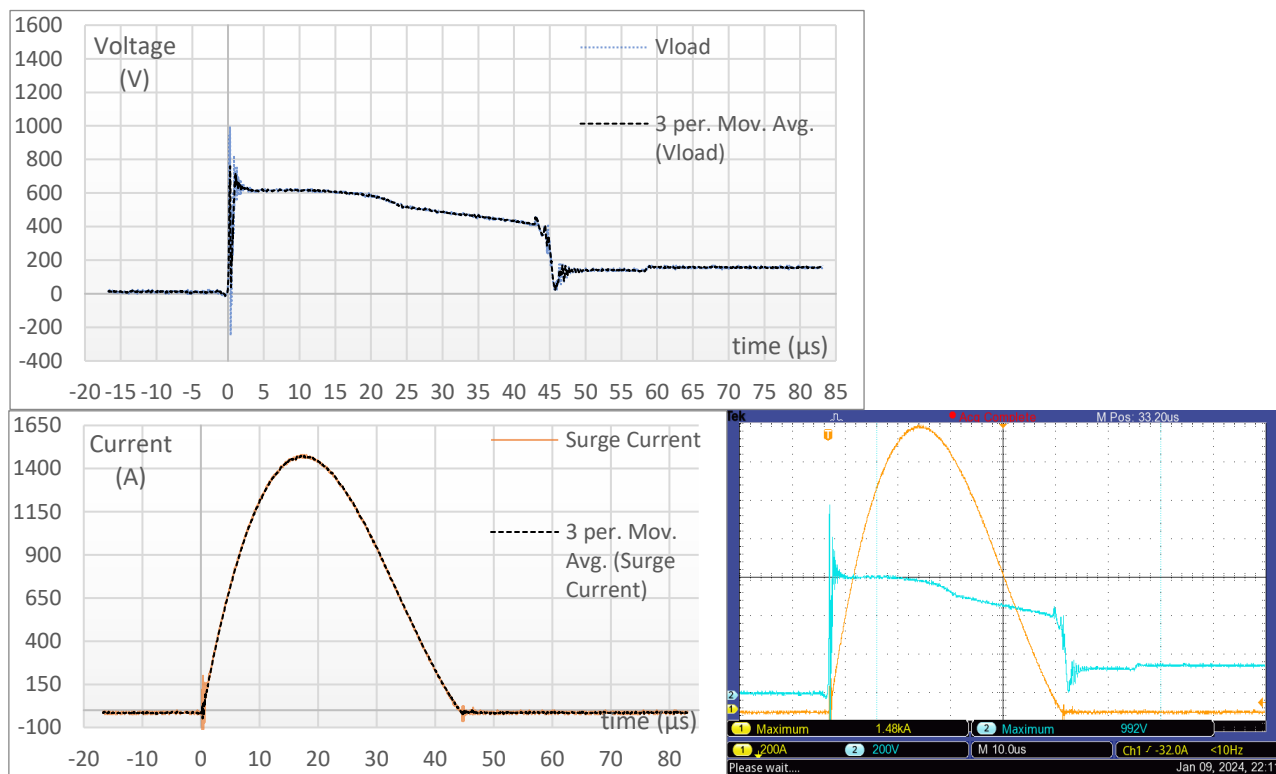
Σχήμα 7.57: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



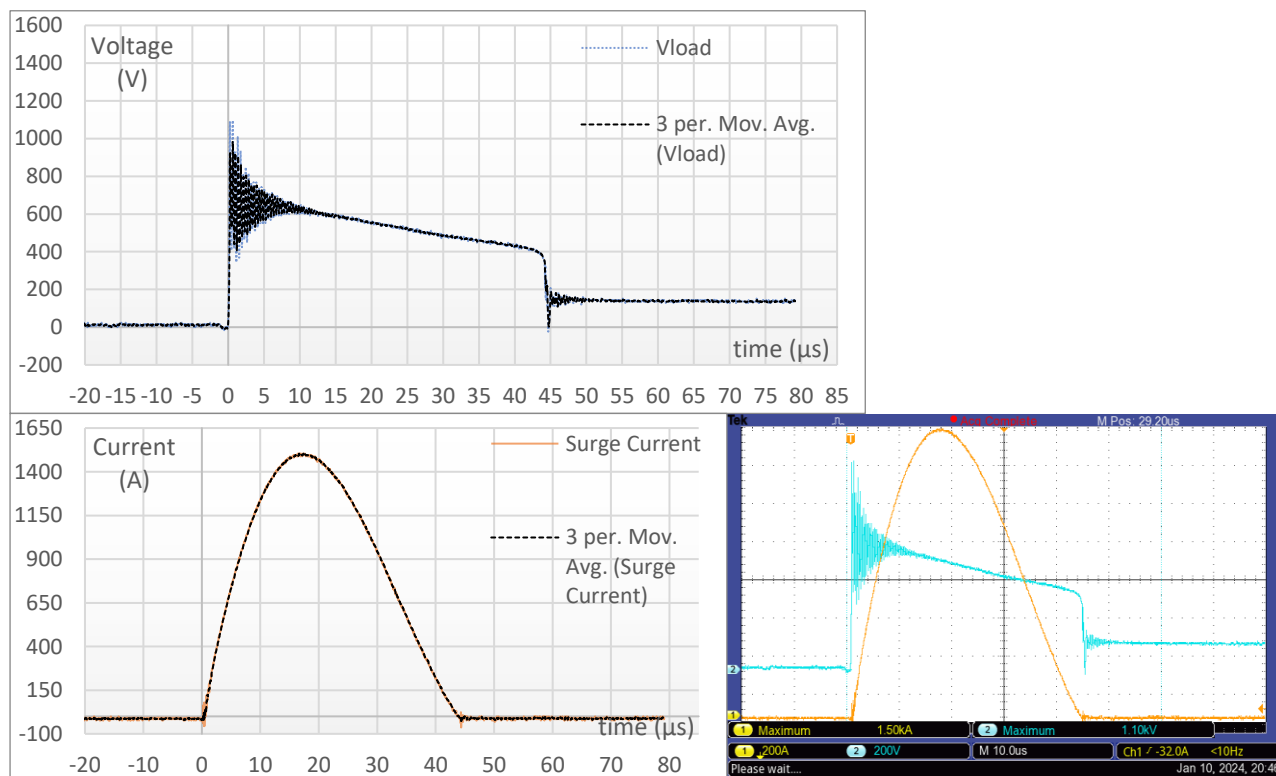
Σχήμα 7.58: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



Σχήμα 7.59: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



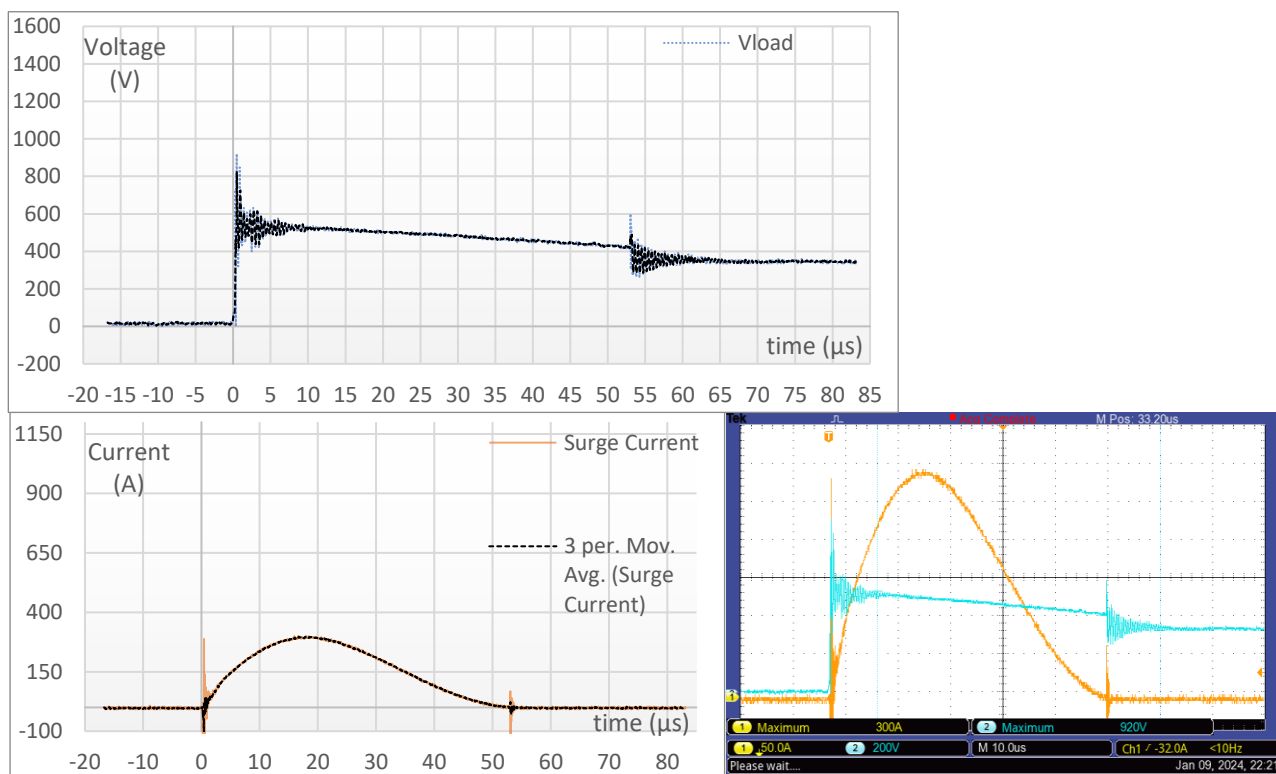
Σχήμα 7.60: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



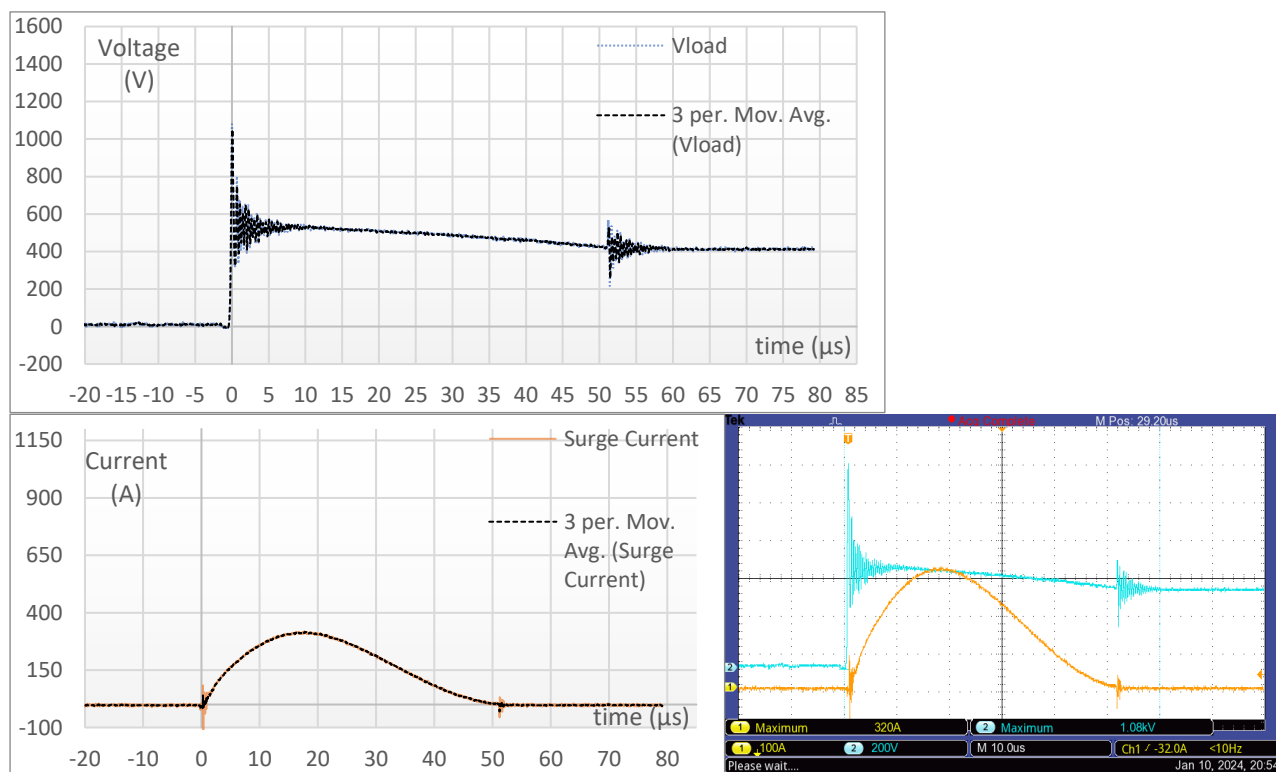
## Παρατηρήσεις

1. Αρχικά, παρατηρούμε πως με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης στα 16m, οι κυματομορφές της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο με τις δύο διαφορετικές διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι αρκετά διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο όδευσης που λαμβάνει χώρα, όπως περιεγράφηκε στο θεωρητικό κομμάτι της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Παρατηρούμε, δηλαδή, μια ισχυρή ταλάντωση της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο, που διαρκεί έως τα πρώτα 12μs της κρούσης και λαμβάνει μέγιστη τιμή ελαφρώς μικρότερης του 1kV, σε αντίθεση με ότι είδαμε στα 6.5m και 7m, στην περίπτωση διάταξης προστασίας με SPD τύπου T1 μόνο. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] 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». Είναι αντιληπτό ότι οι ταλαντώσεις που βλέπουμε δεν οφείλονται στον θόρυβο που εντάσσει η χαρακτηριστική του εγγυόμενου κρουστικού ρεύματος και τα καλώδια σύνδεσης των SPD των πρώτων 1.5 – 2 μs, αλλά λόγω της διάδοσης της υπέρτασης.
2. Η παραμένουσα τάση μετά το πρωταρχικό spike, παρατηρούμε, λαμβάνει τιμές γύρω από τα 600V στην περίπτωση προστασίας με T1+T2. Όταν χρησιμοποιείται μόνο T1 η ταλάντωση που λαμβάνει χώρα γίνεται γύρω από το ίδιο επίπεδο τάσης. Και στις δύο περιπτώσεις προστασίας αυτό το επίπεδο τάσης αυξάνεται με την αύξηση του εγγεόμενου ρεύματος.
3. Αξίζει να σημειώσουμε, επίσης, πως για έγχυση ρεύματος βραχυκύκλωσης 1.8kA, η μέτρηση με προστασία T1+T2, είναι παρόμοια εκείνης με προστασία μόνο με T1. Αυτό οφείλεται στην μη ενεργοποίηση του κατάντη απαγωγέα υπερτάσεων τύπου T2, λόγω του χαμηλού ρεύματος που εγχύθηκε.
4. Παρατηρούμε ότι το εγγεόμενο ρεύμα παρουσιάζει μία ταλάντωση στην αρχή της κρούσης και ορισμένες φορές παρουσιάζει μία λιγότερο ισχυρή ταλάντωση στη σβέση της κρούσης. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην φόρτιση και εκφόρτιση των παράσιτων χωρητικοτήτων και αυτεπαγωγών της πειραματικής διάταξης κατά την μεταβατική κατάσταση της έγχυσης, όπου και οι πυκνωτές της γεννήτριας δεν εκ φορτίζουν συγχρονισμένα.
5. Παράλληλα παρατηρούμε μία μεγάλη, απότομη αιχμή της κυματομορφής της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο στην αρχή της κρούσης. Αυτό οφείλεται στον χρόνο απόκρισης του σωλήνα εκκένωσης αερίου (GDT) των απαγωγών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται. Το “spike” αυτό συμβαίνει στα πρώτα 25-100ns και σηματοδοτεί την ενεργοποίηση του σωλήνα εκκένωσης αερίου του SPD και στην συνέχεια, με την ενεργοποίηση του βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων που συνδέεται σε σειρά.
6. Τέλος, στην αρχή της κρούσης (το πρώτο 1.5μs) όπου το  $di/dt$  είναι μεγάλο και το ρεύμα εμφανίζει ορισμένες ταλαντώσεις λόγω των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, η τάση στα άκρα του πρώτου SPD T1 εμφανίζει μία ταλάντωση που ίσως οφείλεται στην αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσής του (μικρότερα από 0.5m). Αυτός ο θόρυβος μεταφέρεται και στη τάση στο υπό μελέτη φορτίο στο πρώτο 1.5μs

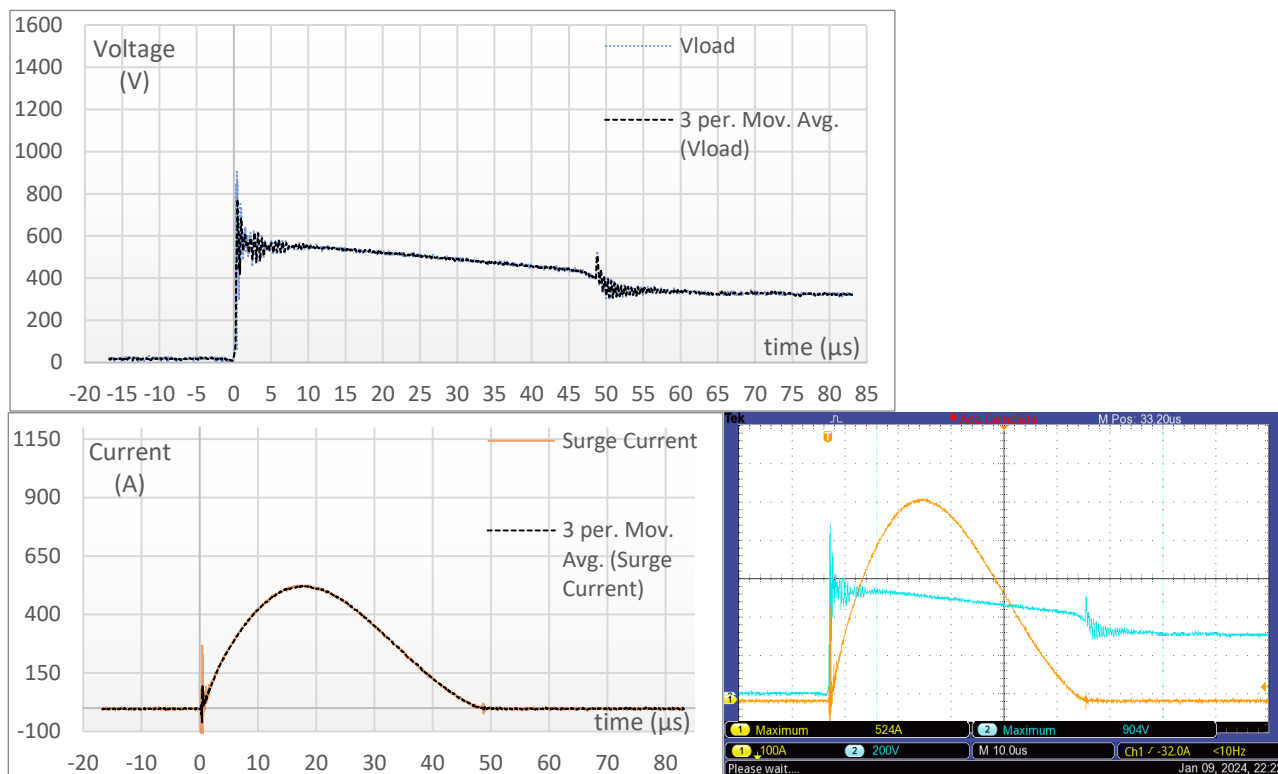
Σχήμα 7.61: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



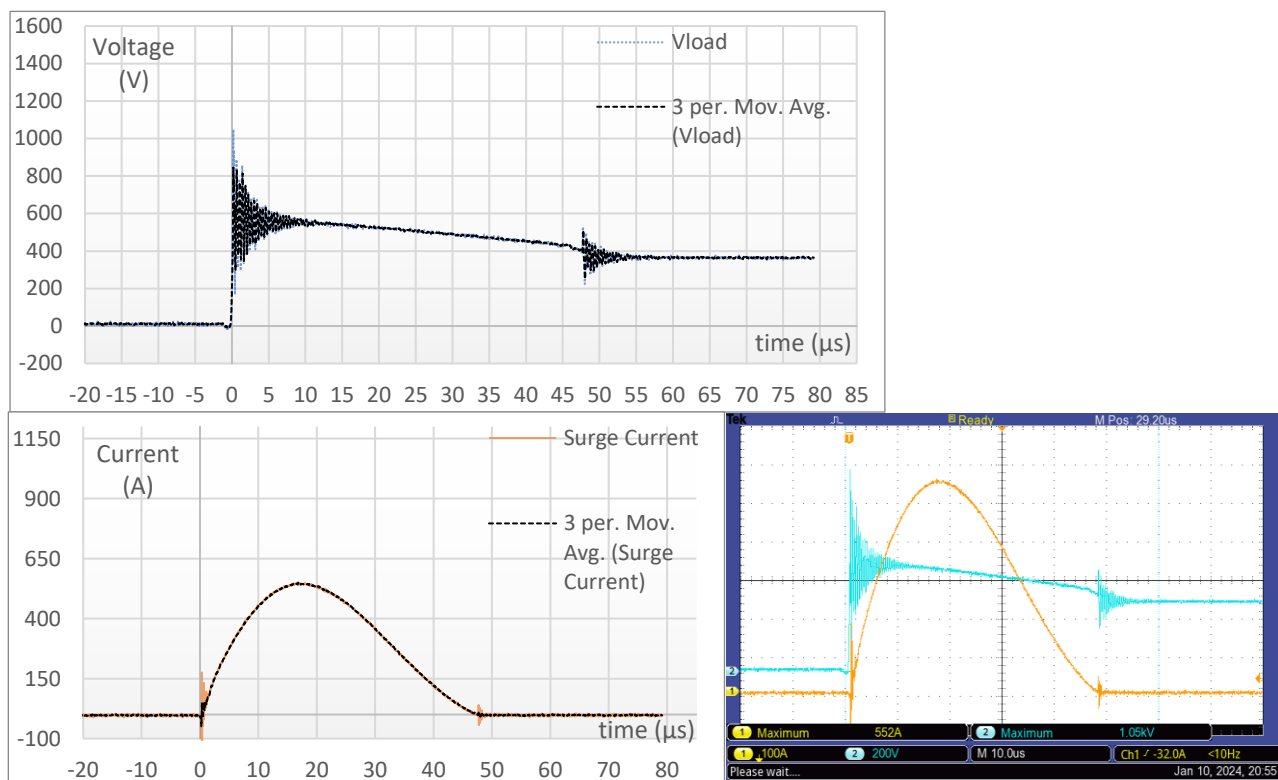
Σχήμα 7.62: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



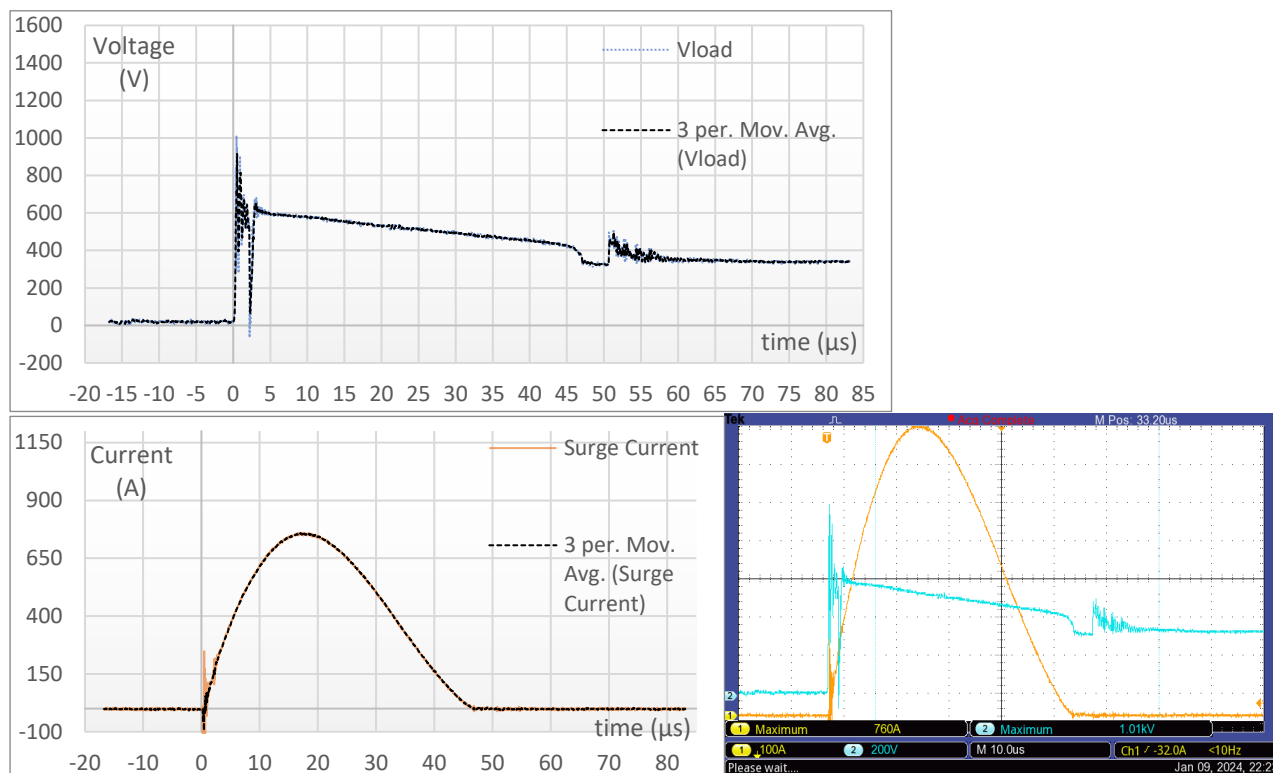
Σχήμα 7.63: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



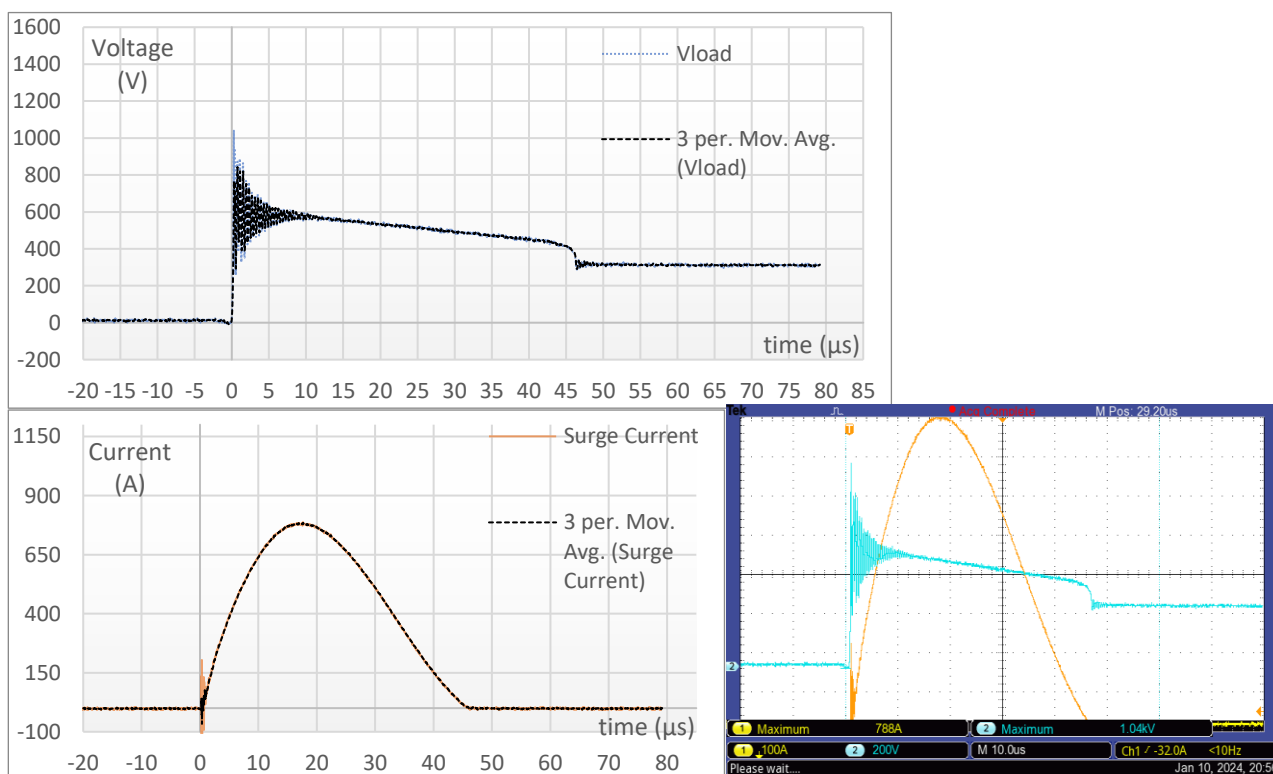
Σχήμα 7.64: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



