



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

**Αξιολόγηση, Βελτιστοποίηση και Έλεγχος Ομοαξονικών
Καλωδίων και Συνδέσμων Παλμικής Υψηλής Τάσης
για Μαγνήτες Kicker στο CERN**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Γ. ΚΟΝΤΕΛΗΣ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



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

**Αξιολόγηση, Βελτιστοποίηση και Έλεγχος Ομοαξονικών
Καλωδίων και Συνδέσμων Παλμικής Υψηλής Τάσης
για Μαγνήτες Kicker στο CERN**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Γ. ΚΟΝΤΕΛΗΣ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24η Σεπτεμβρίου 2018.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

.....

Δημήτριος Γ. Κοντέλης

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

Copyright © Δημήτριος Γ. Κοντέλης, 2018

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με μετρήσεις και ελέγχους που έγιναν σε συνδέσμους και ομοαξονικά καλώδια υψηλής τάσης, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ειδικούς μαγνήτες των επιταχυντών του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Πυρηνικών Ερευνών (CERN).

Το έργο αυτό εκπονήθηκε στις εγκαταστάσεις και τα εργαστήρια του CERN στην Ελβετία, και αφορά σε μετρήσεις και ελέγχους τόσο σε ήδη υπάρχοντα αλλά και σε καινούργια μοντέλα ομοαξονικών καλωδίων και συνδέσμων (connectors), τα οποία χρησιμοποιούνται σε μαγνήτες Kicker. Παρουσιάζεται η ανάπτυξη νέων μεθόδων με σκοπό τη βελτιστοποίηση και παραγωγή νέων πιο εξελιγμένων καλωδίων με τη χρήση νέων υλικών. Εξαιτίας του γεγονότος ότι έπρεπε να γίνει παρουσίαση του παρόντος έργου και στο CERN, ένα μεγάλο τμήμα της εργασίας είναι γραμμένο στην αγγλική γλώσσα.

Αρχικά, εξετάζεται η πιθανή αντικατάσταση των ομοαξονικών καλωδίων υψηλής τάσης (YT) τα οποία χρησιμοποιούν μείγμα πεπιεσμένου αερίου SF₆ (εξαφθοριούχο θείο) μαζί με πολυαιθυλένιο (PE) ως μόνωση, από καινούργια καλώδια, φιλικότερα προς το περιβάλλον. Προτείνονται νέα σχέδια καλωδίων, τα οποία χρησιμοποιούν μονωτικά έλαια σιλικόνης ως διηλεκτρικό. Κατόπιν, γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης της συμπεριφοράς τους υπό YT, με τη βοήθεια λογισμικού που εφαρμόζει τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, για σχεδιασμό και βελτιστοποίηση.

Ακολούθως, δείγματα καλωδίων και συνδέσμων – ήδη υπάρχοντα και καινούργια μοντέλα – τίθενται υπό έλεγχο και τα πειράματα λαμβάνουν χώρα. Το έργο που διεξάγεται στο εργαστήριο περιλαμβάνει την εγκατάσταση διάταξης δοκιμών καλωδίων YT και την πραγματοποίηση των μετρήσεων και ελέγχων των καλωδίων και συνδέσμων. Εισάγεται μια εύκολη στη χρήση μέθοδος μετρήσεων μερικών εκκενώσεων όσον αφορά στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και στους τρόπους βελτίωσής της. Ακολούθως, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στον υπολογιστή επιβεβαιώνονται και συγκρίνονται με αυτά του εργαστηρίου. Συζητείται η δυνατότητα χρήσης των καλωδίων λαδιού ως εναλλακτική λύση για την αντικατάσταση των καλωδίων με πεπιεσμένο αέριο SF₆, και οι προοπτικές για μελλοντικές εξελίξεις.

Λέξεις κλειδιά:

CERN, μαγνήτες kicker, υψηλές τάσεις, μετρήσεις και έλεγχοι, ομοαξονικά καλώδια, σύνδεσμοι, μονωτικά υλικά, διηλεκτρικά, μερικές εκκενώσεις, χαρακτηριστική αντίσταση, εξασθένιση, τάση έναρξης / εξαφάνισης / διάσπασης, ηλεκτρικό πεδίο, τριπλά σημεία, προσομοιώσεις, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

ABSTRACT

The current diploma thesis refers to measurements and tests that were done to high voltage coaxial cables and connectors, which are used for special magnets of the accelerators at the European Organization for Nuclear Research (CERN).

This work was carried out at the facilities and laboratories of CERN, Switzerland, and is about high voltage measurements and tests of various existing and new models of coaxial cables and connectors used for the kicker magnets. It includes the developing of new methods for optimizing and producing new, more efficient cables using new materials. Because of the fact that this work had to be presented also at CERN, an extensive part of the thesis was written in English language.

First, what is discussed is the possible replacement of HV coaxial cables, which use a mixture of pressurized SF₆ (Sulphur Hexafluoride) gas and polyethylene as insulation, with new ones, friendlier to the environment. New designs of cables are proposed, set up, and built as prototypes, which use silicone oils as dielectric. Afterwards, there is an attempt to simulate the behaviour of the test subjects under high voltage with the help of finite element method software, for designing and optimizing.

Subsequently, samples of cables and connectors - still used at CERN and the new models, are put under examination, and the experiments take place. The work that is being done in the laboratory involves the setting up of an HV cable test stand, and the measuring and testing of the cable samples and the connectors. An easy-to-use method regarding the accuracy of the results of PD measurements and ways to improve it, is introduced. Afterwards, the results of the computer simulations are being confirmed and compared to the results from the lab. An outlook is given on the feasibility of oil-filled cables as a replacement for SF₆ gas pressurized cables and the foreseen future developments.

Key words:

CERN, kicker magnets, high voltages, measurements and tests, coaxial cables, connectors, insulating materials, dielectrics, partial discharges, characteristic impedance, attenuations, inception / extinction / breakdown voltage, electric field, triple points, simulations, finite element method.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών κ. Ιωάννη Γκόνο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της διπλωματικής, για τη χρήσιμες συμβουλές και υποδείξεις που μου έκανε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της και για την άμεση και ευχάριστη επικοινωνία που είχαμε. Μα περισσότερο για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε, την καθοδήγηση και για το ότι αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για εμένα μέσα από το μάθημα και το εργαστήριο, ώστε να αγαπήσω το αντικείμενο της σχολής μας.

Ευχαριστώ επίσης τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τους κυρίους Ιωάννη Σταθόπουλο και Φραγκίσκο Τοπαλή, καθηγητές της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ.

Εν συνεχεία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντά μου στο CERN κ. Tobias Stadlbauer, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ σε ένα τόσο μοναδικό περιβάλλον. Για τη βοήθεια, τον χρόνο που μου αφιέρωσε, τις συμβουλές και τις γνώσεις που μου μεταβίβασε κατά τη διάρκεια της δωδεκάμηνης άσκησής μου στον ερευνητικό αυτόν οργανισμό.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς, στους φίλους και την οικογένειά μου που μου συμπαραστάθηκαν και με βοήθησαν από την αρχή μέχρι το τέλος αυτής της πορείας. Ειδικότερα, θέλω να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου στη μητέρα και την αδερφή μου, για το πόσο με στήριξαν υλικά και πνευματικά, μου έδωσαν κουράγιο, με βοήθησαν ουσιαστικά και με ενθάρρυναν να συνεχίσω, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στη μνήμη του πατέρα μου, Γεωργίου Κοντέλη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT	vi
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΑ.....	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1. Το CERN – Σύντομη αναδρομή	12
1.2. Συγκρούσεις Σωματιδίων	14
1.3. Επιταχυντές.....	15
1.4. Μαγνήτες Kicker – Γραμμές Σχηματισμού Παλμών.....	16
2. ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ (CONNECTORS) ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ	18
2.1. Ορισμοί.....	19
2.2. Βασικά Χαρακτηριστικά Στοιχεία	20
2.3. Υψηλές Τάσεις Και Διηλεκτρικά	23
2.3.1. Ο Ρόλος Της Διηλεκτρικής Σταθεράς ϵ_r	23
2.3.2. Τάση Διάσπασης Και Μέγιστη Τάση	24
2.4. Ομοαξονικά καλώδια.....	25
2.4.1. Σημαντικές Παράμετροι Ενός Ομοαξονικού Καλωδίου	25
2.4.2. Σε Ποιες Περιπτώσεις Και Γιατί Χρησιμοποιούμε Ομοαξονικά Καλώδια	26
2.4.3. Το CERN Χρησιμοποιεί Ειδικά Ομοαξονικά Καλώδια Υψηλής Τάσης Που Περιέχουν Αέριο SF ₆ (Εξαφθοριούχο Θείο)	28
2.4.4. Αντικαταστάτες Των SF ₆ Καλωδίων Υπό Διερεύνηση.....	29
2.5. Σύνδεσμοι (Connectors) Για Ομοαξονικά Καλώδια Υψηλής Τάσης	30
3. ΜΕΡΙΚΕΣ ΕΚΚΕΝΩΣΕΙΣ - IEC 60270.....	33
3.1. Ορισμοί.....	33
3.2. Παλμός Μερικής Εκκένωσης – Φαινόμενο Φορτίο – Τάση Έναρξης / Εξαφάνισης ΜΕ	34
3.3. Η Σημασία των Μερικών Εκκενώσεων	35
3.4. Μερικές Εκκενώσεις Σε Ομοαξονικά Καλώδια Υψηλής Τάσης	36
3.4.1. Βλάβες Στη Μόνωση.....	36
3.4.2. Τι Μετράται.....	37
3.4.3. Μοτίβα Μερικών Εκκενώσεων – «Δακτυλικά Αποτυπώματα» (Fingerprints)	38
3.5. Κυκλώματα Ελέγχου Για Μετρήσεις Μερικών Εκκενώσεων	39

3.5.1.	Ο Πυκνωτής Σύζευξης (Coupling Capacitor).....	39
3.5.2.	Ο Επαγωγικός Μετασχηματιστής Ρεύματος (Inductive Current Transformer).....	40
4.	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ (MEASUREMENTS SETUP AND PROCEDURE).....	43
4.1.	Ανάπτυξη Του Συστήματος Μετρήσεων Μερικών Εκκενώσεων – Μεθοδολογία (Development Of The Partial Discharge Measurement System – Methodology)	43
4.1.1.	Σκοπός (Main Purpose).....	44
4.1.2.	Η Προετοιμασία – Πειραματικός Εξοπλισμός, Εργαστήριο, Βήματα Περίφραξης για Ηλεκτρική Ασφάλεια (The Setup - Experimental Equipment, Lab, Electrical Safety Lockout Steps)	44
4.1.3.	Η Διαδικασία των Μετρήσεων – Μεθοδολογία (The Measurements Procedure – Methodology)	51
4.1.4.	Επεξεργασία των δεδομένων με τη βοήθεια Η/Υ (Post – Processing).....	52
4.2.	Εξοπλισμός Για Μετρήσεις Χαρακτηριστικής Αντίστασης Και Απωλειών (The Impedance / Attenuation Measurements Equipment).....	56
5.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ (THEORETICAL EVALUATION OF THE HIGH VOLTAGE COAXIAL CABLES).....	57
5.1.	Διαδικασία Αξιολόγησης Των Καλωδίων (Evaluation Process Of The Cables).....	57
5.2.	Σχεδιασμός Των Πειραμάτων (Planning The Experiments).....	60
5.3.	Το Μονωτικό Έλαιο Που Χρησιμοποιήθηκε (The Oil Used).....	61
5.4.	Αναλυτικοί Υπολογισμοί – Θεωρητικές Προβλέψεις (Analytic Calculations – Theoretical Predictions).....	61
5.4.1.	Υπολογισμοί Για Τη Χαρακτηριστική Αντίσταση Z_0 (Characteristic Impedance Z_0 Calculations).....	61
5.4.2.	Υπολογισμοί Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου E (Electric Field E Calculations)	62
5.4.3.	Άλλοι Υπολογισμοί (Other Calculations)	68
6.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (TESTS AND MEASUREMENTS).....	70
6.1.	Μερικές Εκκενώσεις και Τάση διάσπασης (Partial Discharges and Breakdown Voltage).....	70
6.1.1.	Πρωτότυπο καλώδιο RFS Heliflex – Αέρας ως Διηλεκτρικό (Heliflex Standard Air Dielectric).....	70
6.1.2.	Τροποποιημένο καλώδιο RFS Heliflex – Έλαιο ως διηλεκτρικό (Modified Heliflex – Oil Dielectric)	72
6.1.3.	Σύνδεσμος Spinner για το καλώδιο Heliflex (Spinner Connector For Heliflex cable)	79

6.1.4.	Μετρήσεις Μερικών Εκκενώσεων στο καλώδιο Draka CLP50 (CLP50 PD Measurements)	80
6.2.	Μετρήσεις Χαρακτηριστικής Αντίστασης και Εξασθένισης (Impedance and Attenuation Measurements).....	84
6.2.1.	Αξιολόγηση των Μετρήσεων (Evaluation of the Measurements) 85	
6.2.2.	Σκέψεις και συμπεράσματα για τη Χαρακτηριστική Αντίσταση (Thoughts and Conclusions On The Impedance).....	86
7.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ (SIMULATIONS)	87
7.1.	Πρόγραμμα Opera (Opera FEM Software)	87
7.2.	Κατασκευάζοντας τη Γεωμετρία του Μοντέλου (Building the Geometry of the Model).....	89
7.3.	Εκτέλεση Προσομοιώσεων (Conducting Electric Field Simulations) 91	
7.3.1.	Προσομοίωση του Πρωτότυπου Heliflex Καλωδίου που Έχει Αέρα ως Διηλεκτρικό στα 16 kV (Simulation of the Standard Heliflex Cable) 92	
7.3.2.	Προσομοίωση του τροποποιημένου Heliflex με Έλαιο ως Διηλεκτρικό στα 16 kV (Simulation of Heliflex in Oil at 16 kV).....	95
7.3.3.	Προσομοίωση του καλωδίου SF ₆ στα 80 kV (Simulation of the SF ₆ Cable at 80 kV)	99
7.4.	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων (Simulation Results).....	103
7.5.	Άλλες Προσομοιώσεις (Other Simulations): CLP50	103
7.6.	Δυνατότητες Επέκτασης – Η Επόμενη Μέρα (Scalability – Future Developments)	107
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ (CONCLUSIONS)	110
9.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (ANNEX)	112
10.	ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ (TABLE OF FIGURES)	121
11.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ (REFERENCES).....	124
12.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (BIBLIOGRAPHY)	127

ΚΕΦΑΛΑΙΑ

Στο κεφάλαιο (1) γίνεται μια σύντομη εισαγωγή που αφορά στον οργανισμό του CERN και στο έργο που λαμβάνει χώρα στον παρόντα χρόνο, και δίνεται μια μικρή περιγραφή των Kicker μαγνητών και των γραμμών σχηματισμού παλμών. Ακολούθως, στο κεφάλαιο (2) δίδεται το πλαίσιο των αρχών που διέπουν τα καλώδια ΥΤ και εξηγούνται βασικές έννοιες της θεωρίας γραμμών μεταφοράς. Το κεφάλαιο (3) αφορά στη θεωρία των μερικών εκκενώσεων. Στο κεφάλαιο (4) περιγράφεται η μεθοδολογία και η διαδικασία των μετρήσεων. Το κεφάλαιο (5) αποτελεί μια σύντομη παρουσίαση και θεωρητική αξιολόγηση των υπό εξέταση δειγμάτων καλωδίων. Στο κεφάλαιο (6) παρουσιάζονται οι μετρήσεις και οι έλεγχοι που διεξήχθησαν στο εργαστήριο μαζί με τα αποτελέσματά τους. Το κεφάλαιο (7) περιγράφει τις αριθμητικές μεθόδους προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζει τα αποτελέσματα. Τέλος, στο κεφάλαιο (8) περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα. Τα κεφάλαια (9), (10), (11) και (12) είναι, αντιστοίχως, παράρτημα, πίνακας εικόνων, αναφορές και βιβλιογραφία.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Το CERN – Σύντομη αναδρομή

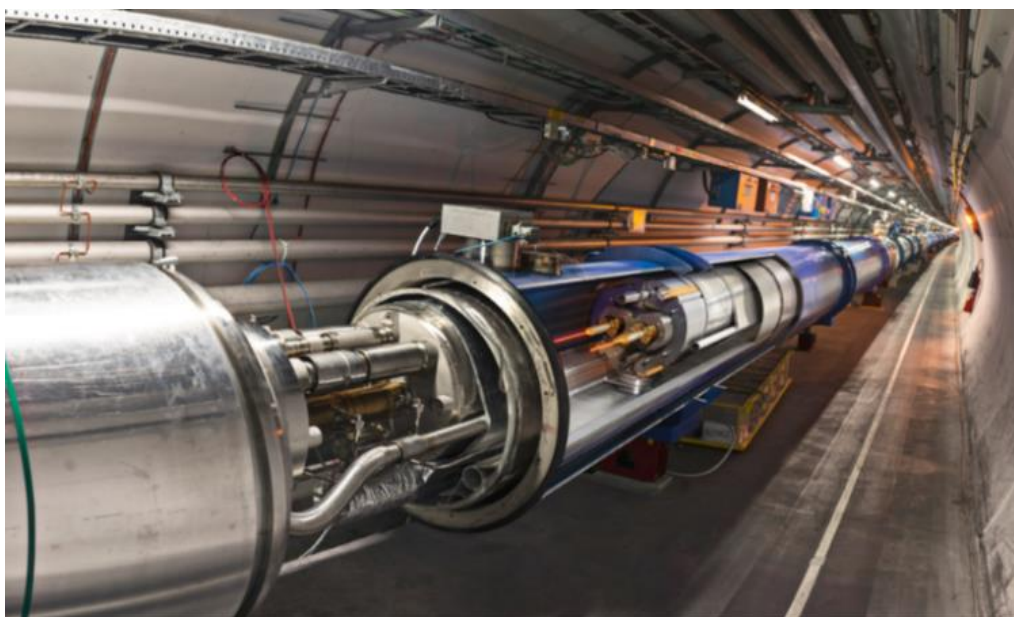


Εικόνα 1: Η υπόγεια σήραγγα του LHC και η εναέρια διάταξη [2]

Το ακρωνύμιο «C.E.R.N.» προέρχεται από τις λέξεις «Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire», οι οποίες στα γαλλικά σημαίνουν «Ευρωπαϊκό Συμβούλιο για την Πυρηνική Έρευνα», όπως ονομάστηκε στην αρχική του μορφή το 1952. Έκτοτε το όνομά του άλλαξε σε «European Organization for Nuclear Research» (Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Πυρηνική Έρευνα), όμως για λόγους ευφωνίας παρέμεινε το «CERN».

Το CERN είναι ένας οργανισμός παγκόσμιας κλάσης, με έδρα στην καρδιά της Ευρώπης, του οποίου σκοπός είναι η έρευνα στο πεδίο της Φυσικής και συγκεκριμένα σε αυτό της Σωματιδιακής Φυσικής, της επιστήμης δηλαδή που μελετά τη δομή της ύλης. Είναι ένα κοινό εγχείρημα κρατών – μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που ιδρύθηκε το 1954, και οι εγκαταστάσεις του βρίσκονται σε μια ευρύτερη περιοχή στα περίχωρα της πόλης της Γενεύης στην Ελβετία, πάνω στα γαλλοελβετικά σύνορα.

Αποτελεί το μεγαλύτερο εργαστήριο σωματιδιακής φυσικής στον κόσμο και το ανώτερο στο είδος του, στο οποίο φυσικοί και μηχανικοί από όλον τον πλανήτη συνεργάζονται προκειμένου να ανακαλύψουν τα μικροσκοπικά συστατικά της ύλης και τους νόμους της φύσης που τα κυβερνούν. Για το σκοπό αυτόν, οι επιστήμονες προσπαθούν να προσομοιώσουν τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των πρώτων στιγμών της γέννησης του σύμπαντος, δηλαδή στα κλάσματα του δευτερολέπτου μετά το «Big Bang», την «Μεγάλη Έκρηξη». Τότε ήταν που τα δομικά στοιχεία του κόσμου που μας περιβάλλει -τα σωματίδια της ύλης- σχηματίζονταν για πρώτη φορά [1].

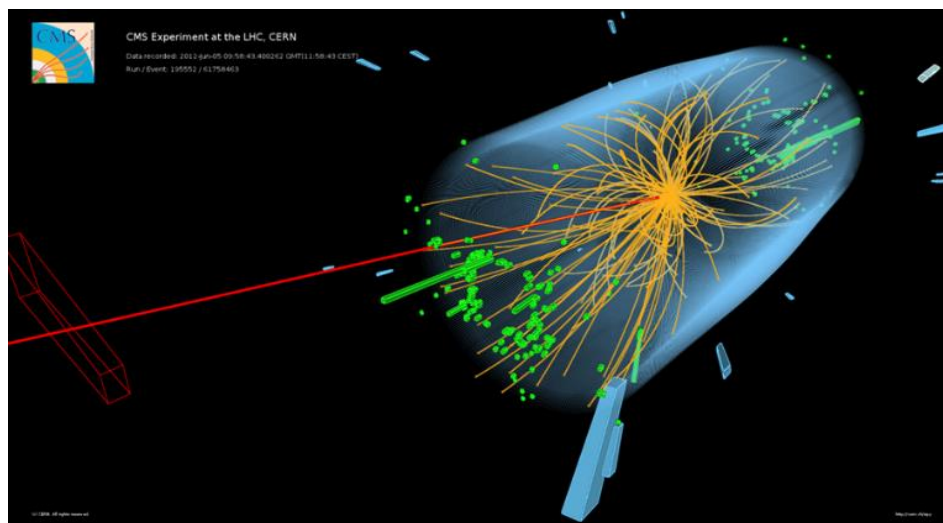


Εικόνα 2: Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων - The Large Hadron Collider (LHC) [2]

1.2. Συγκρούσεις Σωματιδίων

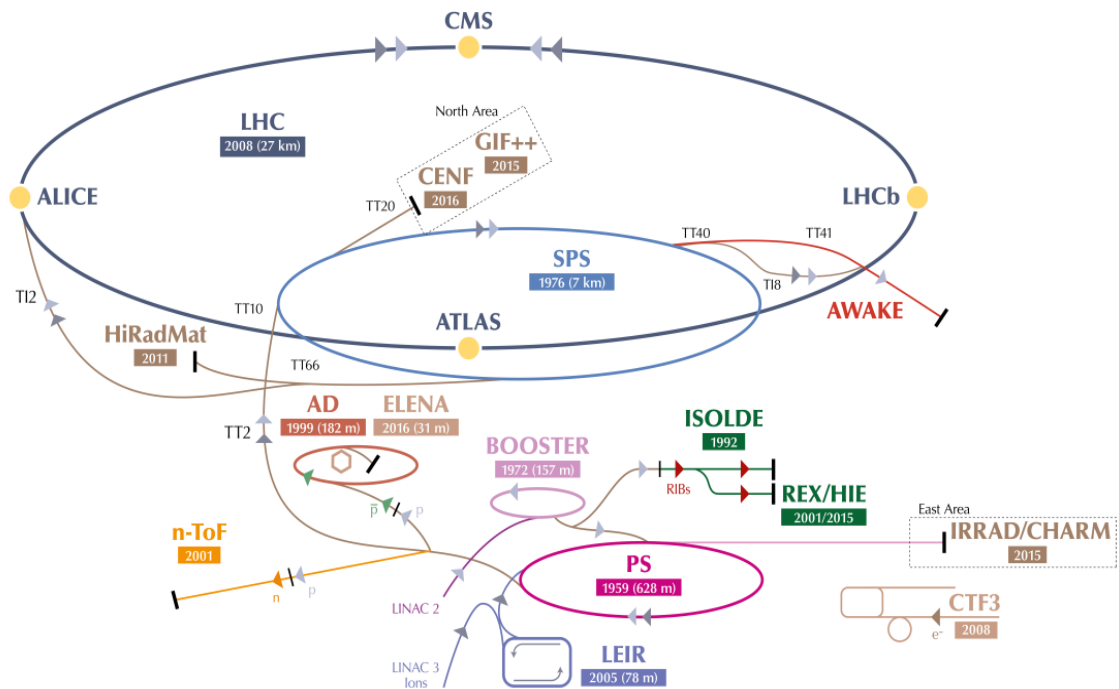
Η βασική ιδέα πίσω από το εγχείρημα αυτό είναι οι εξαιρετικά υψηλής ενέργειας συγκρούσεις σωματιδίων. Μέσω αυτών των πολλών αλληπάληλων συγκρούσεων, νέα σωματίδια θα δημιουργηθούν, επαληθεύοντας σε πολλές περιπτώσεις τις θεωρίες που προβλέπουν την ύπαρξή τους, και αυτό με τη σειρά του θα οδηγήσει στη βαθύτερη κατανόηση της πρωταρχικής δομής της ύλης και της ενέργειας, και επίσης των νόμων που τη διέπουν.

Προκειμένου να επιτευχθούν αυτές οι συγκρούσεις, απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας (της τάξης των TeV). Προς αυτόν το σκοπό, σωματίδια όπως πρωτόνια και βαρέα ιόντα, π.χ. ιόντα μολύβδου, σχηματίζουν ομάδες που ονομάζονται «δέσμες», οι οποίες θα πρέπει να επιταχυνθούν σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Τότε, οι δέσμες αυτές κατευθύνονται σε τροχιές αντίθετες μεταξύ τους και συγκρούονται η μία με την άλλη. Από τις συγκρούσεις, χιλιάδες σωματίδια αναδύονται, και με τη βοήθεια τεράστιων ανιχνευτών, καταγράφονται και μελετώνται [1].



Εικόνα 3: Συμβάντα συγκρούσεων τύπου «πρωτόνιο - πρωτόνιο στο κέντρο της μάζας», ενέργειας 8 TeV, καταγεγραμμένα από τον ανιχνευτή CMS το 2012 [5]

1.3. Επιταχυντές

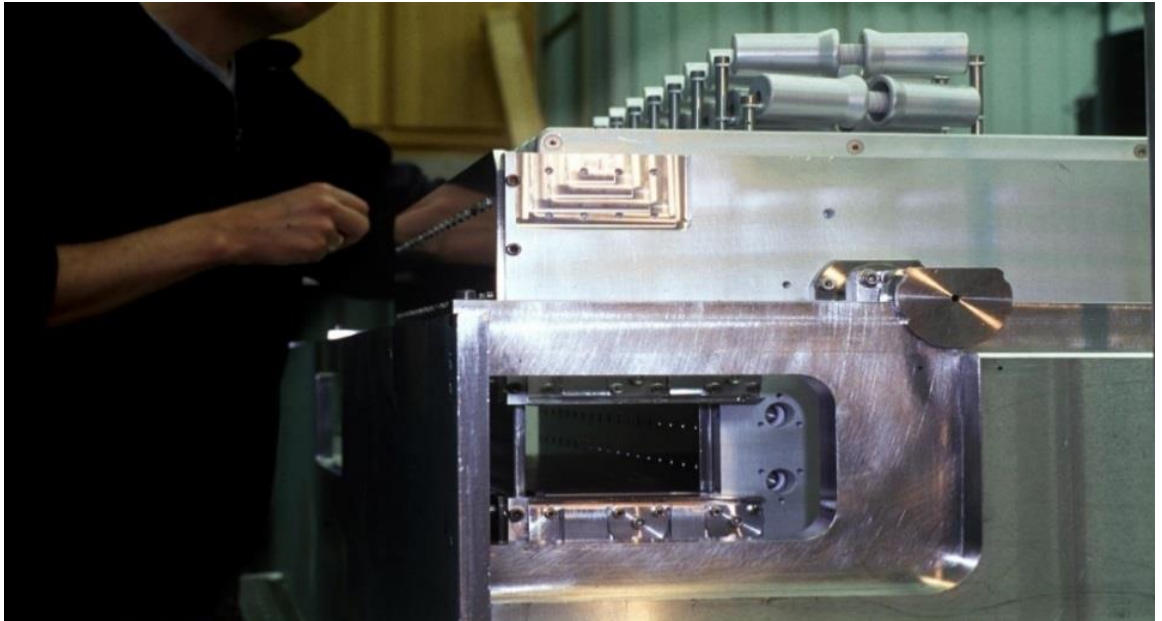


Εικόνα 4: Το σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN [7]

Ως βασικό εργαλείο, για την πραγματοποίηση αυτού του εντυπωσιακού πειράματος, το CERN χρησιμοποιεί πανίσχυρες και ογκώδεις διατάξεις κυκλικού συνήθως σχήματος, που ονομάζονται «επιταχυντές», μέσα στους οποίους τα σωματίδια επιταχύνονται με τη χρήση ηλεκτρικού πεδίου. Οι επιταχυντές βρίσκονται μέσα σε τεράστιες υπόγειες σήραγγες, με τον μεγαλύτερο, τον LHC (Large Hadron Collider, «Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων»), να έχει περίμετρο 27 χιλιομέτρων και να βρίσκεται σε μέσο βάθος 100 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους.