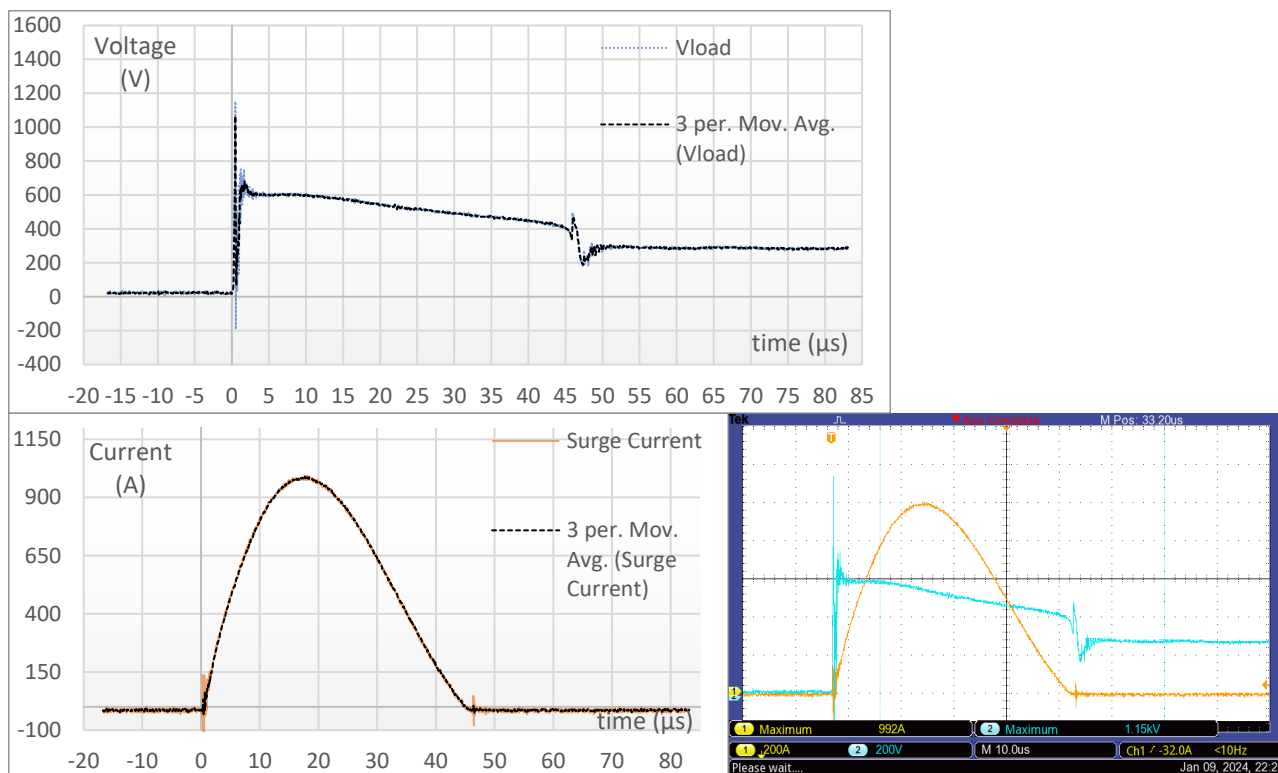
Σχήμα 7.65: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



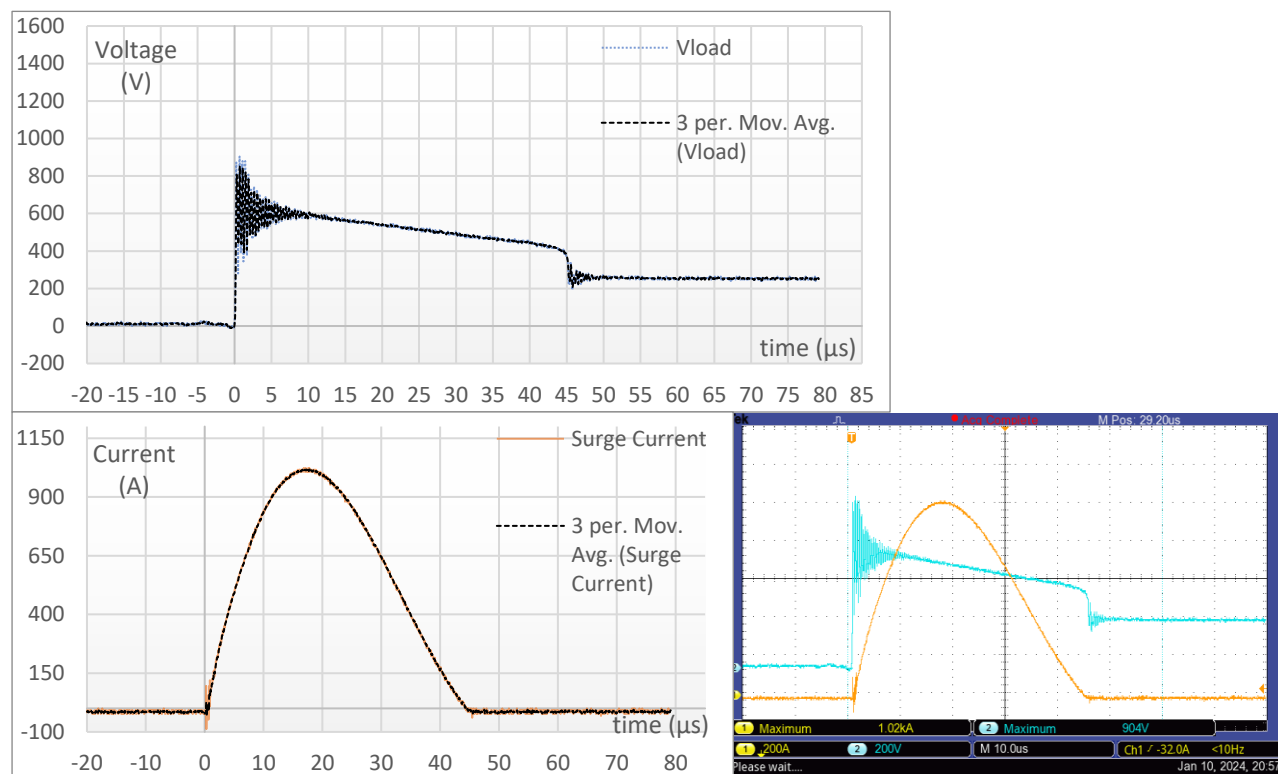
Σχήμα 7.66: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



Σχήμα 7.67: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.

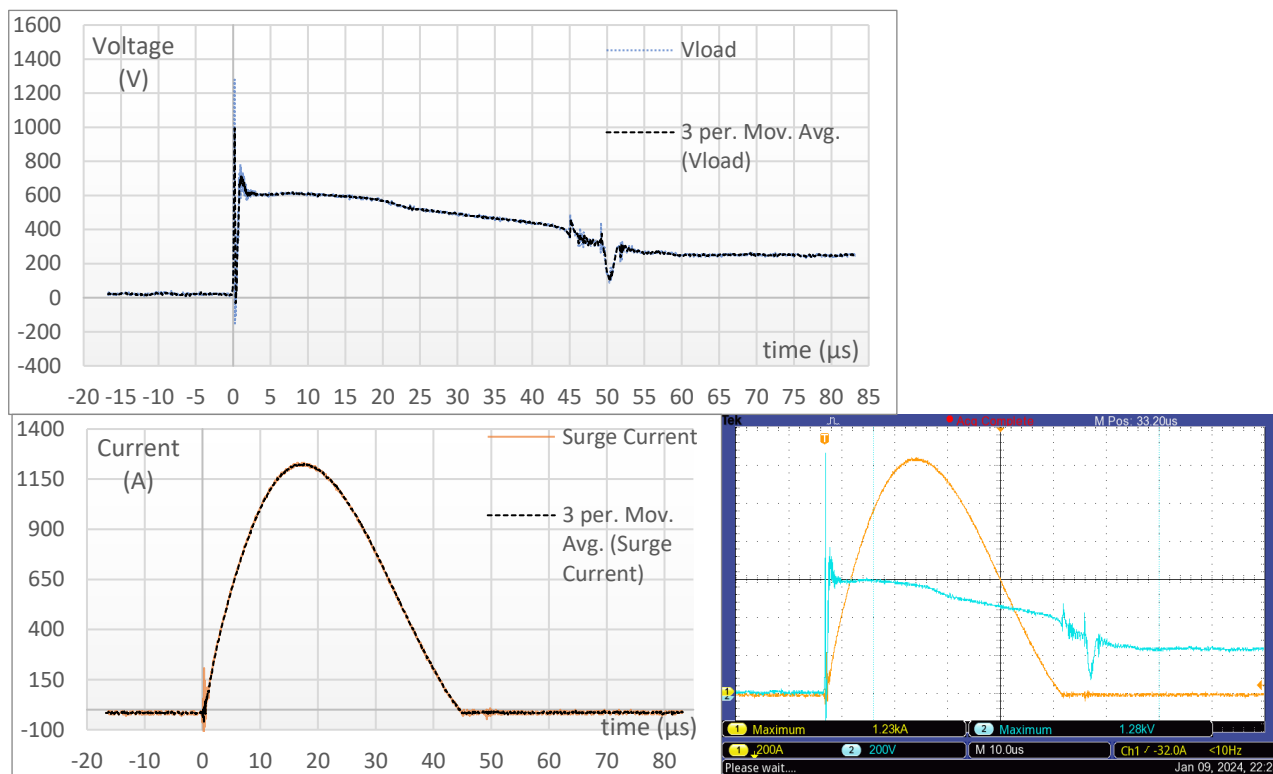


Σχήμα 7.68: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.

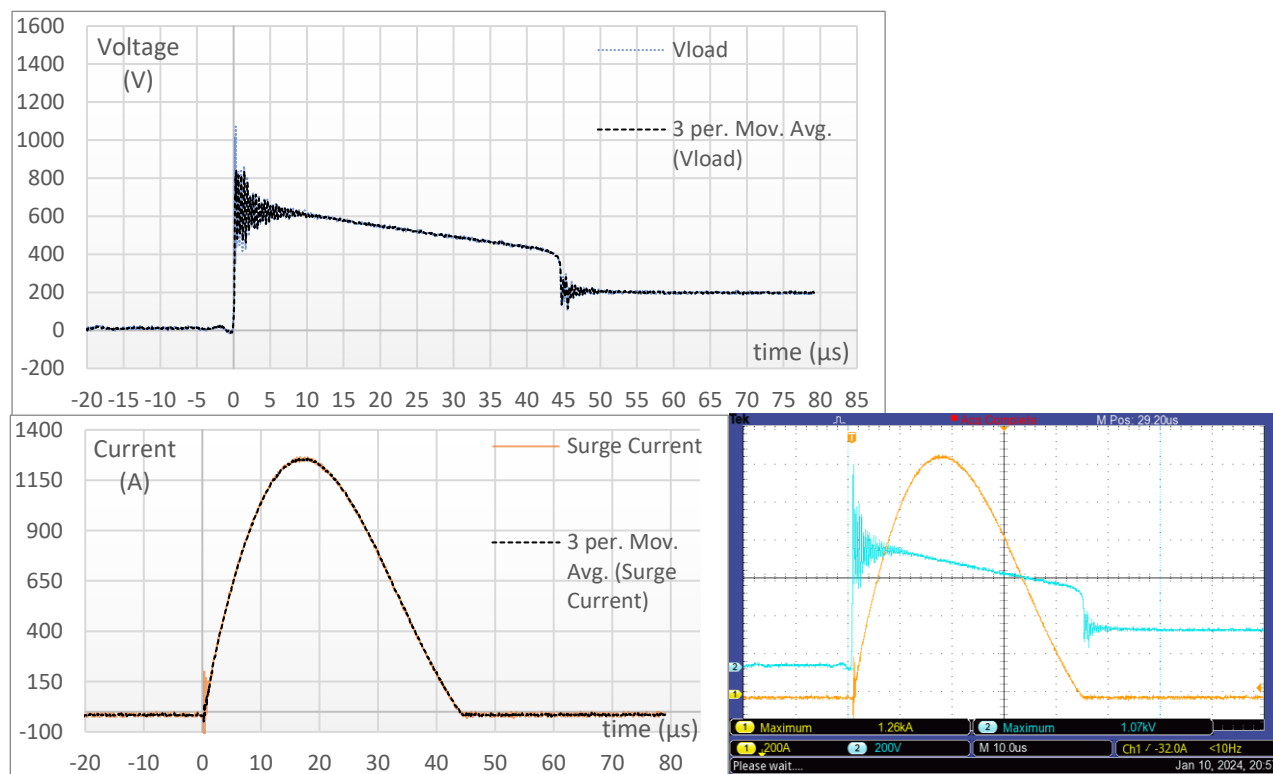




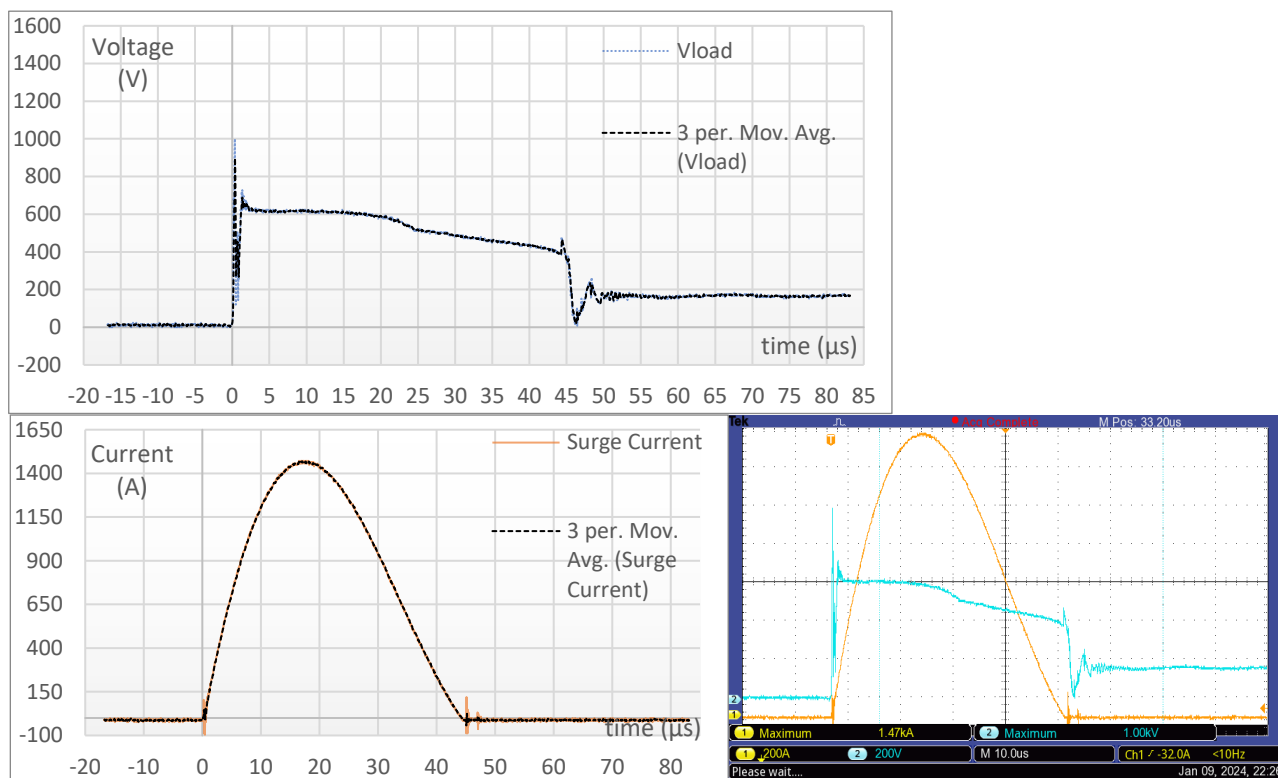
Σχήμα 7.69: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



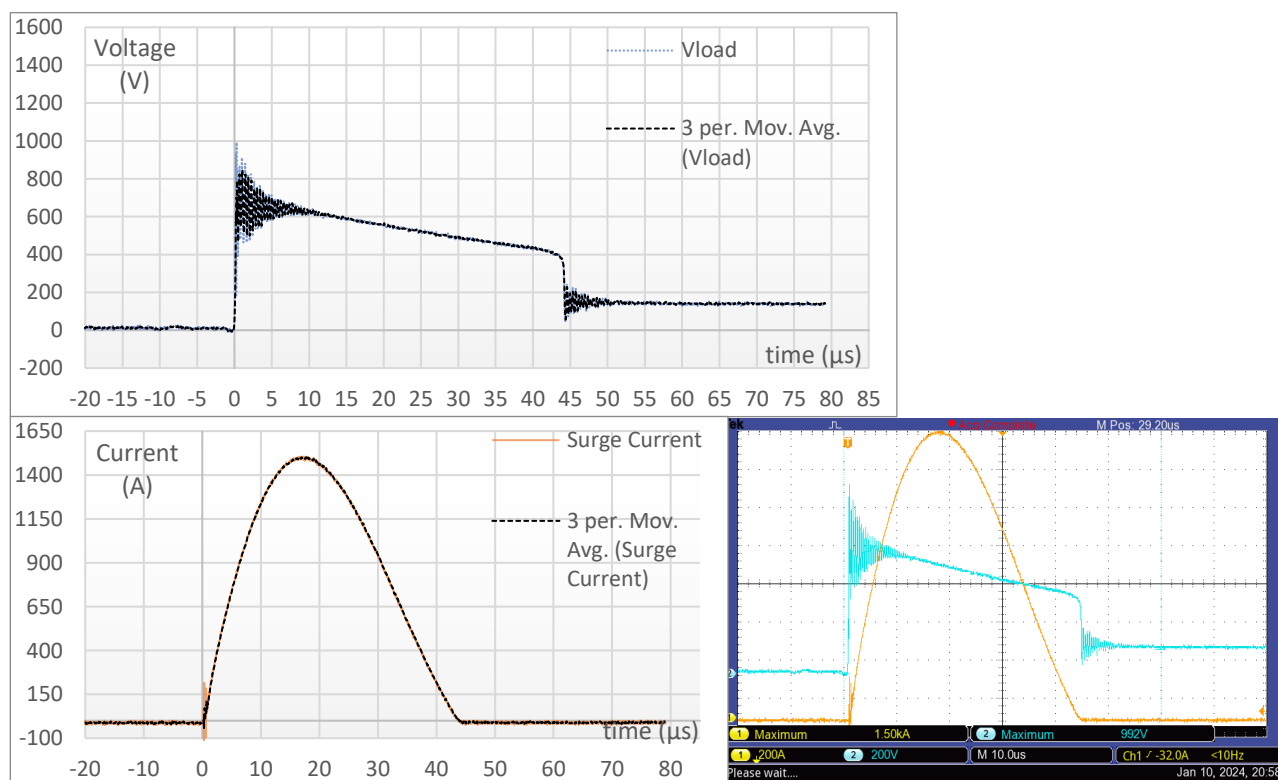
Σχήμα 7.70: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



Σχήμα 7.71: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



Σχήμα 7.72: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



## Παρατηρήσεις

1. Αρχικά, παρατηρούμε πως με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης στα 22.5m, οι κυματομορφές της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο με τις δύο διαφορετικές διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι αρκετά διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο όδευσης που λαμβάνει χώρα, όπως περιεγράφηκε στο θεωρητικό κομμάτι της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Παρατηρούμε, δηλαδή, μια ισχυρή ταλάντωση της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο, που διαρκεί έως τα πρώτα 12-μs της κρούσης και λαμβάνει μέγιστη τιμή στα 850V, σε αντίθεση με ότι είδαμε στα 6.5m και 7m, στην περίπτωση διάταξης προστασίας με SPD τύπου T1 μόνο. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] 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». Είναι αντιληπτό ότι οι ταλαντώσεις που βλέπουμε δεν οφείλονται στον θόρυβο που εντάσσει η χαρακτηριστική του εγγυόμενου κρουστικού ρεύματος και τα καλώδια σύνδεσης των SPD των πρώτων 1.5 – 2 μs, αλλά λόγω της διάδοσης της υπέρτασης

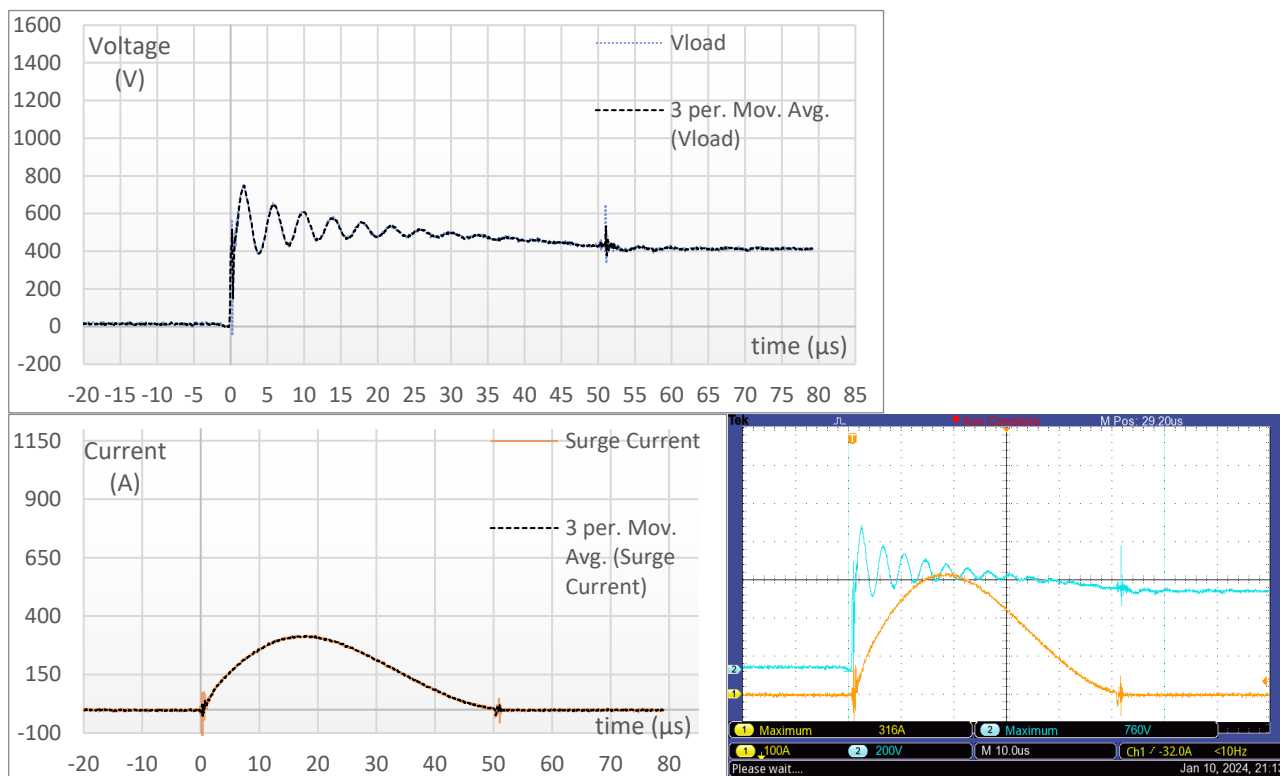
Όπως παρατηρήθηκε η μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή κατά την διάρκεια ταλάντωσης της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο στις περιπτώσεις καλωδίωσης 22.5m, 16m και 9m είναι μικρότερη από ότι στα 6.5m και 7m. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς όπως προαναφέραμε και στο κεφάλαιο 5 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, υπάρχει ένα χειρίστο μήκος καλωδίωσης μεταξύ του SPD και του υπό προστασία φορτίου και ότι δεν ισχύει πως όσο πιο μεγάλο το μήκος τόσο χειρότερα προστατεύεται ένα φορτίο. [26]

2. Η παραμένουσα τάση μετά το πρωταρχικό spike, παρατηρούμε, λαμβάνει τιμές γύρω από τα 600V στην περίπτωση προστασίας με T1+T2. Όταν χρησιμοποιείται μόνο T1 η ταλάντωση που λαμβάνει χώρα γίνεται γύρω από το ίδιο επίπεδο τάσης. Και στις δύο περιπτώσεις προστασίας αυτό το επίπεδο τάσης αυξάνεται με την αύξηση του εγγεόμενου ρεύματος.
3. Αξίζει να σημειώσουμε, επίσης, πως για έγχυση ρεύματος βραχυκύκλωσης 1.8kA, 2.2kA και 2.6kA η μέτρηση με προστασία T1+T2 παρατηρούνται ταλαντώσεις. Αυτό οφείλεται είτε σε μη ενεργοποίηση του κατάντη απαγωγέα υπερτάσεων είτε σε κακή συνεργασία των δύο απαγωγέων.
4. Παρατηρούμε ότι το εγγεόμενο ρεύμα παρουσιάζει μία ταλάντωση στην αρχή της κρούσης και ορισμένες φορές παρουσιάζει μία λιγότερο ισχυρή ταλάντωση στη σβέση της κρούσης. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην φόρτιση και εκφόρτιση των παράσιτων χωρητικοτήτων και αυτεπαγωγών της πειραματικής διάταξης κατά την μεταβατική κατάσταση της έγχυσης, όπου και οι πυκνωτές της γεννήτριας δεν εκ φορτίζουν συγχρονισμένα.
5. Παράλληλα παρατηρούμε μία μεγάλη, απότομη αιχμή της κυματομορφής της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο στην αρχή της κρούσης. Αυτό οφείλεται στον χρόνο απόκρισης του σωλήνα εκκένωσης αερίου (GDT) των απαγωγών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται. Το “spike” αυτό συμβαίνει στα πρώτα 25-100ns και σηματοδοτεί την ενεργοποίησή του

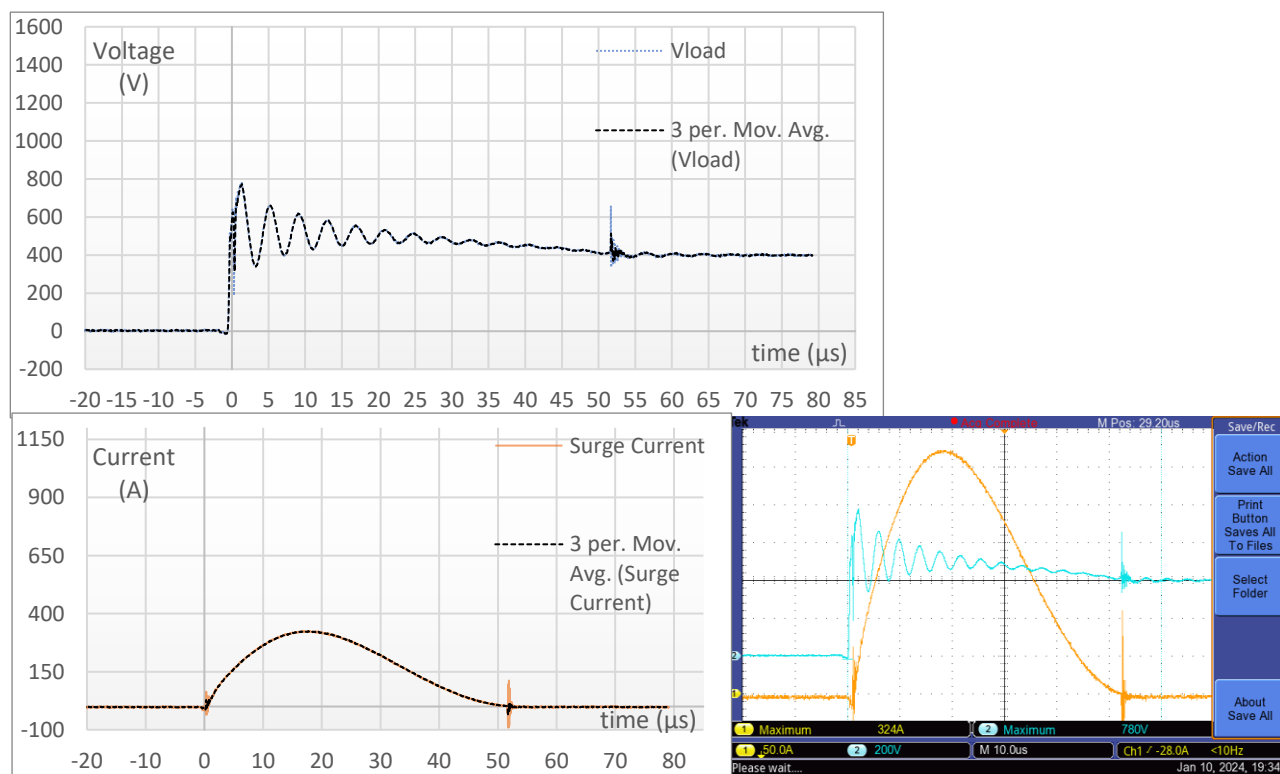
σωλήνα εκκένωσης αερίου του SPD και στην συνέχεια, με την ενεργοποίηση του βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων που συνδέεται σε σειρά.