Αρχικά, τα σωματίδια φορτίζονται, ούτως ώστε να μπορούν να επιταχυνθούν από το ηλεκτρικό πεδίο. Έπειτα εισέρχονται στον επιταχυντή οποίος αποτελείται έναν σωλήνα πολύ υψηλού κενού, και εκεί, διάφορα είδη μαγνητών χρησιμοποιούνται ώστε να τα κατευθύνουν με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, τα σωματίδια επιταχύνονται με τη χρήση κοιλοτήτων επιτάχυνσης (accelerating cavities) και ηλεκτρομαγνητικών συντονιστών (electromagnetic resonators), ενώ διατηρούνται σε μια σταθερή ενεργειακή στάθμη για την εξισορρόπηση των απωλειών ενέργειας. Διπολικοί και τετραπολικοί μαγνήτες χρησιμοποιούνται ευρέως για τη διατήρηση των σωματιδίων σε σταθερή τροχιά και για την εστίαση της δέσμης. Είναι μια αρκετά μεγάλη και ευρεία γκάμα των μαγνητών που χρησιμοποιούνται στους επιταχυντές. [2]

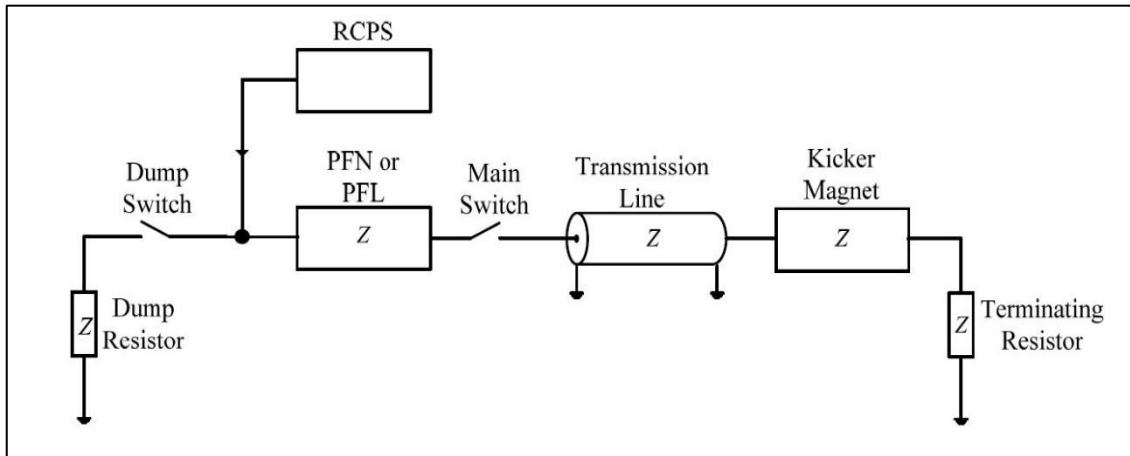
1.4. Μαγνήτες Kicker – Γραμμές Σχηματισμού Παλμών



Εικόνα 5: Ένας από τους kicker μαγνήτες που χρησιμοποιείται για να ευθυγραμμίσει μια εισερχόμενη δέσμη στην τροχιά που κυκλοφορεί στον SPS [6]

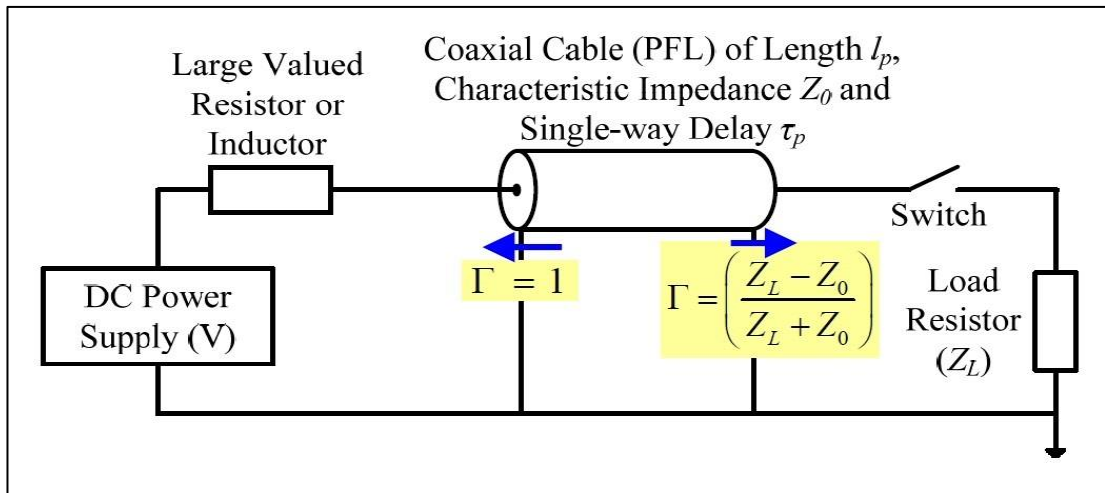
Προκειμένου να επιτευχθούν οι υψηλές ενέργειες που χρειάζονται για τις συγκρούσεις των δεσμών σωματιδίων, δεν αρκεί ένας μόνο επιταχυντής, αλλά απαιτείται ένα σύστημα επιταχυντών, με πολλαπλά επίπεδα ενέργειας, σταδιακά αυξανόμενης από το ένα στάδιο στο άλλο. Γι' αυτό στην πράξη χρησιμοποιείται το λεγόμενο «σύμπλεγμα επιταχυντών» (Accelerator Complex). Αρχικά, η δέσμη εισάγεται σε έναν προωθητή (Booster), και στη συνέχεια από μικρότερους σε μεγαλύτερους επιταχυντές, οι οποίοι συνεργάζονται για να επιταχύνουν τα σωματίδια σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Αυτό σημαίνει ότι οι δέσμες πρέπει να μεταφέρονται από τη μία διάταξη στην άλλη με γρήγορο, ακριβή και αποτελεσματικό τρόπο. Το ειδικό είδος μαγνητών που χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή, την εξαγωγή και γενικά τη μεταφορά δεσμών σωματιδίων από τον έναν επιταχυντή στον άλλον, ονομάζονται μαγνήτες Septa και Kicker, και συχνά χρησιμοποιείται ο συνδυασμός των δύο. Οι μαγνήτες αυτοί, προκειμένου να παράξουν το ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που χρειάζεται για να εκτρέψει τα σωματίδια από την τροχιά τους, τροφοδοτούνται από ορθογώνιους παλμούς υψηλής τάσης (high voltage pulse, συχνά 30 – 40 kV). Οι μαγνήτες Kicker έχουν πολύ γρήγορους χρόνους ανόδου / πτώσης των ορθογώνιων παλμών τάσης (συνήθως από 50ns έως 1μs) και έχουν χαμηλή ένταση πεδίου (<0,3 T) ενώ οι Septa είναι πιο αργοί (slow pulsed, χρόνοι ανόδου-καθόδου συνήθως >1μs) αλλά παρέχουν μεγάλες τιμές πεδίου (<1,7 T) .

Με άλλα λόγια ο Kicker μαγνήτης, στον οποίο αναφέρεται η παρούσα εργασία, είναι η διάταξη που (μαζί με τον Septa μαγνήτη) θα εκτρέψει - θα δώσει το «kick» στην δέσμη ώστε να της αλλάξει την τροχιά.



Εικόνα 6: Απλοποιημένο διάγραμμα ενός kicker συστήματος [3]

Ένα σύστημα Kicker, όπως φαίνεται στην εικόνα 6, αποτελείται από πολλά εξαρτήματα όπως: την γραμμή ή δίκτυο σχηματισμού παλμών (pulse forming line or network, PFL or PFN), τον μαγνήτη Kicker, τους γρήγορους διακόπτες υψηλής ισχύος (fast high power switches), το τροφοδοτικό ισχύος – φόρτισης συντονισμού (Resonant Charging Power Supply, RCPS), τη γραμμή μεταφοράς (transmission line) και τις αντιστάσεις τερματισμού (terminating resistors). [3]



Εικόνα 7: Απλοποιημένο διάγραμμα του κυκλώματος σχηματισμού του παλμού [35]

Ειδικότερα, το ομοαξονικό καλώδιο παλμικής υψηλής τάσης είναι το κύριο συστατικό του κυκλώματος σχηματισμού στο οποίο παράγεται ο παλμός. [3]

2. ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ (CONNECTORS) ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ



Εικόνα 8: Ομοαξονικά καλώδια 20Ω, 40Ω [39]

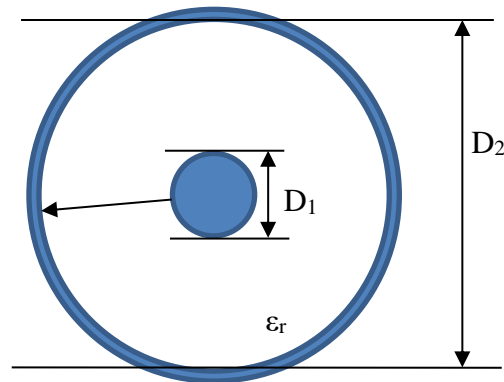


Εικόνα 10: Ομοαξονικά καλώδια υψηλής τάσης [27]



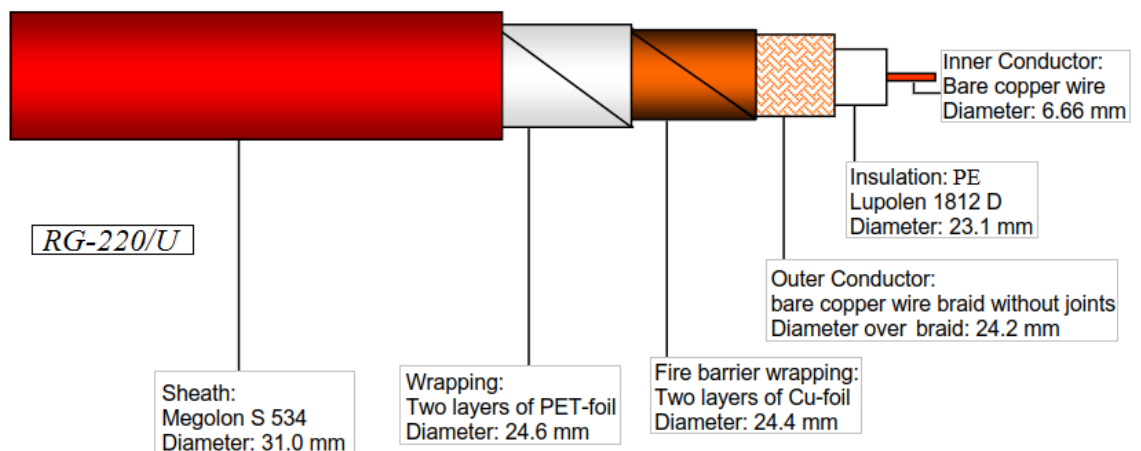
Εικόνα 9: Ομοαξονικά καλώδια και σύνδεσμοι 20Ω [39]

2.1. Ορισμοί



Εικόνα 11: Διατομή ομοαξονικού καλωδίου

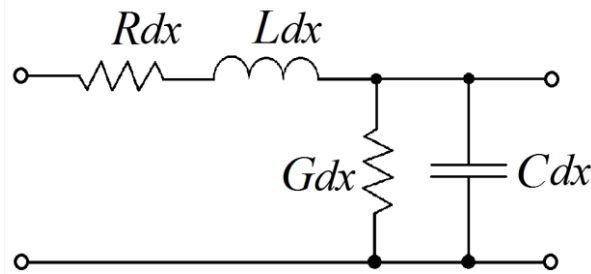
Ένα ομοαξονικό καλώδιο είναι ένα είδος γραμμής μεταφοράς το οποίο αποτελείται από τρία βασικά μέρη: (i) Τον εσωτερικό αγωγό, ο οποίος είναι ένας αγωγίμος σωλήνας ή συμπαγής κύλινδρος, (ii) τον εξωτερικό αγωγό, ο οποίος περικλείει τον εσωτερικό και μπορεί να είναι είτε συμπαγής σωλήνας (επίπεδης επιφάνειας ή με αύλακες) είτε μεταλλικό πλέγμα και (iii) τη μόνωση, η οποία είναι το διηλεκτρικό μέσο μεταξύ των δύο αγωγών και μπορεί να βρίσκεται σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφή. Οι διαστάσεις των διαμέτρων των δύο αγωγών (D_2 για τον εξωτερικό και D_1 για τον εσωτερικό) όπως και η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) της μόνωσης, παίζουν σημαντικό ρόλο για το καλώδιο, επειδή είναι καθοριστικοί παράγοντες για τη χαρακτηριστική του αντίσταση και για άλλες σημαντικές παραμέτρους. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος υλικού για τους μεταλλικούς αυτούς αγωγούς είναι ο χαλκός (Cu), ενώ για τη μόνωση συνήθως χρησιμοποιείται πολυαιθυλένιο (PE) χαμηλής πυκνότητας.



Εικόνα 12: Δομή ομοαξονικού καλωδίου τύπου RG-220/U στην οποία φαίνονται τα διάφορα στρώματα των υλικών [34]

2.2. Βασικά Χαρακτηριστικά Στοιχεία

Οι ομοαξονικές γραμμές και τα ομοαξονικά καλώδια χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο για το σχηματισμό όσο και τη μετάδοση παλμών υψηλής τάσης [4]. Σύμφωνα με τη Θεωρία Γραμμών Μεταφοράς [5], από την αντίστοιχη βιβλιογραφία, μια γραμμή μεταφοράς αποτελείται από δύο αγωγούς - έναν υπό τάση και μία γείωση - και την απαραίτητη μόνωση από διηλεκτρικό υλικό μεταξύ τους. Και οι δύο αγωγοί έχουν σταθερή επιφάνεια διατομής. Μαζί με το διηλεκτρικό, μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα ισοδύναμο κύκλωμα του οποίου τα διακεκριμένα στοιχεία κατανομονται ομοιόμορφα στο μήκος του. Μια σχηματική αναπαράσταση των στοιχείων της γραμμής μεταφοράς φαίνονται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Ομοαξονικό καλώδιο με τα ανά μονάδα στοιχεία του

Τα βασικά χαρακτηριστικά της γραμμής ανά μονάδα μήκους είναι :

- h : το μήκος του καλωδίου
- R/h : η αντίσταση σειράς βρόχου (loop series resistance) του εσωτερικού και του εξωτερικού αγωγού σε Ω/m
- G/h : η παράλληλη αγωγιμότητα (shunt conductance) G σε S/m , η οποία αντιπροσωπεύει το ρεύμα διαρροής στη μόνωση μεταξύ των δύο αγωγών
- C/h : η παράλληλη χωρητικότητα (shunt capacitance) C του καλωδίου σε F/m , η οποία σχηματίζεται από το διηλεκτρικό και τους δύο αγωγούς
- L/h : η επαγωγή σειράς (series inductance) L , σε H/m η οποία εξαρτάται από την επιφάνεια διατομής του καλωδίου

Από τα τέσσερα παραπάνω βασικά στοιχεία μπορούμε να εξάγουμε την εξίσωση της αντίστασης εισόδου μιας γραμμής

μεταφοράς η οποία αποτελεί την χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 , σε Ω , σε οποιαδήποτε συχνότητα ως εξής :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

Για υψηλές συχνότητες (της τάξης των πολλών MHz), η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

Η σταθερά διάδοσης του κύματος είναι:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (3)$$

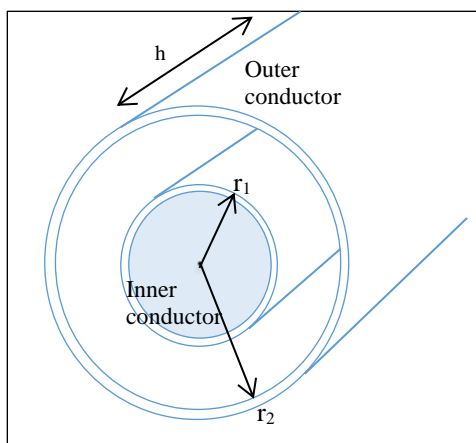
όπου α είναι η εξασθένιση σε nepers/km (ή σε dB/km εάν πολλαπλασιάσουμε με 8.686) και β είναι ο συντελεστής αλλαγής φάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν τις δύο βασικές παραμέτρους των ομοαξονικών καλωδίων, τη χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 και την εξασθένιση α . Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, οι παράμετροι αυτές μπορούν να προκύψουν από τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου, δηλαδή τις διαστάσεις του και τη σχετική επιτρεπτότητα της μόνωσης.

Σύμφωνα με την αντίστοιχη βιβλιογραφία [5], βρίσκουμε ότι οι εξισώσεις για τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία ανά μονάδα μήκους της γραμμής, L , C , R και G , εξαρτώνται από τις διαμέτρους του εσωτερικού και του εξωτερικού αγωγού, τη συχνότητα και άλλες ιδιότητες των υλικών, όπως φαίνεται παρακάτω. Επίσης από τη διηλεκτρική σταθερά $\epsilon = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j \cdot \epsilon_r'')$, όπου $\epsilon' = \epsilon_r' \cdot \epsilon_0$ είναι το πραγματικό μέρος της μιγαδικής (complex) επιτρεπτότητας $\epsilon = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' = \epsilon' \cdot (1 - j \tan \delta)$, όπου $\tan \delta = (\omega \cdot \epsilon'' + \sigma) / (\omega \cdot \epsilon')$ είναι η εφαπτομένη των απωλειών και ϵ_0 η επιτρεπτότητα του κενού, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Από την εικόνα 14, έχουμε:

$$\frac{L}{h} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right), \quad (H/m) \quad (4)$$



Εικόνα 14: Διατομή ομοαξονικού καλωδίου

όπου $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του αγωγού.

$$\frac{C}{h} = \frac{2\pi\epsilon'_r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (F/m) \quad (5)$$

Επίσης από την εικόνα 14:

$$\begin{aligned} \frac{R_{total}}{h} &= [R_{DC_{inner}} + R_{DC_{outer}}] + [R_{AC_{inner}}(f) + R_{AC_{outer}}(f)] = \\ &= \left[\frac{1}{\Delta_{inner} \cdot \sigma_{CU}} + \frac{1}{\Delta_{outer} \cdot \sigma_{CU}} \right] + \left[\frac{1}{\Delta_{eff_{inner}} \cdot \sigma_{CU}} + \frac{1}{\Delta_{eff_{outer}} \cdot \sigma_{CU}} \right], \quad (\Omega/m) \quad (6), \quad [5] \end{aligned}$$

όπου Δ_{inner} και Δ_{outer} είναι οι επιφάνειες της διατομής των δύο αγωγών αντίστοιχα, $\Delta_{eff_{inner}} = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \delta_s$, όπου r_1 είναι η εξωτερική ακτίνα του εσωτερικού αγωγού και $\Delta_{eff_{outer}} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \delta_s$, όπου r_2 είναι η εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού αγωγού, δ_s είναι το επιδερμικό βάθος, $\delta_s = \frac{1}{\sqrt{(\mu_0 \cdot f \cdot \pi \cdot \sigma_{CU})}}$, και σ_{CU} η αγωγιμότητα του χαλκού.

Είναι:

$$\frac{G}{h} = \frac{4\pi^2 \epsilon_0 \epsilon'_r \tan(\delta)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot f, \quad (S/m) \quad (7)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις, ένας άλλος τρόπος για να εκφράσουμε την χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 του καλωδίου σε Ω , μέσω των διαστάσεών του είναι:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left(\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right) \frac{1}{2\pi} \quad (8)$$

και η σταθερά εξασθένησης σε dB/km είναι:

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R}{Z_0} + G \cdot Z_0 \right) \cdot 8.686. \quad (9)$$

όπου $G = G(f)$ και $R = R_{total} = R_{DC} + R_{AC}(f)$, υπολογισμένα τόσο για τον εσωτερικό όσο για τον εξωτερικό αγωγό, $D_2 = 2 \cdot r_2$, $D_1 = 2 \cdot r_1$.

2.3. Υψηλές Τάσεις Και Διηλεκτρικά

2.3.1. Ο Ρόλος Της Διηλεκτρικής Σταθεράς ϵ_r

Τα ομοαξονικά καλώδια υψηλής τάσης χρησιμοποιούν διαφορετικά μονωτικά υλικά ως διηλεκτρικά μέσα μεταξύ των δύο αγωγών. Τα υλικά μπορεί να είναι στερεά (όπως στην περίπτωση του πολυαιθυλενίου), υγρά (π.χ. έλαια σιλικόνης / ορυκτέλαια), αέρια (π.χ. αέρας, αέριο SF₆) ή κενό. Η διηλεκτρική σταθερά (ή σχετική επιτρεπτότητα) καθορίζει τη σωστή απαιτούμενη χαρακτηριστική αντίσταση για κάθε εφαρμογή και επίσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξασθένιση του σήματος και τις απώλειες του παλμού στο καλώδιο. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τύποι διηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιούνται ως μονωτές φαίνονται στον Πίνακα I.

Πίνακας I
Διηλεκτρικές σταθερές για διαφορετικά υλικά στους 20 °C

Υλικό	Διηλεκτρική Σταθερά
Κενό	1
Αέρας (1 Atm)	1.00059
Αέριο SF ₆	1.00204
Αέρας (100 Atm)	1.0548
Υγρό Fluorinert™ FC-40	1.9
Τεφλόν	2.1
Διάφορα Έλαια Σιλικόνης	2.18 - 2.8
Πολυαιθυλένιο	2.2 - 2.3
Πολυπροπυλένιο	2.2 - 2.3
Πολυστυρένιο	2.55
Έλαιο Bluesil™ 47 V 20	2.7
Πλεξιγκλάς	2.7 - 3.7
Μίκα	3 - 6
Πολυβινυλοχλωρίδιο	3.18
Χαρτί	3.3 - 3.5
Βακελίτης	3.5 - 5
Εποξειδική Ρητίνη	3.6 - 6
Γυαλί	5 - 10
Πορσελάνη	6 - 8
Ελαστικό Νεοπρένιο	6.7
Σιλικόνη	11.9
Γερμάνιο	16
Νερό (αποσταγμένο)	80.4
Τιτανικό Στρόντιο	310

Κάτω από ορισμένες συνθήκες, η μόνωση αυτή μπορεί να υποστεί βλάβες και να αποτύχει τελείως ή μερικώς, πράγμα το οποίο οδηγεί στην καταστροφή του καλωδίου. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί μηχανισμοί, αναλόγως με το διηλεκτρικό μέσο στο οποίο μπορεί να συμβεί αυτό το φαινόμενο, κατά τη διάρκεια ζωής

του καλωδίου, ενώ η διαδικασία εξαρτάται από πολλές μεταβλητές. Οι παράγοντες αυτοί είναι οι θερμικές και ηλεκτρικές καταπονήσεις, η ακτινοβολία, οι μηχανικές καταπονήσεις, οι περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και η χρονική διάρκεια κατά την οποία το καλώδιο υφίσταται το κάθε είδος καταπόνησης. Επομένως, οι σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι ευθύνονται για την υποβάθμιση της μόνωσης είναι: η τάση, η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία, η ακτινοβολία και επιπροσθέτως, πολύ σοβαρός παράγοντας είναι η παρουσία ακαθαρσιών / επικαθήσεων στο διηλεκτρικό και ατελειών του καλωδίου, δηλαδή με τη μορφή ρύπων, ασυνεχειών (κοιλοτήτων) και επίσης αιχμηρών ακμών, όπως επίσης το σχήμα και ο τύπος των αγωγών.

2.3.2. Τάση Διάσπασης Και Μέγιστη Τάση

Η πιο σημαντική και μόνιμη βλάβη που μπορεί να συμβεί στη μόνωση ενός καλωδίου καλείται ηλεκτρική διάσπαση (BreakDown - BD). Είναι ουσιαστικά η καταστροφή του διηλεκτρικού, κατά την οποία: η εφαρμοζόμενη τάση στους δύο αγωγούς ξεπερνά την τάση διάσπασης (BreakDown Voltage - BDV), οι τιμές των ηλεκτρικών πεδίων ξεπερνούν την ηλεκτρική αντοχή του υλικού, οι δύο αγωγοί γεφυρώνονται ηλεκτρικά, και επομένως η μόνωση γίνεται πλέον αγωγή.

Πίνακας II
Διηλεκτρική αντοχή για διαφορετικά υλικά στους 20 °C

Υλικό	Διηλεκτρική Αντοχή (kV/mm)
Εποξειδική Ρητίνη	0.5 - 2
Αέρας	3
Χαρτί	6 - 12
Τιτανικό Στρόντιο	8
Αέριο SF ₆	9.018
Γερμάνιο	10
Βακελίτης	12 - 28
Έλαιο Bluesil™ 47 V 20	14
Διάφορα Έλαια Σιλκόνης	14 - 18
Γυαλί	17-30
Υγρό Fluorinert™ FC-40	18.11
Ελαστικό Νεοπρένιο	18 -25
Πολυαιθυλένιο	18.9 - 160
Πολυστυρένιο	19.7
Κενό	20 - 40
Πλεξιγκλάς	30
Σιλκόνη	30
Πολυβινυλοχλωρίδιο	40
Πορσελάνη	40 - 50
Τεφλόν	60
Νερό (αποσταγμένο)	65 - 70
Μίκα	200
Πολυπροπυλένιο	230 - 250

Με άλλα λόγια, η διηλεκτρική αντοχή ενός υλικού είναι η μέγιστη ηλεκτρική καταπόνηση (το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο, δηλαδή η μέγιστη τάση ανά μονάδα μήκους, σε kV/mm ή MV/m) που μπορεί το υλικό να αντέξει πριν τη διάσπαση.

Οι ποικιλία των παραγόντων που μπορούν να οδηγήσουν σε διάσπαση είναι ευρεία και πολύπλοκη και συχνά μπορεί να αποτελεί συνδυασμό πολλών μηχανισμών κατάρρευσης (breakdown mechanisms), οι οποίοι δρουν ταυτόχρονα, είτε άλλοτε να οφείλονται σε μία μόνο αποδεκτή θεωρία, όπως το «φαινόμενο της χιονοστιβάδας» στην περίπτωση των υγρών και των αερίων. Κάτω από χαμηλή ηλεκτρική καταπόνηση, σε ένα διηλεκτρικό αέριο δεν υπάρχει ροή ρεύματος εκτός εάν υπάρχουν αρκετά ελεύθερα ιόντα ή ηλεκτρόνια μέσα σε αυτό. Εάν η ηλεκτρική καταπόνηση είναι αρκετά υψηλή, ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να ιονίσει ένα μόριο του αερίου μέσω κρούσης, από την οποία θα παραχθούν δύο ηλεκτρόνια και ένα ιόν. Τότε, τα δύο αυτά ηλεκτρόνια με τη σειρά τους θα ιονίσουν δύο ακόμα ιόντα, παράγοντας τέσσερα ηλεκτρόνια και δύο ιόντα και ούτω καθεξής. Η όλη αυτή διαδικασία, η οποία ονομάζεται «ηλεκτρονιακή χιονοστιβάδα» (electron avalanche), σταδιακά θα οδηγήσει σε ένα αγωγίμο μονοπάτι ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα την αποτυχία της μόνωσης και την πρόκληση διάσπασης. Η τάση ακριβώς πριν την έναρξη αυτού του φαινομένου ονομάζεται μέγιστη τάση (peak voltage) του καλωδίου και είναι η μέγιστη επιτρεπτή (ονομαστική) τάση λειτουργίας κάτω από την οποία το καλώδιο επιτρέπεται να λειτουργεί με ασφάλεια [5], [6].

2.4. Ομοαξονικά καλώδια

2.4.1. Σημαντικές Παράμετροι Ενός Ομοαξονικού Καλωδίου

Οι παράγοντες που κατέχουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα και στην απόδοση ενός ομοαξονικού καλωδίου, σύμφωνα με τις ανάγκες των συστημάτων των kickers του CERN, είναι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες που αναγράφονται στο δελτίο τεχνικών στοιχείων του κατασκευαστή (datasheet) του εκάστοτε καλωδίου, για το οποίο γίνεται ειδική παραγγελία στις κατασκευαστικές εταιρίες καλωδίων. Οι ιδιότητες αυτές είναι :

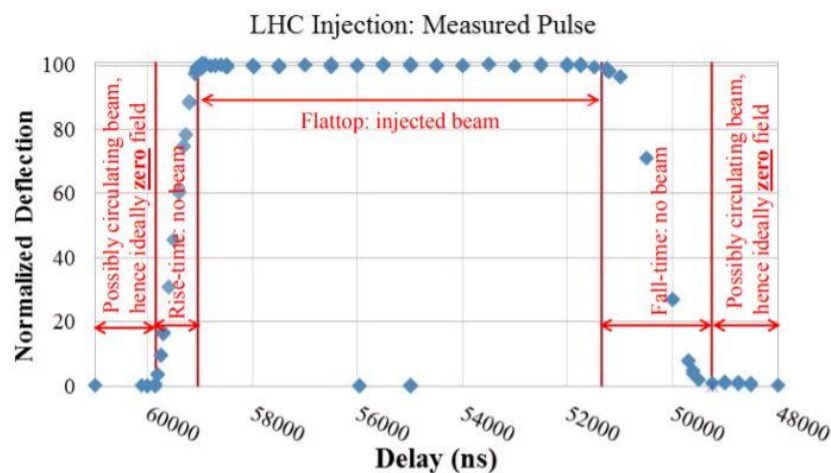
- η χαρακτηριστική αντίσταση (Z_0) του καλωδίου, σε Ω
- η εξασθένηση (απώλειες) του μεταδιδόμενου σήματος κατά μήκος του καλωδίου (εξαρτάται από τη συχνότητα του σήματος), σε dB/km
- το μέγιστο πλάτος των μερικών εκκενώσεων στο μονωτικό διηλεκτρικό του καλωδίου, σε pC

- η μέγιστη AC και DC τάση και η τάση διάσπασης (ΤΔ) του καλωδίου.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες αυτές είναι ιδιαίτερης σημασίας για το CERN και οι μηχανικοί είναι πάντοτε υποχρεωμένοι να ελέγξουν και να επιβεβαιώσουν το εάν και κατά πόσον τα καλώδια πληρούν τα πρότυπα του CERN και το αν είναι κατασκευασμένα σύμφωνα με τις εξειδικευμένες απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Γι' αυτόν το λόγο αυτό γίνονται συχνοί έλεγχοι και μετρήσεις σε δείγματα καλωδίων και συνδέσμων προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία αυτών των προϊόντων. Μία άλλη σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν σχετίζεται με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν τα καλώδια. Τα καλώδια αυτά πρέπει να είναι ανθεκτικά στη ραδιενέργεια ώστε να αντέξουν στις δόσεις ακτινοβολίας που θα λάβουν κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Η ραδιενέργεια έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε μηχανική κατάρρευση ή αλλαγή των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών [7].