6. Τέλος, στην αρχή της κρούσης (το πρώτο 1.5 $\mu$ s) όπου το  $di/dt$  είναι μεγάλο και το ρεύμα εμφανίζει ορισμένες ταλαντώσεις λόγω των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, η τάση στα άκρα του πρώτου SPD T1 εμφανίζει μία ταλάντωση που ίσως οφείλεται στην αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσής του (μικρότερα από 0.5m). Αυτός ο θόρυβος μεταφέρεται και στην τάση στο υπό μελέτη φορτίο στο πρώτο 1.5 $\mu$ s.

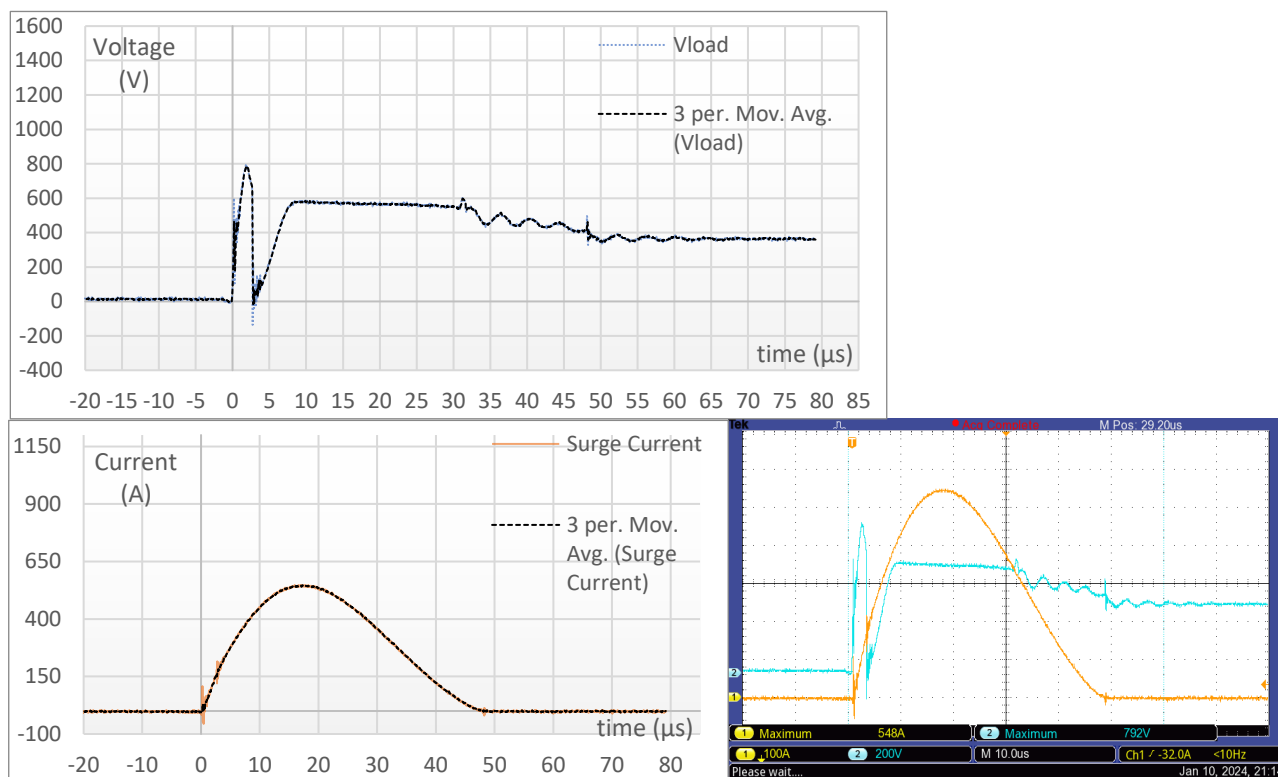
Σχήμα 7.73: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



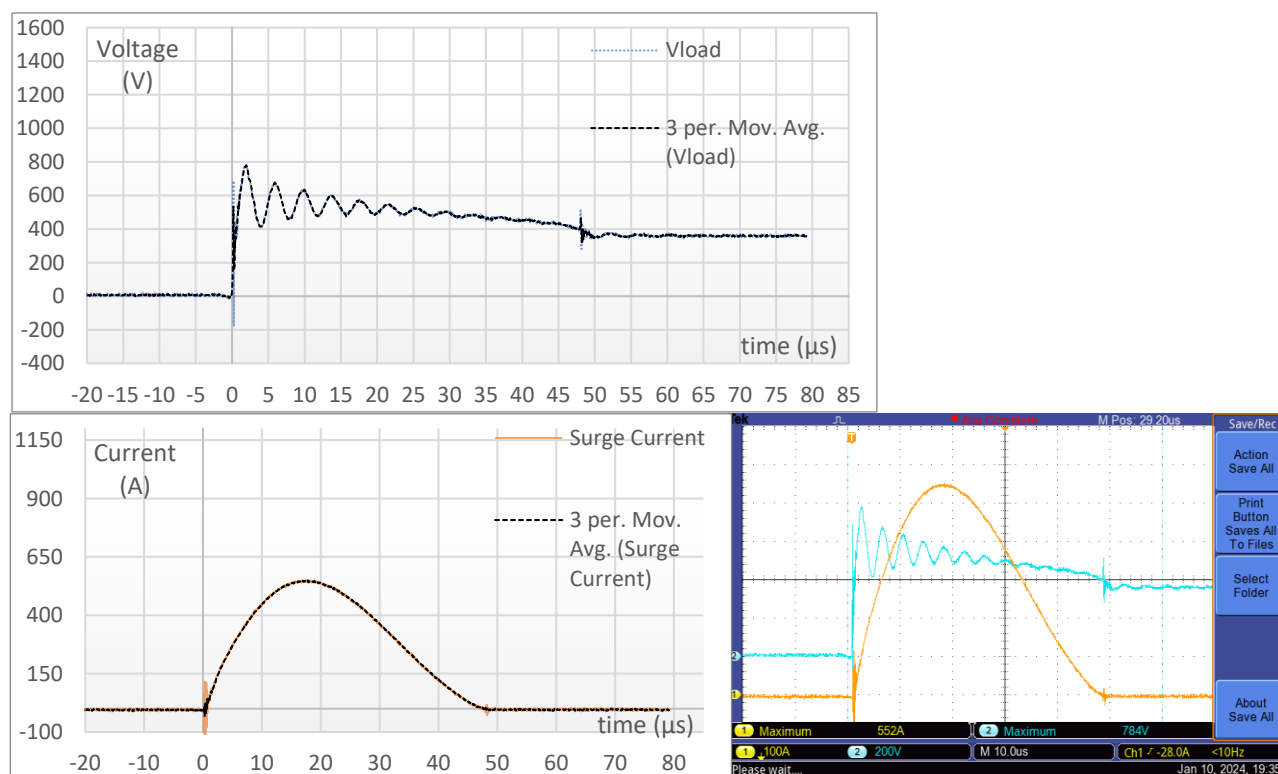
Σχήμα 7.74: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 1800A.



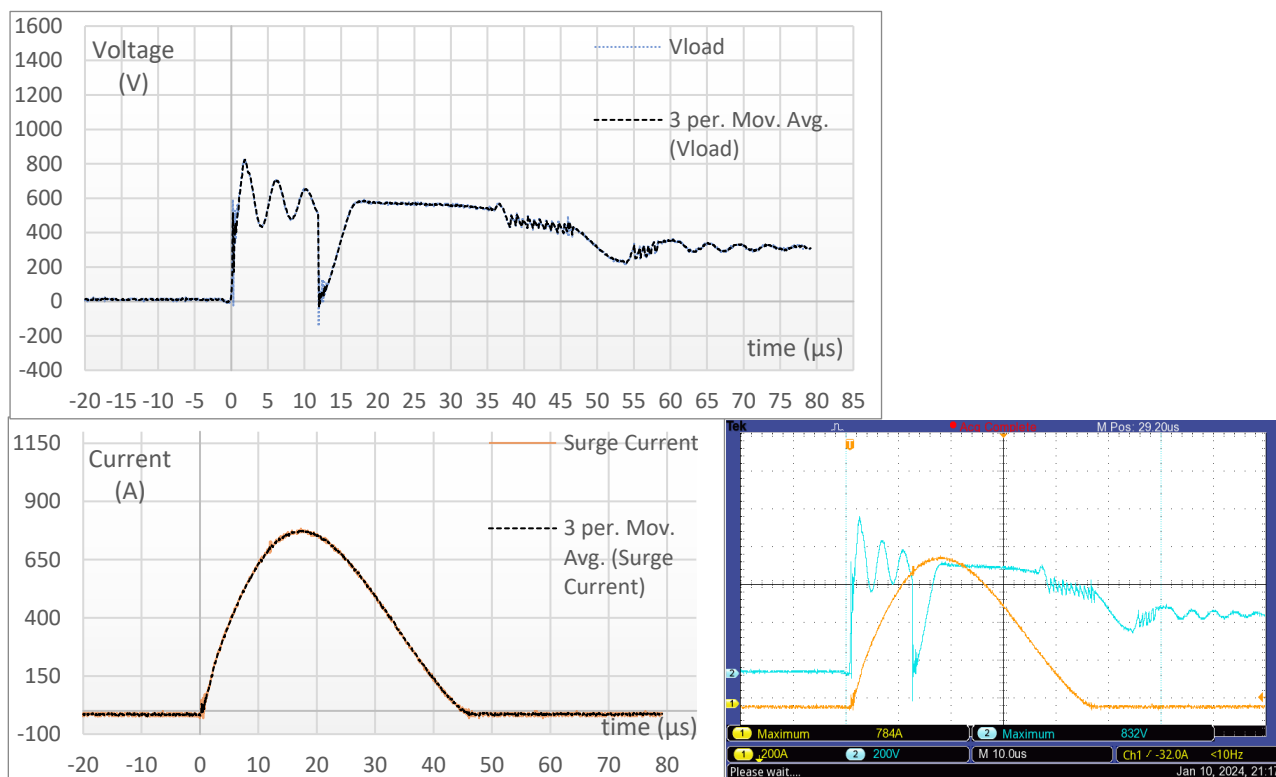
Σχήμα 7.75: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



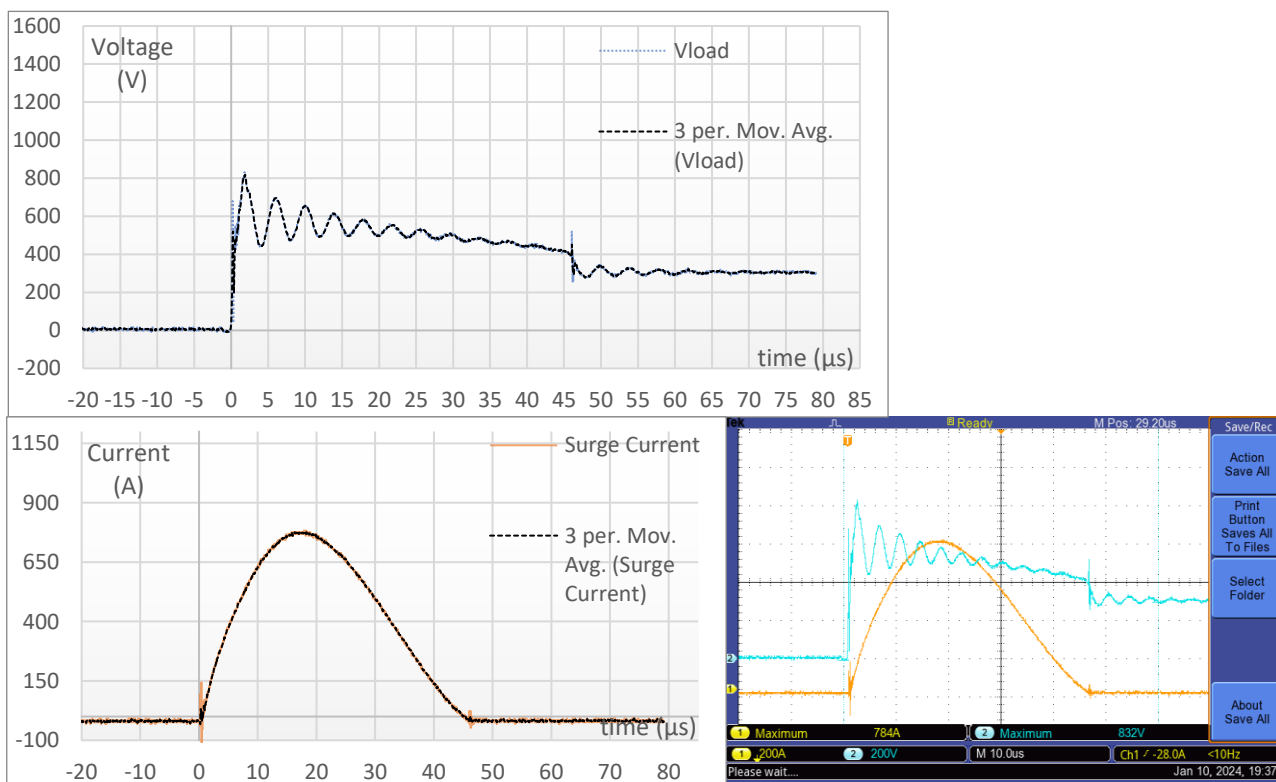
Σχήμα 7.76: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2200A.



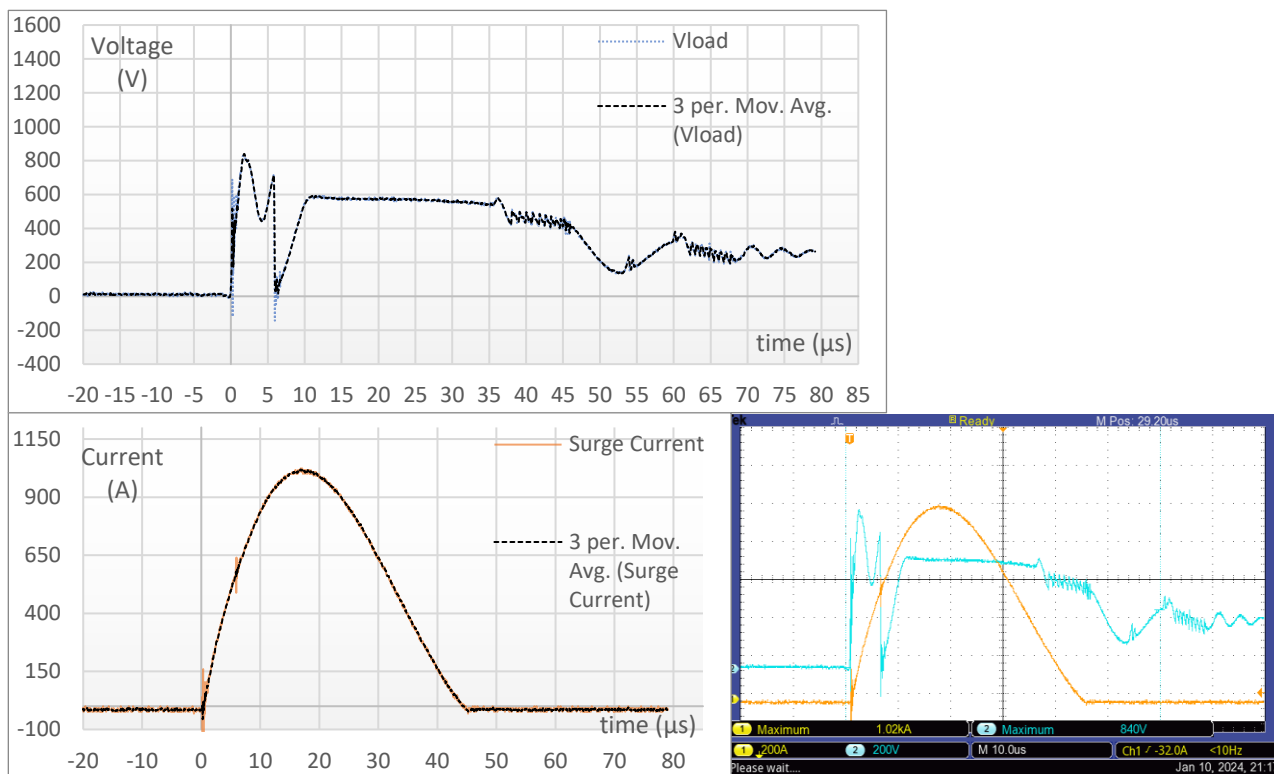
Σχήμα 7.77: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



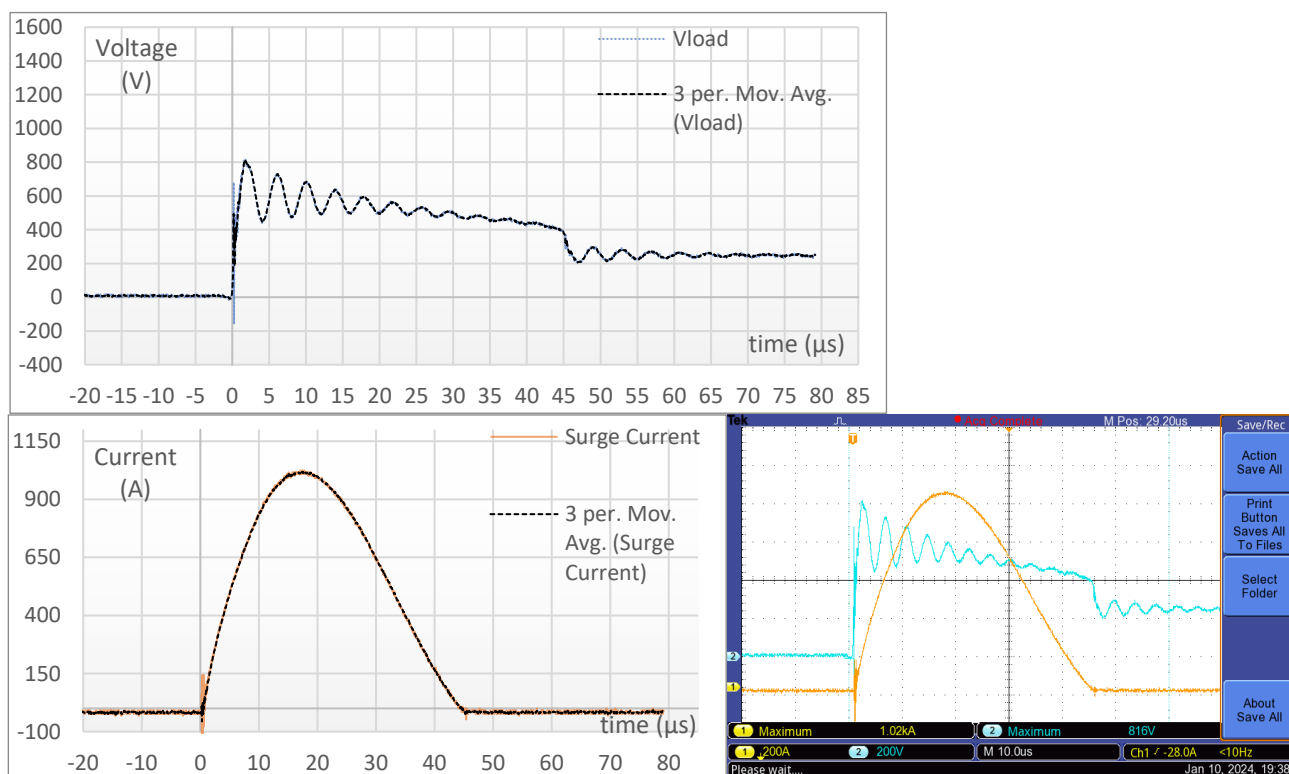
Σχήμα 7.78: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 2600A.



Σχήμα 7.79: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.

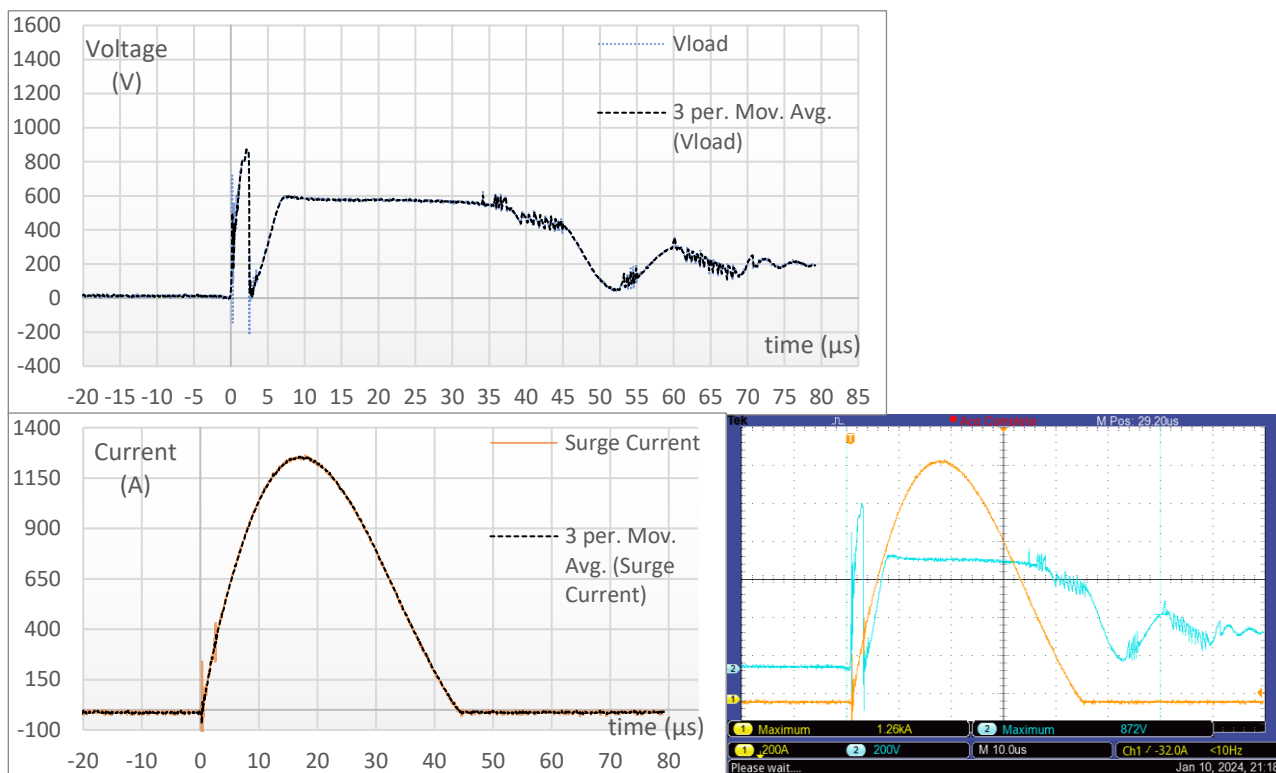


Σχήμα 7.80: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3000A.

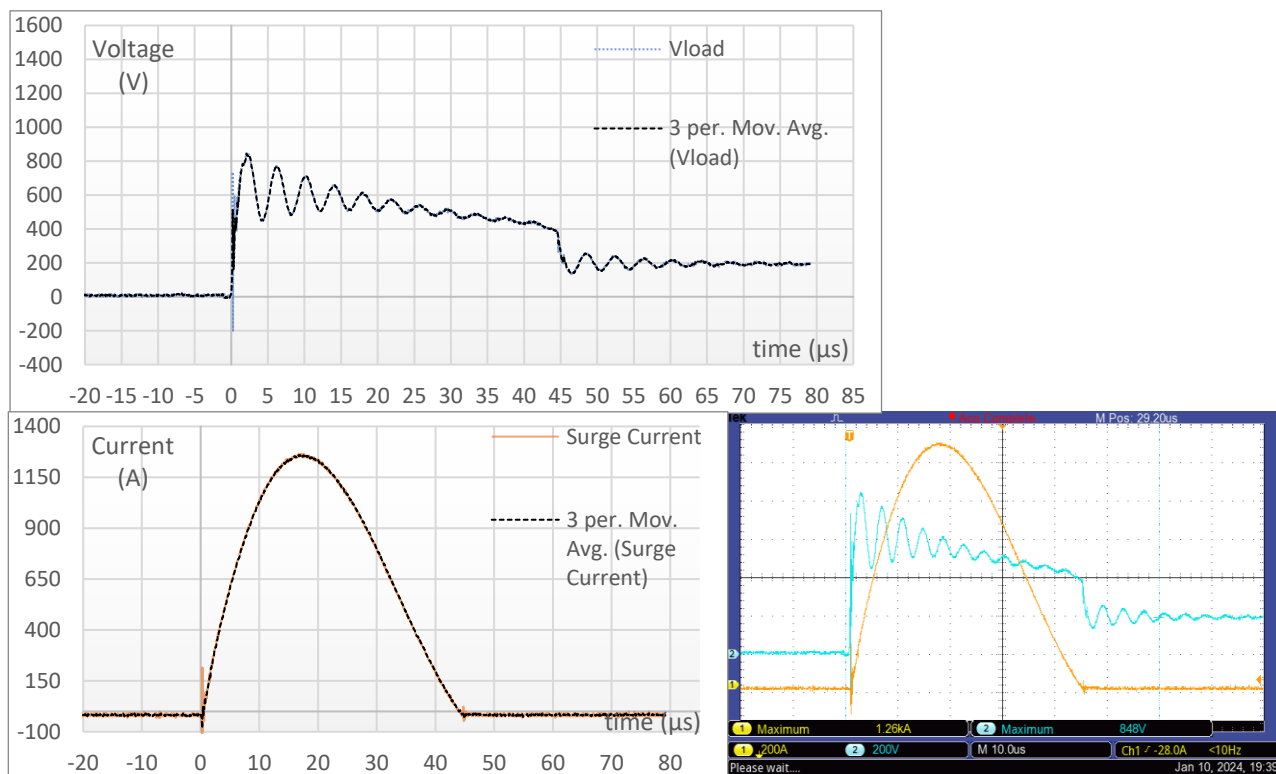




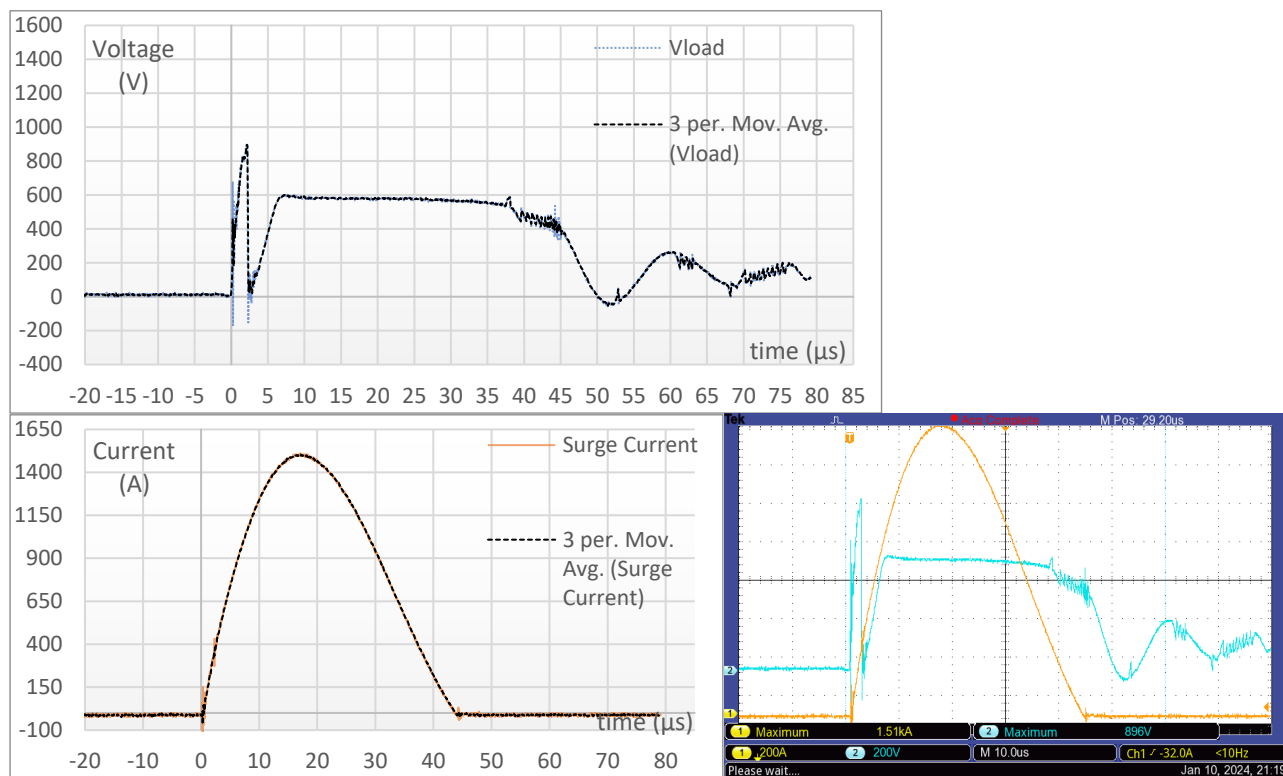
Σχήμα 7.81: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



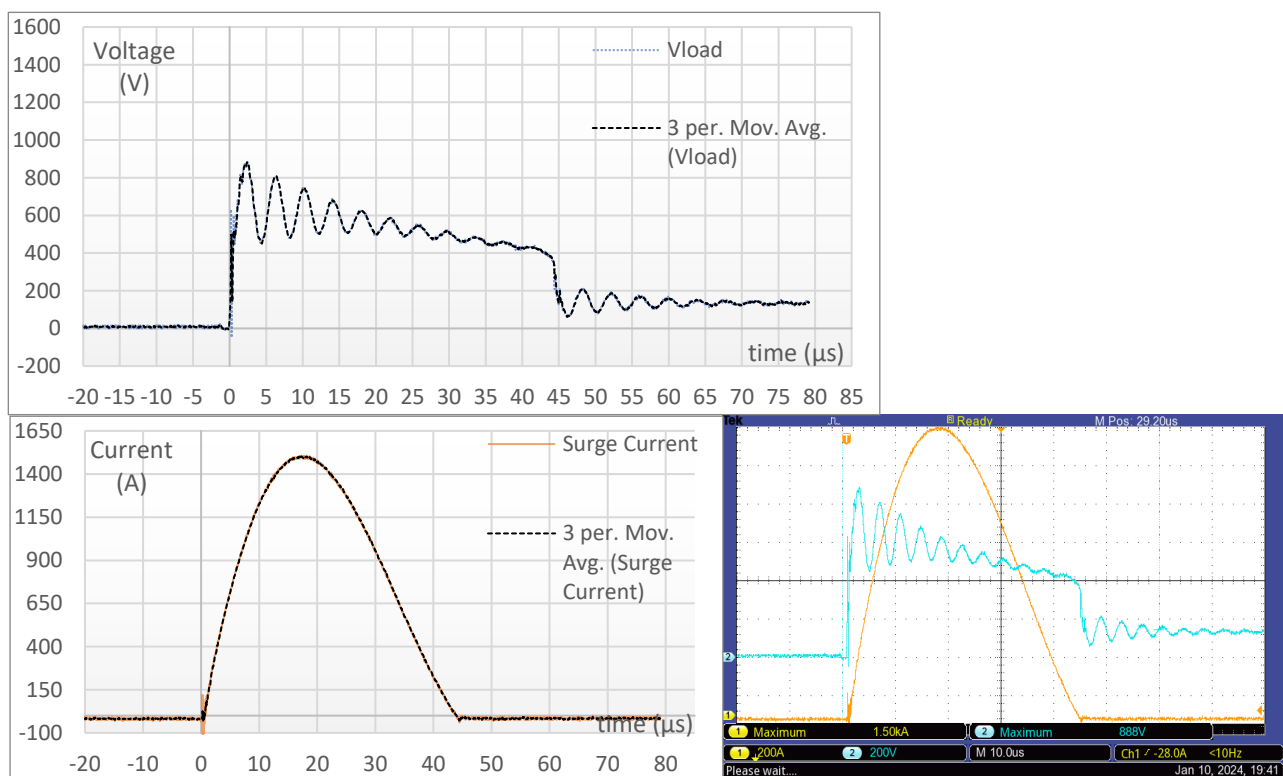
Σχήμα 7.82: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3400A.



Σχήμα 7.83: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



Σχήμα 7.84: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.



## Παρατηρήσεις

1. Αρχικά, παρατηρούμε πως με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης στα 100m, οι κυματομορφές της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο, με διάταξη προστασίας μόνο με T1, εμφανίζουν μία ισχυρή ταλάντωση που διαρκεί έως τη σβέση της κρούσης, δηλαδή έως τα 50μs του φαινομένου και λαμβάνει μέγιστη τιμή έως 900V. Η ταλάντωση γίνεται γύρω από τα 600V. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] που αναφέρει ότι «εάν το μήκος του κυκλώματος μεταξύ του SPD και του εξοπλισμού είναι πολύ μεγάλος, η διάδοση των κυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο ταλάντωσης».
2. Για την διάταξη προστασίας T1+T2 παρατηρούμε αρκετά διαφορετικές κυματομορφές τάσης στο υπό μελέτη φορτίο, σε σχέση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων μικρότερων μηκών καλωδίωσης. Στα πρώτα μs της κρούσης παρατηρούμε μία ταλάντωση, έπειτα μία βύθιση τάσης, ακολούθως μία περίοδο σταθερής παραμένουσας τάσης στα 600V και στο τέλος σβέση του φαινομένου με διάφορες ταλαντώσεις και παράσιτα στην κυματομορφή. Αυτή η ιδιαίτερη συμπεριφορά αποδίδεται στην συνεργασία των δύο απαγωγών προστασίας που λόγω του μεγάλου μήκους καλωδίωσης έχουν μια μεγάλη αυτεπαγωγή μεταξύ τους και μεγαλύτερο χρόνο όδευσης.
3. Αξίζει να σημειώσουμε, επίσης, πως για έγχυση ρεύματος βραχυκύκλωσης 1.8kA η μέτρηση με προστασία T1+T2 παρατηρούνται ταλαντώσεις. Αυτό οφείλεται σε μη ενεργοποίηση του κατάντη απαγωγέα υπερτάσεων.

### 7.3 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Καταρχάς, σχετικά με τον κρουστικό ρεύμα έγχυσης παρατηρείται σε όλες τις μετρήσεις μία ταλάντωση στην αρχή της κρούσης και ορισμένες φορές μία ταλάντωση στη σβέση της κρούσης. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην φόρτιση και εκφόρτιση των παράσιτων χωρητικοτήτων και αυτεπαγωγών της πειραματικής διάταξης κατά την μεταβατική κατάσταση της έγχυσης, όπου και οι πυκνωτές της γεννήτριας δεν εκφορτίζουν συγχρονισμένα.

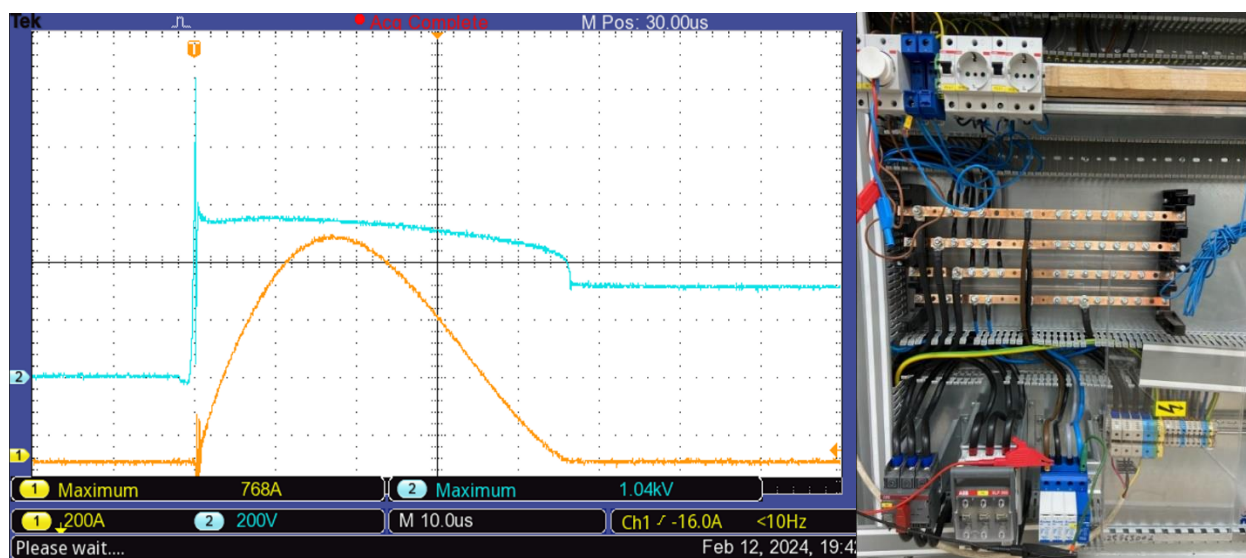
Επιπλέον, παρατηρούμε μία απότομη αιχμή της κυματομορφής της τάσης στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο στην αρχή της κρούσης. Αυτό οφείλεται στον χρόνο απόκρισης του σωλήνα εκκένωσης αερίου (GDT) των απαγωγών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται. Το “spike” αυτό συμβαίνει στα πρώτα 25-100ns και σηματοδοτεί την ενεργοποίηση του σωλήνα εκκένωσης αερίου του SPD κλάσης T1 και στη συνέχεια, την ενεργοποίηση του βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων που συνδέεται σε σειρά με το GDT.

Παρά όλα αυτά, είναι φανερό από τις μετρήσεις που έγιναν πως με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης, για την διάταξη προστασίας μόνο με T1, η εμφανιζόμενη τάση στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο παρουσιάζει ταλαντώσεις. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] 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». Είναι αντιληπτό ότι οι ταλαντώσεις που βλέπουμε δεν οφείλονται στον θόρυβο που εντάσσει η χαρακτηριστική του εγχυόμενου κρουστικού ρεύματος και τα καλώδια σύνδεσης των SPD των πρώτων 1.5 – 2 μs, αλλά λόγω της διάδοσης της υπέρτασης. Μάλιστα η μέγιστη τιμή που εμφανίστηκε αγγίζει το 1kV, η οποία βέβαια δεν είναι ικανή να θέσει σε κίνδυνο ακόμα και μία ηλεκτρονική συσκευή (κατηγορία αντοχής υπερτάσεων I). Στο δεύτερο πείραμα της εν λόγω εργασίας το εγχυόμενο ρεύμα λαμβάνει υψηλότερες τιμές, με σκοπό την εμφάνιση τάσης στο υπό μελέτη φορτίο μεγαλύτερη από 1.5kV.

Επιπλέον, στην αρχή της κρούσης (το πρώτο 1.5μs) όπου το  $di/dt$  είναι μεγάλο και το ρεύμα εμφανίζει ορισμένες ταλαντώσεις λόγω των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, η τάση στα άκρα του πρώτου SPD T1 εμφανίζει μία ταλάντωση που ίσως οφείλεται στην αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσής του (μικρότερα από 0.5m). Αυτός ο θόρυβος μεταφέρεται και στην τάση στο υπό μελέτη φορτίο στο πρώτο 1.5μs.

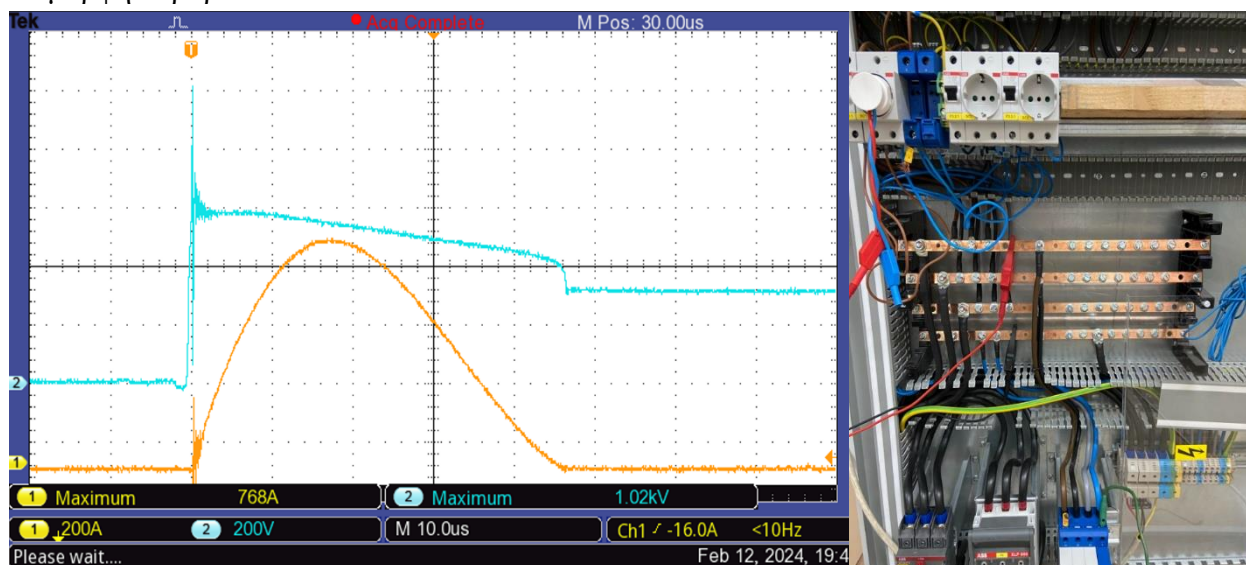
Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχει ένα χείριστο μήκος καλωδίωσης μεταξύ του SPD και του υπό προστασία φορτίου και ότι δεν ισχύει πως όσο πιο μεγάλο το μήκος τόσο χειρότερα προστατεύεται ένα φορτίο. Το χειρότερο μήκος καλωδίωσης στην εγκατάσταση χαμηλής τάσης που εξετάσαμε παρατηρήθηκε να είναι κοντά στα 7m. Στο μήκος καλωδίωσης από το SPD T1 στο υπό μελέτη φορτίο, ωστόσο, θα πρέπει να προσθέσουμε και το επιπλέον μήκος λόγω των καλωδίωσεων των ασφαλειών και διακοπτικών στοιχείων του πίνακα [26]

Ακολουθεί μία απεικόνιση (Εικόνα 7.1) της εμφανιζόμενης τάσης στα άκρα του SPD T1 μεταξύ L1 – N (μπλε χρώμα) και το ρεύμα έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 2.6kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 6.5m. Παρατηρούμε αρχικά το spike που κάνει η τάση του SPD T1 που οφείλεται στην ενεργοποίηση του GDT και στην συνέχεια την λειτουργία του MOV που σταθεροποιεί σχετικά την τάση.



Εικόνα 7.1: Η εμφανιζόμενη τάση στα άκρα του SPD T1 μεταξύ L1 – N (μπλε χρώμα) στην είσοδο της εγκατάστασης και το ρεύμα έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 2.6 kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 6.5m

Παράλληλα, παραθέτουμε παρακάτω μία απεικόνιση (Εικόνα 7.2) της εμφανιζόμενης τάσης στους ζυγούς L1 – N (μπλε χρώμα) στην είσοδο της εγκατάστασης και το ρεύμα έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 2.6kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 6.5m. Παρατηρούμε αρχικά το spike που κάνει η τάση του SPD T1 που οφείλεται στην ενεργοποίηση του GDT και στην συνέχεια την λειτουργία του MOV που σταθεροποιεί σχετικά την τάση και την επίδραση των καλωδιώσεων του SPD T1 σε μορφή θορύβου.



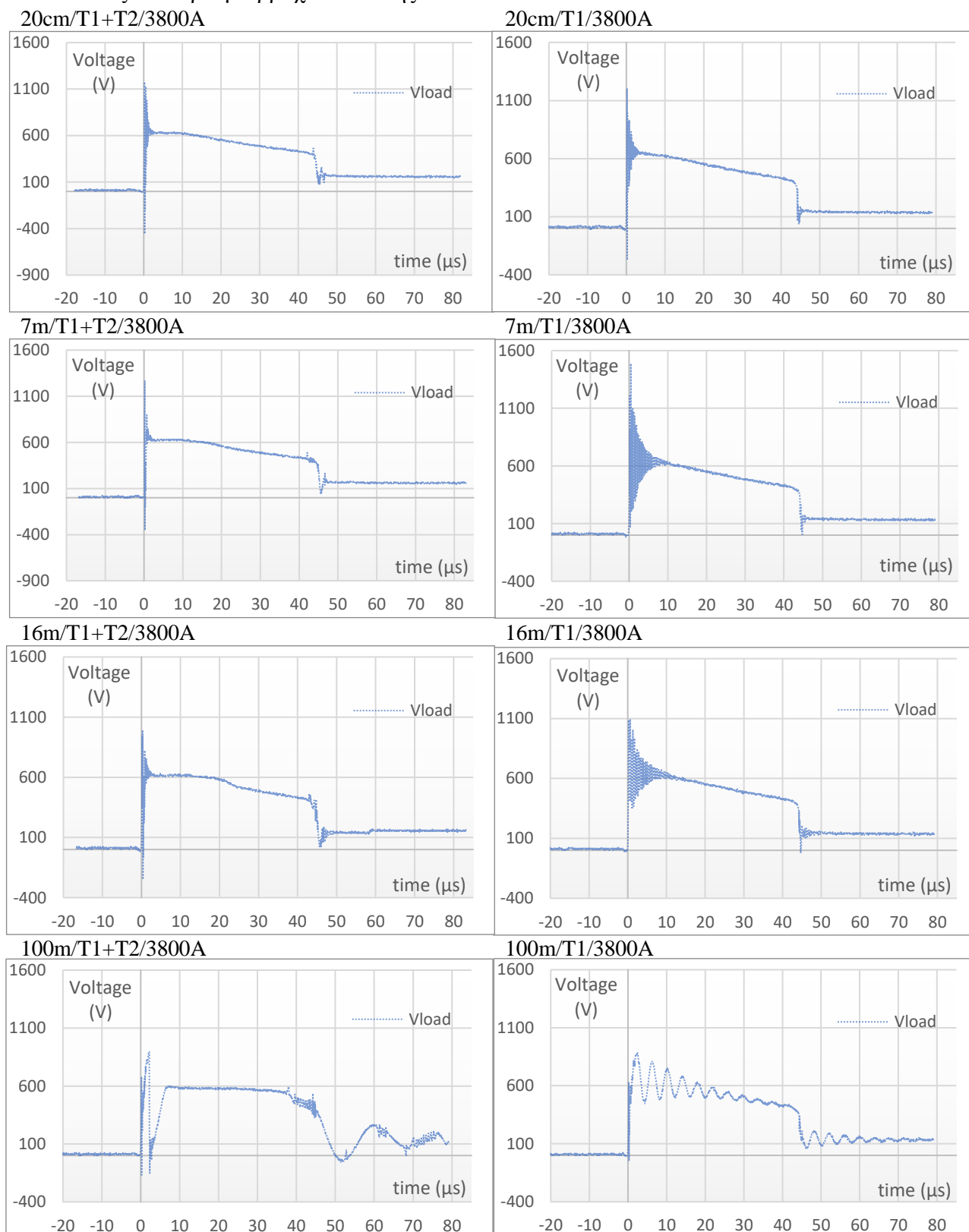
Εικόνα 7.2: Η εμφανιζόμενη τάση στους ζυγούς L1 – N (μπλε χρώμα) στην είσοδο της εγκατάστασης και το ρεύμα έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 2.6 kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 6.5m

Συμπερασματικά, 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 φαινόμενα όδευσης. Οι διάφορες ανακλάσεις που συμβαίνουν παρατηρούνται υπό μορφή ταλαντώσεων στο υπό προστασία φορτίο. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] που αναφέρει ότι «εάν το μήκος του κυκλώματος μεταξύ του SPD και του εξοπλισμού είναι πολύ μεγάλος, η διάδοση των κυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο ταλάντωσης». Για την αποφυγή των ταλαντώσεων και καλύτερη προστασία από υπερτάσεις για καλωδιώσεις μεγάλου μήκους ενδείκνυται η προσθήκη δεύτερου SPD, αν και για έγχυση κρουστικού ρεύματος χαμηλής μέγιστης τιμής βραχυκύκλωσης, το κατάντη SPD τύπου T2 μερικές φορές δεν ενεργοποιήθηκε.

Τέλος, στις πειραματικές μετρήσεις που λάβαμε υπεισέρχονται και ορισμένα σφάλματα, με τα κυριότερα να είναι σφάλματα οργάνων, αν και διακριβωμένα, σφάλματα λόγω μη ιδανικών συνθηκών στο εργαστήριο υψηλών τάσεων και διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την διεξαγωγή των κρούσεων. Τέλος, παρουσιάζεται μία κρούση για κάθε συνδυασμό ρεύματος έγχυσης, διάταξη προστασίας και μήκος καλωδίου, διευρύνοντας έτσι την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων.

Ακολουθεί ένα ενδεικτικό σχήμα (Σχήμα 7.85) με την εμφανιζόμενη τάση που καταγράφηκε στην περίπτωση έγχυσης 3.8kA ρεύματος βραχυκύκλωσης για τα μήκη καλωδίου 20cm, 7m, 16m, 100m. Στα αριστερά με προστασία T1+T2 και στα δεξιά μόνο T1.

Σχήμα 7.85: Για καλώδιο 20cm, 7m, 16m, 100m, με προστασία T1+T2 στα αριστερά και μόνο T1 στα δεξιά και ρεύμα βραχυκύκλωσης 3800A.







## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>

# Πειραματικό Μέρος: Αποτελέσματα Δεύτερου Πειράματος

### 8.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο πείραμα εγχέουμε κρουστικό ρεύμα 8/20  $\mu\text{s}$ , με την μέγιστη τιμή βραχυκυκλώματος να παίρνει τιμές 7kA και 9kA, εξετάζοντας 7 διαφορετικά μήκη καλωδίωσης μεταξύ του SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα και του υπό μελέτη φορτίου, και δύο διαφορετικούς τρόπους προστασίας έναντι υπερτάσεων. Τα διαφορετικά μήκη καλωδίωσης είναι 20cm, 6.5m, 7m, 9m, 16m 22.5m, 100m, ενώ οι δύο τρόποι προστασίας έναντι υπερτάσεων είναι η χρήση ενός SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα ή ενός SPD κλάσης T1 στην είσοδο του πίνακα σε συνδυασμό με ένα SPD κλάσης T2 παράλληλο στο υπό μελέτη φορτίο. Στόχος του εν λόγω πειράματος είναι ο εντοπισμός τιμών τάσης στο υπό μελέτη φορτίο μεγαλύτερες του 1.5kV, κατά την εμφάνιση ταλαντώσεων με την αύξηση του μήκους καλωδίωσης.