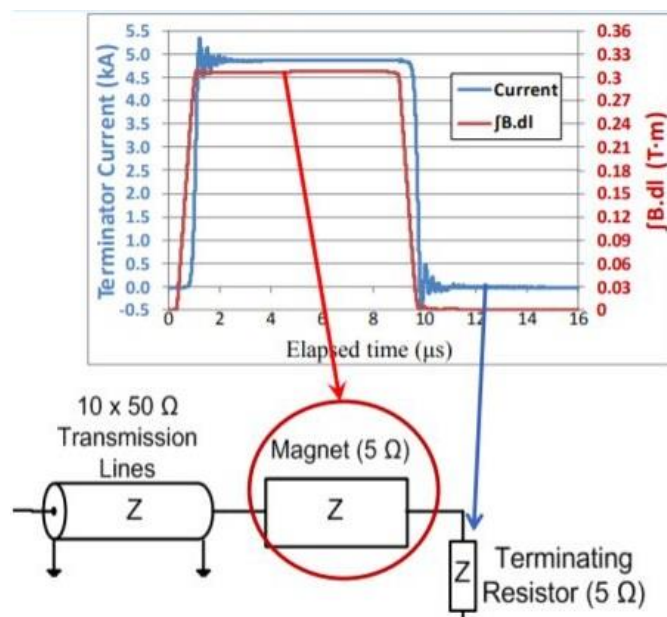
2.4.2. Σε Ποιες Περιπτώσεις Και Γιατί Χρησιμοποιούμε Ομοαξονικά Καλώδια

Οι μαγνήτες kicker χρησιμοποιούνται σε όλο το σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN για τη μεταφορά δεσμών σωματιδίων (beam transfer) μεταξύ των επιταχυντών αλλά και για την απόρριψη των δεσμών (beam dump). Χρειάζεται να έχουν γρήγορους χρόνους ανόδου/καθόδου του μαγνητικού τους πεδίου ώστε, για παράδειγμα, να μπορούν να εκτρέψουν ένα μόνο πακέτο της δέσμης που εισάγεται σε έναν επιταχυντή, χωρίς να επηρεαστεί η (ήδη υπάρχουσα) δέσμη που κυκλοφορεί σε αυτόν. Για την εφαρμογή αυτή, χρησιμοποιούνται κυκλώματα σχηματισμού ταχέων παλμών (fast pulse forming circuits). Τα ομοαξονικά καλώδια υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται ευρέως στο CERN για τη δημιουργία και



Εικόνα 15: Χαρακτηριστικά ενός ορθογώνιου παλμού ενός kicker που χρησιμοποιείται στον LHC για εισαγωγή δέσμης [42]

μεταφορά παλμών kicker. Το μαγνητικό πεδίο του kicker πρέπει να αυξάνεται και να μειώνεται πολύ γρήγορα, από δεκάδες σε εκατοντάδες ns. Η απλούστερη διάταξη είναι η Γραμμή Σχηματισμού Παλμών που (Pulse Forming Line, PFL) που αποτελείται από ομοαξονικό καλώδιο. Για τέτοιου είδους γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα, σύμφωνα με τη θεωρία των οδεύοντων κυμάτων, πρέπει να ικανοποιούνται διάφορες απαιτήσεις και συνθήκες ώστε να εξασφαλιστεί ομαλή λειτουργία. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά στοιχεία των ομοαξονικών καλωδίων, για χρήση στα συστήματα παλμών τάσης, είναι: η ομογενής χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου, η οποία πρέπει να είναι ίση με την χαρακτηριστική αντίσταση της εκάστοτε εφαρμογής ώστε να αποφευχθούν ανακλάσεις κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς και απώλειες στο μαγνητικό πεδίο του kicker, η χαμηλή εξασθένιση, ώστε να αποφευχθεί η πτώση του ρεύματος (current droop) και η παραμόρφωση των παλμών (pulse distortion), όπως επίσης και η διηλεκτρική αντοχή, ώστε να αντέχουν στις υψηλές τάσεις που απαιτούνται για τη μεταφορά του ρεύματος.



Εικόνα 16: Ο ορθογώνιος παλμός ενός kicker και μέρος της PFL [42]

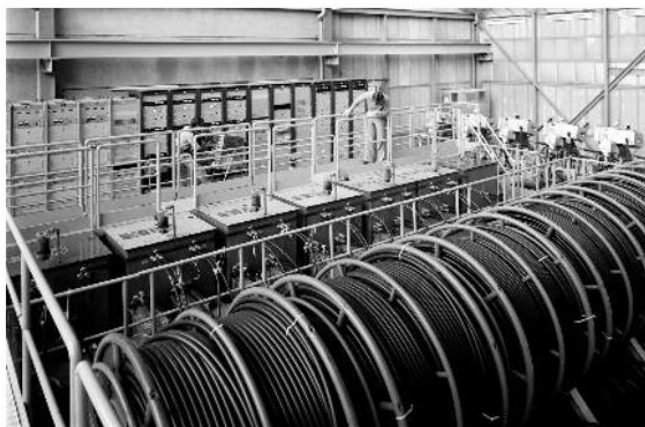
Συνοψίζοντας, τα σημαντικά χαρακτηριστικά των ομοαξονικών καλωδίων είναι :

- ✓ προσαρμοσμένη και ομογενής χαρακτηριστική αντίσταση
- ✓ χαμηλή εξασθένιση
- ✓ υψηλή διηλεκτρική αντοχή

2.4.3. Το CERN Χρησιμοποιεί Ειδικά Ομοαξονικά Καλώδια Υψηλής Τάσης Που Περιέχουν Αέριο SF₆ (Εξαφθοριούχο Θείο)

Είναι κρίσιμης σημασίας για τις εφαρμογές των μαγνητών kicker, ο παλμός του μαγνητικού πεδίου να έχει, ιδανικά, ορθογώνια μορφή. Επομένως, χρειάζεται ο χρόνος ανόδου-καθόδου του παλμού να είναι μικρός, η πτώση/εξασθένιση του παλμού (droop) κατά την εκφόρτιση να είναι μικρή, και επίσης θέλουμε ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων κατά τη διάρκεια του παλμού (στην αποκαλούμενη «flat top» γραμμή). Γι' αυτό απαιτείται ένα καλώδιο χαμηλών απωλειών με πολύ μικρή εξασθένιση (<2.9 dB/km) και ομογενή (χωρίς διακυμάνσεις) χαρακτηριστική αντίσταση ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης του παλμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το να είναι αδύνατη η χρήση των ημιαγωγικών στρωμάτων, τα οποία κανονικά εξομαλύνουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στη διεπαφή του αγωγού με το μονωτή. Τέτοια στρώματα κανονικά επιτρέπουν την κατασκευή συμπαγών εξωθημένων (extruded) καλωδίων για εφαρμογές υψηλών τάσεων. Στο CERN, το πλάτος της μέγιστης τάσης δίνεται από την απαιτούμενη ένταση του kick του μαγνήτη (magnet kick strength) και φτάνει τα 80 kV. Για την αποφυγή ανακλάσεων του παλμού, η χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου πρέπει να είναι προσαρμοσμένη και ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση του εκάστοτε μαγνήτη. Συνήθως χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικές αντιστάσεις με τιμές μεταξύ 2 και 25 Ω. Ήδη σύμφωνα με απλούς υπολογισμούς, φαίνεται ότι για συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς την χαρακτηριστική αντίσταση, την εξασθένιση και την τάση λειτουργίας, το πάχος της μόνωσης ενός εξωθημένου καλωδίου πολυαιθυλενίου (extruded PE cable) παίζει σημαντικό ρόλο, γι' αυτό και η διάμετρος του καλωδίου είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό προκαλεί προβλήματα στην παραγωγή όσον αφορά την ακρίβεια μιας διαδικασίας εξώθησης (extrusion process).

Το CERN εκμεταλλεύτηκε στο παρελθόν τις εξαιρετικές ιδιότητες του αερίου SF₆ και εισήγαγε ένα σχέδιο στο οποίο το



Εικόνα 17: Γραμμές σχηματισμού παλμών αποτελούμενες από καλώδιο με αέριο SF₆ [19]

καλώδιο αποτελείται από έναν κοίλο εσωτερικό αγωγό χαλκού με πεπιεσμένο αέριο SF₆, και είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε το αέριο να εισχωρεί στο διηλεκτρικό. Το διηλεκτρικό αυτό καθαυτό αποτελείται από πολλά στρώματα λεπτών φύλλων πολυαιθυλενίου, τυλιγμένα γύρω από τον αγωγό, και αέριο SF₆. Η διαδικασία του τυλίγματος της ταινίας PE (με επικάλυψη και σε εναλλακτικές κατευθύνσεις) γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το αέριο SF₆ να εισχωρεί σε όλη την έκταση του διηλεκτρικού καλύπτοντας οποιαδήποτε κενά (voids). Ο εξωτερικός αγωγός κατασκευάζεται από είτε από extruded αλουμίνιο ή είναι παράλληλος κυματοειδής (αυλακωτός) χαλκός (υπάρχουν δύο σχέδια) και προστατεύεται από ένα εξωτερικό περίβλημα (Low Smoke Zero Halogen - LSZH jacket). Το CERN χρησιμοποιεί περίπου 15 km καλωδίων γεμισμένα με αέριο SF₆, κατασκευασμένα από τις Les Câbles de Lyon (τη δεκαετία του '70) και Brugg (δεκαετία '90) [8].

Υπάρχει μία διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη αντικατάστασης του καλωδίου SF₆ όχι μόνο εξαιτίας της γήρανσης του συστήματος αλλά επίσης λόγω των συνεχώς αυστηρότερων προδιαγραφών και περιορισμών στις διαδικασίες χειρισμού του αερίου αυτού. Το εξαφθοριούχο θείο απορροφά σε μεγάλο βαθμό την υπέρυθη ακτινοβολία και εκτιμάται ότι συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη 25.000 φορές περισσότερο από ότι το CO₂ [9]. Συν τοις άλλοις, το συγκεκριμένο ομοαξονικό καλώδιο δεν είναι διαθέσιμο στην αγορά καθότι δεν κατασκευάζεται πλέον. Γι' αυτόν το λόγο το CERN αναζητεί εντατικά μια εναλλακτική λύση.

2.4.4. Αντικαταστάτες Των SF₆ Καλωδίων Υπό Διερεύνηση

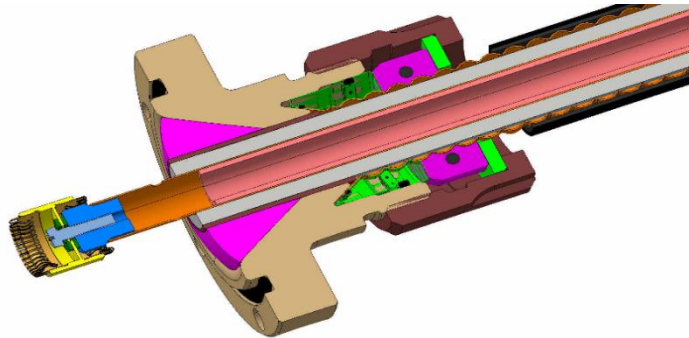
Σε αυτό το πλαίσιο, διάφορες πιθανές υποψήφιες εναλλακτικές λύσεις για την αντικατάσταση των καλωδίων SF₆ έχουν προταθεί. Μια πρώτη επιλογή θα ήταν η χρήση βελτιωμένων εξωθημένων καλωδίων με διηλεκτρικό το πολυαιθυλένιο, τα οποία έχουν μεγάλη διάμετρο, χωρίς ημιαγωγίμο στρώμα. Άλλες πολλά υποσχόμενες λύσεις περιλαμβάνουν νέες τεχνολογίες γεννητριών παλμών, όπως ο Επαγωγικός Αθροιστής [10] και η γεννήτρια-Marx [11]. Μια άλλη επιλογή, η οποία και εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι η προσαρμογή ενός έτοιμου (προκατασκευασμένου) καλωδίου, χαμηλής εξασθένισης, το οποίο χρησιμοποιεί τον αέρα ως διηλεκτρικό, το HCA118-50J «Heliflex», το οποίο κατασκευάζεται από την Radio Frequency Systems, RFS [12]. Η τροποποίηση του καλωδίου θα γίνει με την αντικατάσταση του αερίου διηλεκτρικού με ηλεκτρομονωτικό έλαιο. Η αύξηση στη διηλεκτρική αντοχή θα επιτρέψει τόσο την επίτευξη υψηλότερων μέγιστων τάσεων, μείωση του φαινομένου Corona, αλλά και αύξηση της τάσης εμφάνισης μερικών εκκενώσεων.

2.5. Σύνδεσμοι (Connectors) Για Ομοαξονικά Καλώδια Υψηλής Τάσης

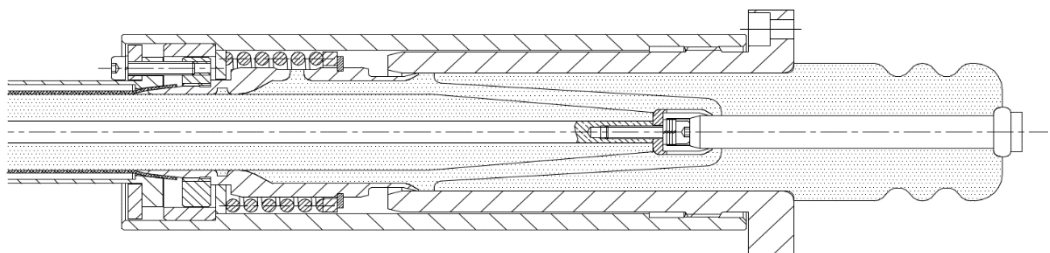


Εικόνα 18: Σύνδεσμος M30311h (Spinner) για το ομοαξονικό καλώδιο RFS HCA118-50J Heliflex [26]

Οι σύνδεσμοι ομοαξονικών καλωδίων υψηλής τάσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση και την ηλεκτρική συμπεριφορά των ίδιων των καλωδίων. Πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια τα οποία περιλαμβάνουν: υποδοχείς σύνδεσης με στεγανότητα κατά των διαρροών, συγκεκριμένη χαρακτηριστική αντίσταση, αντοχή στη ραδιενέργεια, ασφαλή σχεδιασμό για παλμούς τάσης πλάτους δεκάδων kV και άλλες μηχανολογικές απαιτήσεις, που είναι



Εικόνα 19: Διατομή σε CAD ενός συνδέσμου ομοαξονικού καλωδίου γεμισμένου με αέριο SF₆ [30]



Εικόνα 20: Σχέδιο συναρμολόγησης συνδέσμου καλωδίου τύπου RG 220/U [13]



Εικόνα 21. LEMO HT50 σύνδεσμος, σε χρήση για συστήματα τάσεων έως 40kV [19]

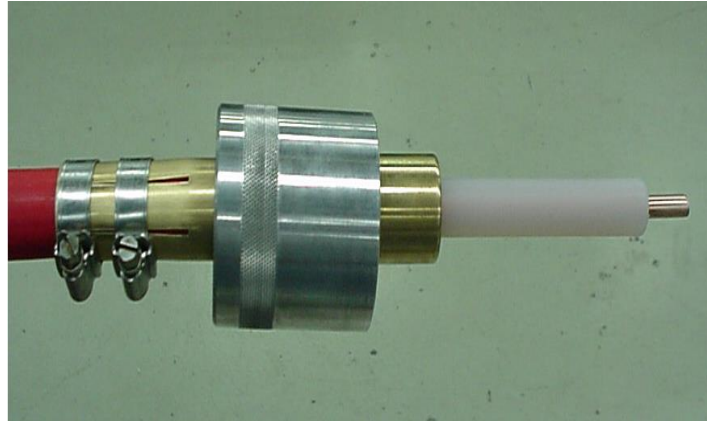
απαραίτητες όσον αφορά στην εγκατάσταση και τον χειρισμό τους [13].

Ωστόσο, πιθανότατα ο πιο σημαντικός λόγος για τον οποίο είναι απαραίτητη η εγκατάσταση αυτών των συνδέσμων στα άκρα των καλωδίων υψηλής τάσης είναι το γεγονός ότι εξασφαλίζουν την απουσία μερικών εκκενώσεων, φαινομένου corona, διασπάσεων, ή άλλου είδους δυσλειτουργίας που μπορεί να συμβεί. Τα άκρα των καλωδίων αποτελούν πιθανά «αδύναμα» σημεία του καλωδίου εξαιτίας του γεγονότος ότι οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου εκεί δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες – το πεδίο δεν είναι ομογενές – λόγω των αιχμηρών γωνιών στα άκρα αυτά. Γι' αυτό και οι σύνδεσμοι πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εφαρμόζουν τέλεια στην μόνωση του καλωδίου, χωρίς να αφήνουν κενά στα οποία εγκλωβίζεται αέρας, και το σημαντικότερο: να έχουν το κατάλληλο σχήμα το οποίο σχηματίζει ένα ομαλό ηλεκτρικό πεδίο που περιβάλλει τους αγωγούς. Ως αποτέλεσμα, σε πολλές περιπτώσεις σφαιρικά ή συνηθέστερα κυλινδρικά γεωμετρικά σχήματα προτιμώνται, όπως επίσης και κωνικά (εκτροπείς, deflectors, εικόνα 22).



Εικόνα 22. Εκτροπέας (Deflector)

Με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια, οι σύνδεσμοι πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται αντιστοίχως, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε καλωδίου, αφού συχνά τα εξαρτήματα αυτά δεν είναι διαθέσιμα στην αγορά. Γι' αυτό και οι διεξοδικοί έλεγχοι στο εργαστήριο είναι απαραίτητοι, όπως επίσης και η πραγματοποίηση προηγουμένως προσομοιώσεών τους σε υπολογιστή.

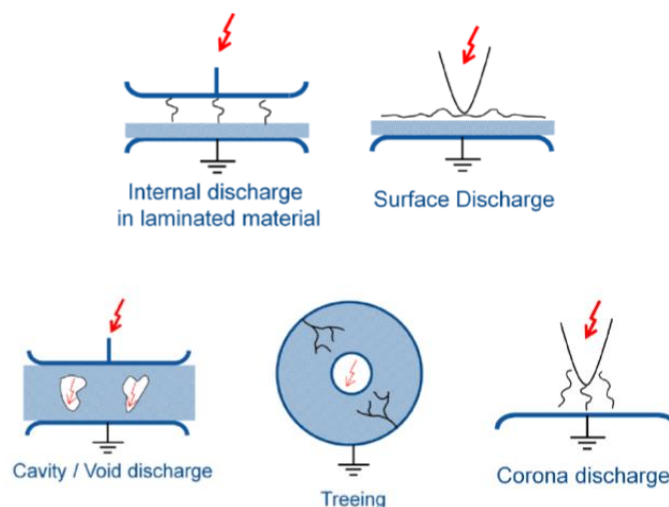


Εικόνα 23. Άκρο ομοαξονικού καλωδίου 40 Ω [39]

3. ΜΕΡΙΚΕΣ ΕΚΚΕΝΩΣΕΙΣ - IEC 60270

3.1. Ορισμοί

Σύμφωνα με την IEEE και το IEC 60270, το διεθνές πρότυπο σε «Τεχνικές Ελέγχων Υψηλών Τάσεων – Μετρήσεις Μερικών Εκκενώσεων», ως «μερική εκκένωση» (ME), ορίζεται το φαινόμενο της ηλεκτρικής εκκένωσης η οποία δεν διασπά πλήρως την μόνωση μεταξύ δύο αγωγών που βρίσκονται υπό υψηλή τάση (δεν υπάρχει πλήρης γεφύρωση μεταξύ τους), αλλά συμβαίνει, για παράδειγμα, σε ένα ορισμένο μόνο βάθος (μέρος) της μόνωσης, ή του μέσου που περιβάλλει τον αγωγό, ή εντός μιας κοιλότητας (π.χ. μέσα σε ένα διάκενο αέρα, εικόνα 24). Πιο συγκεκριμένα, οι ME είναι εκκενώσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στη μόνωση ή στην επιφάνειά της, εξαιτίας «τοπικών συγκεντρώσεων ηλεκτρικών καταπονήσεων» σε αυτή, διαρκούν συνήθως κάτω από 1 μ s, και γι' αυτόν το λόγο θεωρούνται ως παλμοί. Αναγνωρίζονται εύκολα καθώς κάνουν έναν χαρακτηριστικό ήχο, συχνά εκπέμπουν φως και θερμότητα, και επίσης ιονίζουν τα μόρια του αέρα ο οποίος περιβάλλει τον αγωγό ή βρίσκεται μέσα στην κοιλότητα. Αυτό οδηγεί στην παραγωγή όζοντος, η παρουσία του οποίου είναι τοξική στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το φαινόμενο «Corona», είναι τύπος μερικής εκκένωσης αλλά διαφέρει από τις άλλες μορφές ME. Έχει φωτεινότητα, διότι εκπέμπει μια αμυδρή λάμψη καθώς ιονίζει είτε τον αέρα, είτε άλλα αέρια διηλεκτρικά μέσα που περιβάλλουν έναν αγωγό ο οποίος δεν είναι κοντά σε στερεό ή υγρό μονωτικό, ενώ αντιθέτως, δεν είναι όλοι οι τύποι μερικών εκκενώσεων απαραίτητα φωτεινοί [14], [6].



Εικόνα 24. Είδη μερικών εκκενώσεων [16]

3.2. Παλμός Μερικής Εκκένωσης – Φαινόμενο Φορτίο – Τάση Έναρξης / Εξαφάνιση ΜΕ

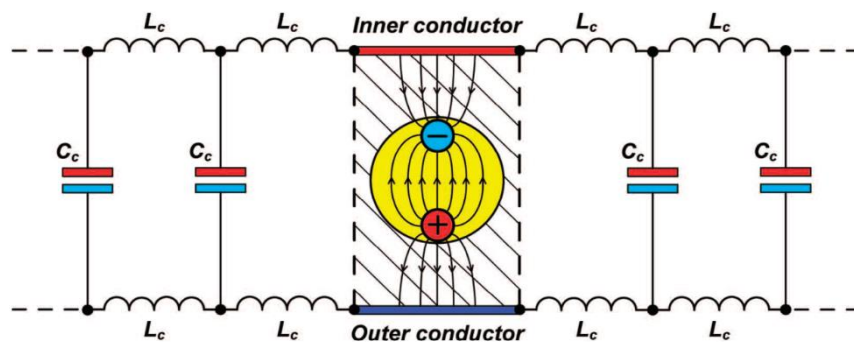
Παλμός μερικής εκκένωσης είναι το ρεύμα ή η τάση που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας ΜΕ, και μετράται με τη βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού και κυκλωμάτων ανίχνευσης. Αυτό σημαίνει ότι μία ΜΕ παράγει ένα παλμό ρεύματος συγκεκριμένου φορτίου και τότε το κύκλωμα ανίχνευσης παράγει ένα αντίστοιχο σήμα ρεύματος ή τάσης. Αυτό που μετράται είναι το φαινόμενο φορτίο q του φορτίου μιας μερικής εκκένωσης. Το διεθνές πρότυπο IEC 60270 ορίζει το φαινόμενο φορτίο q (pC) ως το φορτίο το οποίο εάν εγχεόταν ανάμεσα στους ακροδέκτες ενός υπό έλεγχο αντικειμένου σε ένα συγκεκριμένο κύκλωμα ελέγχου, θα έδινε την ίδια ένδειξη στο όργανο μέτρησης, με αυτή της μερικής εκκένωσης αυτής καθουτής, και δεν είναι ίσο με την ποσότητα του φορτίου που εμπλέκεται τοπικά στο σημείο της εκκένωσης, η οποία δεν μπορεί να μετρηθεί ευθέως. Το φαινόμενο φορτίο είναι η ποσότητα που μετράται κατά τη διάρκεια των ελέγχων με τη βοήθεια του κατάλληλου κυκλώματος ελέγχου και συστήματος μέτρησης. Καθένα από αυτά τα συστήματα χρειάζεται βαθμονόμηση και έχει διαφορετικές αρχές λειτουργίας και απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται. Εν ολίγοις, αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο κατά τις μετρήσεις μερικών εκκενώσεων, είναι το μεγαλύτερο επαναλαμβανόμενο πλάτος φορτίου μερικής εκκένωσης που παρατηρείται [14].

Η Τάση Έναρξης Μερικών Εκκενώσεων U_i ορίζεται ως η τάση που εφαρμόζεται κατά την οποία επαναλαμβανόμενες ΜΕ εμφανίζονται για πρώτη φορά στο υπό εξέταση αντικείμενο, όταν η εφαρμοζόμενη σε αυτό τάση σταδιακά αυξάνεται από μια χαμηλότερη τιμή στην οποία δεν παρατηρούνται ΜΕ. Στην πράξη, η τάση έναρξης U_i είναι η χαμηλότερη τιμή της τάσης που εφαρμόζεται, κατά την οποία το πλάτος μιας ποσότητας παλμού ΜΕ γίνεται ίσο ή δεν ξεπερνάει μια συγκεκριμένη χαμηλή τιμή. Όσο για την τάση εξαφάνισης U_e , εκείνη ορίζεται ως η εφαρμοζόμενη τάση στην οποία επαναλαμβανόμενες ΜΕ παύουν να υφίστανται στο αντικείμενο υπό εξέταση, όταν η εφαρμοζόμενη σε αυτό τάση σταδιακά μειώνεται από μια υψηλότερη τιμή στην οποία ποσότητες παλμών ΜΕ παρατηρούνται. Πρακτικά είναι η μικρότερη εφαρμοζόμενη τιμή τάσης, κατά την οποία το πλάτος της ποσότητας ενός επιλεγμένου παλμού ΜΕ γίνεται ίσο ή μικρότερο από μια συγκεκριμένη χαμηλή τιμή [14].

3.3. Η Σημασία των Μερικών Εκκενώσεων

Η παρουσία των μερικών εκκενώσεων σε μία γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης, όπως π.χ. ένα ομοαξονικό καλώδιο με στερεό μονωτικό, θα οδηγήσει με την πάροδο του χρόνου, και με μεγάλη βεβαιότητα, στη σταδιακή και ολοκληρωτική καταστροφή της μόνωσης του καλωδίου, καθιστώντας το άχρηστο. Εξαιτίας της ύπαρξης άριστων μονωτικών υλικών στη σημερινή εποχή, όταν υπάρχει ένα ελαττωματικό σημείο στο καλώδιο (όπως για παράδειγμα, μία αιχμηρή μεταλλική άκρη), αυτό προσελκύει όλες τις ηλεκτρικές εκκενώσεις οι οποίες συσσωρεύονται στο σημείο, και το καλώδιο τελικά καταρρέει. Λόγω των μερικών εκκενώσεων το διηλεκτρικό διαρκώς υποβαθμίζεται και σταδιακά αυτό που ακολουθεί είναι κατάρρευση της μόνωσης (διάσπαση – breakdown). Ο μηχανισμός πίσω από αυτό το φαινόμενο, είναι η παραγωγή όζοντος, που είναι μία πολύ δραστική μορφή οξυγόνου, η οποία επιτίθεται στη μόνωση από κοινού με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία παράγονται από τον ιονισμό. Το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων λαμβάνει χώρα με πολλούς τρόπους και σε διάφορες μορφές. Μπορεί να συμβεί στα αέρια υλικά μέσα που περιβάλλουν έναν αγωγό υψηλής τάσης (εκκένωση Corona), σε ένα διάκενο (void) μέσα στη μόνωση (εκκένωση κοιλότητας- cavity / void discharge), π.χ. όταν η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου υπερβαίνει τη διηλεκτρική αντοχή του μέσου μέσα στην κοιλότητα. Σε άλλες μορφές μερικών εκκενώσεων έχουμε εσωτερικές εκκενώσεις (internal discharge) σε υλικά επάλληλων στρώσεων, επιφανειακές εκκενώσεις (surface discharge) και επίσης ηλεκτρικές διακλαδώσεις (electrical treeing), όπως φαίνεται και στην εικόνα 24.

Μπορούμε να πούμε ότι μία μερική εκκένωση δημιουργεί περίσσεια ενέργειας η οποία απελευθερώνεται σε σημεία του καλωδίου τα οποία δεν είχαν σχεδιαστεί γι' αυτό από τον κατασκευαστή. Ως αποτέλεσμα, τα υλικά που περιβάλλουν τα σημεία αυτά, αποσυντίθενται. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του, είναι εκείνο που τελικά πυροδοτεί την εκκίνηση του φαινομένου της διάσπασης και ακολούθως μειώνει τη διάρκεια ζωής του καλωδίου [15].



Εικόνα 25. Ισοδύναμο κύκλωμα ενός καλωδίου ισχύος στο οποίο υπάρχει κενό στο διηλεκτρικό (κοιλότητα), μέσα στο οποίο δημιουργείται εκκένωση [28]

3.4. Μερικές Εκκενώσεις Σε Ομοαξονικά Καλώδια Υψηλής Τάσης

3.4.1. Βλάβες Στη Μόνωση

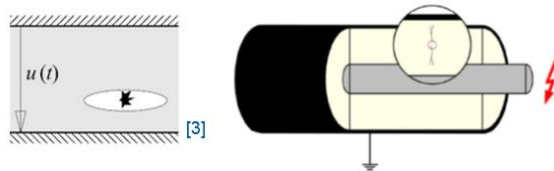
Η μονάδα μέτρησης του πλάτους μιας μερικής εκκένωσης είναι το φορτίο της, το οποίο μετράται σε Coulombs (πιο συχνά, pC). Η εμφάνιση των πρώτων μερικών εκκενώσεων κατά τη διάρκεια ενός ελέγχου σε υψηλή τάση, συμβαίνει με τη σταδιακή αύξηση της τάσης μεταξύ των δύο αγωγών. Η χαρακτηριστική (χαμηλότερη) εκείνη τάση κατά την οποία συνεχόμενες ΜΕ ή corona συγκεκριμένου πλάτους παλμού απαντάται, καλείται «(Corona) Τάση Έναρξης». Όσο μεγαλύτερη η τάση καταπόνησης, τόσο περισσότερες μερικές εκκενώσεις ανιχνεύονται και με μεγαλύτερα πλάτη, και παρατηρούνται εξίσου σε AC και DC συστήματα. Στα AC, η ζημιά που προκαλούν στη μόνωση αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας. Εξαιτίας του ιονισμού, η βλάβη που προκαλείται στη μόνωση και στην επιφάνειά της, είναι πολύ έντονη, ακόμα και στα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στερεά μονωτικά υλικά, όπως το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο και το PTFE (Τεφλόν): κορεσμένα πολυμερή τα οποία έχουν υψηλή αντοχή στην οξειδωση αλλά μικρή αντοχή στον ιονισμό. Άλλα υλικά όπως τα σιλικονούχα ελαστικά, τα οποία θεωρούνται ως η πιο εύκαμπτη μόνωση, έχουν μεγαλύτερη αντοχή στον ιονισμό και στο όζον σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 130 °C), ενώ άλλα πολυμερή, όπως το συμπολυμερές αιθυλενίου-προπυλενίου, το ελαστικό βουτυλίου, το νάιλον και οι χλωριούχες πολυολεφίνες, έχουν καλύτερη αντοχή, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τέλος, εξίσου υψηλή προστασία ενάντια στην οξειδωση και τον ιονισμό, έχουν τα καλώδια που χρησιμοποιούν μόνωση χαρτιού-ελαίου [6].

Είναι πολύ σημαντικό να διεξάγονται μετρήσεις μερικών εκκενώσεων, ως ένας τρόπος προστατευτικής συντήρησης, και συνεχούς αξιολόγησης της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η μόνωση, της γήρανσης και της ποιότητας, για παράδειγμα, σε καλώδια, συνδέσμους, ενώσεις και μετασχηματιστές. Προς αυτήν την κατεύθυνση, η μέτρηση των μερικών εκκενώσεων μπορεί να μας βοηθήσει να βελτιώσουμε το σχεδιασμό διατάξεων υπό υψηλή τάση, να εντοπίσουμε τυχόν σφάλματα που ενδεχομένως να προκύψουν, να επεκτείνουμε τη διάρκεια ζωής τους και να μειώσουμε το ρυθμό γήρανσης [15].

Όσον αφορά στις γραμμές υψηλής τάσης, ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες ποιότητας και καλής λειτουργίας ενός ομοαξονικού καλωδίου είναι το μέγιστο πλάτος μερικών εκκενώσεων. Αναγράφεται στο δελτίο τεχνικών χαρακτηριστικών του καλωδίου του κάθε κατασκευαστή και συχνά δεν πρέπει να υπερβαίνει τα λίγα picocoulombs (pC). Είναι πολύ σημαντικό να πραγματοποιούνται μετρήσεις μερικών εκκενώσεων καθώς είναι

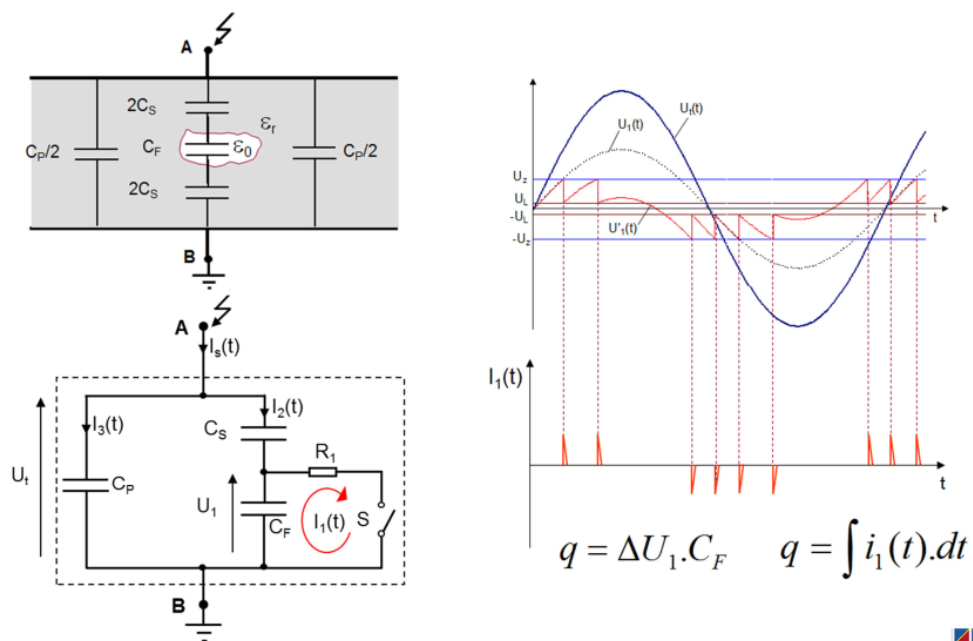
ένας πολύ καλός δείκτης και χρήσιμο διαγνωστικό εργαλείο για τη διάρκεια ζωής και την εγγύηση της ποιότητας του καλωδίου.

3.4.2. Τι Μετράται



Εικόνα 26. Φυσαλίδα αέρα μέσα στη μόνωση του καλωδίου [40], [36]

Η κοιλότητα του αερίου στο εσωτερικό της μόνωσης του καλωδίου στην εικόνα 26, αναπαρίσταται με το ισοδύναμο κυκλωματικό διάγραμμα της εικόνας 27. Ένας πυκνωτής C_F με τη δική του διηλεκτρική αντοχή, πολύ μικρότερη από εκείνη του υπόλοιπου διηλεκτρικού της μόνωσης έχει μικρότερη πτώση τάσης U_1 από αυτήν της εφαρμοζόμενης τάσης U_t , καθώς οι πυκνωτές C_S και C_F συμπεριφέρονται σαν χωρητικός καταμεριστής. Καθώς η ημιτονοειδής τάση αυξάνεται, το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό της κοιλότητας ξεπερνά την αντοχή του διακένου αέρος και συμβαίνει διάσπαση (η U_1 φτάνει τη μέγιστη τιμή της, U_z). Ύστερα ο διακόπτης S κλείνει, ο C_F εκφορτίζεται και η U_1 μηδενίζεται. Καθώς η U_t συνεχίζει να αυξάνεται, ο C_F φορτίζεται, η U_1 αυξάνεται ξανά, μέχρις ότου το διάκενο διασπαστεί ξανά, και τότε εκφορτίζεται πάλι. Έπειτα η πολικότητα αλλάζει και συμβαίνει η ίδια διαδικασία από την αντίθετη κατεύθυνση. Το ρεύμα που ρέει κατά τις μερικές αυτές διασπάσεις είναι οι ΜΕ που μετράμε [16].

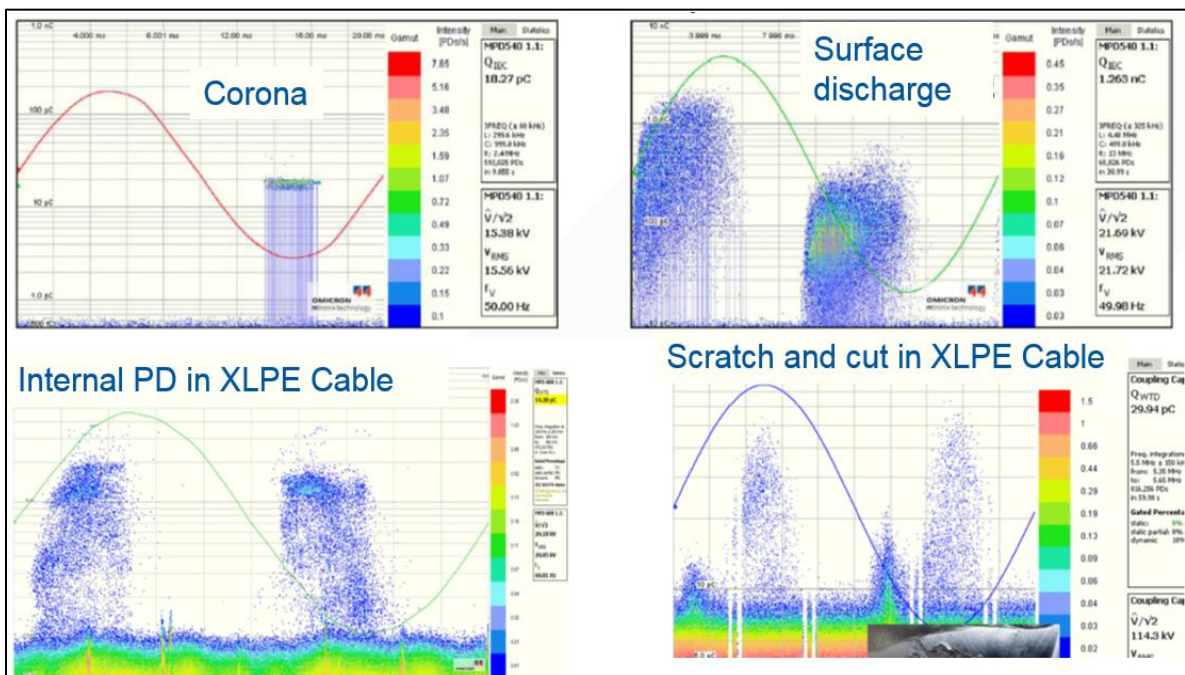


Εικόνα 27. Ισοδύναμο κυκλωματικό διάγραμμα [16]

3.4.3. Μοτίβα Μερικών Εκκενώσεων – «Δακτυλικά Αποτυπώματα» (Fingerprints)

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που αφορά τις μερικές εκκενώσεις, είναι η πηγή η οποία τις παράγει. Αυτή μπορεί εύκολα να ταυτοποιηθεί από τα μοτίβα των ΜΕ που αυτές ακολουθούν, αναλόγως με τη φάση κατά την οποία αυτές συμβαίνουν. Η διαδικασία αυτή καλείται «phase resolved PD» [17]. Ως αποτέλεσμα, σε συνάρτηση με τη φάση κατά την οποία συμβαίνουν οι ΜΕ όταν παρατηρούνται στο σύστημά μας, μπορούμε να προσδιορίσουμε από πού προέρχονται, για παράδειγμα από επιφανειακές εκκενώσεις, από το φαινόμενο Corona, από φθορές, εκδορές ή από εσωτερικά κενά και κοιλότητες, όπως π.χ. μέσα σε ένα καλώδιο δικτυωμένου πολυαιθυλενίου (XLPE), ή όπως θα δούμε και στην πορεία, από φυσαλίδες αέρα μέσα σε μονωτικό έλαιο.

Στην επόμενη εικόνα (28) φαίνονται μερικά από αυτά τα παραδείγματα.

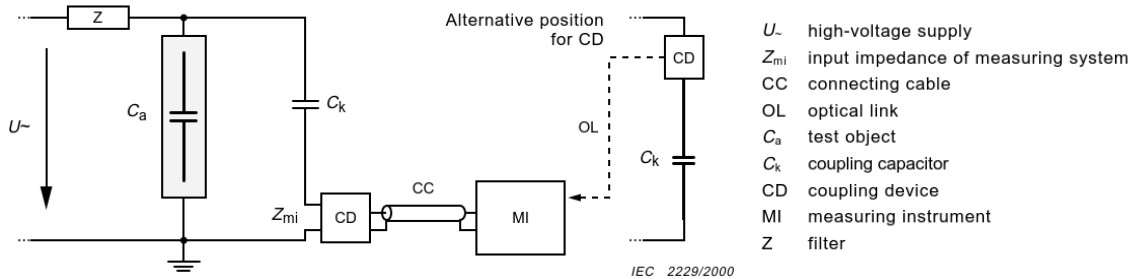


Εικόνα 28. Οι διάφορες πηγές μερικών εκκενώσεων παράγουν διαφορετικά μοτίβα ΜΕ [17]

3.5. Κυκλώματα Ελέγχου Για Μετρήσεις Μερικών Εκκενώσεων

3.5.1. Ο Πυκνωτής Σύζευξης (Coupling Capacitor)

60270 © IEC:2000



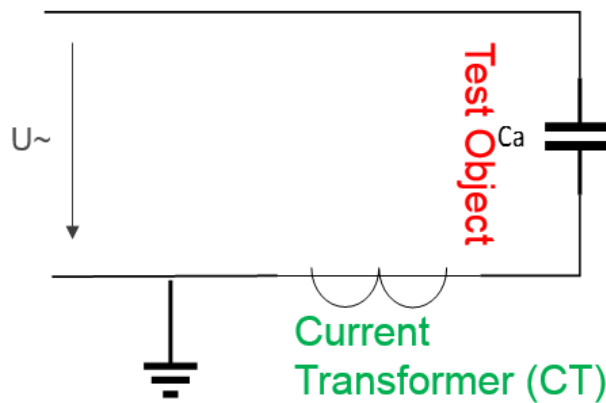
Εικόνα 29. Η συσκευή σύζευξης CD σε σειρά με τον πυκνωτή σύζευξης C_k [14]

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC-60270, τα κυκλώματα ελέγχου για μετρήσεις μερικών εκκενώσεων αποτελούνται κυρίως: από το αντικείμενο υπό εξέταση C_a το οποίο είναι κατ'ουσίαν ένας πυκνωτής, έναν πυκνωτή σύζευξης (coupling capacitor) C_k ο οποίος έχει μικρή αυτεπαγωγή, το σύστημα μέτρησης με τη χαρακτηριστική του αντίσταση εισόδου (input impedance, Z_{mi}), τη γεννήτρια υψηλής τάσης (HV power supply) η οποία έχει χαμηλό θόρυβο υποβάθρου (background noise), τις συνδέσεις υψηλής τάσης που κι αυτές έχουν χαμηλό θόρυβο υποβάθρου, και μια χαρακτηριστική αντίσταση Z ή φίλτρο για τον θόρυβο υποβάθρου. Τα συστήματα μέτρησης ME μπορούν να χωριστούν σε τρία υποσυστήματα, τα οποία είναι: η συσκευή σύζευξης, το σύστημα μετάδοσης, και το σύστημα μέτρησης. Η συσκευή σύζευξης είναι το «αναπόσπαστο μέρος του συστήματος μετρήσεων και του κυκλώματος ελέγχου» και το έργο της είναι να μετατρέψει τα σήματα εισόδου ρεύματος σε σήματα εξόδου τάσεως, τα οποία έπειτα μεταδίδονται στο όργανο μέτρησης με τη βοήθεια ενός συστήματος μετάδοσης.

Σύμφωνα με τη θεωρία, όταν εμφανίζονται εκκενώσεις στο υπό έλεγχο αντικείμενο C_a , παρατηρείται μια στιγμιαία πτώση τάσης στα άκρα του (η οποία είναι ουσιαστικά το φαινόμενο φορτίο που θέλουμε να μετρήσουμε) και τότε ένα μικρό ρεύμα θα ρεύσει στο υπό έλεγχο αντικείμενο, ούτως ώστε να εξισορροπηθεί η πτώση της τάσης λόγω της εκκένωσης. Ο πυκνωτής σύζευξης C_k και η συσκευή σύζευξης (έχει χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου Z_{mi}), οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, θα σχηματίσουν ένα RC φίλτρο ($f_c = \frac{1}{2\pi RC}$) το οποίο κόβει τις χαμηλές συχνότητες και θα αφήσει να περάσουν οι υψηλές συχνότητες από τις μερικές εκκενώσεις εξαιτίας της χαμηλής χαρακτηριστικής αντίστασης του πυκνωτή σε υψηλές συχνότητες, $X_c = \frac{1}{j\omega C}$. Επίσης, ο πυκνωτής σύζευξης θα πρέπει να έχει

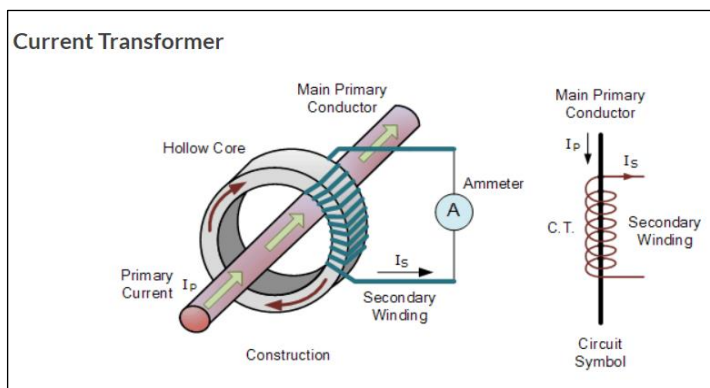
πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από αυτήν του υπό έλεγχο αντικειμένου, ούτως ώστε το σύστημα μετρήσεων να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι θέλουμε μόνο μικρές αλλαγές της τάσης στη γεννήτρια υψηλών τάσεων όταν εμφανίζονται οι μερικές εκκενώσεις. Επιπλέον, χρειάζεται να είναι πυκνωτής που να έχει χαρακτηριστεί ότι μπορεί να λειτουργεί σε υψηλή τάση (HV-rated capacitor).

3.5.2. Ο Επαγωγικός Μετασχηματιστής Ρεύματος (Inductive Current Transformer)



Εικόνα 30. Κύκλωμα ελέγχου της μεθόδου του επαγωγικού μετασχηματιστή ρεύματος [15]

Μια άλλη μέθοδος μέτρησης μερικών εκκενώσεων είναι με τη βοήθεια του Επαγωγικού Μετασχηματιστή Ρεύματος, Inductive Current Transformer (CT). Η μέθοδος είναι πολύ απλή στην εφαρμογή και στη θεωρία της και για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε στη διάρκεια των πειραμάτων για μετρήσεις ΜΕ που πραγματοποιήσαμε. Η χρήση της εφαρμόζεται με την απλή τοποθέτηση του μετασχηματιστή στο καλώδιο επιστροφής (γείωση) του κυκλώματος, και, δίχως να το διακόπτει, μετράει την ένταση του



$$T.R. = n = \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

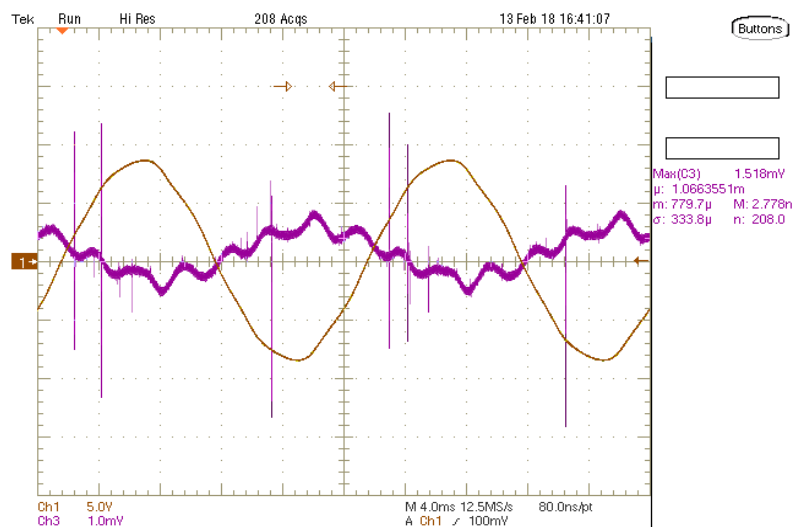
Η σχέση επαγωγής του CT που δίνει το λόγο μετασχηματισμού

Εικόνα 31. Ο μετασχηματιστής ρεύματος [32]

ρεύματος που διαρρέει. Η αρχή λειτουργίας του CT είναι ότι, καθώς το ρεύμα διαρρέει το καλώδιο, περνά από τα τυλίγματα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο το οποίο με τη σειρά του παράγει ρεύμα στην έξοδο του CT. Το μετρούμενο ρεύμα τότε αναπαρίσταται σαν μία κυματομορφή τάσης και μπορεί να οπτικοποιηθεί σε έναν παλμογράφο. Αναλόγως με το λόγο του CT (Transformer Ratio, TR), ο οποίος ορίζεται από τον κατασκευαστή, το μετρούμενο ρεύμα μεταφράζεται τότε σε τάση [15].

Αυτό μας επιτρέπει να μετρήσουμε το ρεύμα που διαρρέει από τον εσωτερικό αγωγό του καλωδίου υπό εξέταση – διαμέσου της μόνωσης – προς τον εξωτερικό αγωγό, παρατηρώντας την κυματομορφή του στον παλμογράφο. Καθώς η τάση αυξανόταν σταδιακά κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, όταν έφτασε την τάση εμφάνισης ME (inception voltage), οι πρώτες μερικές εκκενώσεις εμφανίστηκαν ως ακανόνιστες «κορυφές» (spikes) στην κυματομορφή του ρεύματος, όπως φαίνεται και στην εικόνα 32.

Η διαδικασία της εξαγωγής των τιμών του ρεύματος από την κυματομορφή αυτή και τελικώς ο υπολογισμός του πλάτους του φορτίου των ME, θα περιγραφεί λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 32. Παράδειγμα ME όπως αυτό φαίνεται σε στιγμιότυπο από παλμογράφο, στον οποίο αποτυπώνονται ως κορυφές «spikes» στην κυματομορφή του ρεύματος (μωβ χρώμα), το οποίο αναπαρίσταται ως το σήμα εξόδου του CT

Στο σημείο αυτό, τελειώνει το πρώτο μέρος της διπλωματικής, το οποίο είναι γραμμένο στα ελληνικά. Ακολουθεί το δεύτερο μέρος που αφορά στα πειράματα, τις μετρήσεις και τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο CERN, και είναι γραμμένο στην αγγλική γλώσσα.

4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ (MEASUREMENTS SETUP AND PROCEDURE)

4.1. Ανάπτυξη Του Συστήματος Μετρήσεων Μερικών Εκκενώσεων – Μεθοδολογία (Development Of The Partial Discharge Measurement System – Methodology)

As to assure that the system measures the specified PD magnitude correctly, the PD measuring system needs to be calibrated before any measuring takes place. The goal is to measure the apparent charge q , which is injected to the terminals of the test object. A generator produces step voltage pulses of amplitude U_0 in series with a known capacitor C_0 (often 10 or 100 pF), so that the charge is then $q_0 = U_0 \cdot C_0$. Afterwards, using the measuring system, we measure the current, which we will integrate over time, and calculate the charge Q . Finally, we compare the two charges and, because there is going to be an attenuation of the signal, we can use the results of the comparison in order to calibrate our system. (For more detailed information and the corresponding calibration circuits, see IEC 60270, [14]).

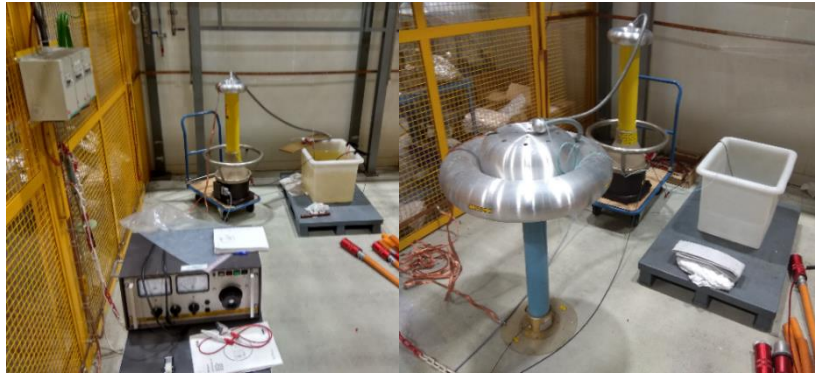
Another important factor that must be taken into account is the background noise, which originates from signals not arising from the device under test, or it could just be white noise from the measuring system, a radio broadcast, and ultimately any kind of continuous or impulsive systems. We can use two ways in accomplishing the noise cancellation: one is by visually detecting which parts of our signal are noise and set a threshold to cut them off. The other method would be to perform tests at zero voltage and when measuring peak-to-peak, detect the noise of the background.

Lastly, the procedures mentioned above prove not suitable for DC voltage. Although the same set up can be used as for AC, nonetheless there is not a generally accepted way of measuring of PDs in DC. However, there is detection of PDs when the polarity of the current changes, but it is difficult to measure inception and extinction voltages. [14]

As mentioned the main device of measuring PDs during the tests was the CT. The integral parts of the test system are the ones described in the IEC 60270 standard. Before listing the various equipment that was used, it is wise to outline the development, methodology, and preparations that took place before commencing the tests. A complete monitoring of the experimental equipment needed and the measurement set up inside the lab was recorded.

4.1.1. Σκοπός (Main Purpose)

The main purpose of the tests and measurements was to set up an HV test stand with the use of the right equipment available in the lab, calibrate it, and then start the evaluation of coaxial cables and connectors: Samples that had already been used in various applications, as well as new samples, that had to be tested, modified and then tested again. The main value to be measured was the current and consequently the partial discharges in the cable.



Εικόνα 33: “Jura 2”, the test-cage where the first tests took place

4.1.2. Η Προετοιμασία – Πειραματικός Εξοπλισμός, Εργαστήριο, Βήματα Περιφραξης για Ηλεκτρική Ασφάλεια (The Setup - Experimental Equipment, Lab, Electrical Safety Lockout Steps)

4.1.2.1. Εργαστήριο (Laboratory)



Εικόνα 34: The ‘Saleve 6’ HV test cage in b.867

In the first phase of tests, the test-cage that was used was the “Jura 2”, a 3x4m cage in the laboratory b.867, in the Prévessin CERN site. The room had to be prepared. That means that measurements of distances, which would be considered safe for the use of high voltage, were done, before arranging the HV equipment in the cage. In addition, along with the equipment needed, which was already available, there had to be some purchases according to the needs. The second phase of the experiments took place in a bigger test-cage, the “Saleve 6”, for higher voltage tests up to 96 kV.

4.1.2.2. Συσκευές Τροφοδοσίας (Power Supply Devices)

The instrument used as the AC high voltage power supply was the BAUR PGK 110 HB High Voltage testing set. It has the capability of reaching up to 94/126kV AC/DC. It consists of two main parts: (a) the operating unit (Fig. 35) with the indicating and operating elements, as well as the power supply and the safety devices and (b) the High Voltage unit (Fig. 36.), an oil filled housing with an HV transformer which transforms and the delivers the high voltage.



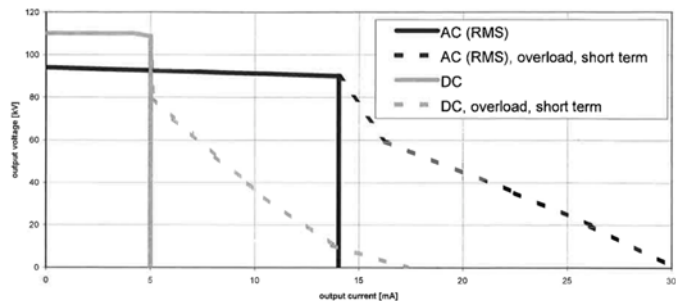
Εικόνα 36: BAUR PGK 110 operating unit



Εικόνα 37: The High Voltage unit

1.3 Technical Data

	PGK 70 HB	PGK 70 -2.5 HB	PGK 110 HB	PGK 150 HB	PGK 260 HB	unit
Mains voltage	see type plate					V ~
Mains frequency	45 to 60	45 to 60	45 to 60	45 to 60	45 to 60	Hz
Power consumption at nominal working point	640	3200	1380	1380	2600	VA
Max. power consumption (in short-circuit operation)	1200	6500	2650	2650	5000	VA
Power output at nominal working point AC/DC	330/190	2750/1200	1280/695	690/530	1665/1000	VA/W
Max. output voltage AC@50Hz in no-load	56/76	55/78	94/126	110/160	185/260	kV
Output voltage AC@50Hz at nominal working point	47/66	55/62	80/108	110/137	155/250	kV
Max. output current AC@50Hz at short-circuit	20/12	117/84	33/17	23/20	20/20	mA
Accuracy of kV-meter	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	%
Accuracy of mA-meter	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	%
Dimensions of operating unit housing (W x H x D)	502 x 242 x 290	802x 242 x 290	802 x 242 x 290	802 x 242 x 290	802 x 242 x 290	mm
Dimensions of H.V. unit (height / diameter)	810/385	1130/450	1130/455	1460/455	2050/1270	mm
Weight of operating unit	13,5	22	17	17	19	kg
Weight of H.V. unit	27	83	75	85	280	kg
Relative humidity	not condensing					
Ambient temperature	working: 0...+45° C storage: -20...+60° C					



Εικόνα 35: Data sheet of the Baur PGK 110 HV test set. The load diagram shows that the maximum output current (AC) is 14mA.

For the DC tests up to 30 kV, the 30 kV Non-Destructive Insulation Tester Type JP 30 A by Danbridge Denmark was used (Fig.38).



Εικόνα 38: 30 kV Non-Destructive Insulation Tester



Εικόνα 39: 160 kV DC Power Supply

For test with voltages higher than 30 kV DC, a 160 kV power supply from the laboratory in b.867 was used (Fig. 39).

An important figure that had to be calculated before the beginning of the tests was the maximum length (in meters) of the respective cable sample according to the maximum current that the HV power supply could deliver. According to the data sheets, from the load curve of the specific instrument, the maximum output current is 14mA (fig. 37). Due to the fact that we would have partial discharges during the tests, we had to reduce this value by 10%, so this means we should consider the max current to be 12.6mA. Therefore, for example, for an RG-220/U cable, which is of 93 pF capacitance per meter, at 90 kV, 50 Hz, the maximum length of the cable that could be tested without damaging the instrument, would be below 4.792m (fig. 40).

Max length of cable

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot (50\text{Hz})$$

$$I_{\text{max}} := 12.6\text{mA}$$

$$U := 90\text{kV}$$

$$C_{\text{max}} := \frac{I_{\text{max}}}{\omega \cdot U} \quad C_{\text{max}} = 445.634\text{ pF}$$

RG220 (2003) $C_0 := 93 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$

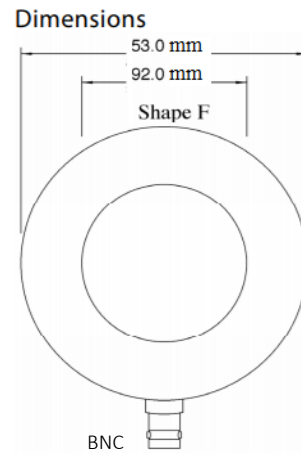
$$\text{Length}_{\text{max}} := \frac{C_{\text{max}}}{C_0} \quad \text{Length}_{\text{max}} = 4.792\text{ m}$$

Εικόνα 40: Necessary calculations for determining the maximum length of the cable

4.1.2.3. Μετασχηματιστής Ρεύματος (Current Transformer – CT)



Εικόνα 41: The CT that was used during the experiments



Εικόνα 42: Outline diagram of the CT

The specific CT that was used, had a V/A ratio of 0.5 for 50 Ω termination, meaning that, e.g. when connected to a measuring device (i.e. an oscilloscope) and shows 1 millivolt, that corresponds to 2 milliampere. Nevertheless, in order to increase the sensitivity of the measurement we made several loops of the cable to be measured (primary winding of the CT), which meant that we had to divide the result by the number of the loops. For example, if we use 10 loops, as shown in fig. 41, then the measured value of the voltage at the oscilloscope has to be divided by 10.