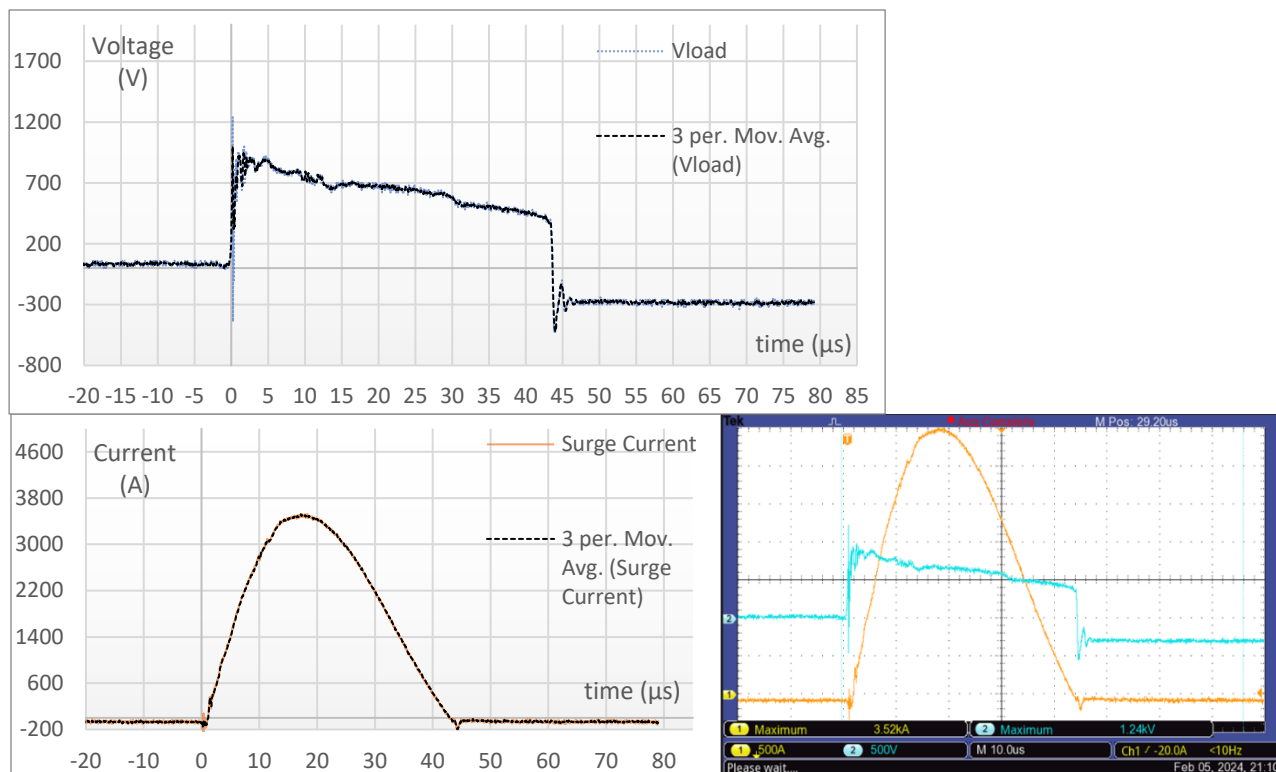
### 8.2 Παρουσίαση Μετρήσεων

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων αποθηκεύονται σε εξωτερικό USB Flash Drive από τον παλμογράφο σε μορφή Microsoft Excel και εικόνας. Η εικόνα απεικονίζει το παλμογράφημα που εμφανίζει ο παλμογράφος, ενώ σε μορφή Microsoft Excel λαμβάνουμε τις 2500 λήψεις που έχει αποθηκεύσει ο παλμογράφος, για κάθε κανάλι μέτρησης. Αφού επεξεργάστηκαν οι μετρήσεις παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο.

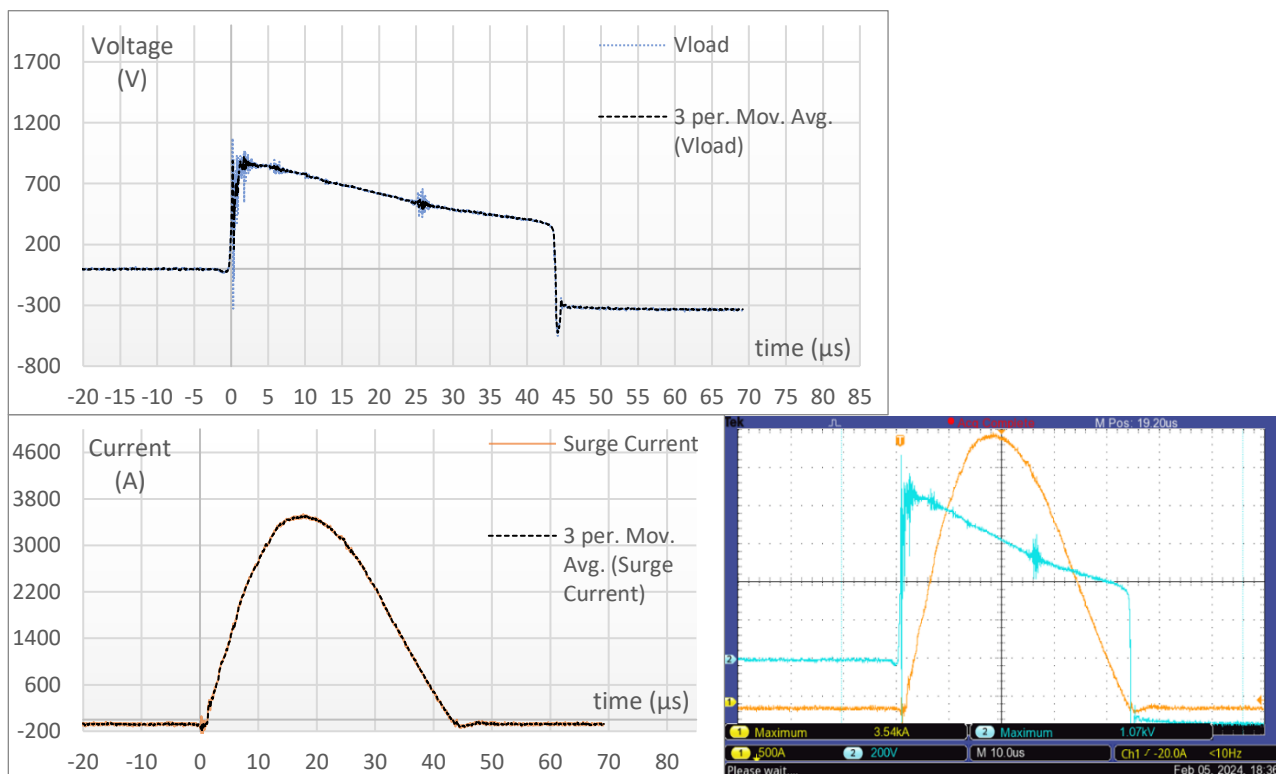
Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μέτρηση παρατίθεται ένα σχήμα που αποτελείται από την τάση που εμφανίζεται στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο (κανάλι 2 παλμογράφου), με χρώμα μπλε, και το κρουστικό ρεύμα έγχυσης (κανάλι 1 παλμογράφου), με χρώμα πορτοκαλί, όπως παράχθηκαν από τα 2500 σημεία που αποθήκευσε ο παλμογράφος για κάθε κανάλι μέτρησης σε μορφή Microsoft Excel. Παράλληλα, παρατίθεται στο ίδιο σχήμα και το παλμογράφημα της ίδιας μέτρησης. Τέλος, παράλληλα με της κυματομορφές τάσης και ρεύματος, όπως προκύπτουν από τα 2500 σημεία που αποθήκευσε ο παλμογράφος, παρατίθεται και μία εξομάλυνσή τους, με μαύρες κουκκίδες. Η εξομάλυνση αυτή προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου απλών κινητών μέσων όρων 3 σημείων. Αναλυτικότερα, κάθε σημείο του εξομαλυσμένου σήματος προκύπτει από τον μέσο όρο τριών σημείων γύρω από την ίδια χρονική στιγμή του αρχικού σήματος. Αυτό γίνεται για να μειωθεί ο θόρυβος και τυχόν αβέβαιες λήψεις του παλμογράφου και να αποτυπωθεί η κύρια συνιστώσα του μετρούμενου μεγέθους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εν λόγω μετρήσεις. Κάθε σχήμα αποτελεί διαφορετική περίπτωση μήκους καλωδίωσης, διάταξης προστασίας και ρεύματος βραχυκύκλωσης της γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων.

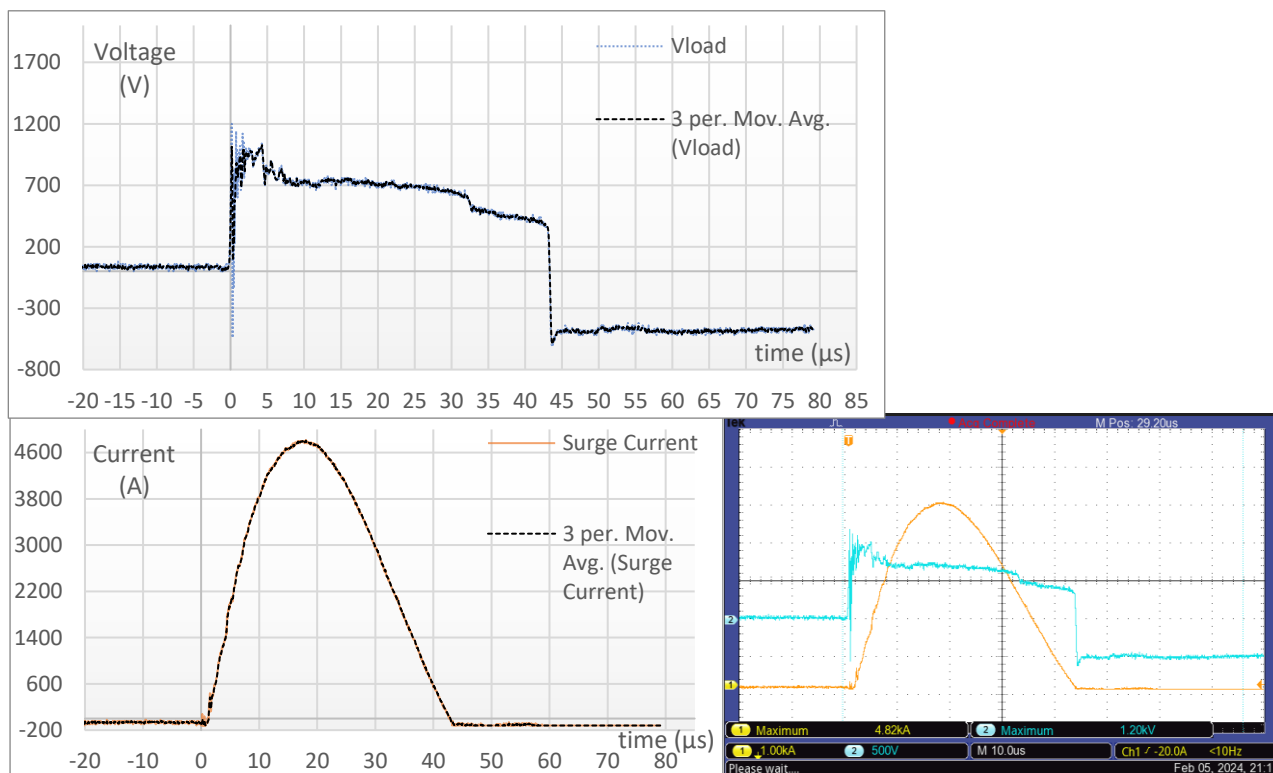
Σχήμα 8.1: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



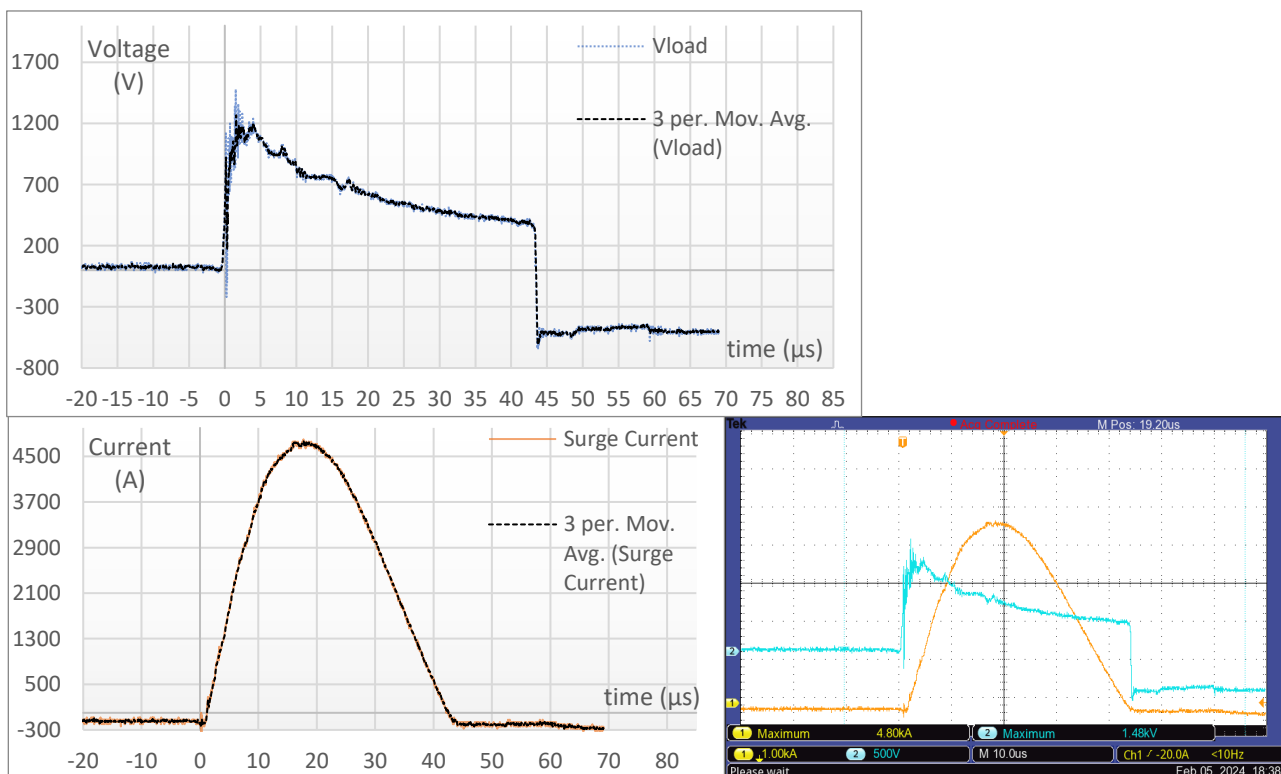
Σχήμα 8.2: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



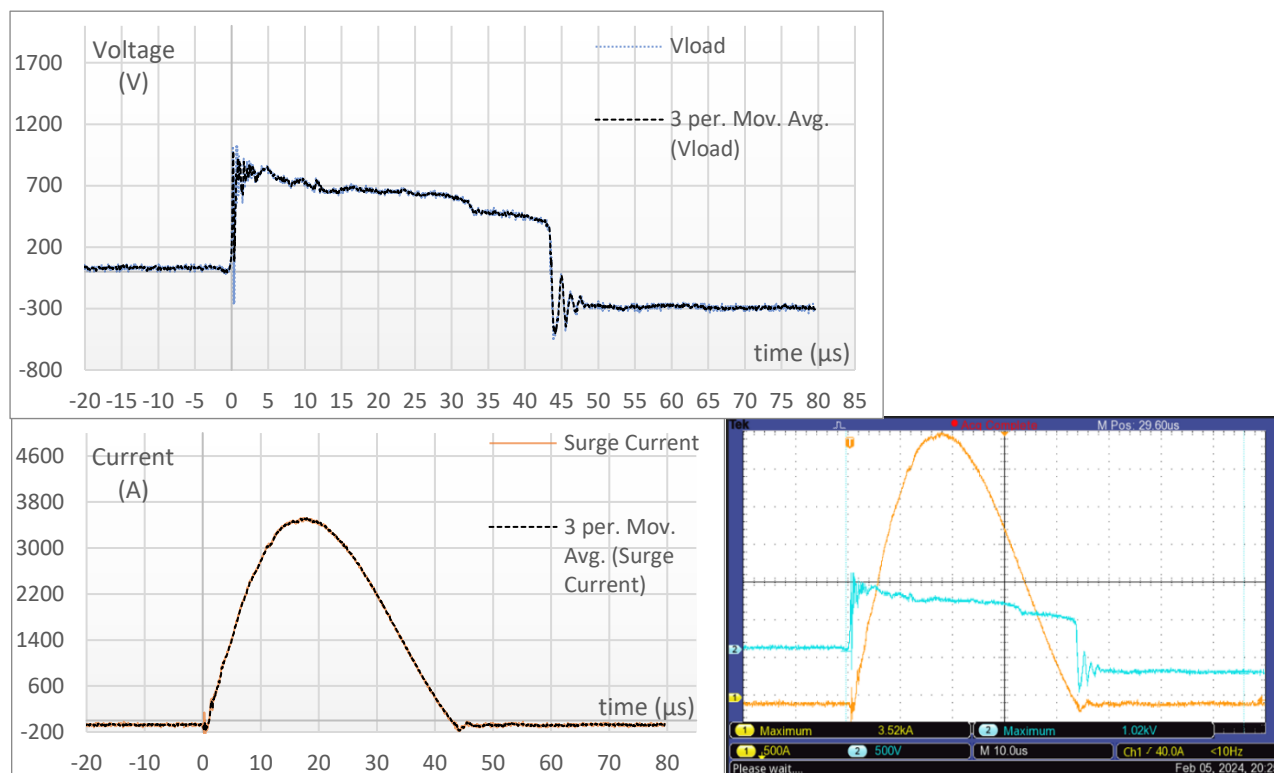
Σχήμα 8.3: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



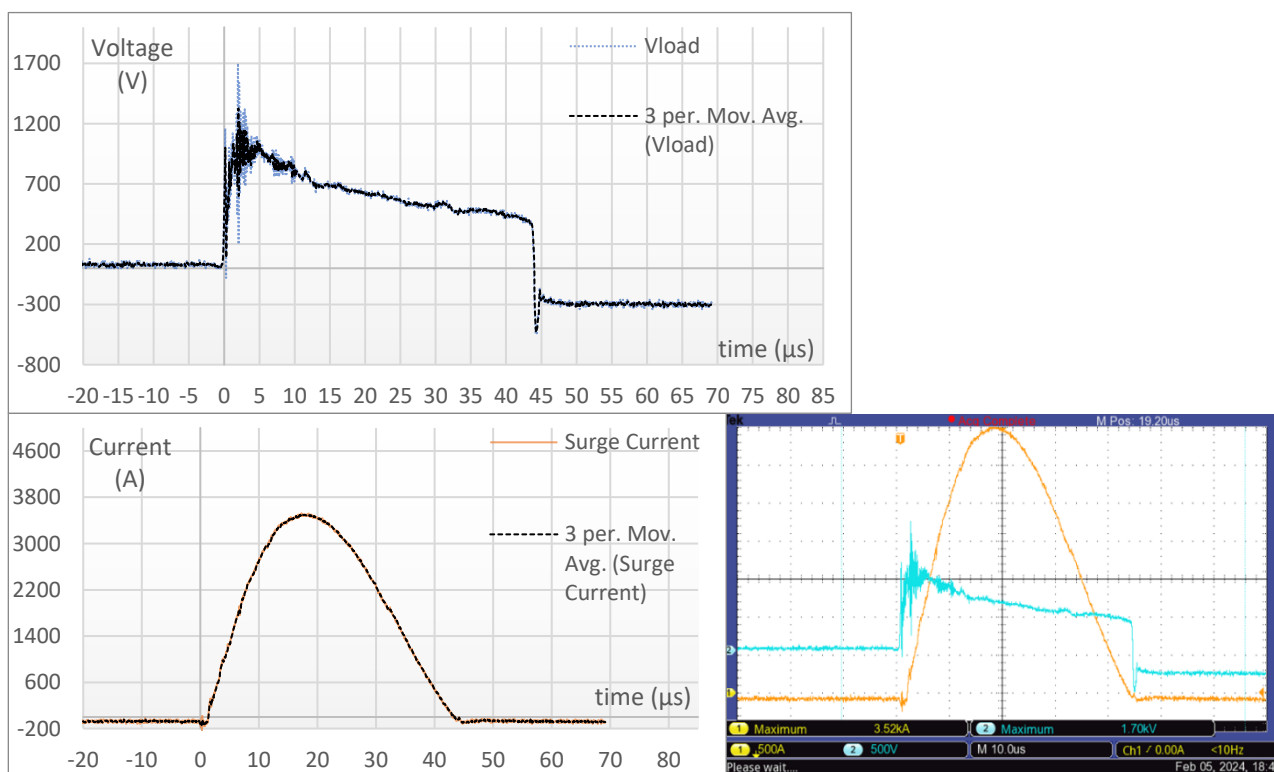
Σχήμα 8.4: Για καλώδιο 20cm, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



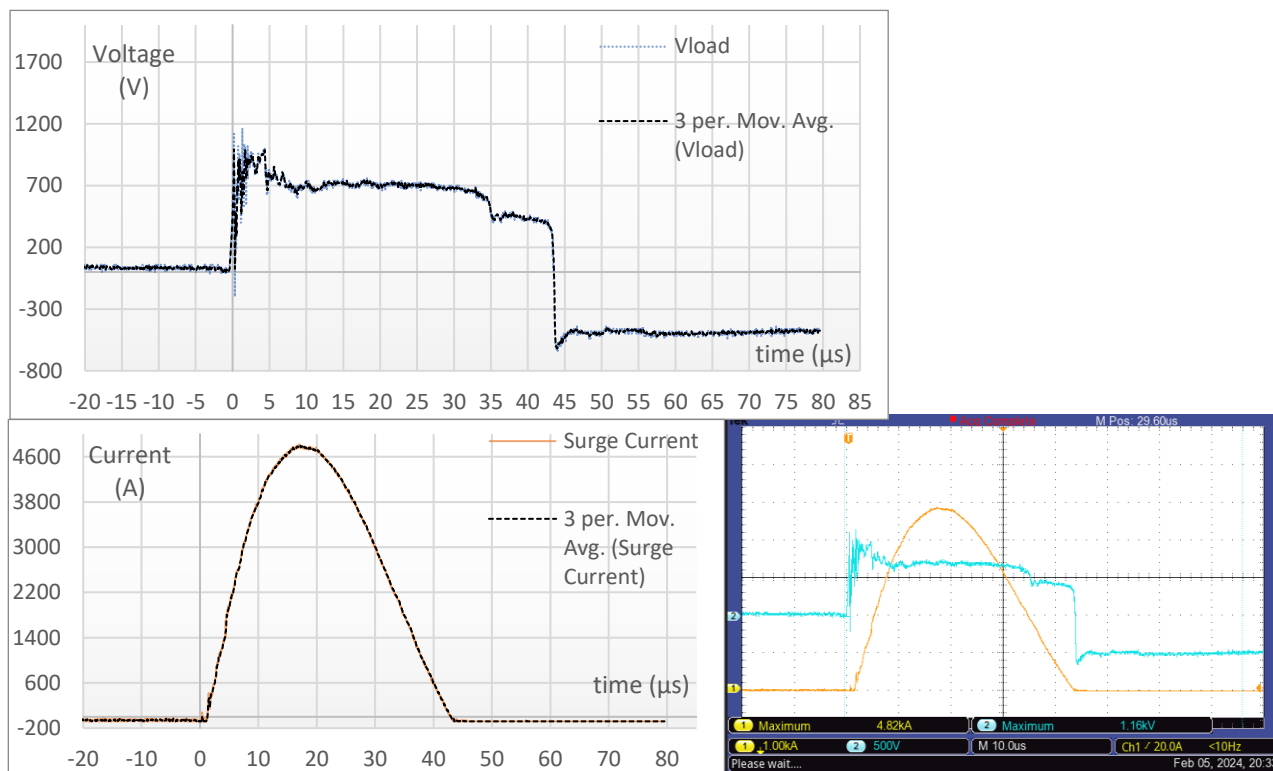
Σχήμα 8.5: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



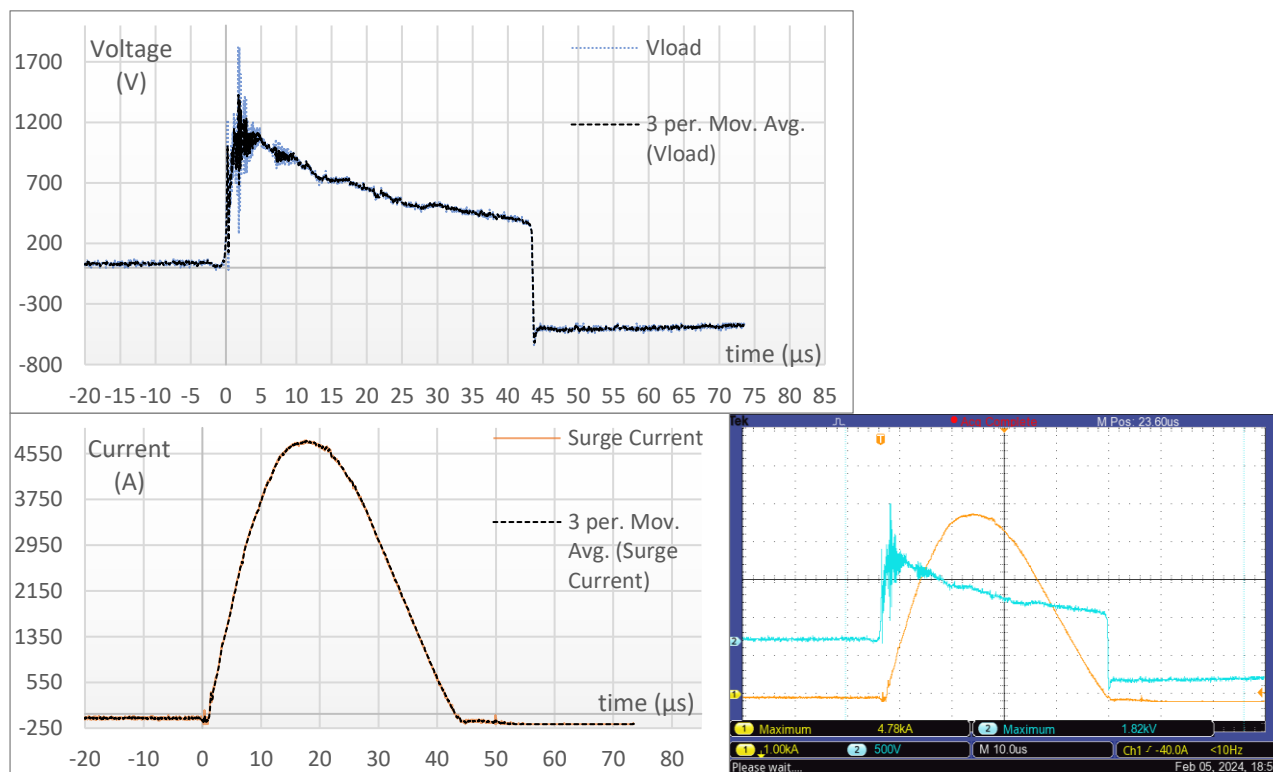
Σχήμα 8.6: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