It is manufactured by Bergoz Instrumentation, model number CT- F1.0 B, with a BNC termination connection for connecting it to the oscilloscope. The current model can measure 11 A RMS and 1 kA peak, and has lower cutoff frequency of 200 Hz and high cutoff 500 MHz.

The BNC cable that connected it to the scope had a 50 Ω impedance and for that, it was terminated with a 50 Ω termination. As a measure of protection of the CT and the oscilloscope from high currents due to possible breakdown or other equipment failure, an extra grounding cable was added to the termination of the CT. Plus, for over-voltage protection of the scope a spark-gap of 90 Volts was added in parallel.

4.1.2.4. Διαίρετης Τάσης (Voltage Divider)

The next device is the voltage divider (Fig. 43). Made by Ross Engineering Corp., it has a ratio of 1000:1 voltage division, a max input voltage of 240 kV DC (or peak AC), and it consists of a tube



Εικόνα 43: The HV divider, with the toroidal conductor placed on top

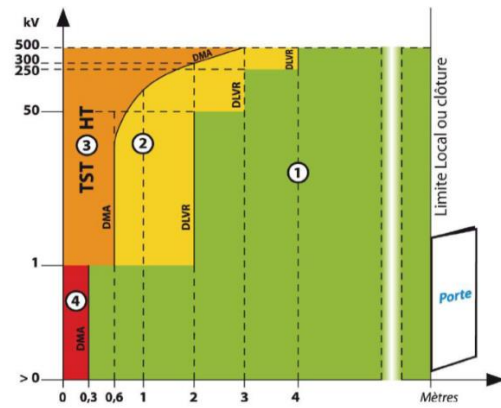


Εικόνα 44: Specifications of the device

filled with pressurized SF₆ gas. It allows high accuracy measurements of very low PDs/corona for oscilloscopes and other sensitive electronic devices. On top of it, we specially adjusted a metallic toroidal. Placing it serves as a means of making the electric field more evenly distributed and homogeneous around the conductors of high voltage. Because of its round shape, it prevents the event of concentrating high electrical fields close to possible sharp edges, and thus helps avoiding electric arcs and unwanted breakdowns, PDs/corona.

4.1.2.5. Μέτρα Προστασίας (Safety Measures)

Because at CERN, safety comes always first, a specific operating procedure in which the experiments were conducted was followed. This procedure consists of six “electrical safety lock-out steps” that have to be followed every time an experiment has been carried out, and the cage door opens, to allow us to work with the equipment. These are:



Légende :

Zone 1	zone de voisinage simple
Zone 2	zone de voisinage renforcé en haute tension
Zone 3	zone des travaux sous tension en haute tension
Zone 4	zone de voisinage renforcé en basse tension

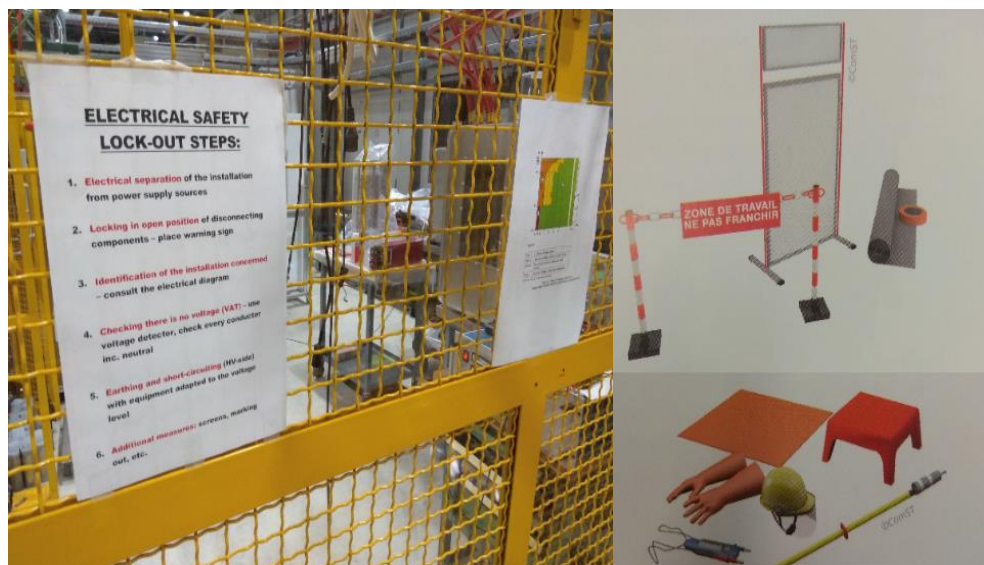
NOTE La valeur 0 Volt est exclue de la figure.

Εικόνα 45: Safe working distances / vicinity area

1. Electrical separation of the installation from power supply sources
2. Locking in open position of disconnecting components – place warning sign
3. Identification of the installation concerned – consult the electrical diagram
4. Checking there is no voltage (VAT) – use voltage detector, check every conductor including neutral
5. Earthing and short-circuiting (HV-side) with equipment adapted to the voltage level
6. Additional measures: screens, marking out, etc.

There are also other specific requirements when operating HV equipment, like the distances one has to keep from the live parts of the equipment (Fig. 45). These are defined by the standard NF C 18-510, which sets the safety limits and zones around uninsulated parts, depending on the voltage range.

Other parts of equipment that are needed for the proper function of the test cage were: The plastic tank where the cable samples and the conductors were submerged in insulating oil, connecting cables, signs with the electrical safety lock-out steps and the vicinity area, grounding braid cables, clips and pins, crocodiles,

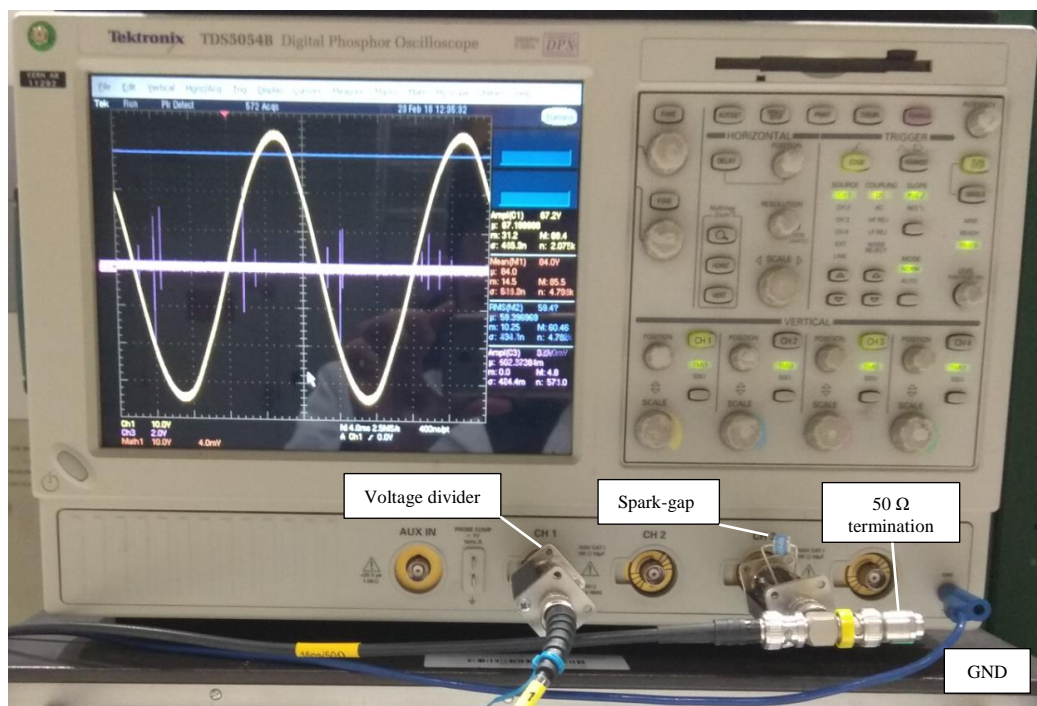


Εικόνα 46: Electrical safety measures

banana cables, gloves, cable ties, big clams, semi conductive and isolating tape, cable jacket stripping tool, saw, pence, pliers, grounding clips, and a grounding rod that would be used after every experiment for discharging the test subjects, which, after all, behave quite like capacitors.

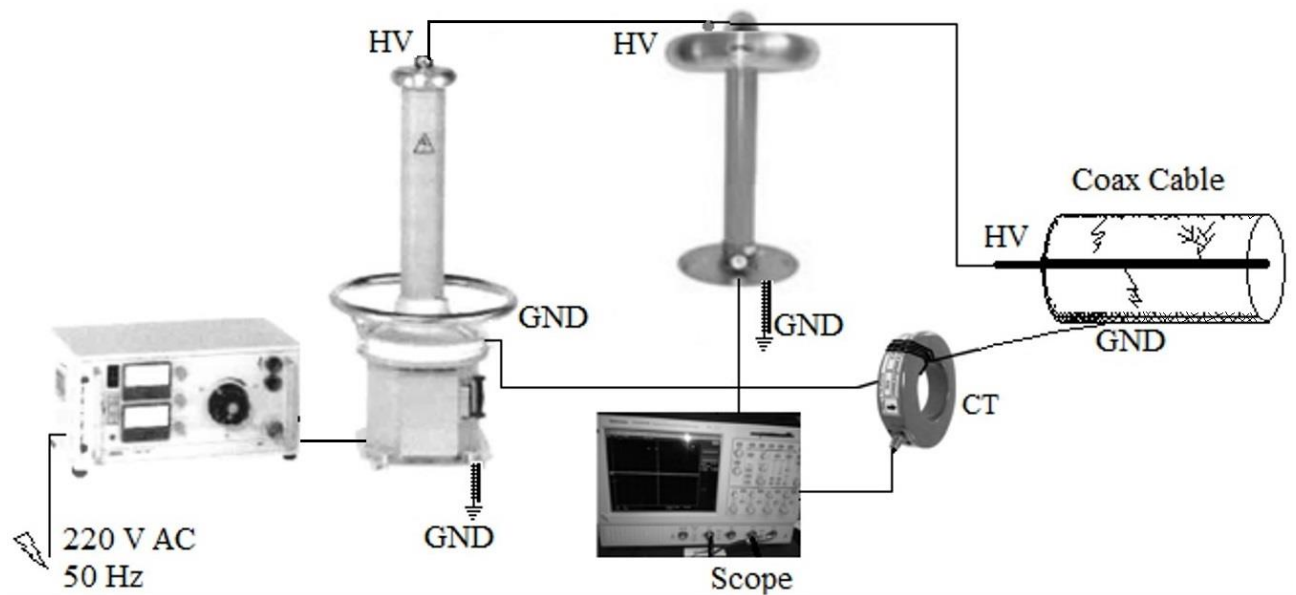
4.1.2.6. Όργανο Μετρήσεων – Παλμογράφος (Measuring Device – Oscilloscope)

The electronic measuring device was the Tektronix TDS5054B Digital Phosphor Oscilloscope. It has a sampling rate of 2.5 MS/s. While taking precautions and making preparations for the tests, one aspect that had to be taken into account was the magnitude of the voltage that the respective oscilloscope could measure without being damaged. A parallel resistance should be added each time according to the level of voltage to be measured. Moreover, a spark-gap was a necessary option to insure that no excess voltage would destroy the device in case of overload or breakdown of the sample. On channel 1, the BNC cable coming from the voltage divider was connected, measuring the applied voltage. Then an appropriately designed resistance (voltage divider) was added in parallel to limit the incoming signal as to not exceed the limit of the channel of the scope. In addition, on channel 3, there was the signal from the CT, measuring the current and subsequently showing the PDs when present. There, the 90 volts spark-gap was added as a protective device.



Εικόνα 47: The Tektronix oscilloscope

4.1.3. Η Διαδικασία των Μετρήσεων – Μεθοδολογία (The Measurements Procedure – Methodology)



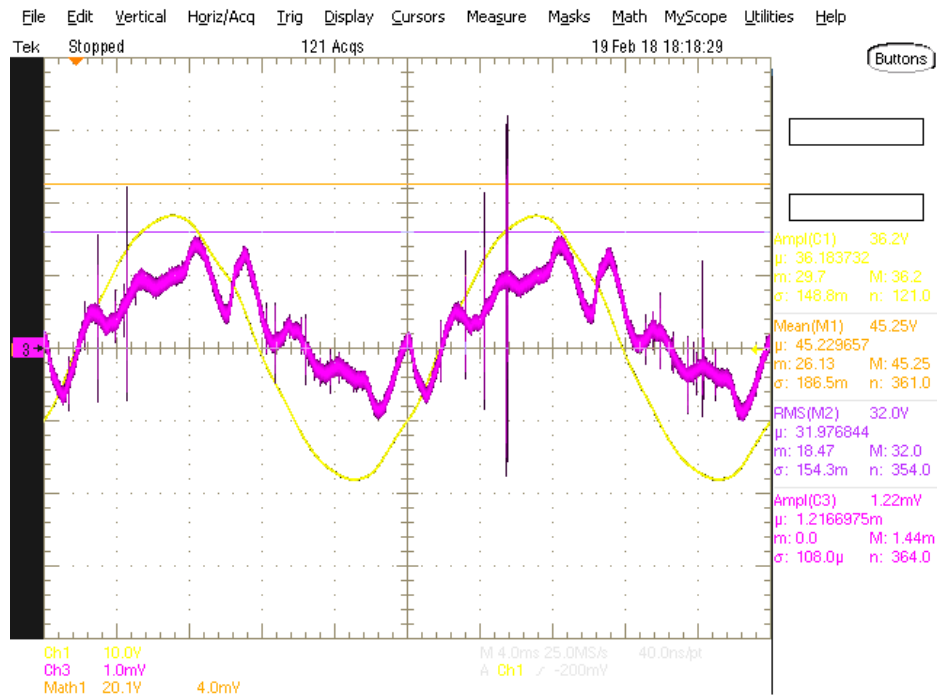
Εικόνα 48: Schematic diagram of the AC test circuit used for measuring partial discharges in the laboratory

The figure (48) shows exactly the connectivity between the different electrical and electronic devices that were for measuring PDs in AC. Likewise, almost the same circuit was used for DC, replacing the AC HV power supply with the DC one.

The inducted current from the CT was transmitted as voltage via BNC cable to the oscilloscope, which represented the waveform of current. Similarly, the divided voltage from the voltage divider was transmitted to the scope, which served in this case as an accurate voltmeter, and also provided the measurement for the voltage waveform.

With the gradual raise of the voltage, we were able to: measure the PD inception voltage, as well as the extinction, determine the breakdown voltage, and most importantly, measure the total PD charge, the PD count and the highest PD magnitude, with the help of the computer software 'MATHCAD' [18], where the results from the oscilloscope were processed.

Below there is an example of an AC test measurement processed with Mathcad and extraction of results:



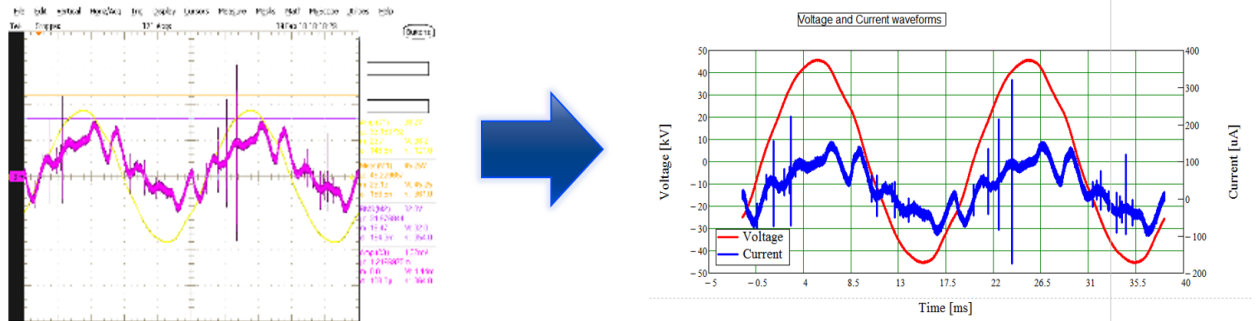
- Oscilloscope screenshot of a coaxial cable filled with oil as dielectric (PDs in oil due to trapped air bubbles).
- The yellow colour is the voltage (here = 45.25 kV peak).
- The purple waveform is the current.
- The ‘spikes’ (peaks) are the partial discharges in oil.

4.1.4. Επεξεργασία των δεδομένων με τη βοήθεια H/Y (Post – Processing)

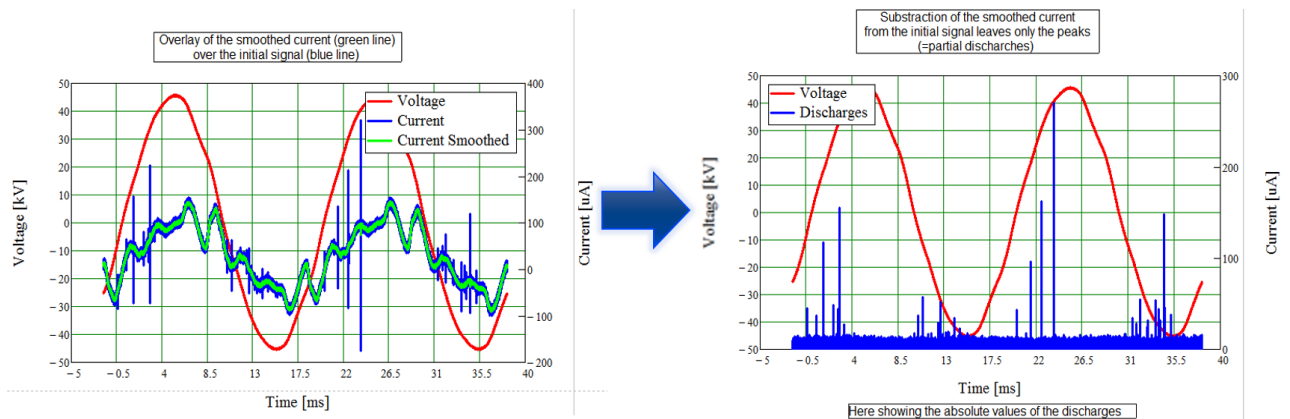
Calculation of the PDs – with the help of Mathcad:

- ❖ Export the waveform of the current, from the oscilloscope, to a .csv file, then import it into Mathcad.
- ❖ The developed code uses the smoothing function and keeps only the peaks of the signal, while removing the rest of the waveform, along with the noise.
- ❖ Then it counts the number of spikes = #PDs
- ❖ Finally, it integrates each peak (I) over time (t) to give the magnitude of each discharge (Q) and sums it to calculate the total charge of the PDs in one period.

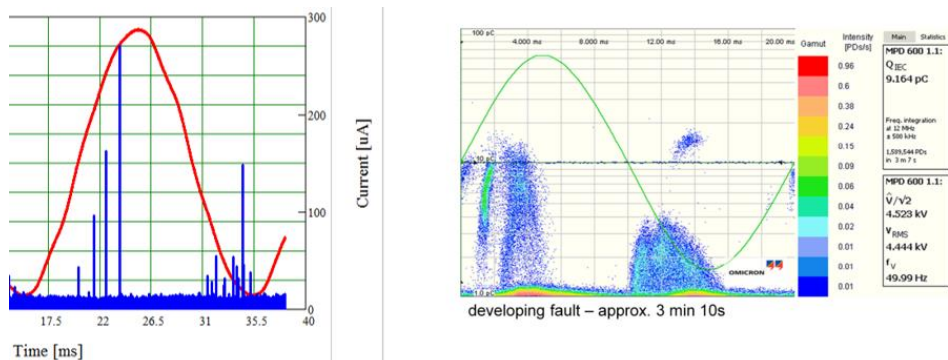
Therefore, from the oscilloscope, with a use of a USB stick, we import data to Mathcad. The waveforms of the current and voltage are represented in blue and red colour respectively:



By using the smoothing function from Mathcad, and subtracting it from initial signal of the current, we can remove the low frequencies and leave only the peaks that represent the PDs:

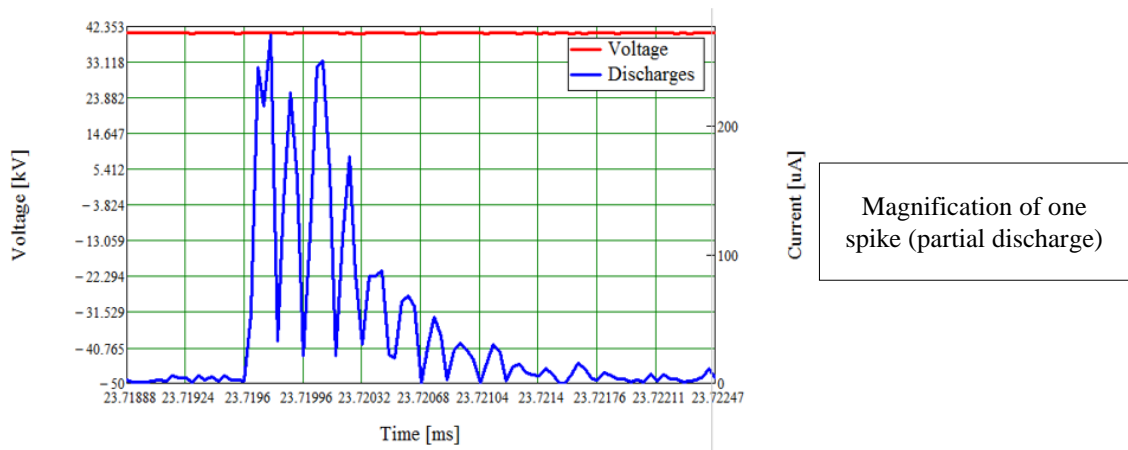
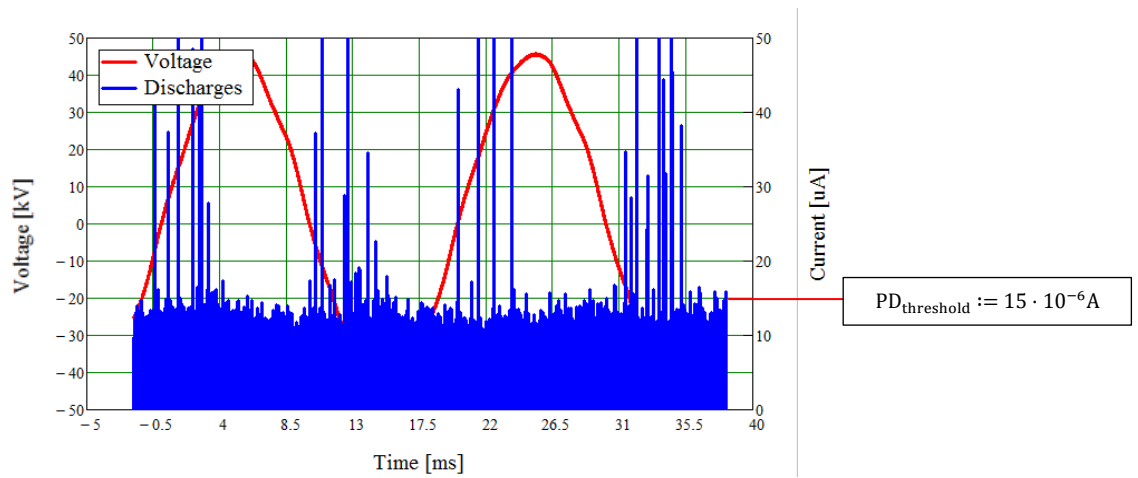


Note: Because different PD sources bring different PD patterns: Our pattern confirms indeed that (here) the PDs originate from voids (gas bubbles – trapped air) in the dielectric.



Εικόνα 49: Our results (left), PRPD pattern that reveals internal PDs (right) [17]

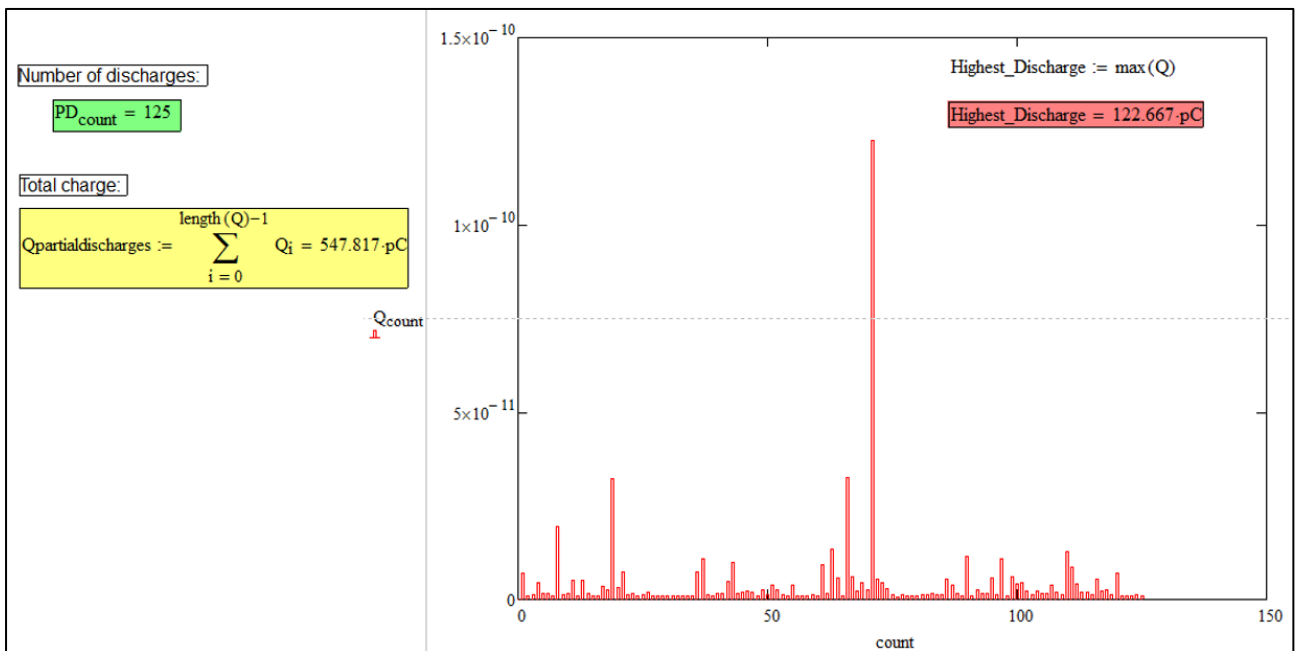
If we zoom-in to the Y-axis, we can see that approximately below $15\mu\text{A}$, is just noise. Therefore, we can set the threshold to that level. The program will cut off any signal is below that level.



Finally, what is left from the initial signal is only the partial discharges. These are peaks of current. The program first counts the number of those peaks in one period and gives the PD count. Then it integrates the current I over time t , for each peak separately, and gives the charge q for each discharge. It can also state the value of the highest discharge, and finally sums up all the discharges to give the total charge Q of the PDs in one period, which is 20 ms, given that we are using the electricity from the local grid whose frequency is 50 Hz.

Results:

- Number of PDs: 125
- Total charge: 547.82 pC
- Highest discharge: 122.67 pC



Εικόνα 50: Screenshot from Mathcad program with the final results of the PD measurements

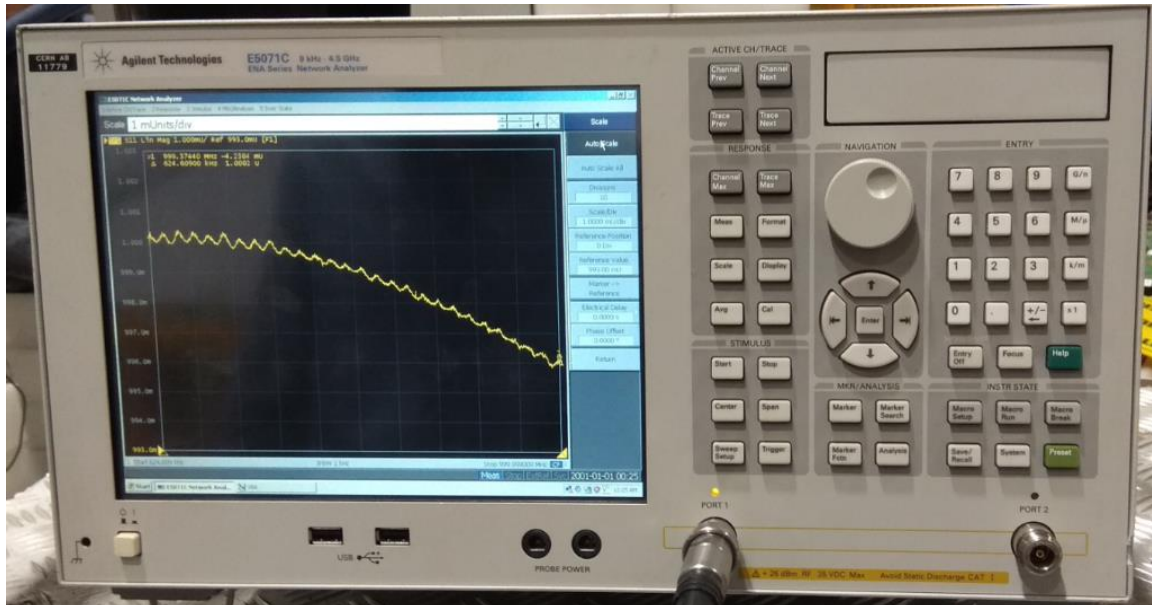
Note: Even though this particular example was for 2 periods, which means we should divide all values by 2, still it gives a good idea for future improvements, as to average over many periods for better results.

Correct values:

PD count: 63 PDs, Total charge: 273.91 pC, Highest discharge: 61.34 pC

4.2. Εξοπλισμός Για Μετρήσεις Χαρακτηριστικής Αντίστασης Και Απωλειών (The Impedance / Attenuation Measurements Equipment)

The device that was used for the measurements of the impedance and attenuation of the cable samples was the Agilent E5071C Vector Network Analyzer.