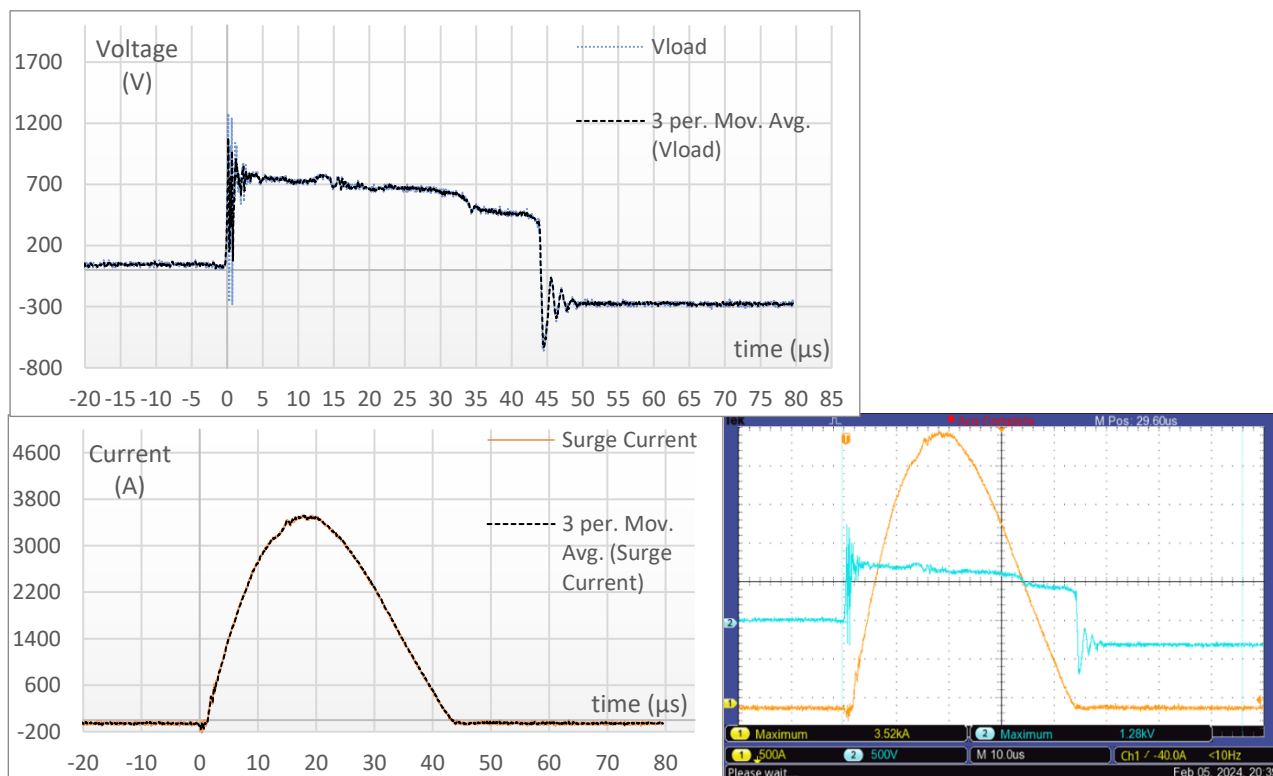
Σχήμα 8.7: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



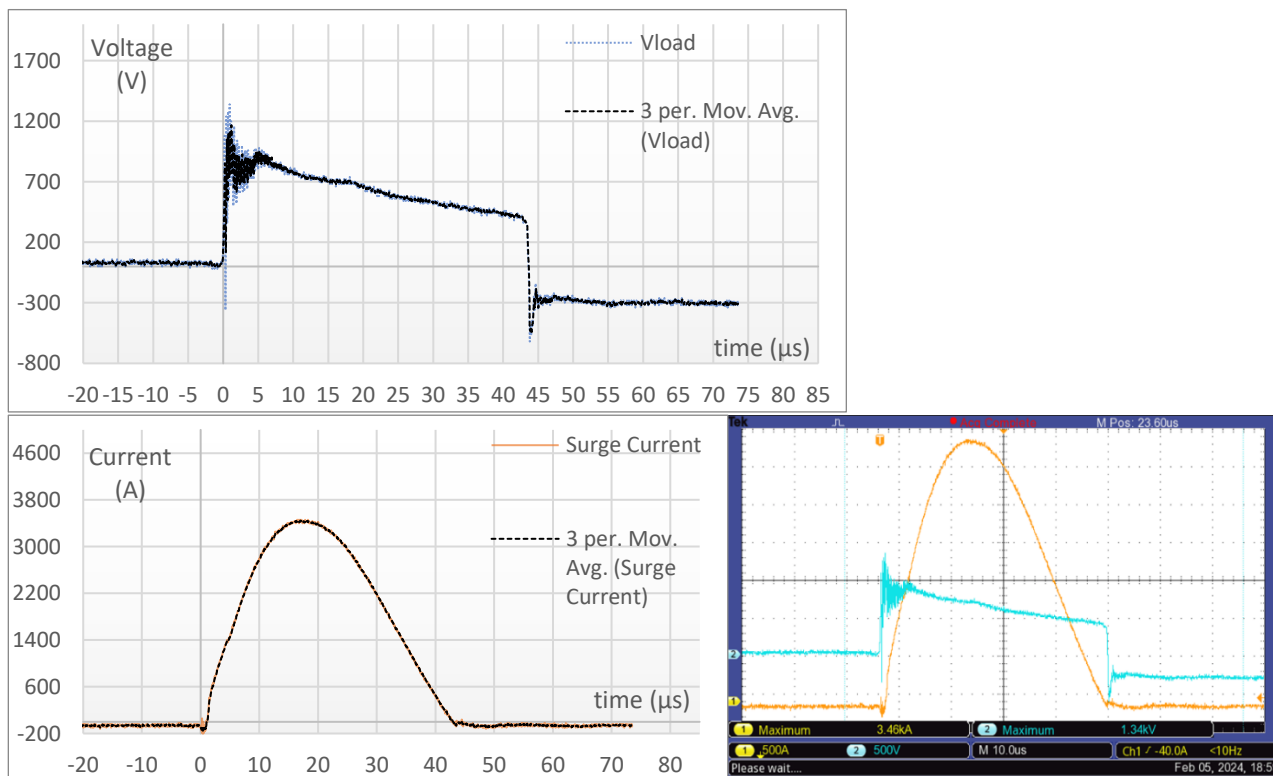
Σχήμα 8.8: Για καλώδιο 6.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



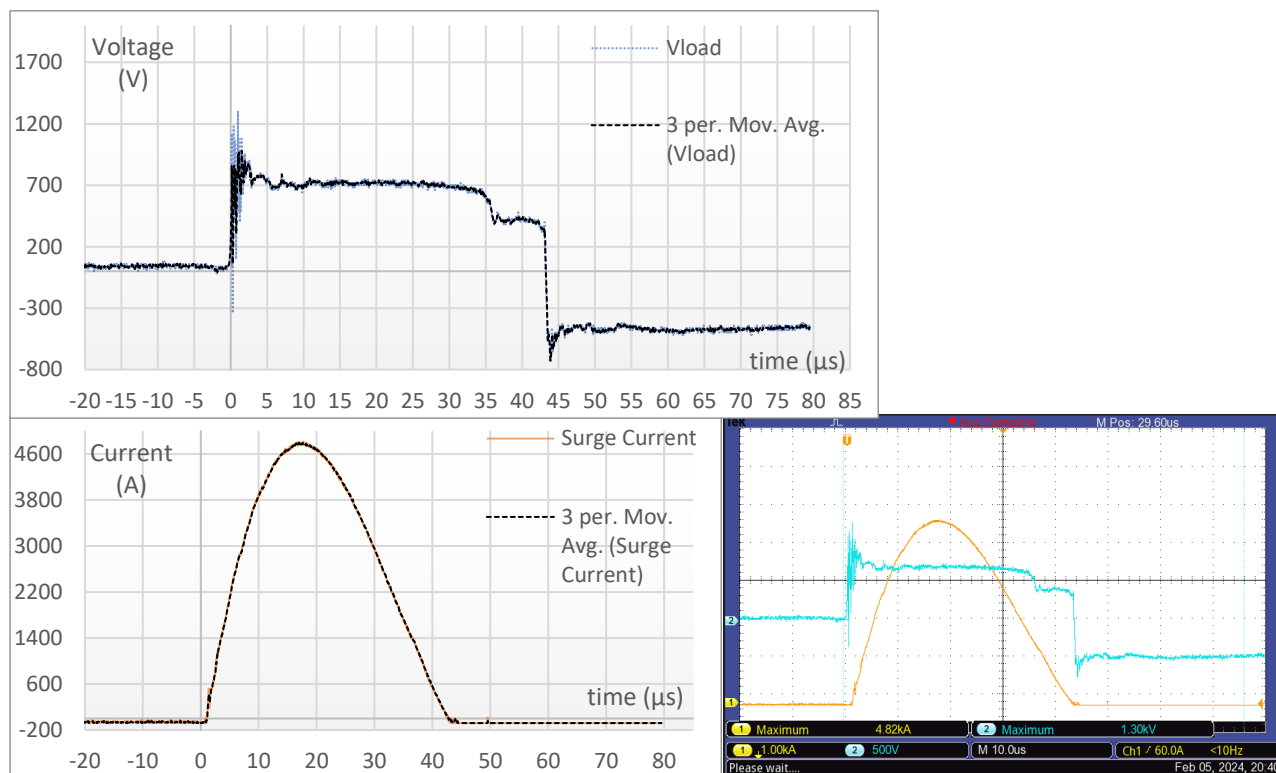
Σχήμα 8.9: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



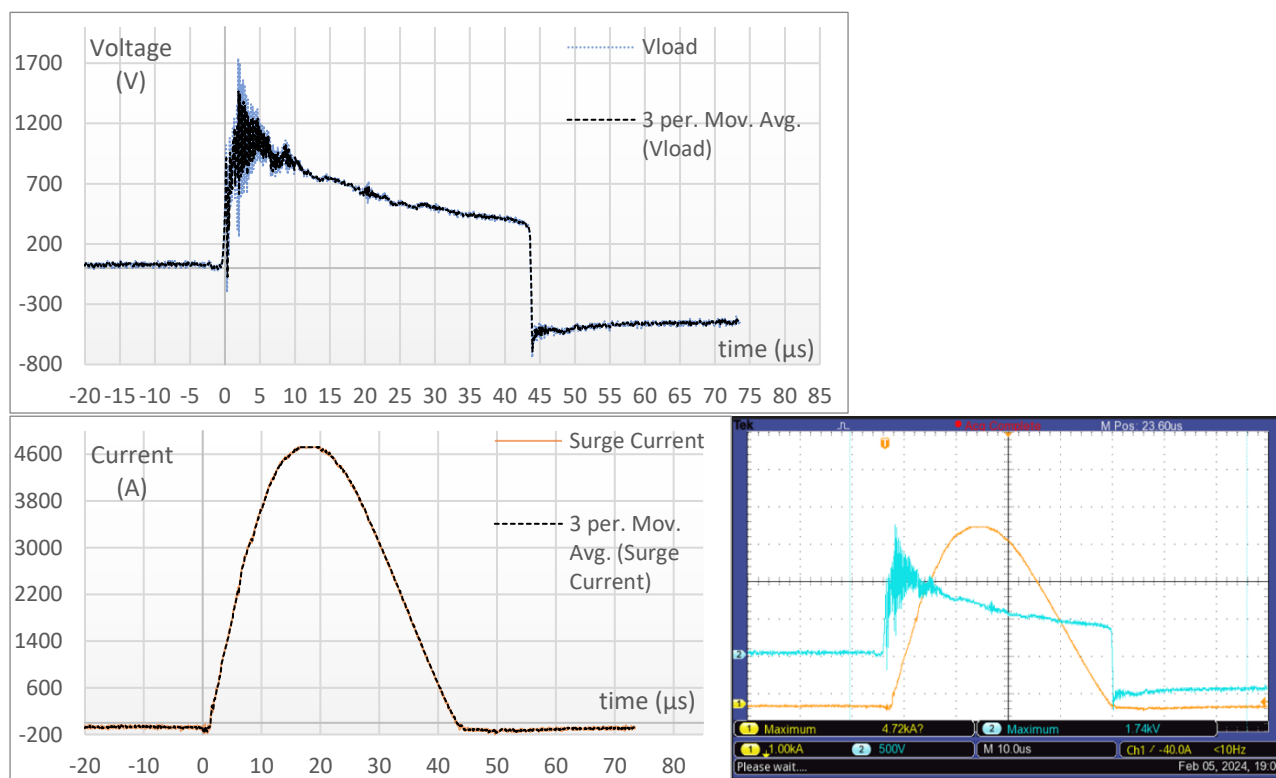
Σχήμα 8.10: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



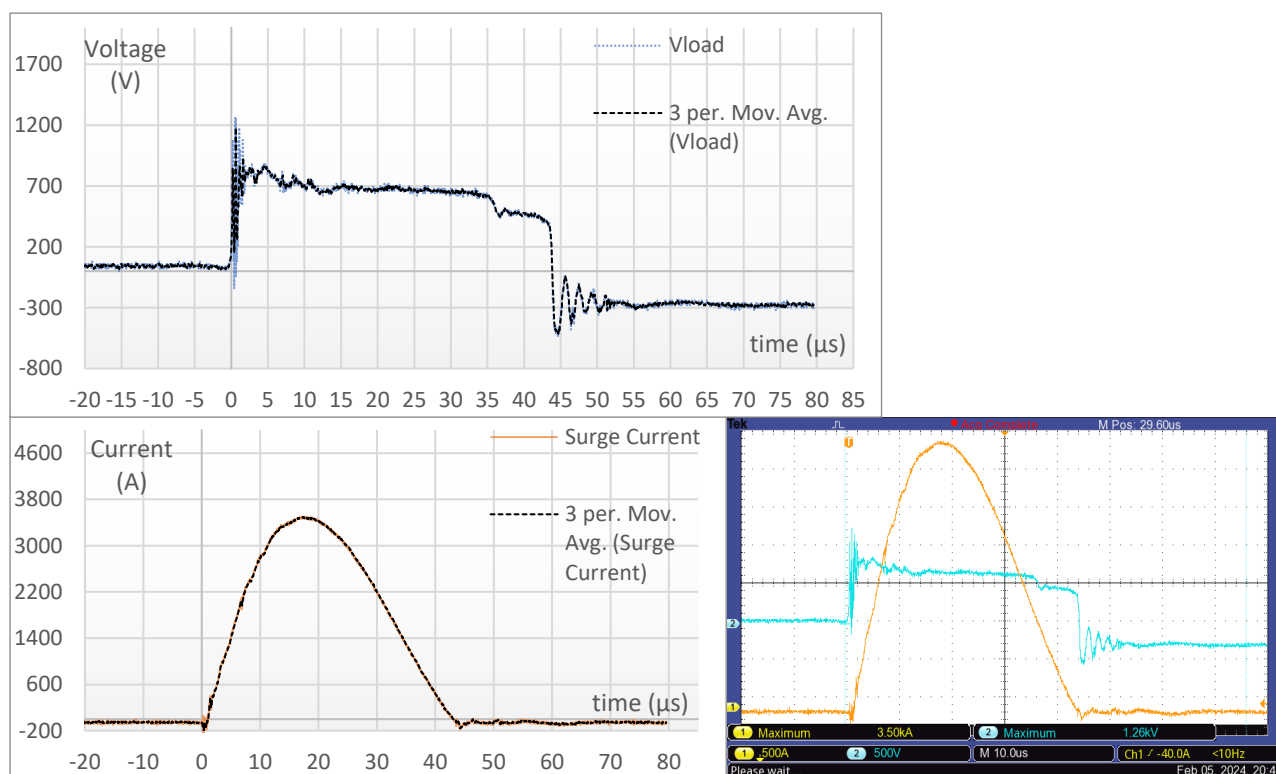
Σχήμα 8.11: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



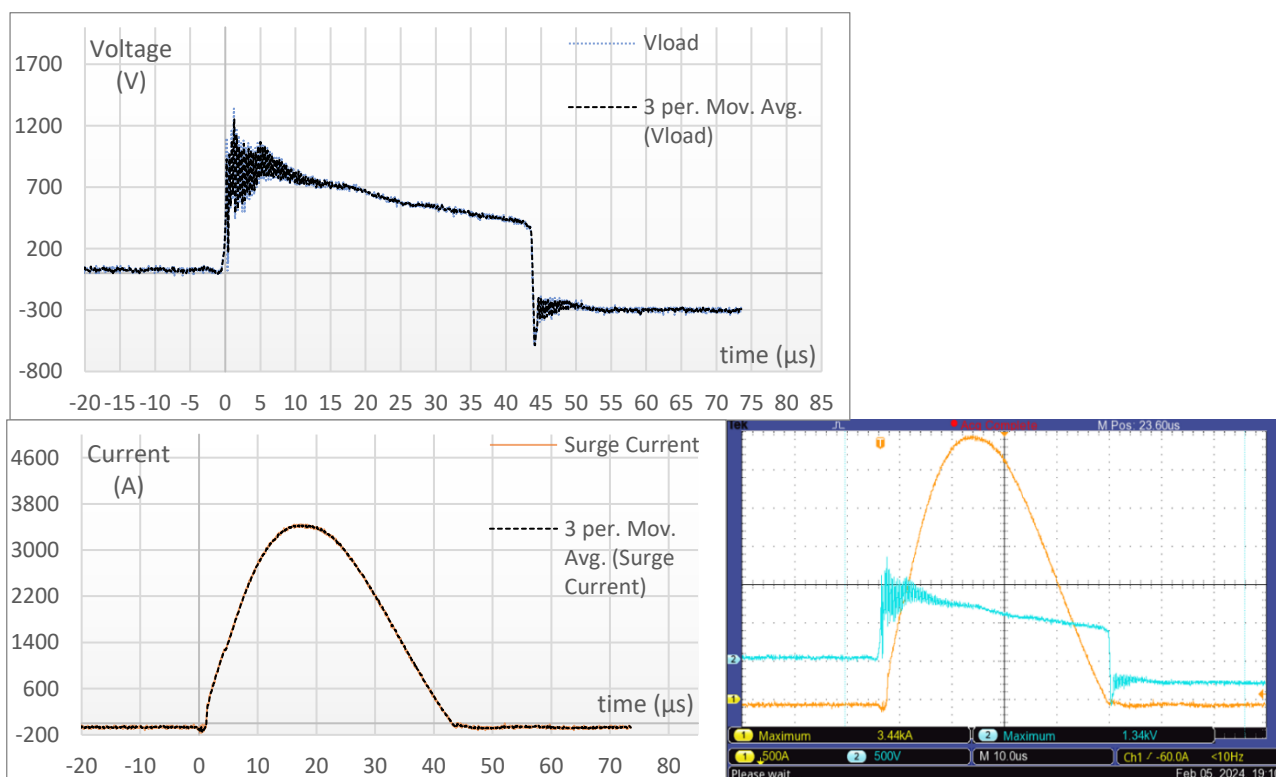
Σχήμα 8.12: Για καλώδιο 7m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



Σχήμα 8.13: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.

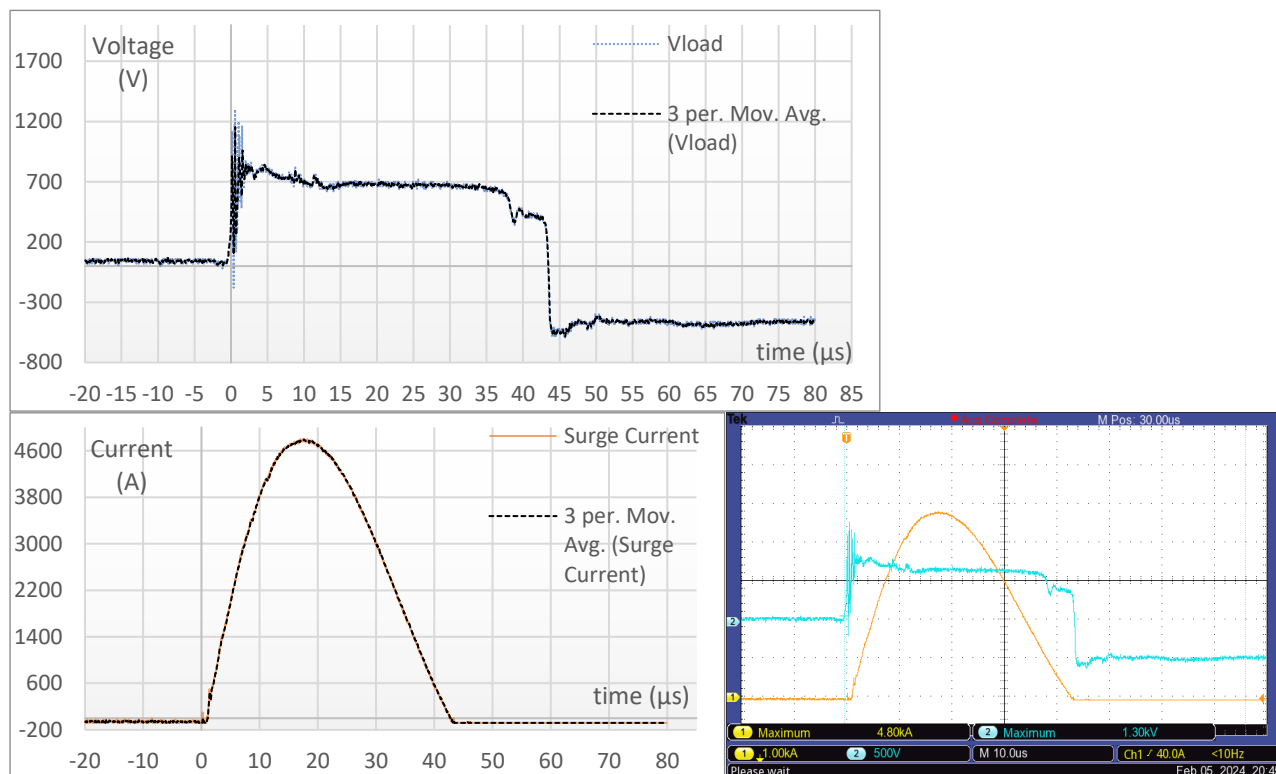


Σχήμα 8.14: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.

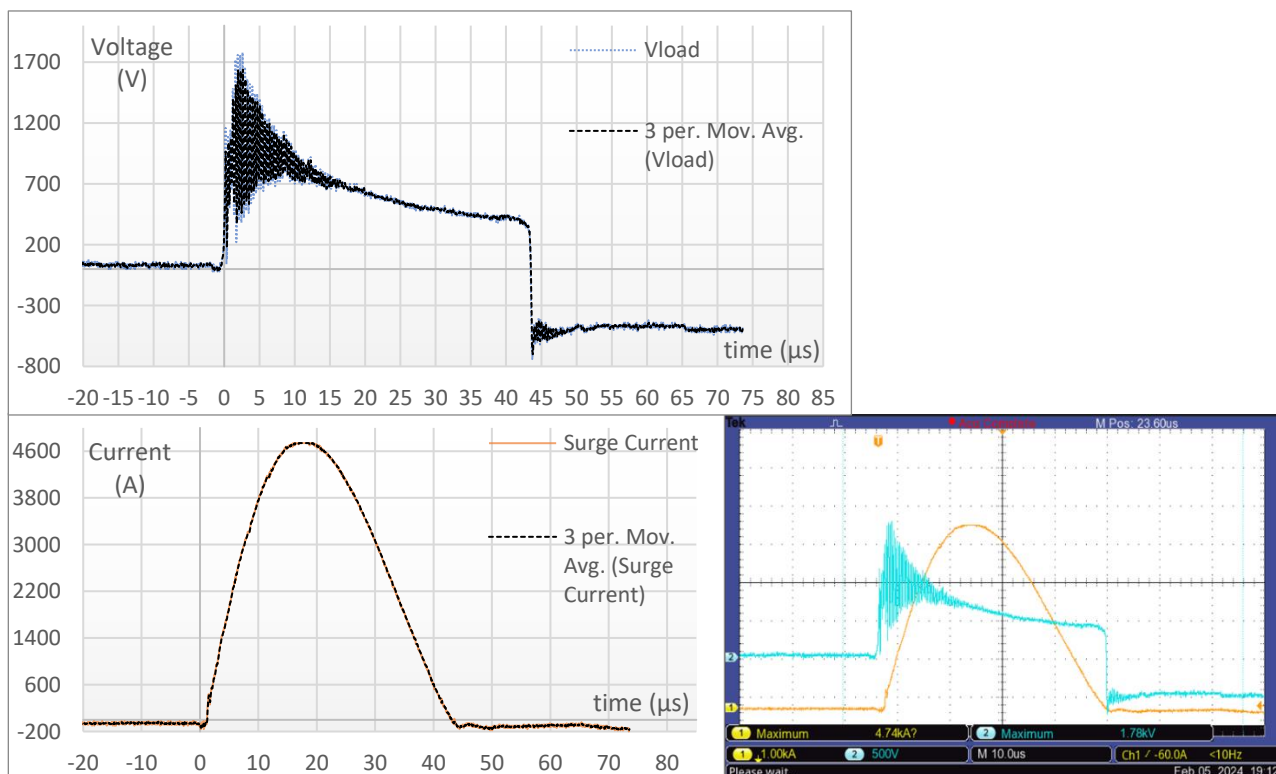




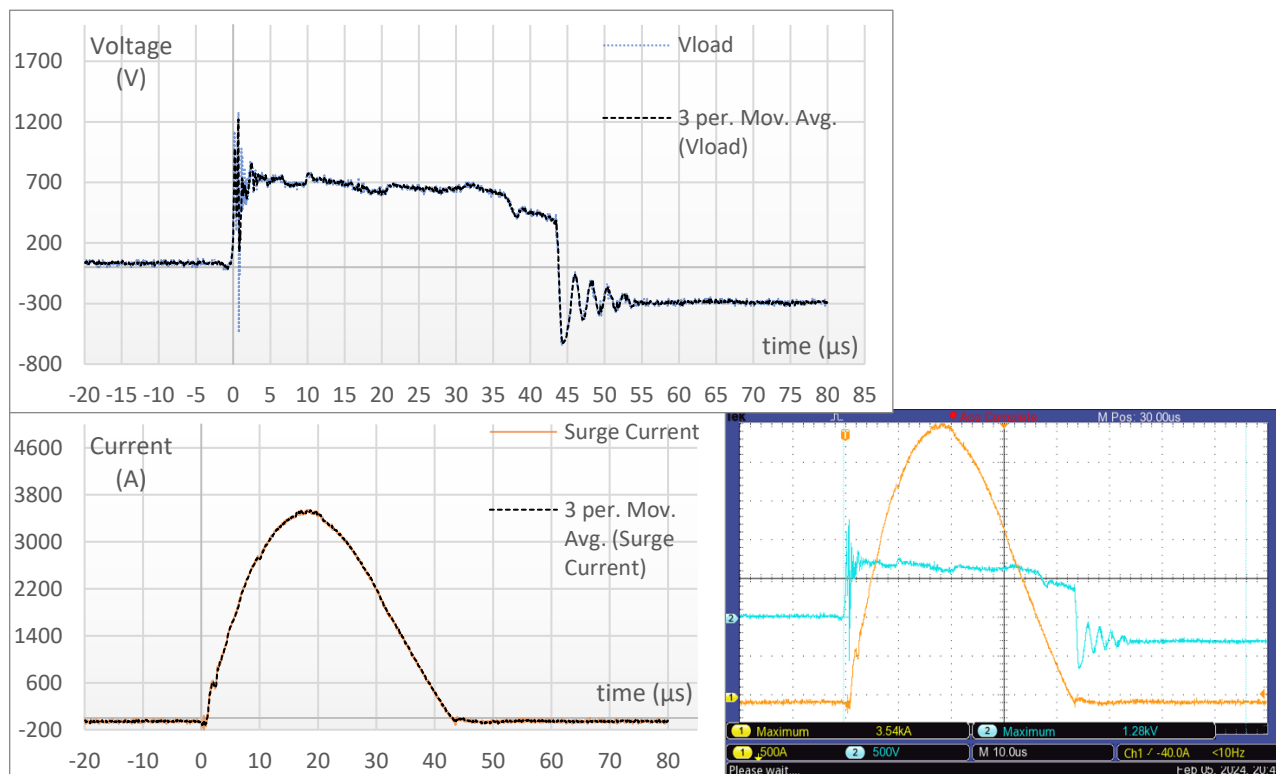
Σχήμα 8.15: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