Εικόνα 51: Agilent E5071C Vector Network Analyzer

It is an instrument that measures the scatter parameters (S-parameters) of electrical networks. Out of the scatter parameters, transmission line attenuation can be derived. In addition, by using a Discrete Fourier Transformation of the S - parameters, information about the impedance and the length of the transmission line can be measured.

5. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ (THEORETICAL EVALUATION OF THE HIGH VOLTAGE COAXIAL CABLES)

5.1. Διαδικασία Αξιολόγησης Των Καλωδίων (Evaluation Process Of The Cables)

The cable samples under examination were varying from cables that have already been used at CERN for many years, to new prototypes, as well as new optimized models, which were taken of the shelf (OTS) and were modified. More specifically, the cables were: (i) the specialized SF₆ (Sulphur Hexafluoride) gas filled coaxial high voltage cable (Kabelwerke Brugg), (ii) the standard coaxial cable HCA118-50J Heliflex (RFS), (iii) the CLP50 (RG220/U) and (iv) the CLP30 new prototype (DRAKA), figures 51, 52, 53 and 54.

- SF₆ cable

The already mentioned Kabelwerke Brugg SF₆ coax cable: build in 1994, this cable has a corrugated copper outer conductor, and uses thin PE foils wrapped around the inner conductor, which they are pressurized with SF₆ gas. This has the major advantage that the gas fills all the voids inside the insulation, which means it provides superior dielectric strength. Also the cable has a lower velocity factor due to low-density PE core. There have been no issues with surface discharge of spacers, usually used in large diameter air insulated coax cables. It is characterized by low attenuation/losses (~3dB/km at 10 MHz) due to large its large inner diameter and because it has no semiconducting layers. This cable has been in use at CERN since the 1990's and there have been no issues so far.



Εικόνα 52: The Kabelwerke Brugg SF₆ gas filled cable

It operates at nominal voltages up to 80 kV. It comes in many impedances, while in this study, the 26.3 Ω was examined. Its main disadvantages are: the fact that vacuum and SF₆ gas systems are

needed; also special gas tight connectors (in house production) with slow disconnect. It is a relatively stiff and heavy cable (one pulse forming line weighs 2.6 tons) and most importantly, it not produced anymore [19], [20].

- HCA118-50J Heliflex

The main cable under test was the HCA118-50J HELIFLEX® 1-1/8", low loss air dielectric cable by RFS, Radio Frequency Systems, in 2012. It has a 12 mm diameter inner conductor, a corrugated copper outer conductor of 30.2 mm mean diameter, and in between a helical polyethylene spacer with a diameter of 27.2 mm. The RF peak voltage is quoted with 3.7 kV and the nominal impedance Z is 50 Ω . Due to the air dielectric, it has of course low attenuation benefits, however lower voltage strength and thus no direct use in our HV applications. The main idea of modifying it, will be extensively discussed later on here.



Εικόνα 53: The RFS HCA118-50J Heliflex

- CLP50



Εικόνα 54: The DRAKA CLP50

The “workhorse” at CERN. It is an improved RG-220/U coaxial cable by DRAKA Cable Company. It has a 50Ω impedance and has no semiconductor layer. It is compliant with CERN IS23, and factory tested, at 35kV RMS. At CERN it is used for operational voltages up to 40kV pulsed, and more than 32 km of it are in use. It can be used with LEMO and in house made connectors. It has a “regular” consumption due to the often exchange of irradiated cables in critical systems. [19]

- CLP30

The new CLP30 prototype from Draka has an impedance of 30Ω , also no semiconducting layer, low attenuation and a good BDV (48 kV RMS) with respect to the RG220 type cables. It has a potential for future optimization towards higher operational voltages. CERN could profit from its low attenuation and higher BDV, as an SF₆ cable replacement solution.



Εικόνα 55: The DRAKA new CLP30

Πίνακας III
Τεχνικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων υπό εξέταση καλωδίων
(Structure properties of the four cables under examination)

		Material, ϕ :diameter, (width)		
<i>Cable / Data Specs</i>	<i>manufacturer</i>	<i>inner conductor</i>	<i>insulation</i>	<i>outer conductor</i>
SF ₆	Brugg	copper tube, ϕ : 30/34 mm (2mm)	LDPE-tape, ϕ : 34/61.2 mm (13.6mm)	corrugated copper, ϕ : 61.35/68.47mm (1.15mm)
Heliflex	RFS	copper tube, ϕ : 12 mm (0.8mm)	helical PE spacer, ϕ : 27.2 mm	corrugated copper, ϕ : 33.2mm
CLP50	DRAKA	bare copper wire, ϕ : 6.66 ± 0.02 mm	PE, ϕ : 23.1 ± 0.2 mm	bare copper braid, ϕ : 24.2 ± 0.4 mm
CLP30	DRAKA	bare copper tube, ϕ : 15mm (1.5 mm)	PE, ϕ : 32.0 ± 0.2 mm	bare copper braid, ϕ : 33.1 ± 0.4 mm

5.2. Σχεδιασμός Των Πειραμάτων (Planning The Experiments)

The main task at hand was replacing the air-dielectric of the Heliflex with electrical insulating oil, in order to introduce it as a substitute of the SF₆ gas filled cable. The upgraded cable was expected to reach a higher peak voltage whilst having also less partial discharges.

The strategy was to confirm the feasibility of this approach by a quick and efficient evaluation of the cable with standard equipment. Therefore, a small-scale model to reduce the required voltage and ease the handling was established. This model was characterized by measurements of partial discharge inception voltage, break down voltage (AC and DC) and the impedance both in air and in oil. These results together with simulations and analytic calculations allowed to initially decide if the basic requirements for a possible replacement of the 80 kV SF₆ cables are fulfilled.

A simple, user-friendly, and cost effective method to measure partial discharges was set up. It consists of a high voltage generator, a voltage divider, a current transformer, an oscilloscope and a tank of oil where the cable sample was tested.

The first tests were made to evaluate the prototype cable as delivered, without any modifications, hence with air as dielectric. Measurements were taken in AC and DC, PD inception was determined, and the impedance was verified. The same tests were then repeated using electrical insulating oil as dielectric.

In addition, numerical simulations of the different cables and options have been performed using OPERA v18R2 [21]. Finally, the

measurements of the impedance of the cable, along a certain length of it, were carried out.

5.3. Το Μονωτικό Έλαιο Που Χρησιμοποιήθηκε (The Oil Used)

The oil used for subsequent tests was BLUESIL™ FLUID 47 V 20 [22], a type of silicone oil, which is commonly used as an electrical insulator. It is a low viscosity polydimethylsiloxanic fluid, whose relative dielectric constant (ϵ_r) is 2.7 and the nominal dielectric strength is 14.0 kV/mm.

5.4. Αναλυτικοί Υπολογισμοί – Θεωρητικές Προβλέψεις (Analytic Calculations – Theoretical Predictions)

5.4.1. Υπολογισμοί Για Τη Χαρακτηριστική Αντίσταση Z_0 (Characteristic Impedance Z_0 Calculations)

From (8), using the dimensions of the cable and the relative permittivity ϵ_r of the insulation we can calculate the impedance Z_0 of each cable. The values of the constants are $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m (copper), and $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m for vacuum.

- Kabelwerke Brugg SF₆ Cable

The relative dielectric constant ϵ_r of the combined media (PE with pressurized SF₆) is given in the cable datasheet at ~2.2 [23]. Using (8), we obtain:

$$Z_0 = 26.146 \Omega$$

- Heliflex HCA118-50J

The datasheet does not provide the ϵ_r of the combination of air and the PE spacer. However, it mentions: $L_0 = 0.183 \mu\text{H/m}$ and $C_0 = 73 \text{ pF/m}$. By using (2), we obtain:

$$Z_0 = 50.068 \Omega$$

If we use (8), we can then calculate the ϵ_r of the Heliflex cable:

$$\epsilon_r = 1.222$$

- CLP50

We have the specific dimensions of the cable and the ϵ_r of the insulation. The common RG-220/U cables use as insulation material the LE6006, low loss LDPE compound for coaxial cables, which has a dielectric constant of 2.29 (at 1 MHz). From (8), we get:

$$Z_0 = 51.133 \Omega$$

- CLP30

Again, knowing the dimensions and the $\epsilon_r = 2.29$, we obtain:

$$Z_0 = 31.367 \Omega$$

5.4.2. Υπολογισμοί Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου E (Electric Field E Calculations)

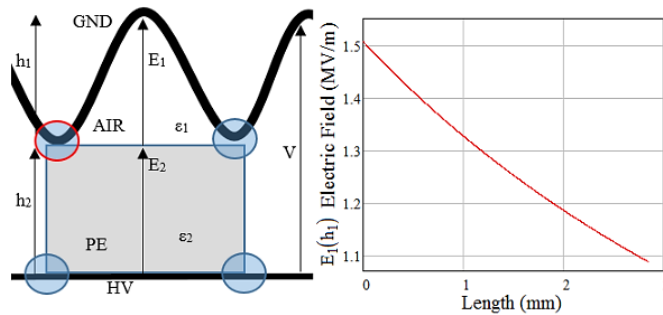
One very important aspect of coaxial cable transmission lines is the voltage holding which they can undergo. High electric field quantities are obviously observed close to the inner conductor. These high fields usually create the “unwanted” PDs and corona, hence the need to keep them as low as possible. However, high voltage is not the only one responsible for these high fields. As mentioned earlier, the shape of the conductors, the sharp edges and, most importantly, the cracks and voids in the insulation or even between the insulation and the conductor, are also factors.

All of the above can and will be referred to from now on as the “weak points” of the cable, that is, points (small areas around them) that can potentially create such high fields, which can cause PDs or even total breakdowns. However, one special category of weak points inside a coaxial cable are the so-called “triple points” of the cable. They are not referring to water. A ‘triple point’ is called the junction of metal, dielectric and vacuum. These spots inside a cable, and the area surrounding them, give exceptionally high electric field values, and, together with the sharp edges of the conductors, they are absolute candidate spots for creating partial discharges, flashovers, and breakdowns. In the case of our cables,

we have air instead of vacuum, or oil, and SF₆ gas. Therefore, the triple points may give possibly the highest electric fields, according to analytical calculations, which will later be confirmed by FEM simulations.

As shown in (10), when h₁ goes to zero, E₁ acquires its highest value:

$$E_1(h_1) = \frac{V}{(h_1 + h_2) \cdot \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} + 1 \right)} \quad (10)$$



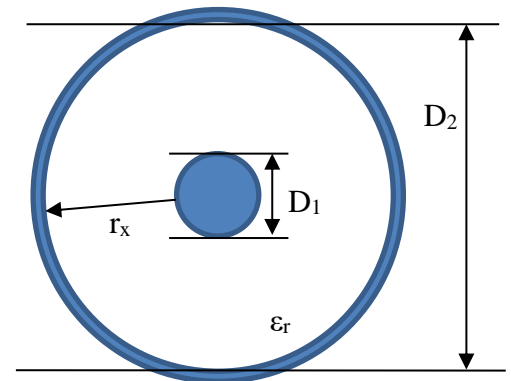
Εικόνα 56: (Left) Illustration of ‘triple points’ and (right) the graph of the electric field around the area of one point

where E₁(h₁) is the electric strength in air, V the applied voltage, while h₁, ε₁ and h₂, ε₂ are distances and dielectric constants inside the air gap and the PE, respectively, as shown in Fig. 56.

▪ *Simple cylindrical coaxial geometries*

The electric strength E_x is depended on the applied voltage and the dimensions of the coaxial line. When located at a distance r_x, (D₁/2 < r_x < D₂/2), from the cable axis, it is given by (11), [4]:

$$E_x = \frac{V}{r_x \ln \frac{D_2}{D_1}}, \quad (11)$$

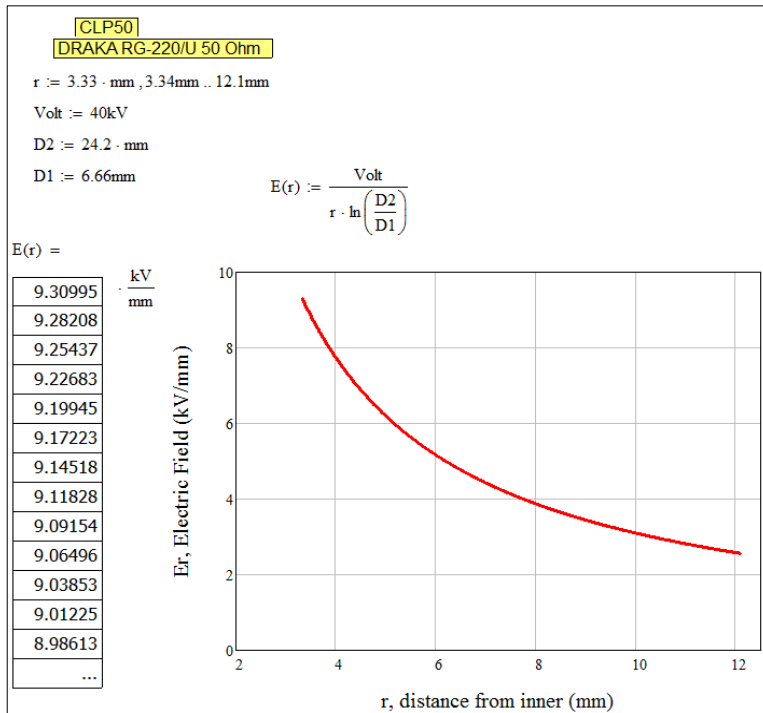


Εικόνα 57: Cross-section of the cable

where V is the voltage between the conductors.

As expected, the highest value of E_x is when r_x = D₁/2 and the lowest is when r_x = D₂/2.

○ CLP50



Using (11), for the simple coaxial geometry of the CLP50 cable, and for the operating voltage of the 40 kV, we get:

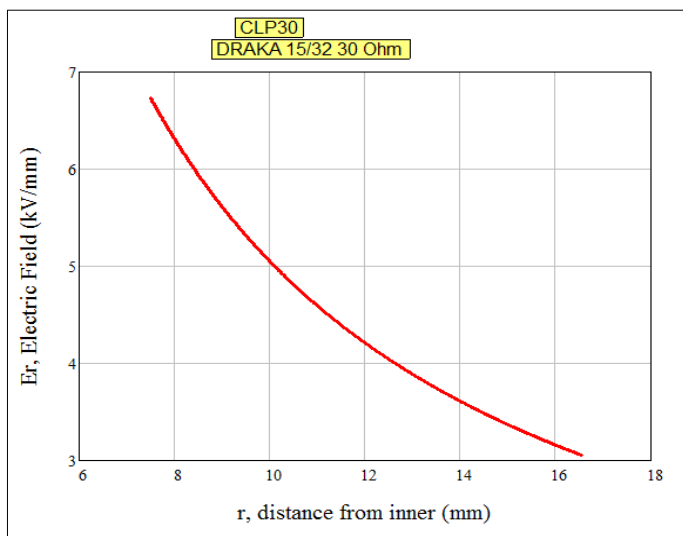
$E_{\max} = 9.31 \text{ kV/mm}$

Εικόνα 58: Mathcad calculations and graph of the electric field inside the CLP50 cable

○ CLP30

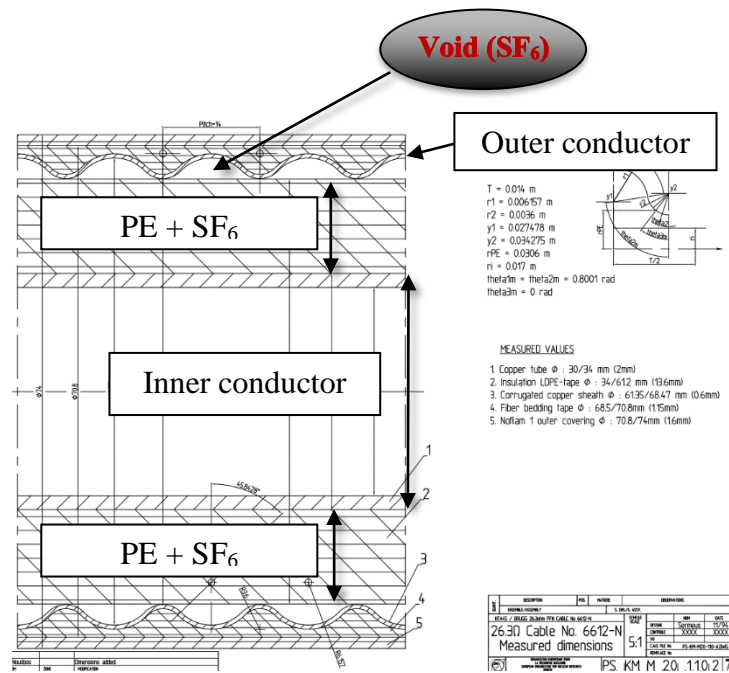
Using (11), for the CLP30 cable, at 40 kV, we obtain:

$E_{\max} = 6.74 \text{ kV/mm}$



Εικόνα 59: Mathcad calculations and graph of the electric field inside the CLP30 cable

▪ *More complex coaxial geometries*

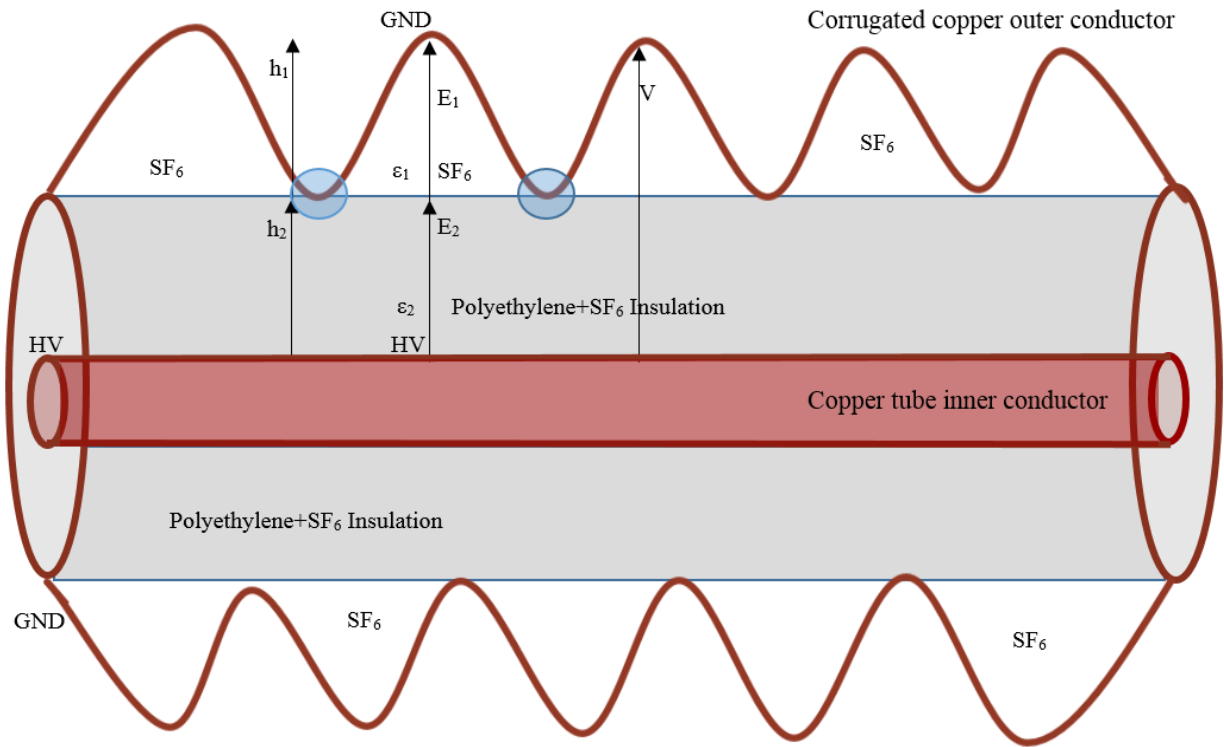


Εικόνα 60: Design printout of the 26.3 Ω Brugg SF₆ cable

The geometrical shapes of both the Brugg SF₆ and the RFS Heliflex are more compound in their structure, especially due to the fact that the outer conductor is corrugated in both of the cables. The corrugation (although needed for such bulky structures) is useful for the flexibility of the cables, but not for the voltage holding. It is needed when bending a cable of that size, in order not to deform the copper. However, because of it, the PE does not fit smoothly to the copper in both cables, leaving areas surrounding the triple points that create high fields, subsequently showing PDs and lower BDV.

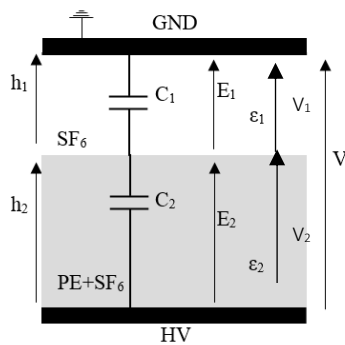
○ SF₆ cable

In figure 60, it is clearly shown that the geometry of the cable allows the existence of triple points, because of the presence of voids filled with SF₆, between the insulation and the outer conductor. This is exhibited more vividly in the next figure (61). With its help, we will try to explain why electric field strength acquires such high values around triple points, two of which are depicted in blue circles.



Εικόνα 61: Schematic representation of the inside of an SF₆ gas filled coax cable (not in scale)

Here, the triple point consists of three different materials with dielectric constants: $\epsilon_1 = 1.00204$ for SF₆ gas, $\epsilon_2 = 2.17$ from the mixture of polyethylene pressurized with SF₆, and finally the outer conductor, which is made of copper. Since it was not possible to calculate the exact value of the E-field close to the triple point, we calculate it in the middle of the ‘arc’ of the void. From the simplified schematic in fig. 62, given that the applied voltage is 80 kV, we can derive the following:



Εικόνα 62: The above schematic, simplified

From the schematic, we get:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$C_1 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot \frac{A}{h_1} \quad , \quad C_2 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_2 \cdot \frac{A}{h_2}$$

Turns out: $V_1 = 15.189$ kV, $V_2 = 64.811$ kV

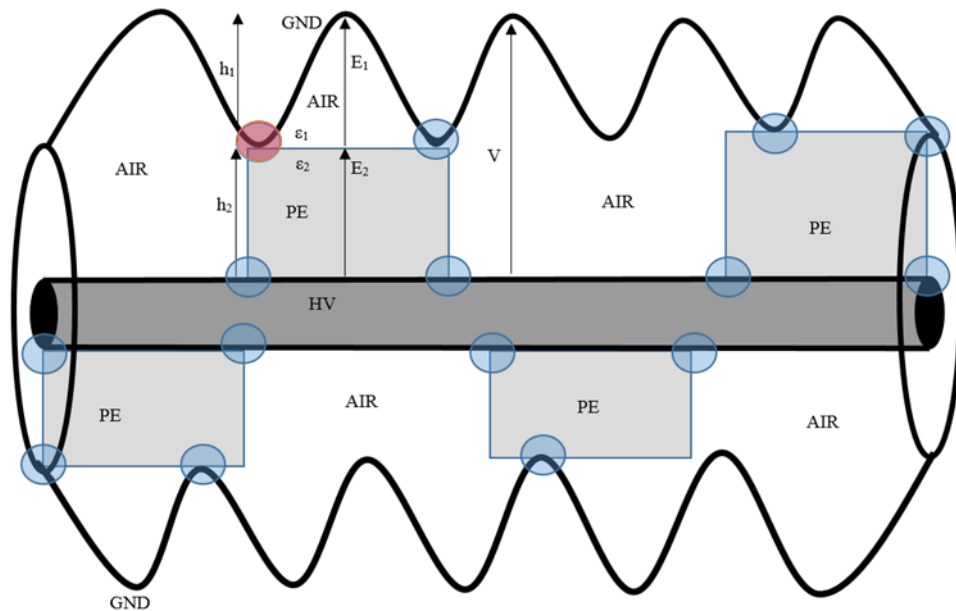
Hence, $E_1 = V_1 / (h_1 \cdot \ln(D_2/D_1)) = 7,520,172.9$ V/m = 7.52 MV/m

And $E_2 = 3,472,815.8 \text{ V/m} = 3.47 \text{ MV/m}$

$$E_{\text{total}} = 10.99 \text{ MV/m}$$

○ Heliflex

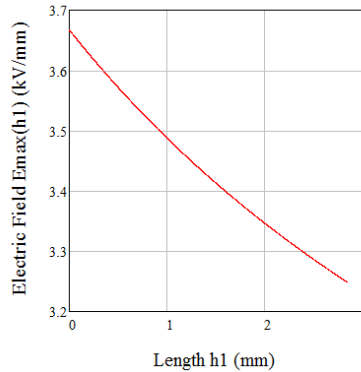
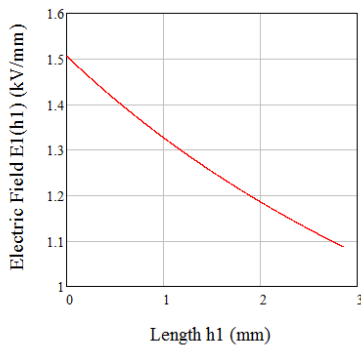
The exact equivalent phenomenon is observed in the Heliflex cable. Here, instead of SF_6 gas, we have air as a dielectric with $\epsilon_r \approx 1$. The polyethylene helical spacer creates triple points (fig. 63) where it touches the corrugated outer copper conductor.



Εικόνα 63: Schematic diagram of the Heliflex cable, showing the weak (triple) points

In Fig. 63, in the area near the triple point (in red), as we get closer to it, h_1 goes to zero, thus E_1 acquires its higher value, which, according to our calculations is **1.505 kV/mm**, given that we apply a voltage of 16 kV (as we will later find out in the HV tests, little more than 16 kV was the BDV of the standard Heliflex). If we then add E_2 , this results in a total E_{max} electric field strength for the Heliflex. Of course, this is merely an approximation, because it is nearly impossible to calculate the actual E - field near the triple point, due to the complexity of the geometry of the cable. This why we will later use the simulations, to correctly calculate these values.

$$E1(h1) := \frac{HV}{(h1 + h2) \cdot \left(\frac{\epsilon1}{\epsilon2} + 1 \right)}$$



**$E_{max} =$
3.667 kV/mm.**

Εικόνα 64: E-field for the Heliflex, close to a triple point (left), total (right)

What is left now to do is to simulate the cables under the same voltages and compare the E-field values calculated here, with the results from Opera. This will be done later in the Simulations chapter (7).

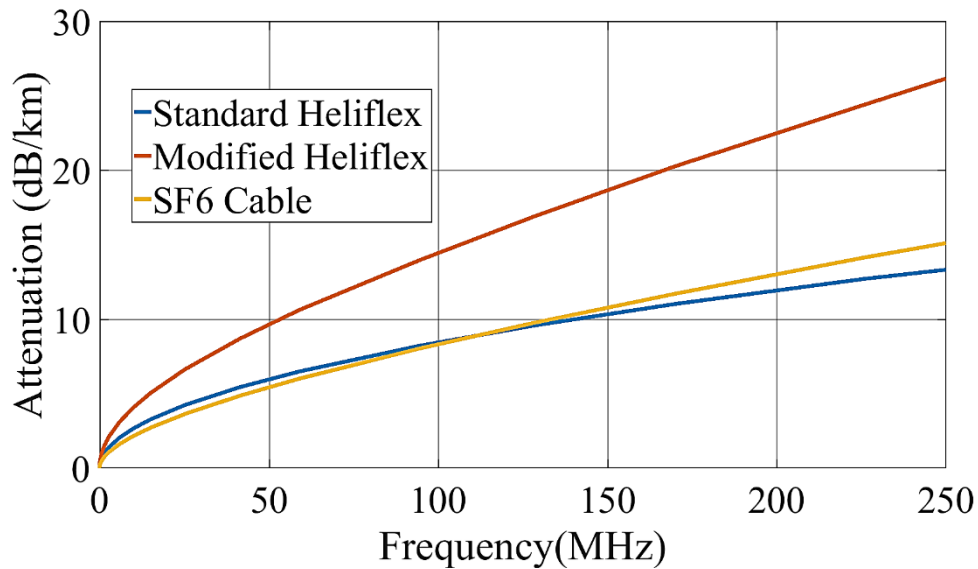
5.4.3. Άλλοι Υπολογισμοί (Other Calculations)

By using the analytical formulas from the corresponding bibliography [4], [5], we can calculate the capacitance (C_0), inductance (L_0), active resistance (R_0) and the conductivity (G_0) per unit length of the cable, plus the attenuation (α), for a frequency of 50 MHz. This was done for the standard air-dielectric cable, the modified one filled with oil (we hypothesized $\epsilon_r=2.7$), and the 26.3 Ω SF₆ cable, as seen in Table IV. The attenuation and the losses are compared in Fig. 65. They are important factors for selecting the correct HV coaxial cable, since the applications that these cables are used in, are within the high frequency range, typically operating at several tens or hundreds of megahertz [24]. Other electrical specifications were drawn from the equivalent data sheet of each cable and are presented for comparison.

Πίνακας IV

Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά των Καλωδίων, (α) από τον κατασκευαστή, και (β) Θεωρητικοί Υπολογισμοί και Προβλέψεις (50 MHz, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά) - (Electrical Specifications Of The Cables, Data Sheet And Analytical Calculations)

a/a	Data Sheet				Theoretical calculations	
Type of cable	<i>SF₆ Cable</i>	<i>CLP50</i>	<i>CLP30 @30MHz</i>	<i>Standard Heliflex</i>	<i>Modified Heliflex</i>	
ϵ_r	2.2	2.3	2.3	-	1.2	2.7
Z_0 (Ω)	26.3	50 +/- 1%	30.9	50 +/- 0.5	50.9	33.7
C_0 (pF/m)	189.8	100	165.2	73	73.9	162.5
L_0 (μ H/m)	0.129	0.26	-	0.183	0.185	0.185
R_0 (Ω /km)	26.5	1.54	1.03	-	68.9	68.9
G_0 [1/(M Ω ·km)]	$9.42 \cdot 10^3$	10^4	10^4	-	0	$5.41 \cdot 10^3$
α (dB/km)	5.5	13	9.9	6.4	6.0	9.7



Εικόνα 65: Theoretical comparison of the attenuation over frequency

6. ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (TESTS AND MEASUREMENTS)

6.1. Μερικές Εκκενώσεις και Τάση διάσπασης (Partial Discharges and Breakdown Voltage)

The equipment available in the laboratory allowed to setup a simple, user friendly, low cost measurement system for measuring partial discharges in cables under high voltage. In addition, it helped to determine the breakdown voltage (peak voltage) of the cables. The samples that went under examination were: (a) cables that are already in use at CERN in many applications; the RG-220/U and the HTC-50-5-1, (b) the standard, off-the-shelf, Heliflex cable, (c) the modified oil-filled Heliflex, along with some variations in the design in order to optimize its performance, and (d) the corresponding Spinner connector for the Heliflex. The multiple series of tests included AC and DC high voltage measurements of partial discharges, corona, and finding the inception, extinction and breakdown voltages of each cable.