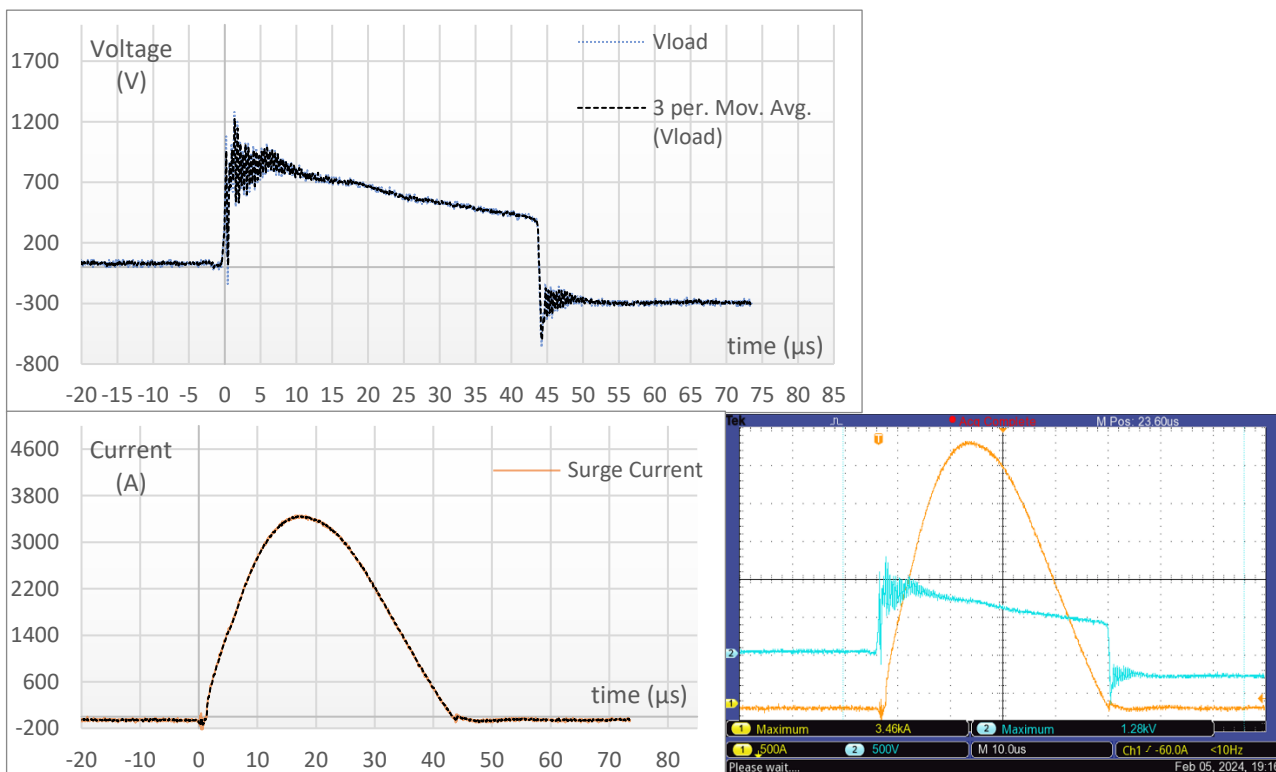
Σχήμα 8.16: Για καλώδιο 9m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



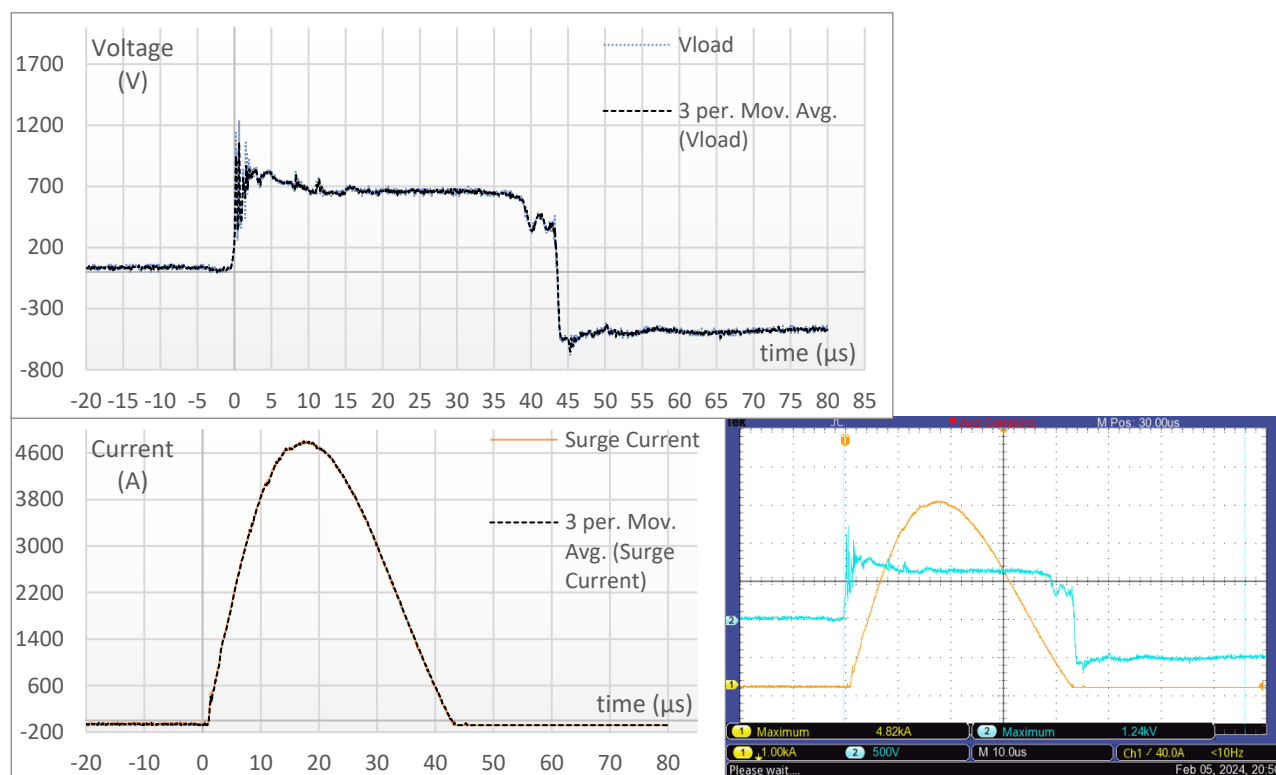
Σχήμα 8.17: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



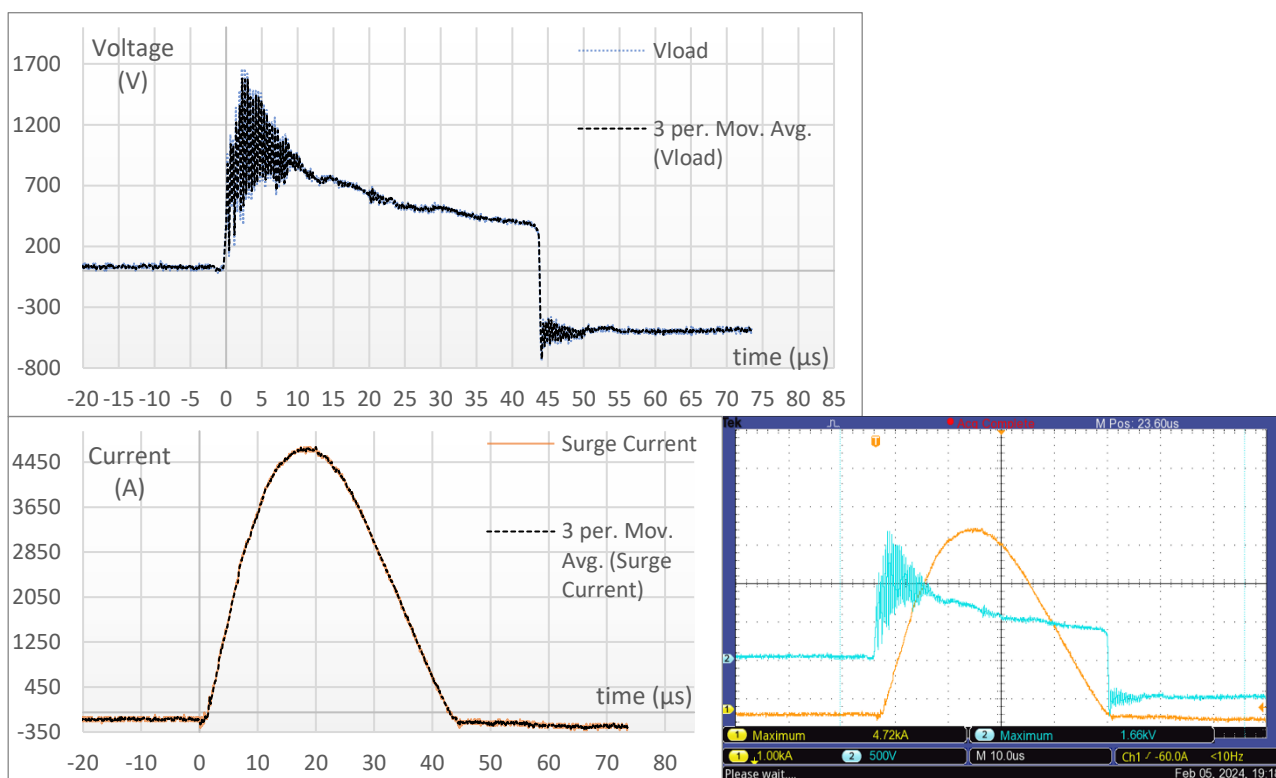
Σχήμα 8.18: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



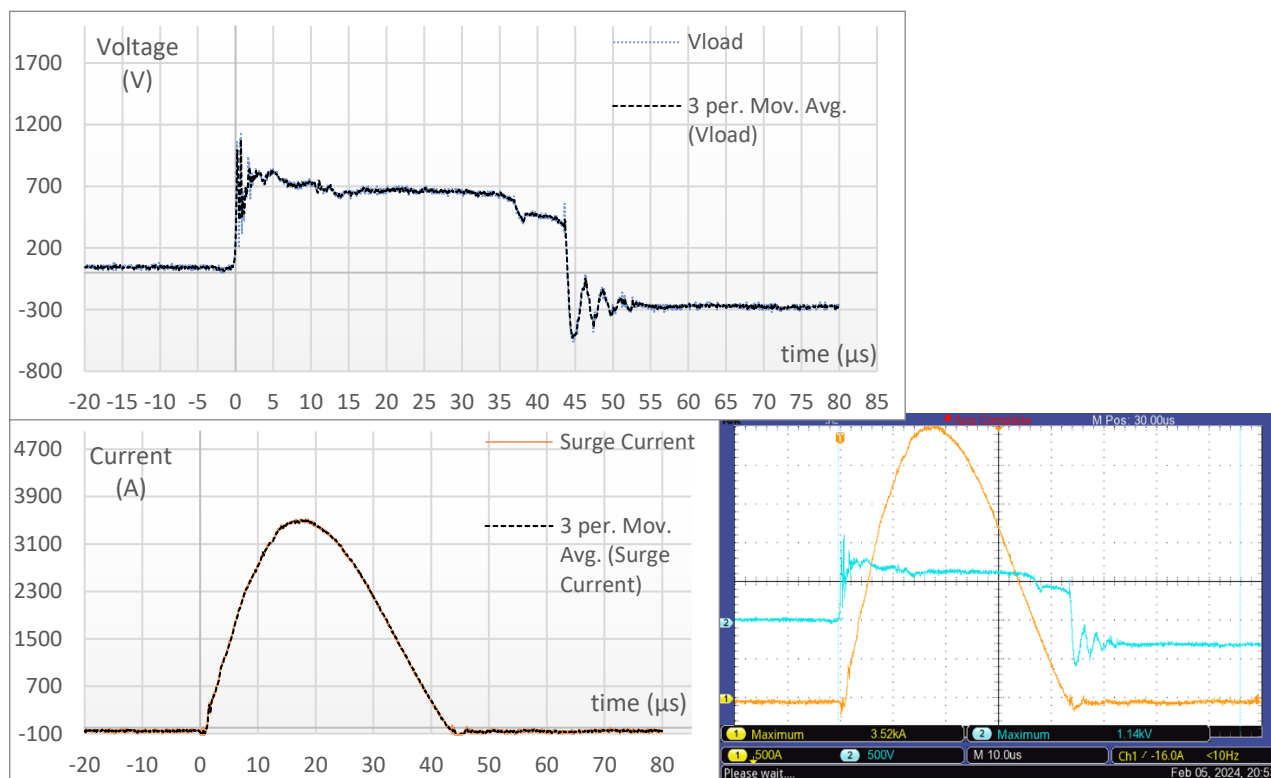
Σχήμα 8.19: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



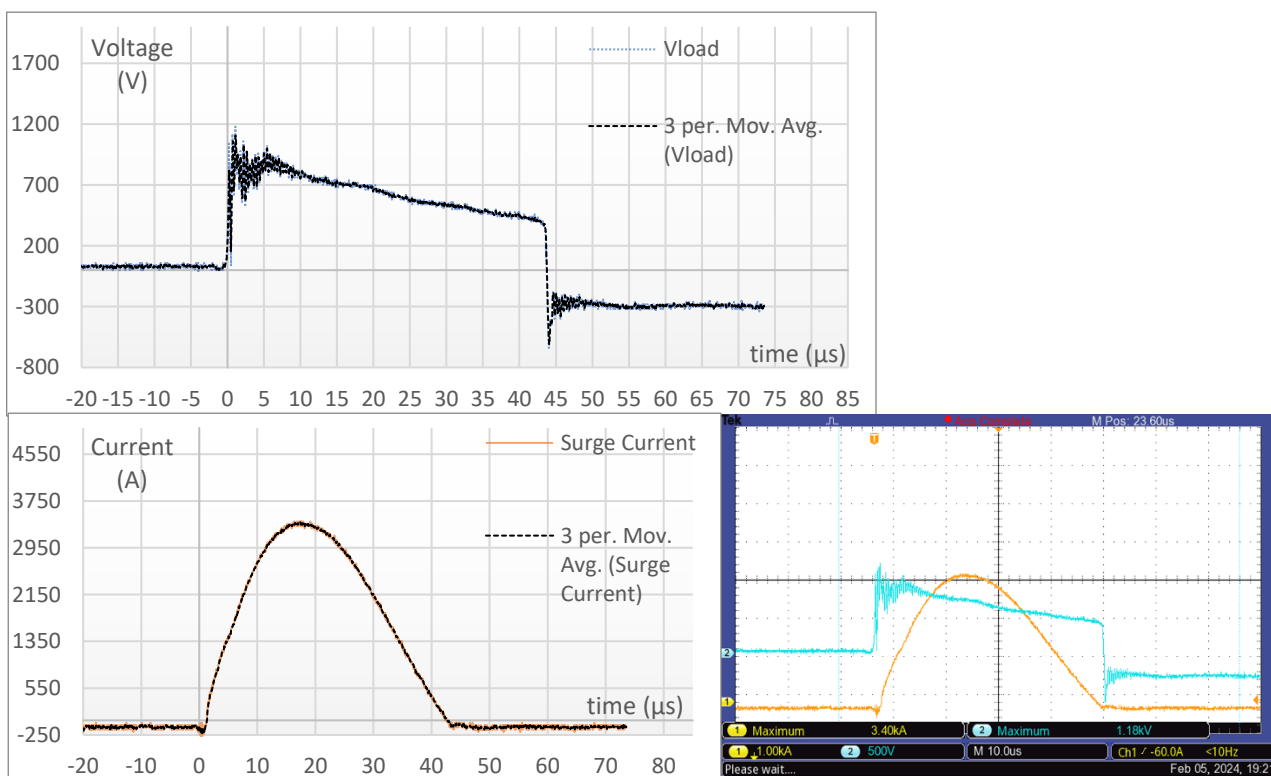
Σχήμα 8.20: Για καλώδιο 16m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



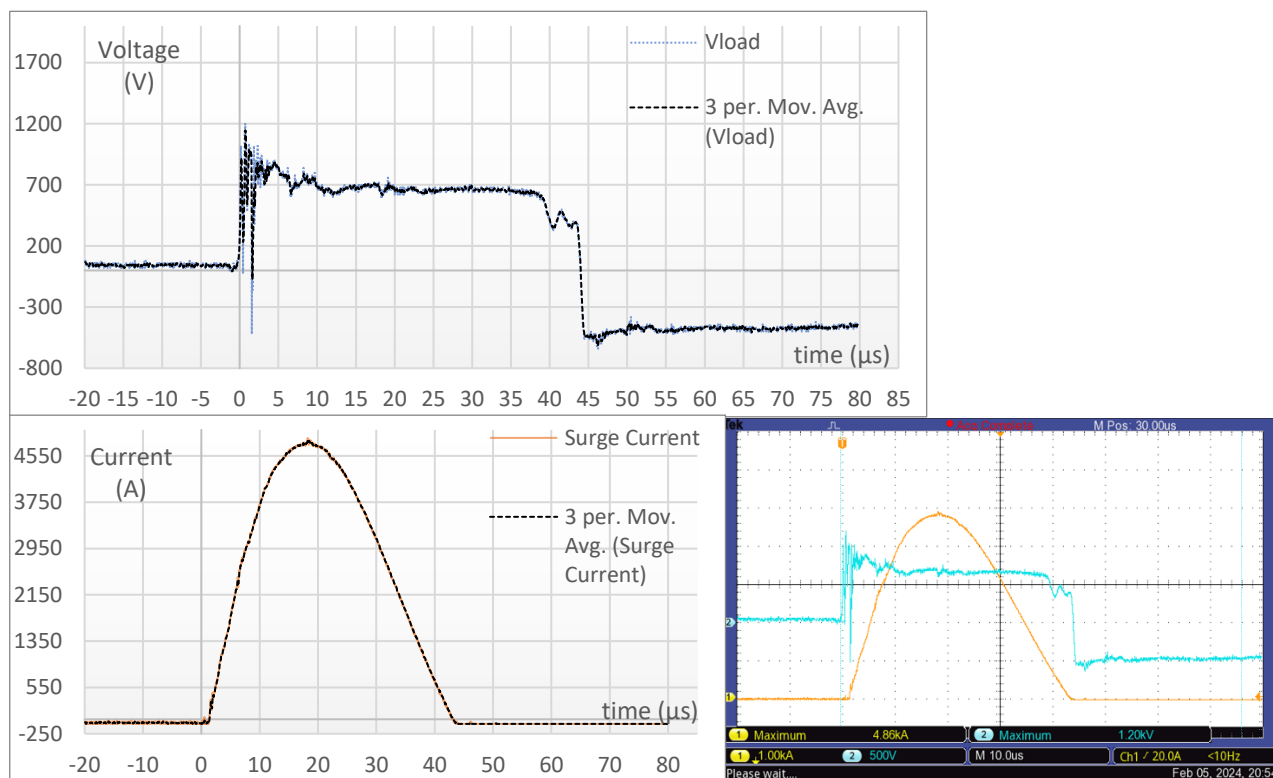
Σχήμα 8.21: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



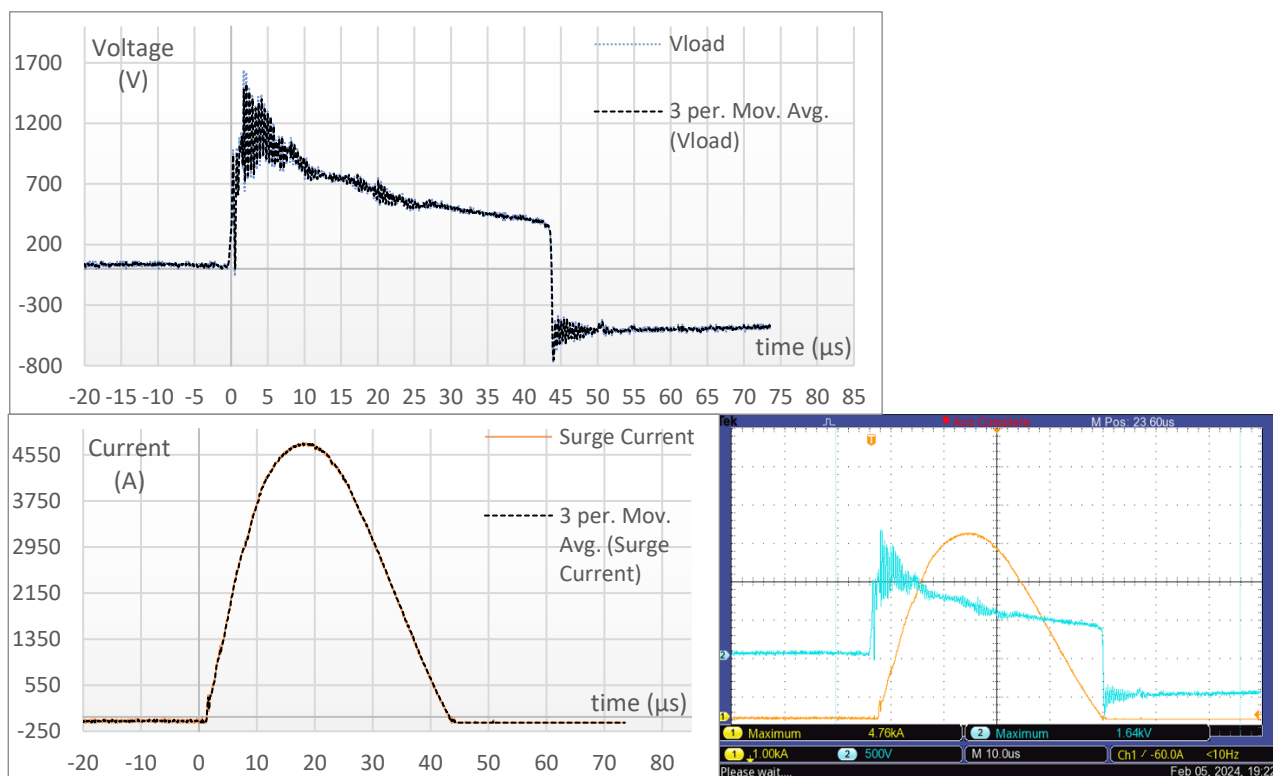
Σχήμα 8.22: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



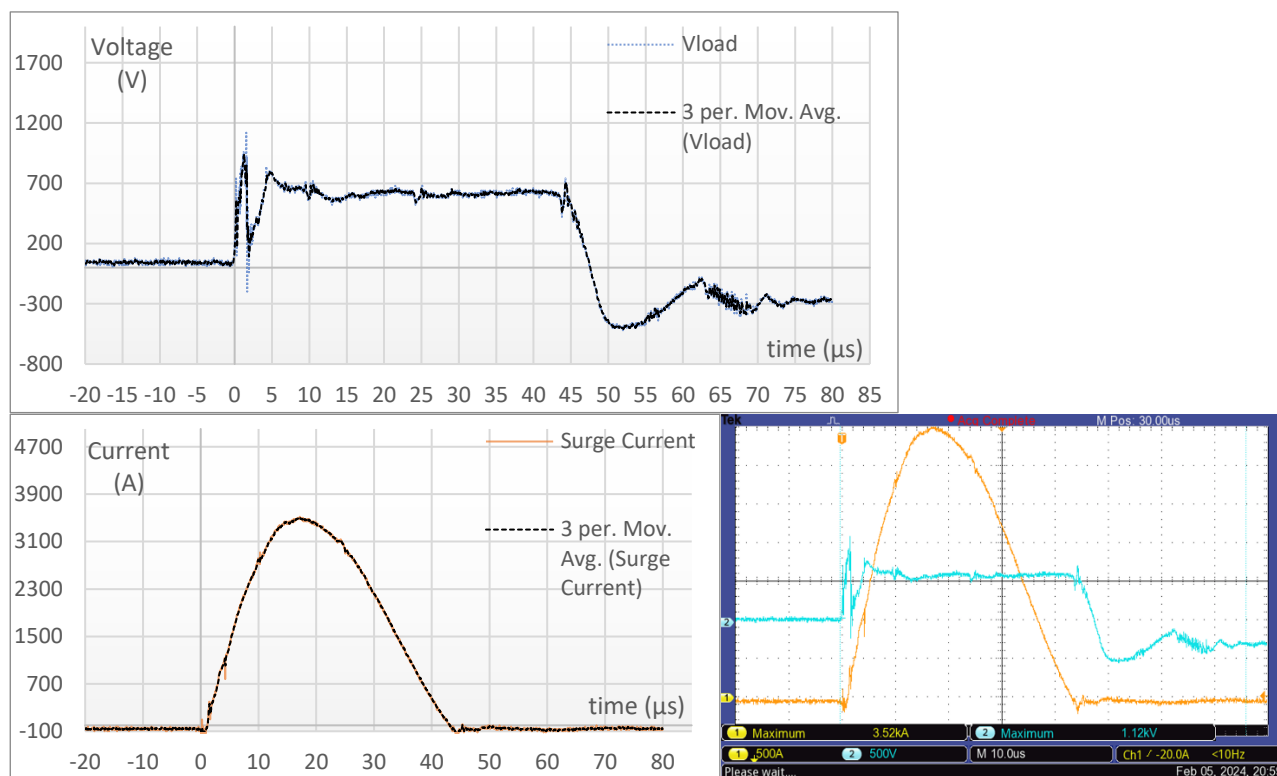
Σχήμα 8.23: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



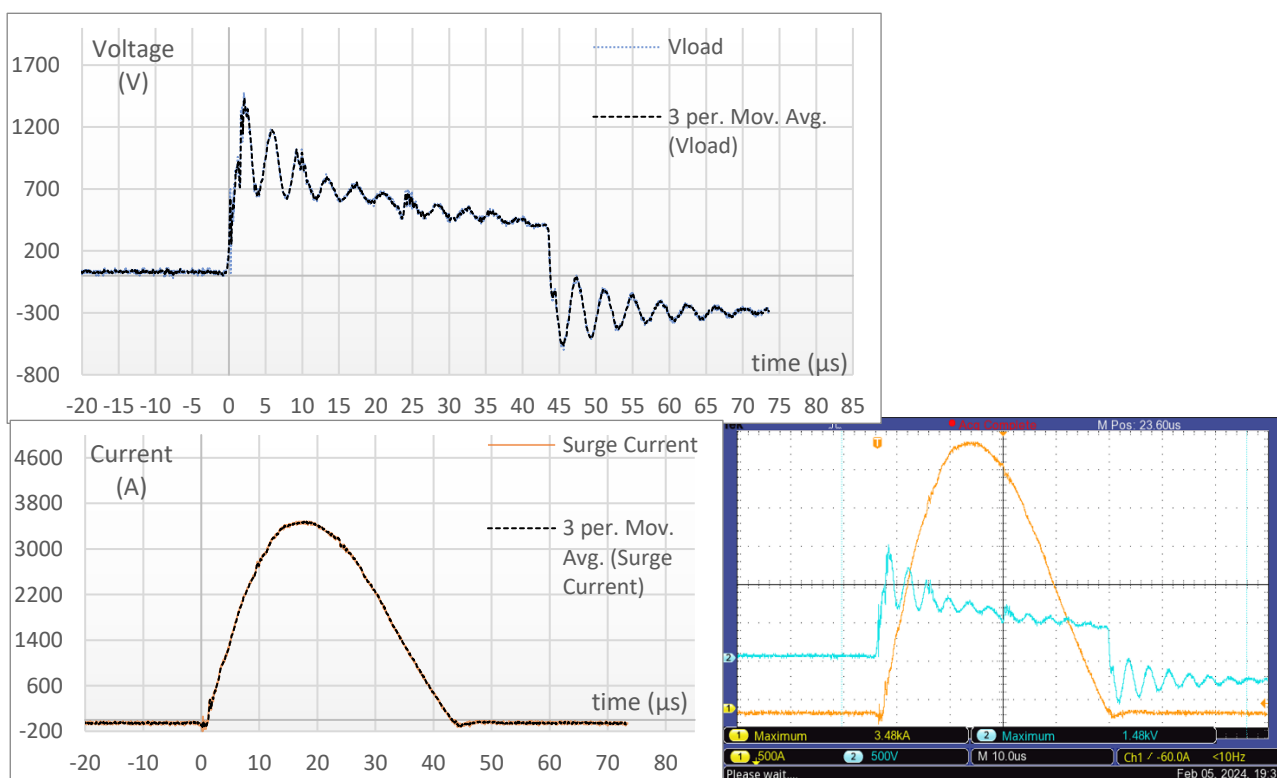
Σχήμα 8.24: Για καλώδιο 22.5m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