6.1.1. Πρωτότυπο καλώδιο RFS Heliflex – Αέρας ως Διηλεκτρικό (Heliflex Standard Air Dielectric)

The main interest in the project was to confirm the possibility of using an oil filled cable as a replacement for the SF₆ filled one. Various tests were conducted in the laboratory for that purpose. The first tests concerned the standard OTS Heliflex cable that uses air as dielectric. The goal was to measure its breakdown voltage in both DC and AC. It was not expected to be high enough since it is not made for HV applications.

○ DC test

Initially the tests were conducted on DC voltage, on a 3 m Heliflex cable sample, having its two ends in oil, in order to avoid any electrical arcing or breakdown due to the non-usage of cable terminations. Cable terminations play a very important role in high voltage cable measurements, because they ensure due to their structure that no partial discharges or corona, originate from the cable ends.

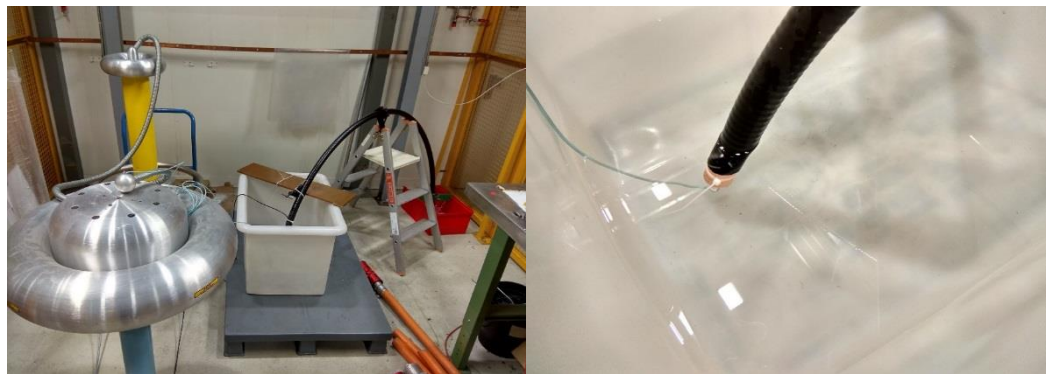
Using the 30 kV Non-Destructive Insulation Tester, we carried out the first tests in DC. The breakdown voltage (BDV) was measured at 18 kV during the 1st test and at 20 kV during the 2nd measurement.

- AC test

Afterwards a test was conducted on AC voltage, on the same 3 m Heliflex cable sample, having its two ends in oil. The results from the PDs are shown below.

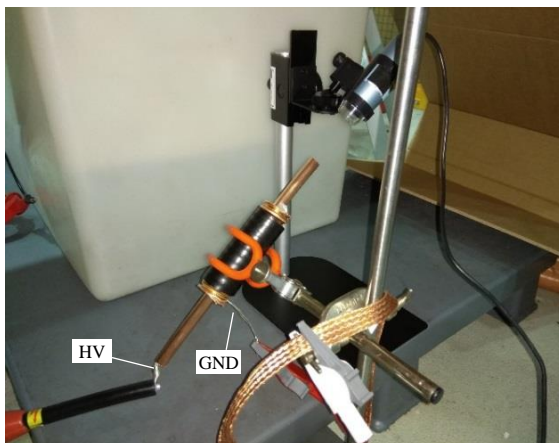
Πίνακας V
AC Tests with Standard Air - Dielectric Heliflex cable

kV peak	#PDs	total Q (nC)	highest discharge (nC)
2.114	277	19817	118.44



Εικόνα 66: First test of the Heliflex cable (standard-air-dielectric) in AC

Subsequently, a 20 cm sample was prepared and used for DC measurements, in air. The temperature inside the laboratory was 20 °C and the relative humidity was 28.2%. Because the sample had no cable terminations, the two ends of the outer conductor had plenty of sharp edges, which can be responsible for electrical arching between the conductors, flashovers, and lower breakdown voltages. This is due to the fact that sharp, pointy and not smooth metallic parts, tend to accumulate strong electric fields, as the electric field lines there get really dense.



Εικόνα 67: The set-up for recording breakdowns in DC



Εικόνα 68: An electric arc (breakdown) in air during DC test

Figure 68 depicts an electric arc during a breakdown in air. It was taken using a Dino-Lite Digital Microscope [25] connected to a laptop that was recording. If closely observed, one can see that it originates from a very sharp edge of the outer conductor, due to the fact that no cable terminations were used, and, although it was cut with a wheel and was polished and with a Dremel, it still had sharp edges that attracted such electric fields, high enough to break the air at approximately 1.95 kV/mm, much less than 3 kV/mm (BDV of air).

BDV: 17.5 kV

*Electric field:
17.5 kV / 9.03 mm
= 1.95 kV/mm*

A way to optimize the design and thus have better results, was to try to avoid the very sharp edges and scratches at the ends of the cable. For that reason, two smooth copper rings were mounted to evenly distribute the electric field lines, in order to avoid sparks and electric arcs between the inner and the outer conductor.

6.1.2. Τροποποιημένο καλώδιο RFS Heliflex – Έλαιο ως διηλεκτρικό (Modified Heliflex – Oil Dielectric)

- DC tests

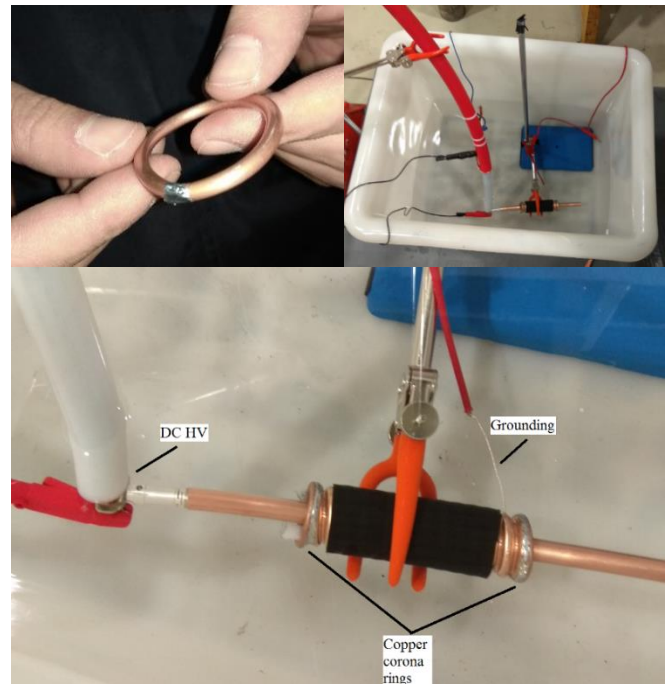
Following this, new DC tests were done, both in air and in oil. The tank was filled with the Bluesil oil, and because the 30 kV tester did not cause a breakdown, the 160 kV DC Power Supply was used.

Table V shows the initial results:

Πίνακας VI

First Tests in Dc – In Air and In Oil

No.	Dielectric	Corona Rings	BDV [kV]
1	Air	None	17.95
2	Air	None	17.71
3	Air	None	17.28
4	Air	None	17.45
5	Air	1	17.89
6	Air	1	17.86
7	Air	1	17.47
8	Air	2	17.62
9	Air	2	18.33
10	Air	2	15.98
11	Oil	2	37
12	Oil	2	39

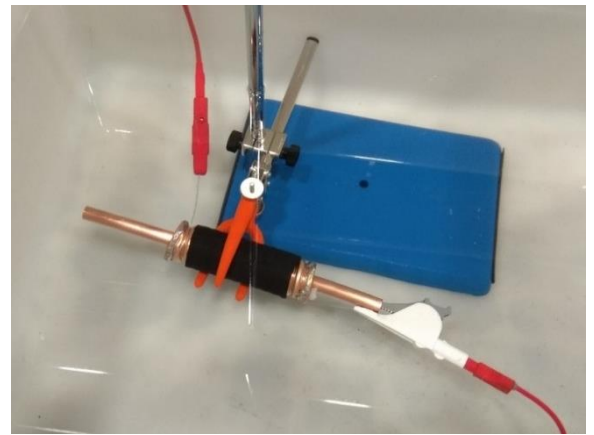


Εικόνα 69: HV DC tests in oil with soldered corona rings

For the tests in oil, the cable sample was fully submerged into the oil tank and all air bubbles left inside the cable were carefully removed before measurements were taken at different voltages. From these first results, one cannot say with certainty whether the small corona rings that were soldered to the two ends of the outer conductor, helped indeed to improve the breakdown voltage. What is sure though, from a first point of view is that due to the insulating oil, the BDV was increased at least by a factor of 2.

○ AC tests

The next step was to conduct AC (50 Hz), HV measurements, in oil, on the same 20cm Heliflex sample, fully submerged in oil. Using the test circuit of fig. 48, we were able to measure the PD inception voltage, PD charge and count, along with the breakdown voltage. Again, we had to make sure that all air bubbles were carefully removed from inside the cable. The results from the oscilloscope were processed with the help of Mathcad.



Εικόνα 70: First tests of AC HV testing in oil

First tests of AC HV testing in oil:

- Heliflex 20 cm
- AC, 50 Hz
- In oil dielectric
- 2 rings soldered

During these tests, no breakdown was observed.

Πίνακας VII
First Results of AC HV Testing for PDs in Oil

kV (Peak)	#PDs	Total (nC)	Highest (nC)
19	0	0	0
30	7	0.469	0.125
38	3	0.157	0.058
42.9	11	31.13	26.47
43.05	6	30.61	25.47
43.03	10	24.05	18.16

Table VII shows some first results from measurements that were processed with the Mathcad code. When the voltage by the power supply was raised to 43.03 kV peak, our measuring system recorded in one period (20 ms): 10 partial discharges with a total charge of 24.05 nC, while the highest of the PDs had a charge of 18.16 nC.

More tests on the effectiveness and usefulness of the copper rings:

Πίνακας VIII
Comparison Of and Evaluation of Soldered Corona Rings (2 Tests in Oil)

	peak [kV]	PDs	threshold	total Q [pC]	# of PDs	Highest Q [pC]
2 rings	17.66	Yes	10 μ A	78.4	106	2.841
	21.7	Yes	10 μ A	112.2	134	5.444
No rings	12.55	Yes	10 μ A	598	526	10.227
	17.7	Yes	10 μ A	557.132	542	10.345
	21.7	Yes	10 μ A	569.791	548	10.431
1 ring	17.68	Yes	10 μ A	606.2	654	8.483
	21.73	Yes	10 μ A	654	684	10.751
2 rings	17.76	Yes	10 μ A	91.6	116	6.461
	21.73	Yes	10 μ A	135.6	144	11.797

Then, what followed was the first tests for the determination of the PD inception voltage. There were two tests: one with no protection box, and the second with the spark - gap and a transorb diode (both tests in oil – no rings).

Πίνακας IX
Measurements for Inception – Without and With Protection Box

P. Supply (kV, peak)	oscilloscope (kV, peak)	current (μ A)	PDs	BD
Without protection box				
0	316m	820	-	-
0.5	2.05	810	-	-
5	5.3	860	-	-
10	11.5	1080	-	-
15	16.9	1320	YES	-
20	21.8	2440	YES	-
With protection box				
0	37m	220	-	-
2	2.08	259	-	-
5	4.75	313	-	-
10	9.7	422	-	-
15	15.05	533	NO	-
20	20.1	720	YES	-

Due to fact that the transorb diode dropped the inception voltage, we kept only the spark-gap.

The next series of tests included higher AC voltages to determine the possible peak voltages in oil. What was witnessed is that during the same test, while raising the voltage gradually, gas bubbles were observed. It was assumed that they originated from PDs taking place in the oil. Moreover, during each breakdown, there were enough amounts of gas formed inside the cable. The gas bubbles significantly lowered the peak voltage in the next tests.

This effect was confirmed after the first test, which went up to 66 kV peak, the highest BDV we reached during all tests. Then it significantly dropped in the following test to 40 kV and then 30 kV. Moreover, the same thing happened with the PD inception voltage. The PDs appeared much sooner than the first time due to the trapped gas.

First HV AC Tests for Breakdown Voltage (Tests in Oil):

1st test: 66 kV peak, more than 3 times the BDV in air

2nd test: 40 kV

3rd test: 30 kV

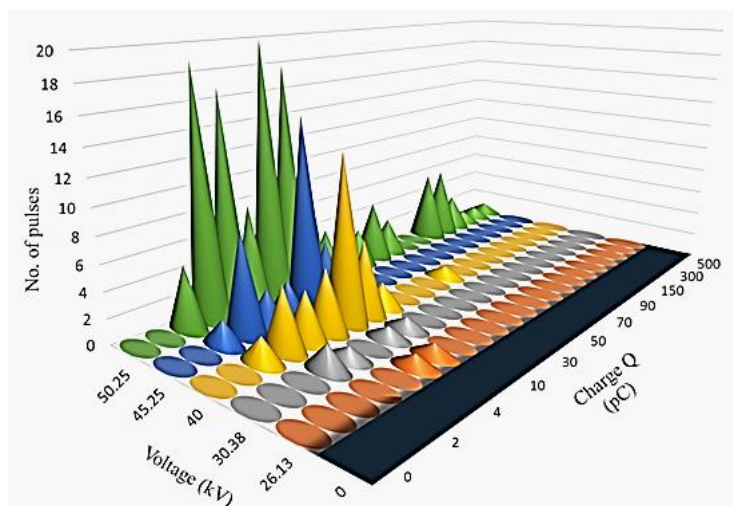
Table X shows another two series of tests (without any copper rings soldered), with results concerning the inception voltage, the breakdown voltage, as well as the partial discharges. Before the 1st test, air bubbles were thoroughly removed from inside the cable as to assure there are no PDs originating from them. The 2nd test was immediately done afterwards, without removing the gas that was produced from the first test. The results confirmed our initial hypothesis.

Πίνακας X
Presence of Partial Discharges in Oil Dielectric

	kV (peak)	Presence of PDs	# PDs	total PD charge Q (pC)	highest PD charge (pC)
1 st test – air bubbles thoroughly removed	25	No PDs up to 25 kV	0	-	-
	26.13	Yes- Inception	6	31	15
	30.38	Yes	16	89	25
	40	Yes	83	658	91
	45.25	Yes	98	693	46
	50.25	Yes	157	8644	837
	55.38	Breakdown			

	kV (peak)	# PDs	total PD charge Q (pC)	highest PD charge (pC)
2 nd test, right after the 1 st breakdown - has air bubbles inside	10	-	-	-
	15.38	-	-	-
	20.38	-	-	-
	21.5	Yes – Inception Voltage	-	-
	25.3	43	241	18

At the end of the 2nd test, a breakdown occurred at approximately after 1 minute at 25.3 kV.



Εικόνα 71: Partial Discharges of the oil-filled Heliflex in AC high voltage

In figure (71), one can see the number of PDs along with their charge Q increasing with the raise of the voltage.

More tests and measurements:

- a) Tests in order to determine the breakdown voltage (tests without corona rings):

Test	BDV (kV peak)
1 st	50 - forming of air bubbles
2 nd	40
3 rd	38
4th (after removing the air-bubbles)	55

During the experiments, we noticed some differences between the results in inception or breakdown voltage, depending on whether we were increasing the voltage fast or slowly.

- b) Test for determining inception voltage, breakdown voltage, measuring PDs (no rings soldered):

1st test: Fast raise of voltage

No.	(kV) peak	PDs
1	15.44	No
2	20.88	No
3	22.13	No
4	22.88	No
5	23.63	No
6	25.56	No
7	27.63	Yes - starting PDs - Inception
8	43	Breakdown

2nd test: Slow raise of voltage – Time: 27 minutes

No.	(kV) peak	PDs	# PDs	Total Charge (pC)	Highest discharge (pC)
1	1.637	No	-	-	-
2	6.475	No	-	-	-
3	11.19	No	-	-	-
4	11.56	No	0	0	0
5	15.88	Yes - Inception	51	210	14
6	17.31	Yes	31	85	5.7
7	20.5	Yes	31	106	12
8	24.38	Yes	69	238	21
9	27.5	Breakdown	-	-	-

After these two tests, it was clear that the voltage increase rate plays a great role in the voltage that can be achieved, both the breakdown and the inception voltage. When we were raising the voltage from the power supply more quickly, then we were able to achieve higher peak and inception voltages.

In the next test, we tried to determine not only the inception voltage, but the extinction voltage as well.

- c) Inception / extinction voltage – BDV – PDs – 2 rings soldered – Clear of air bubbles. Raising voltage gradually and slowly, total time: 52 mins

	No.	(kV) peak	PDs	# PDs	Total Charge (pC)	Highest discharge (pC)
	1	1.74	No	-	-	-
	2	4.5	No	-	-	-
	3	10.32	No	-	-	-
	4	19.75	No	-	-	-
Inception	5	24	No at first, Yes after 2 mins	11	31.12	4.5
	6	24	Yes - a lot	140	1282	42
	7	3.375	No	-	-	-
	8	4.156	No	-	-	-
	9	4.172	Yes	-	-	-
Extinction	10	3.625	Yes at first, No after 1 min	-	-	-
	11	4.156	No	-	-	-
	12	4.344	No	-	-	-
	13	5.344	Yes	33	167	14
	14	10.63	Yes	39	228	21
	15	15.63	Yes	40	259	20.4

	16	20.19	Yes	35	355	35
	17	26.31	Yes	87	679	41.7
	18	34.25	Yes - Breakdown after 1 min	102	1187	45.4

d) Inception voltage – BDV – PDs

#1 test (2 rings soldered)	No.	(kV) peak	PDs	# PDs	Total charge (pC)	Highest discharge (pC)
no air bubbles inside	1	10	No	-	-	-
fast raise of voltage, 7mins	2	20	No	-	-	-
	3	30	Yes - Inception Voltage	-	-	-
	4	40	Yes	-	-	-
	5	50	Yes	-	-	-
	6	60	Yes	-	-	-
	7	62.5	1st Breakdown	-	-	-
After 1st BD measurements - has air bubbles inside						
	8	10	No	-	-	-
	9	15	Yes - Inception	15	45.4	6
	10	20	Yes	69	273.5	24
	11	30	Yes	163	1369	105
	12	39.13	Yes	344	6017	1755
	13	40	2 nd Breakdown	-	-	-

#2 test (2 rings soldered)	No.	(kV) peak	PDs	# PDs	Total charge (pC)	Highest discharge (pC)
no air bubbles inside	1	1.5	No	-	-	-
raise of voltage, 11 mins	2	23.06	Yes - Inception Voltage	20	71.7	11.5
	3	30	Yes	35	181.4	23.5
	4	40	Breakdown	197	1488	106.6

Conclusions on Partial Discharge Measurement Tests:

After numerous tests, we came to the conclusion that the major factor for the achievable peak voltage / higher inception voltage is:

A. The voltage increase rate

- The faster the voltage was raised, the higher peak voltage was achieved.
- When the voltage was raised slowly, the partial discharges had enough time to form gas bubbles, which led to more PDs, and ultimately breakdown.
- When the voltage was raised faster, gas bubbles did not form quickly enough, and higher voltages were achieved before break down.

B. Removing gas bubbles carefully after every test

- Gas bubbles trapped in the oil inside the cable and the continuous forming of them under HV is a major drawback to the whole project.

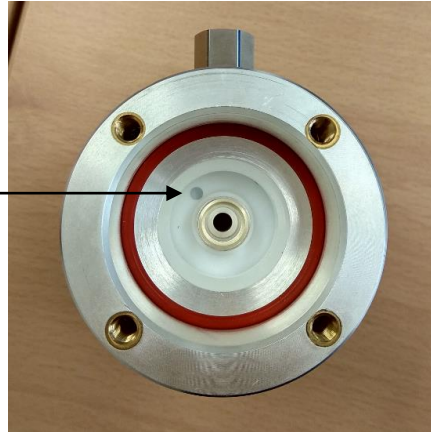
6.1.3. Σύνδεσμος Spinner για το καλώδιο Heliflex (Spinner Connector For Heliflex cable)



Εικόνα 72: The Spinner connector tests

The corresponding connector that is specially design as cable termination for the Heliflex cable, also went under testing for PDs and BDV.

Weak point inside the PE insulation of the connector.
It was light emitting during breakdowns.



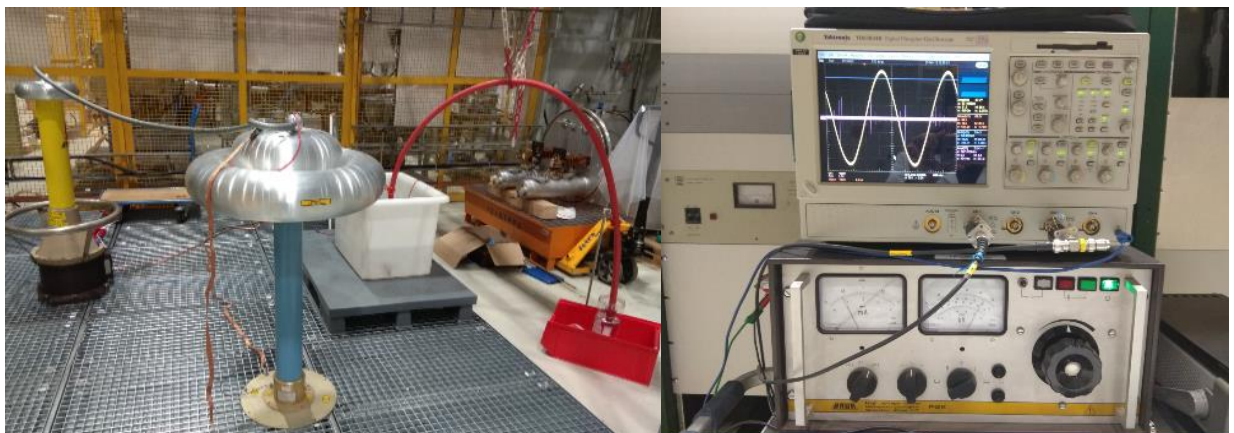
The first test for the connector was done in AC voltage, inside the oil tank. Below are the results:

Πίνακας XI
AC PD Tests of the Spinner Connector in Oil

No	kV peak	#PDs	total Q (nC)	highest discharge (nC)
1	20	21	13.395	1.258
2	23	48	70.139	23.889
3	25	62	127.081	56.552

The following test took place in air, under DC voltage, and the goal was to determine the BDV. After raising the voltage gradually, the connector broke down at 20 kV peak.

6.1.4. Μετρήσεις Μερικών Εκκενώσεων στο καλώδιο Draka CLP50 (CLP50 PD Measurements)



Εικόνα 73: The CLP50 cable HV tests

The DRAKA CLP50 cable is one of the most widely used cables at CERN. It can withstand higher voltages and went under many thorough tests for PDs during this project.



Εικόνα 74: Cable ends in oil

Again, the main concern was to put the ends of the cable inside insulating oil, to make sure that the partial discharges do not come from any sharp and pointy edges of the inner conductor or the outer braid, or from surface discharges on the polyethylene ends, but rather from inside the cable (PE insulation).

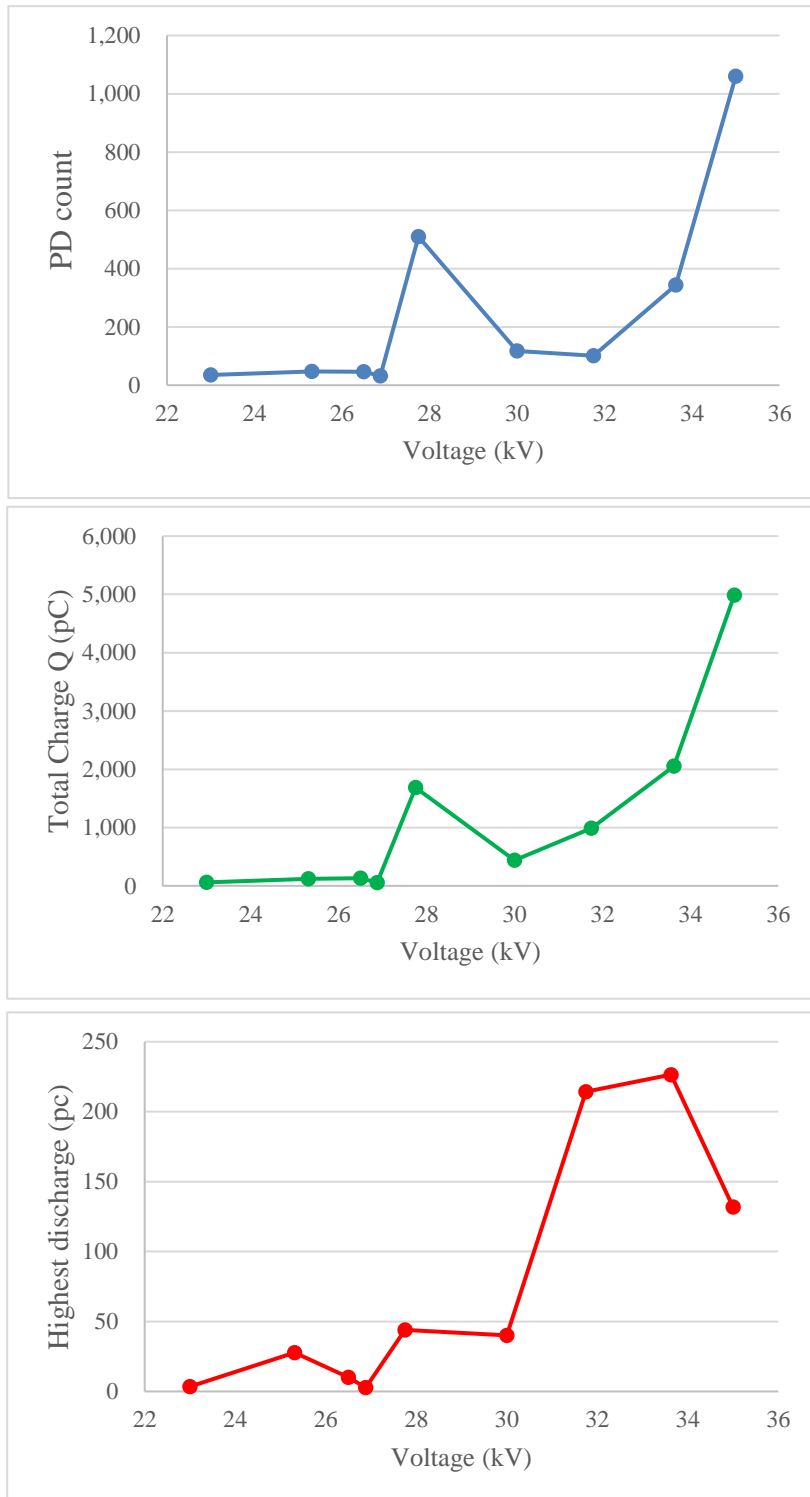
1) Test for Determining Inception Voltage

No.	(V) peak	PDs
1	5	No
2	15.44	No
3	21.13	No
4	24	No
5	26.38	Yes - Inception Voltage

2) Inception / extinction voltage – BDV – PDs

No.	(kV) peak	PDs	#PDs	Total Charge Q (pC)	Highest discharge (pC)
1	1.5	No	-	-	-
2	5.2	No	-	-	-
3	10	No	-	-	-
4	15	No	-	-	-
5	20	No	-	-	-
6	25.5	No	-	-	-
7	26.13	No	-	-	-
8	26.38	No	-	-	-
9	26.5	Yes	46	129.5	10.1
10	27.38	No	-	-	-
11	28.5	No	-	-	-
12	29.38	No	-	-	-
13	30.75	No	-	-	-
14	31.5	Yes - Inception Voltage	-	-	-
15	30.75	Yes	-	-	-
16	30	Yes	-	-	-
17	28.8	Yes	-	-	-
18	26.88	Yes	32	56.75	2.7
19	25.31	Yes	47	121.7	27.8
20	24.19	Yes	-	-	-
21	23	Yes	35	59.85	3.4
22	21.81	No - Extinction Voltage	-	-	-
23	23.75	No	-	-	-
24	24.88	Yes	-	-	-
25	27.75	Yes	510	1687	44
26	30	Yes	117	438	40
27	31.75	Yes	101	988.5	214.25
28	33.63	Yes	344	2053	226.5
29	35	Yes	1060	4985	131.8

The fact that in this series of tests we have recorded PDs at 26.5 kV, does not mean that this is the inception voltage of the specific cable. Because in the next measurement, at which the voltage is raised to 27.38 kV, as well as in the few next that follow, the PDs disappear, and then they reappear at 31.5 kV. Therefore, this is the inception voltage. The graphs that are based on the above measurements, are about the behaviour of the PDs while raising the voltage, and they are shown in the next page. What we expected, that with the increase of voltage we have increasing numbers of PDs, total charge, and higher magnitudes, is confirmed.



Εικόνα 75: Graphs of PD values over voltage, for the CLP50 coaxial cable

6.2. Μετρήσεις Χαρακτηριστικής Αντίστασης και Εξασθένισης (Impedance and Attenuation Measurements)



Εικόνα 76: The instrument with the measured cable



Εικόνα 77: Specially made connector for connecting with the VNA cable

The tests included the measurement of the impedance (Z), and the attenuation (α) of a 9 m Heliflex cable sample, with the Vector Network Analyzer.