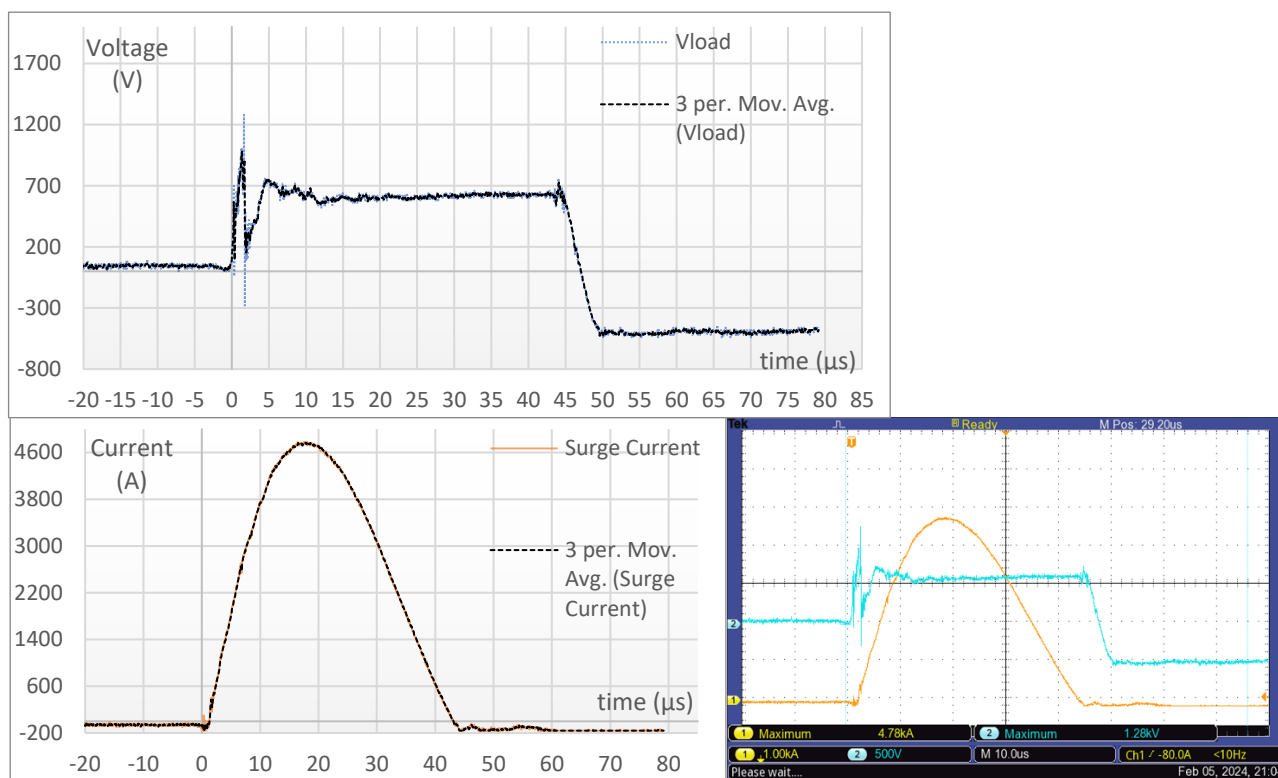
Σχήμα 8.25: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



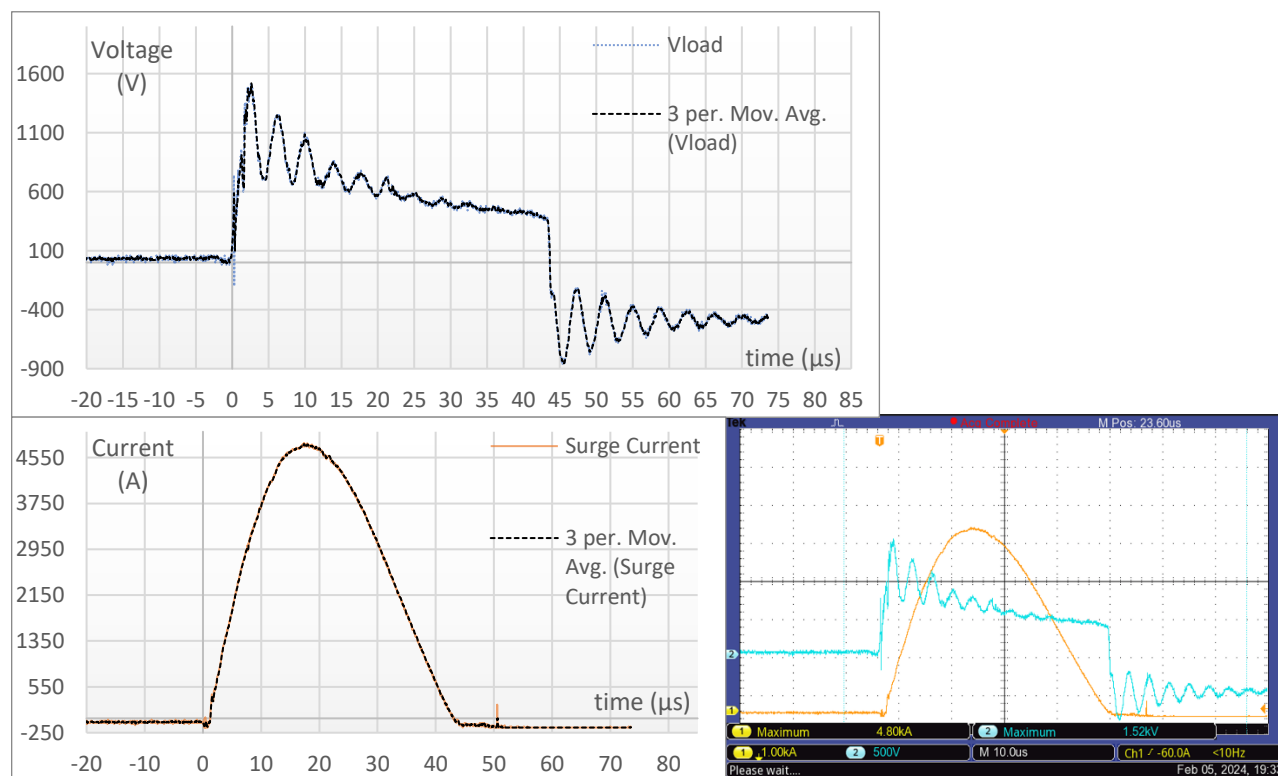
Σχήμα 8.26: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 7kA.



Σχήμα 8.27: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1+T2 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



Σχήμα 8.28: Για καλώδιο 100m, με προστασία T1 και ρεύμα βραχυκύκλωσης 9kA.



### 8.3 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Όπως παρατηρούμε στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 8.1) η εμφανιζόμενη τάση στο υπό μελέτη φορτίο λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1.5kV (κατηγορία υπερτάσεων I). Αναλυτικότερα, 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 σωλήνα εκκένωσης αερίου (GDT) των απαγωγών υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται. Το “spike” αυτό συμβαίνει στα πρώτα 25-100ns και σηματοδοτεί την ενεργοποίηση του σωλήνα εκκένωσης αερίου του SPD κλάσης T1 και στη συνέχεια, την ενεργοποίηση του βαρίστορ μεταλλικών οξειδίων που συνδέεται σε σειρά με το GDT.

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

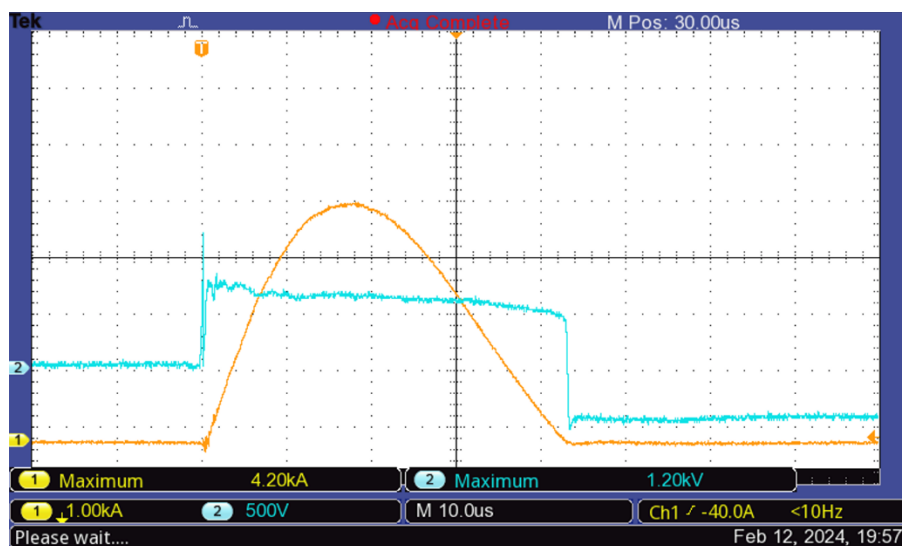
Πίνακας 8.1: Η μέγιστη τιμή της μετρούμενης τάσης στο υπό μελέτη φορτίο κατά την διεξαγωγή του δεύτερου πειράματος.

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. Σε αντιστοιχία με το πρώτο πείραμα εντοπίζουμε την εμφάνιση ταλαντώσεων της τάσης στο υπό μελέτη φορτίο με την αύξηση του μήκους καλωδιώσεων. Η εμφάνιση ταλαντώσεων συμφωνεί με το πρότυπο IEC 62305-4 [20] 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». Στο ίδιο πρότυπο, επίσης, αναφέρεται πως «στην περίπτωση που το φορτίο είναι ανοιχτοκυκλωμένο ενδέχεται να εμφανιστούν και υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας του απαγωγού υπερτάσεων». Αντίστοιχα 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.

Το χειρότερο μήκος καλωδίωσης στην εγκατάσταση χαμηλής τάσης που εξετάσαμε παρατηρήθηκε ξανά να είναι κοντά στα 7m. 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 [26].

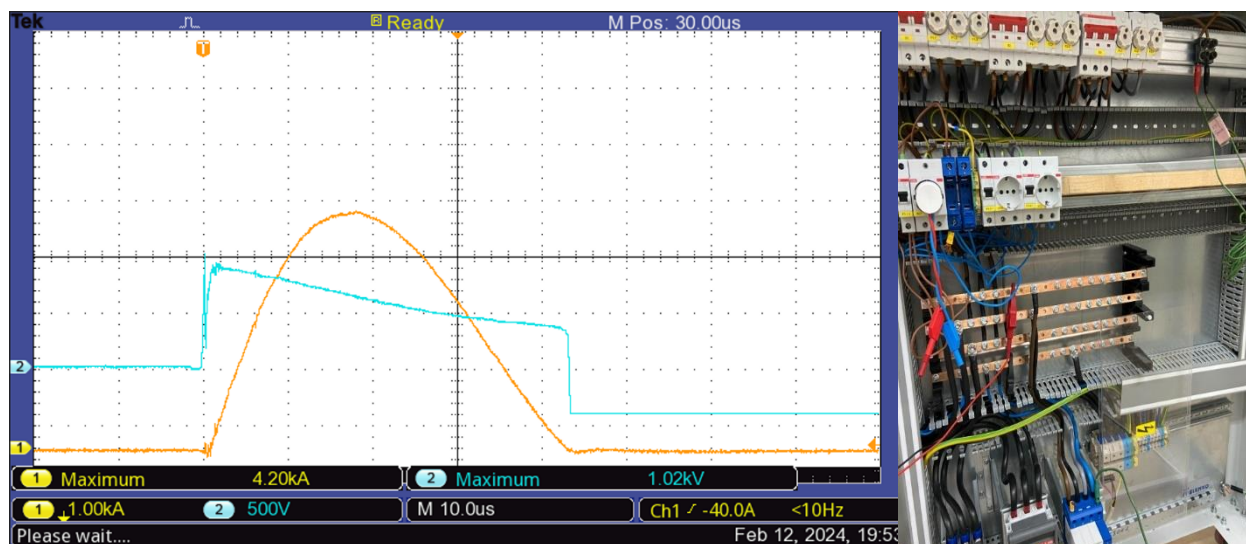
Ακολουθεί μία απεικόνιση (Εικόνα 8.1) της εμφανιζόμενης τάσης στα άκρα του SPD T1 μεταξύ L1 – N (μπλε χρώμα) και του ρεύματος έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 8kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 9m. Παρατηρούμε αρχικά το spike που κάνει η τάση του SPD T1 που οφείλεται στην ενεργοποίηση του GDT και στην συνέχεια την λειτουργία του MOV που σταθεροποιεί σχετικά την τάση.





Εικόνα 8.1: Η εμφανιζόμενη τάση στα άκρα του SPD T1 μεταξύ L1 – N (μπλε χρώμα) και του ρεύματος έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 8kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 9m.

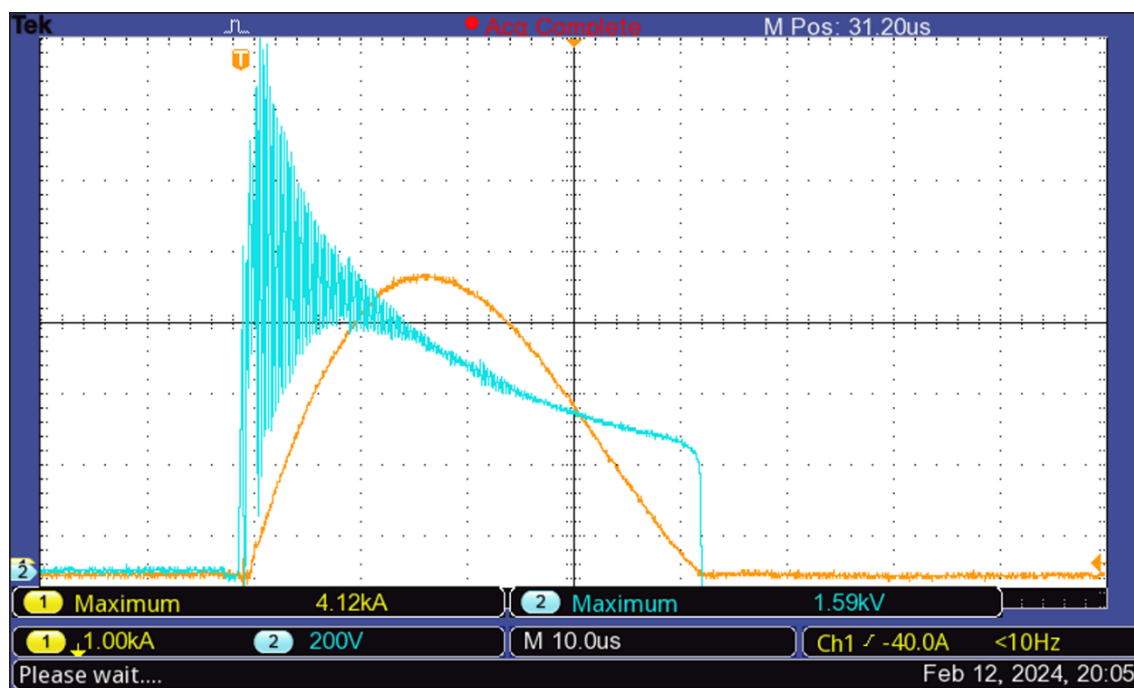
Παράλληλα, παραθέτουμε παρακάτω μία απεικόνιση (Εικόνα 8.2) της εμφανιζόμενης τάσης στους ζυγούς L1 – N (μπλε χρώμα) στην είσοδο της εγκατάστασης και το ρεύμα έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 8kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 9m. Παρατηρούμε αρχικά το spike που κάνει η τάση του SPD T1 που οφείλεται στην ενεργοποίηση του GDT και στην συνέχεια την λειτουργία του MOV που σταθεροποιεί σχετικά την τάση.



Εικόνα 8.2: Η εμφανιζόμενη τάση μεταξύ των ζυγών L1 – N (μπλε χρώμα) και του ρεύματος έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 8kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 9m.

Επιπλέον, παραθέτουμε παρακάτω μία απεικόνιση (Εικόνα 8.3) της εμφανιζόμενης τάσης στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο (μπλε χρώμα) και το ρεύμα έγχυσης στην εγκατάσταση

(πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 8kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 9m. Παρατηρούμε ότι έχουμε εστιάσει τον παλμογράφο κατάλληλα ώστε να αποτυπωθεί το φαινόμενο ταλάντωσης.



Εικόνα 8.3: Η εμφανιζόμενη τάση στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο (μπλε χρώμα) και το ρεύμα έγχυσης στην εγκατάσταση (πορτοκαλί χρώμα), για έγχυση 8kA ρεύματος βραχυκύκλωσης, διάταξη προστασίας μόνο με T1 και μήκος καλωδίωσης 9m.

Συμπερασματικά, 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 φαινόμενα όδευσης. Οι διάφορες ανακλάσεις που συμβαίνουν παρατηρούνται υπό μορφή ταλαντώσεων στο υπό προστασία φορτίο. Για την αποφυγή των ταλαντώσεων και καλύτερη προστασία από υπερτάσεις για καλωδιώσεις μεγάλου μήκους ενδείκνυται η προσθήκη δεύτερου SPD. Στην περίπτωση ανοιχτοκυκλωμένου φορτίου, όπως εξετάσαμε, ενδέχεται να εμφανιστούν και υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας του απαγωγού υπερτάσεων (βλέπε εικόνα 8.2 και 8.3). 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 [20].

Τέλος, στις πειραματικές μετρήσεις που λάβαμε υπεισέρχονται και ορισμένα σφάλματα, με τα κυριότερα να είναι σφάλματα οργάνων, αν και διακριβωμένα, σφάλματα λόγω μη ιδανικών συνθηκών στο εργαστήριο υψηλών τάσεων και διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την διεξαγωγή των κρούσεων. Τέλος, παρουσιάζεται μία κρούση για κάθε συνδυασμό ρεύματος έγχυσης, διάταξη προστασίας και μήκος καλωδίου, διευρύνοντας έτσι την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων.

## Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup>

# Συμπεράσματα και η Επόμενη Μέρα

### 9.1 Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης του μήκους καλωδιώσεων στην λειτουργία των απαγωγών υπερτάσεων σε εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης. Γι' αυτό πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα χρησιμοποιώντας μία γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων 8/20μs και έναν ηλεκτρικό πίνακα που αναπαριστά μία εγκατάσταση χαμηλής τάσης. Με το πρώτο πείραμα, όπου εγχέονται κρουστικά ρεύματα χαμηλής σχετικά μέγιστης τιμής και εξετάζουμε δύο τρόπους προστασίας έναντι υπερτάσεων, με συνδυασμό SPD κλάσης I+II και μόνο κλάσης I, παρατηρούμε με την αύξηση του μήκους καλωδιώσεων την δημιουργία ταλαντώσεων στην εμφανιζόμενη τάση του υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένου φορτίου στην περίπτωση προστασίας με ένα SPD κλάσης T1 στην είσοδο της εγκατάστασης. Με το δεύτερο πείραμα, όπου εγχέονται κρουστικά ρεύματα υψηλότερης σχετικά μέγιστης τιμής και εξετάζουμε δύο τρόπους προστασίας έναντι υπερτάσεων, με συνδυασμό SPD κλάσης I+II και μόνο κλάσης I, παρατηρούμε με την αύξηση του μήκους καλωδιώσεων την δημιουργία ταλαντώσεων στην εμφανιζόμενη τάση του υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένου φορτίου, στην περίπτωση προστασίας με ένα SPD κλάσης T1 στην είσοδο της εγκατάστασης, όπου μάλιστα λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1.5kV (κατηγορία υπερτάσεων I), που είναι ικανές να βλάψουν τα ηλεκτρονικά ηλεκτρικών συσκευών.

Συνοπτικά τα συμπεράσματα των δύο πειραμάτων και τα αποτελέσματα συνολικά τις διπλωματικής εργασίας απαριθμούνται ακολούθως:

1. 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 IEC 62305-4 [20] 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».
2. 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.
3. 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 [22] 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 [20] , όπως αναλύθηκαν και στο κεφάλαιο 4.6 (1 2 3).

4. Στην περίπτωση ανοιχτοκυκλωμένου φορτίου, όπως εξετάσαμε, ενδέχεται να εμφανιστούν και υπερτάσεις διπλάσιας μέγιστης τιμής από την αποτελεσματική στάθμη προστασίας του απαγωγού υπερτάσεων (βλέπε εικόνα 8.2 και 8.3). 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 προστασία του SPD T1 είναι μικρότερη του 1.5kV (εικόνα 8.2) και η εμφανιζόμενη υπέρταση στο υπό μελέτη ανοιχτοκυκλωμένο φορτίο είναι μεγαλύτερη (εικόνα 8.3). 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 [20] .
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» [26] . Το χειρότερο μήκος καλωδίωσης στην εγκατάσταση χαμηλής τάσης που εξετάσαμε παρατηρήθηκε να είναι κοντά στα 7 – 9m. Υπογραμμίζουμε ότι αυτό το χείριστο μήκος αναφέρεται στην συγκεκριμένη εγκατάσταση που εξετάστηκε, όπου τα καλώδια χαμηλής τάσης διαφόρων μηκών είναι διατομής 2.5mm<sup>2</sup> και το φορτίο ανοιχτοκυκλωμένο. 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.

## 9.2 Η Επόμενη Μέρα

Κατά την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και την βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγιναν στα πλαίσια της εν λόγω διπλωματικής εργασίας προέκυψε η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης του φαινομένου που εξετάσαμε. Ορισμένες προτάσεις απαριθμούνται εν συνεχεία:

1. Επανάληψη των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιώντας Combination Wave Surge Generator.

2. Επανάληψη των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιώντας SPDs περιορισμού τάσης και όχι μεταγωγής.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Διεξαγωγή εργαστηριακής άσκησης στα πλαίσια του μαθήματος «Προστασία Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων από Υπερτάσεις».



# Βιβλιογραφία

- [1] «The physics of lightning», Joseph R. Dwyer Martin A. Uman.
- [2] «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων Έναντι Υπερτάσεων», Ιωάννης Α. Σταθόπουλος, Εκδόσεις Συμείων.
- [3] «Προστασία από Υπερτάσεις - Αλεξικέραυνα», Ε. Πυργιώτη, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- [4] «Υψηλές Τάσεις», Λάμπρος Οικονόμου, Γεώργιος Φώτης, Χρήστος Χριστοδούλου, 3η Έκδοση – Εκδόσεις Τζιόλα.
- [5] <https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Thunderstorm-electrification>
- [6] CIGRE technical brochure on «Lightning Parameters for Engineering Applications».
- [7] IEC 62305-1:2010 «Protection Against Lightning - Part 1: General Principles».
- [8] «Υψηλές Τάσεις», Ε. Kuffel, W.S Zaengl, J. Kuffel, 2η Έκδοση – Εκδόσεις Τζιόλα.
- [9] «Μεταβατικά Φαινόμενα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Πέτρος Ντοκόπουλος, Εκδόσεις Ζήτη.
- [10] «Power System Analysis and Design», J Duncan Glover, Mulukutla S Sarma, Thomas Overbye, SI Edition - Fifth Edition
- [11] «Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών», Πέτρος Ντοκόπουλος, Εκδόσεις Ζήτη.
- [12] IEC 62305-3:2010 «Protection Against Lightning - Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard».
- [13] IEC 62305-2:2010 «Protection Against Lightning - Part 2: Risk Management».
- [14] «Guide to BS/IEC 62305» ( <http://www.furse.com/> )
- [15] «Σχέδιο για Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς», Ιωάννης Γκόνος, Αικατερίνη Πολυκράτη, 2η Έκδοση – Εκδόσεις Τζιόλα.
- [16] «Power System Analysis and Design», J Duncan Glover, Mulukutla S Sarma, Thomas Overbye, SI Edition - Fifth Edition.
- [17] «The basics of overvoltage protection», Weidmuller.
- [18] «Lightning and surge protection basics», PHOENIX CONTACT
- [19] «Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας», Παύλος Γεωργιάκης,
- [20] IEC 62305-4:2010 «Protection Against Lightning - Part 4: Electrical and Electronic Systems Within Structures».
- [21] IEC 61643-11:2002 «Low-voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems — Requirements and tests».
- [22] IEC 61643-12:2002 «Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems Selection and application principles».
- [23] «Surge Protection Handbook» ( <https://cime.uv/wp-content/uploads/manuales-pdf/surge-protection-handbook.pdf> )
- [24] «Mains power protection Type 1 & Type 2 Surge Protection Series», Furse ([https://library.e.abb.com/public/e365a493461041e48f8a0f487f885197/Furse\\_ESP\\_T1\\_T2\\_Surge\\_Protection\\_Series\\_Product\\_Guide\\_211021.pdf](https://library.e.abb.com/public/e365a493461041e48f8a0f487f885197/Furse_ESP_T1_T2_Surge_Protection_Series_Product_Guide_211021.pdf) ).
- [25] «Evaluation of the Effective Protection Distance of Low-Voltage SPD to Equipment», Jinliang He, Senior Member, IEEE, Zhiyong Yuan, Jing Xu, Shuiming Chen, Senior Member, IEEE, Jun Zou and Rong Zeng, Member, IEEE.

- [26] «Discussion on Worst Distance Between SPD and Protected Device», Shunchao Wang and Jinliang He.
- [27] «Coordination of two-stage surge protective device in low-voltage system under mixed waves», Yiming Zheng, Chunyan Gong, Wei Hu, Zhengyuan Zhu.
- [28] «Effective Protection Distances of Low-Voltage SPD With Different Voltage Protection Levels», Jinliang He, Fellow, IEEE, Zhiyong Yuan, Shunchao Wang, Jun Hu, Shuiming Chen, Senior Member, IEEE, and Rong Zeng, Senior Member, IEEE.
- [29] «Analysis of Coordination between Surge Protection Devices in Low Voltage Electric Networks», Mehdi Mahmoudzadeh, Mohsen Niasati.
- [30] «Coordination of surge protective devices in low voltage AC power installations», Vladan Radulović, Saša Mujović.
- [31] «TBS1000B and TBS1000B-EDU Series Digital Storage Oscilloscopes – User Manual», Tektronix
- [32] «Πειραματική μελέτη μεταβατικής αντίστασης γείωσης με χρήση μοντέλων υπό κλίμακα», Διπλωματική Εργασία, Δημήτριος Κ. Αναγνωστόπουλος
- [33] «Απαγωγοί Κρουστικών Υπερτάσεων», ΕΛΕΜΚΟ  
([http://www.elemko.gr/download/elemko\\_catalogue\\_spds\\_06\\_2020.pdf](http://www.elemko.gr/download/elemko_catalogue_spds_06_2020.pdf))
- [34] « Impact of line length on the operation of overvoltage protection in LV networks», J. Ribic
- [35] «Experimental investigation of the coordination between SPDs and between SPD and the protected equipment», Qibin Zhoua, Alain Rousseaub, Yang Zhaoc, Feifan Liud, Xiaoyan Bian
- [36] «Critical insight into performance requirements and test methods for surge protective devices connected to low-voltage power systems», Thomas E. Tsovilis, Senior Member, IEEE