Firstly, the standard air-dielectric model was measured, and the result was 50.2Ω , as expected. Then, approximately 6.5 litres of the Bluesil Oil were carefully filled in between the inner and outer conductors of the Heliflex. This was a rather long procedure and it does not exclude the presence of small quantities of air left inside the cable.

Impedance measurements have been taken at different oil temperatures:

- 32.7Ω at $25.3 \text{ }^\circ\text{C}$ and
- 32.9Ω at $27.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Finally, the attenuation measurement was 10.23 dB/km at 50 MHz .



Εικόνα 78: The setup for the impedance measurement

6.2.1. Αξιολόγηση των Μετρήσεων (Evaluation of the Measurements)

Results on the impedance:

- In the case of the standard air-dielectric cable, the result of **50.2 Ω** was anticipated, as it is within the limits of the manufacturer.
- For the oil-filled cable, although we are not sure that all air inside was removed, the impedances of **32.7 Ω** and **32.9 Ω** were actually not far from the analytically calculated (with approximations) value. In fact, the theoretical expectation was 33.7 Ω , so this can be considered as a satisfactory result.

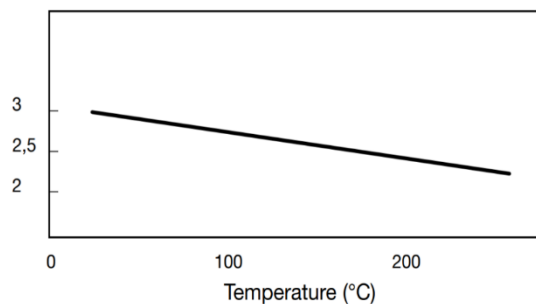
The attenuation, which was measured at 10.23 dB/km at 50 MHz, was again close to the theoretical calculation of 9.7 dB/km. For comparison, the RG - 220 (CLP50) attenuation at 50 MHz is 13 dB/km.

However, we observe that there is a significant increase in the attenuation considering the standard cable. The higher attenuation (comparing to the 6.4 dB/km of the standard ‘air’ Heliflex) is due to the different dielectric of the modified cable. Oil has higher ϵ_r (2.7) than air.

Comparing to SF₆ cable (5.5 dB/km), the Heliflex cable has a smaller inner conductor diameter, hence higher attenuation than the SF₆.

Rhodorsil® Oils 47 Dielectric properties

Dielectric constant



Εικόνα 79: Taken from the data sheet of the ‘family’ of oils, from which the oil we used belongs. [22]

6.2.2. Σκέψεις και συμπεράσματα για τη Χαρακτηριστική Αντίσταση (Thoughts and Conclusions On The Impedance)

- By means of different oils, or a mixture of them, the cable can be tuned to different impedances to match a connected magnet perfectly, which is also considered as one of the main benefits of this method.
- According to the technical information available in the data sheet of the used oil, when the temperature (T) rises, there is a drop in the viscosity of the oil, which in turn reduces the dielectric constant (ϵ_r), hence the impedance (Z) increases. In addition, pressurizing the oil increases its viscosity and leads to a higher ϵ_r .
- After calculations based on the correlation between the temperature and the dielectric constant of the oil, we came to the conclusion that: **An increase by 1 °K results in a 0.05% increase in Z.** This is not a small factor and should be definitely be taken into consideration for this kind of applications.

These results lead to the idea that temperature could be used to match the impedance, with the use of the appropriate mechanical system. Nevertheless, for sure it would also be really challenging to keep it stable.

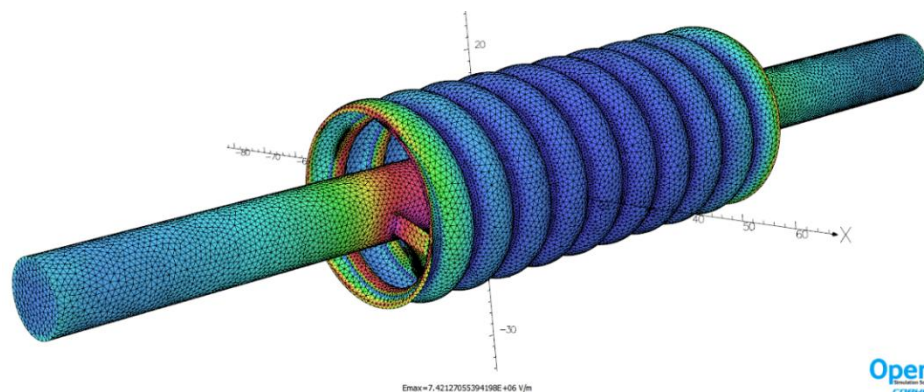
7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ (SIMULATIONS)

7.1. Πρόγραμμα Opera (Opera FEM Software)

With the help of the of finite element method software, ‘OPERA Simulation Software’ by Cobham, there was an attempt to simulate the performance and behaviour of the test subjects under high voltage.

Electric field simulations were conducted, in order to simulate in 3D modelling the electric field zones and lines, as well as the performance and behaviour of existing cables and connectors and also new designs under high voltage. The goal was to determine the weak points of the cable, which means the points that are potentially capable of causing problems to the correct function of the cable and can affect its lifetime. With the help of Opera, we are able to identify these points, by finding where the electric field acquires exceptionally high values. There, we have candidate spots for partial discharges, which is the main reason for cable decaying and finally the total destruction of the insulation of the cable.

Depicted in different colours, vectors, zones or lines, the electric field strength will tell where to expect future malfunctions of the cable. These areas of high fields are usually shown in purple or red colour, whereas low or zero fields are depicted in blue. As

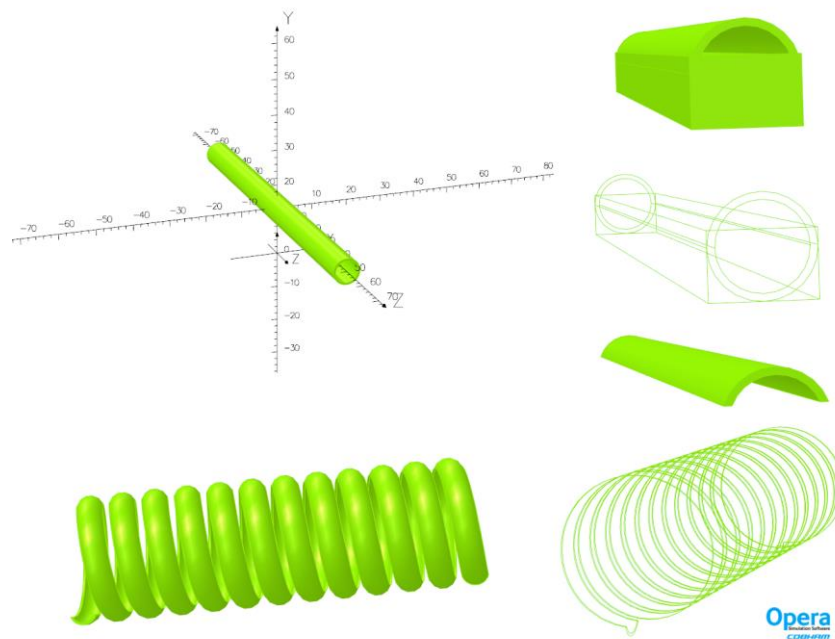


Εικόνα 80: The actual model to simulate (up) and the Opera simulation (down)

already mentioned, the weak points of the cable are the triple points, where the electric field strength goes high around areas close to these points. The purpose of the simulation is to prove, explain and confirm the existence of such points, and also determine the magnitudes of the electric strength, with a possible divergence from the real values, due to problems while constructing and designing the model.

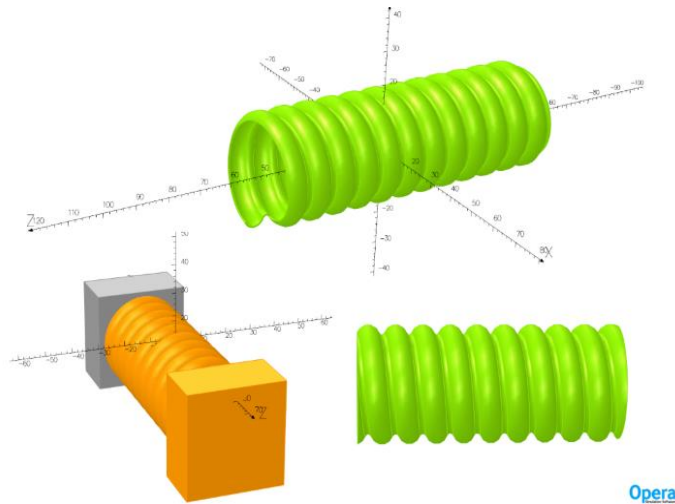
However, there was a high effort to be as accurate as possible, considering the design of the exact models, with persistency to precision to the geometry of the models, the properties of the materials, and finally in choosing the correct solving method of the simulation.

Another reason of why electric field simulations are important is that they are a way to confirm and validate the tests and measurements in lab, and then simulate new models in order to check the scalability of the model / optimized design, for future improvements and further studies.



Εικόνα 81: Designing the outer conductor of the Heliflex cable

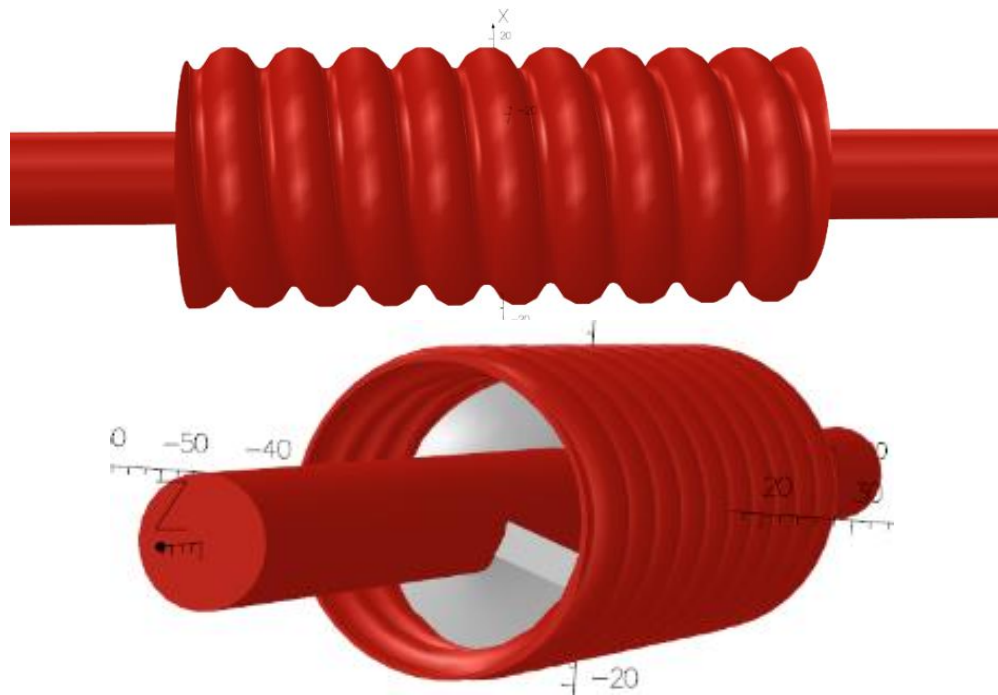
7.2. Κατασκευάζοντας τη Γεωμετρία του Μοντέλου (Building the Geometry of the Model)



Εικόνα 82: Using cutting blocks to cut the edges of the outer conductor in order to be closer to the reality (sharp edges)

The difficulties encountered in the process of building the models differ from one cable to the other. We had to simulate the exact geometry of the cables, in order to have accurate results. It was a highly demanding procedure to measure the exact dimensions of each part and try to replicate them as accurately as possible. Especially in the case of the Heliflex, there were no cable dimensions in the technical data sheet, so we had to do measurements and complicated calculations.

The geometry of both the Heliflex and the SF₆ cables is quite complex, especially due to the fact that the outer conductor is corrugated in both the Heliflex and the SF₆ cables. Firstly, there was the need of very precise measurements of the cable dimensions, thicknesses of the materials and pitch, in accordance to the specifications in the data sheets (where mentioned), in order to get the exact structures.



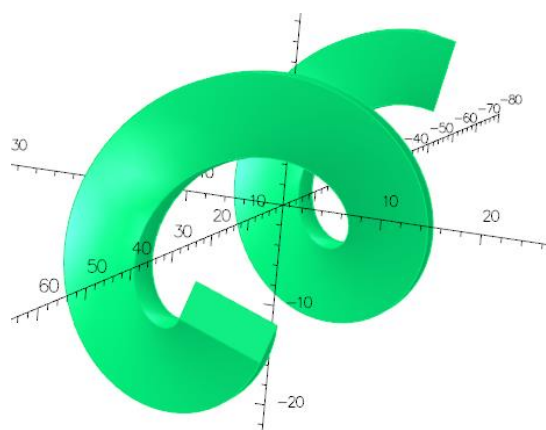
Εικόνα 83: The complete RFS Heliflex coaxial cable model

In the case of the SF₆ cable, the corrugation could be described as parallel big and small toroidals cut almost in half and joined together. The outcome seemed like a tube of rings in parallel, something that proves useful for bending the cables, but not for the voltage holding.

On the other hand, the corrugation of the Heliflex was different in the sense that it was in the form of a spiral, following the helical spacer that was inside, and thus excluding any symmetry. For this, a different approach was made in modelling it: two long cylinders were cut and formed using a mathematical function, in order to bend into a spiral with the correct pitch, and finally form the model, which was close to the real one with great accuracy. Later, the problems of the volume and the surface meshing (which

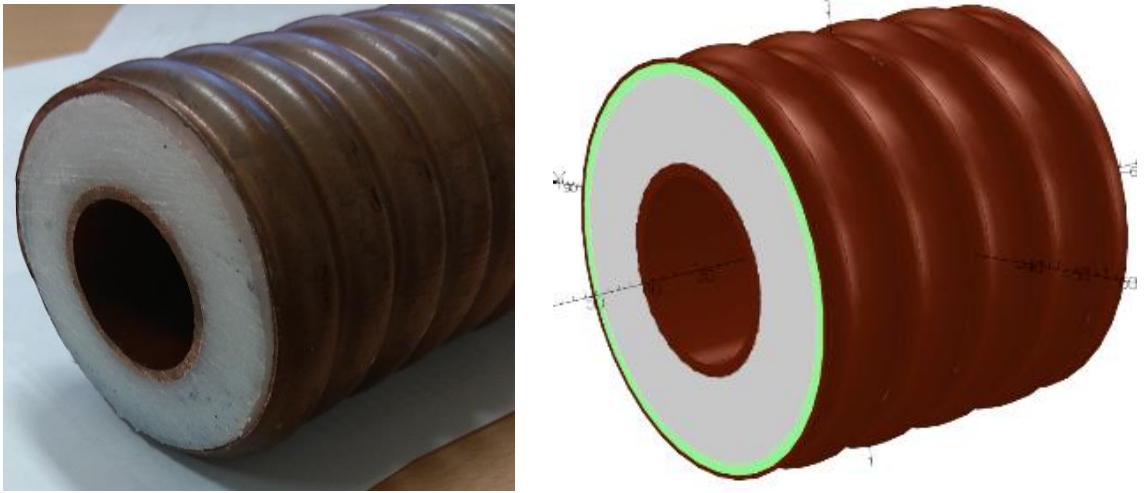


Εικόνα 84: The actual spirally corrugated OC and the helical spacer



Εικόνα 85: Producing the spiral shape of the PE helical spacer

was very irregular) had to be dealt, and afterwards the appliance of the material properties and boundary conditions was made.



Εικόνα 86: The SF₆ coaxial cable and its simulation model

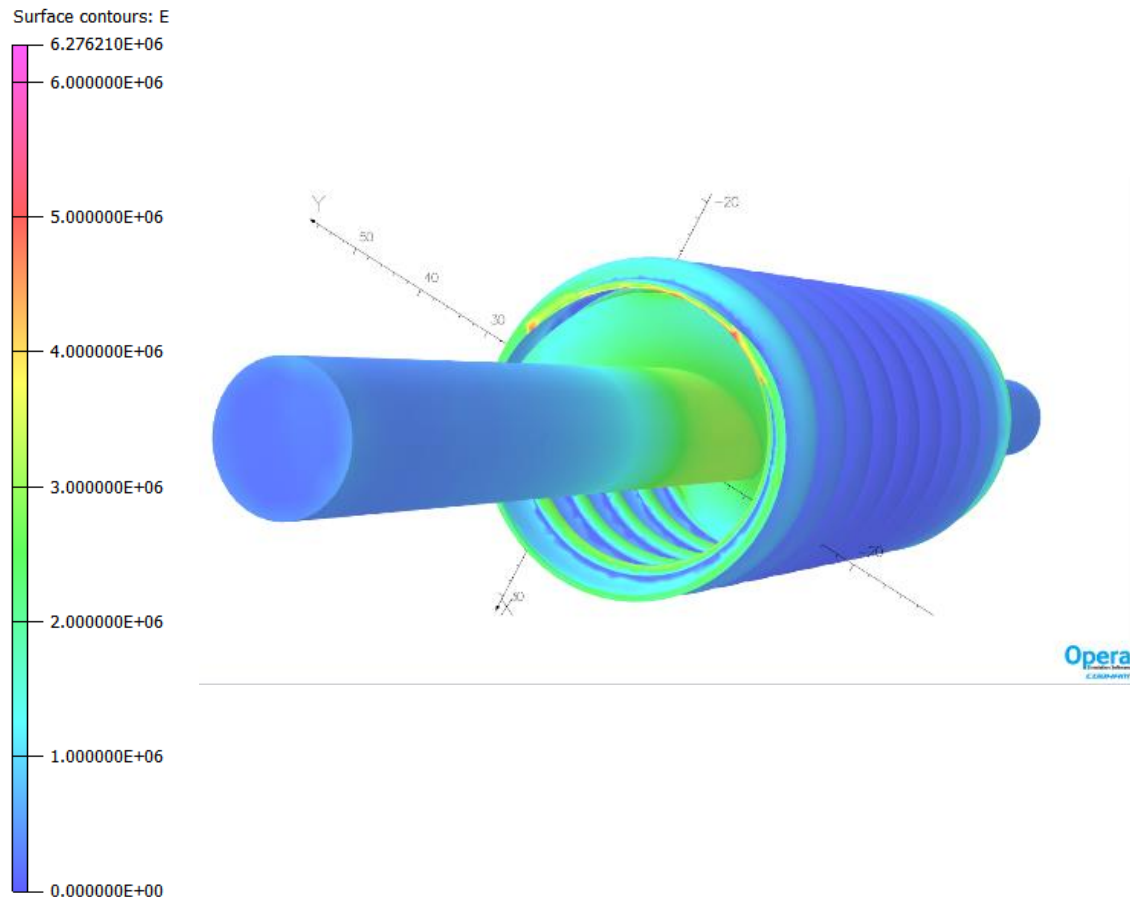
7.3. Εκτέλεση Προσομοιώσεων (Conducting Electric Field Simulations)

The main issue in reassuring that the simulations are correct in terms of being close to the reality, was the size of the mesh. In other words, the finer the mesh, the more accurate results and more precise values we get from the simulations, with the price of longer time to analyse them.

The small scale Heliflex (20cm) was simulated at 16 kV (17.89 kV was the lowest breakdown voltage that was measured during the tests in air dielectric). In addition, the SF₆ cable was simulated at the operational voltage of 80 kV. For the all the simulations, voltage independent characteristics were assumed for the permittivity.

7.3.1. Προσομοίωση του Πρωτότυπου Heliflex Καλωδίου που Έχει Αέρα ως Διηλεκτρικό στα 16 kV (Simulation of the Standard Heliflex Cable)

- Simulation #1

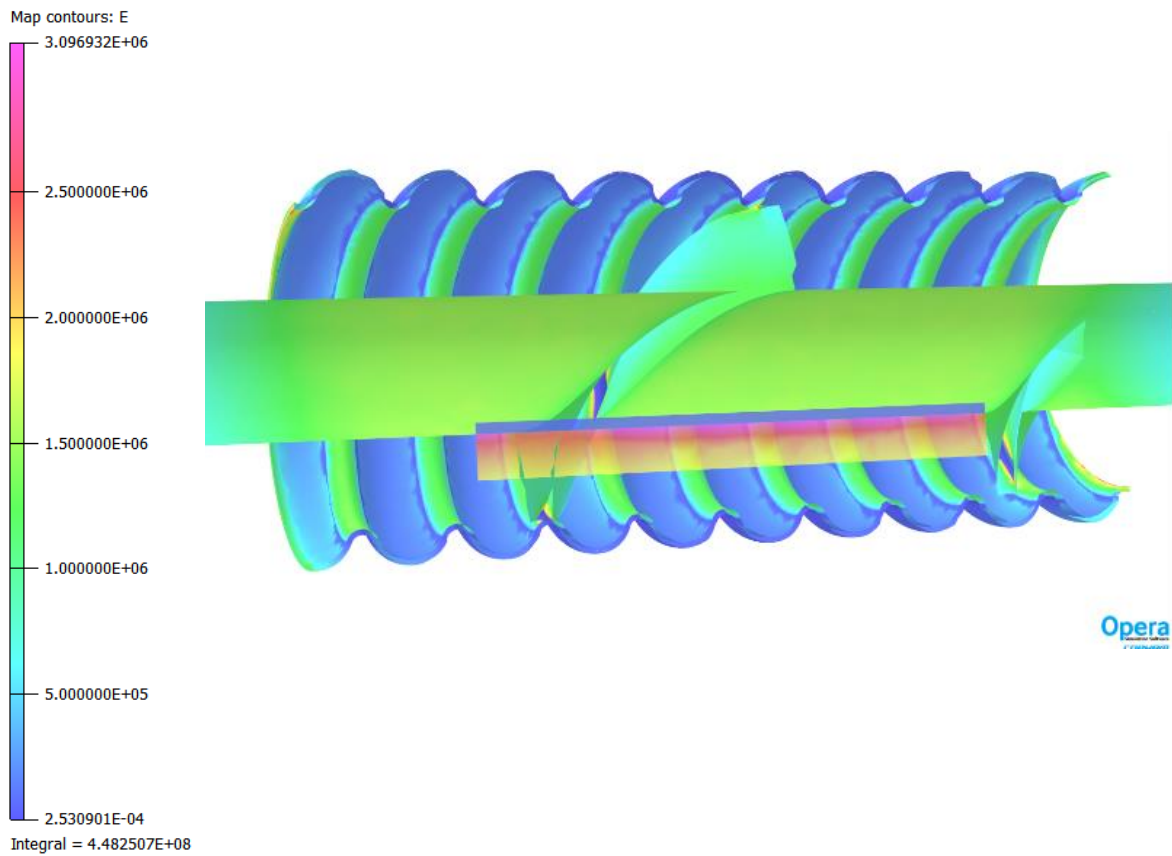


The highest value of the electric field is observed on the sharp edges of the outer conductor, because we did not use any cable terminations.

The maximum value of the electric field strength E_{\max} is:

$$E_{\max} = 6.276 \text{ MV/m}$$

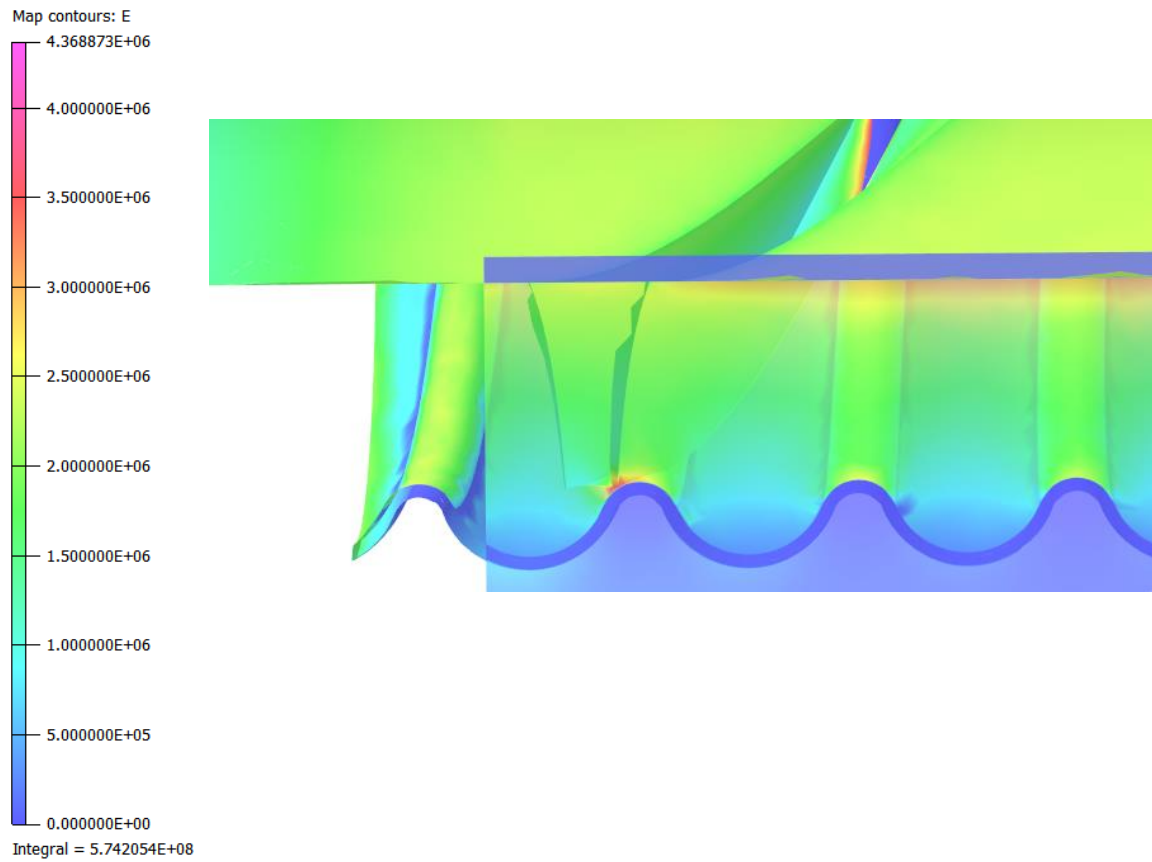
- Simulation #2



By using a patch we see that the highest value of electric field is now close to the inner conductor, which is on HV (16 kV):

$$E_{\max} = 3.0969 \text{ MV/m}$$

- Simulation #3

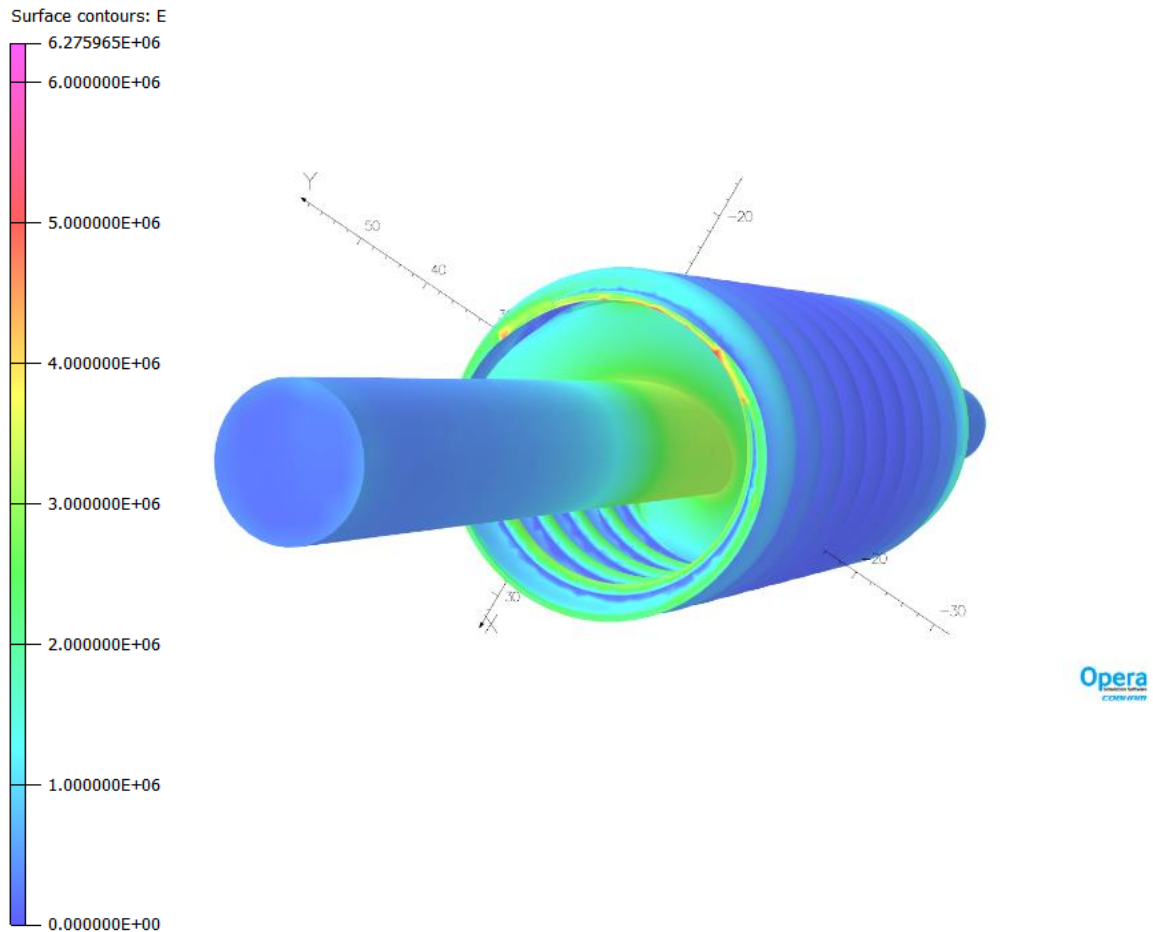


Triple point: The point where the PE spacer touches the corrugated outer conductor. The highest E-field value inside the cable:

$$\mathbf{E}_{\max} = 4.3689 \text{ MV/m}$$

7.3.2. Προσομοίωση του τροποποιημένου Heliflex με Έλαιο ως Διηλεκτρικό στα 16 kV (Simulation of Heliflex in Oil at 16 kV)

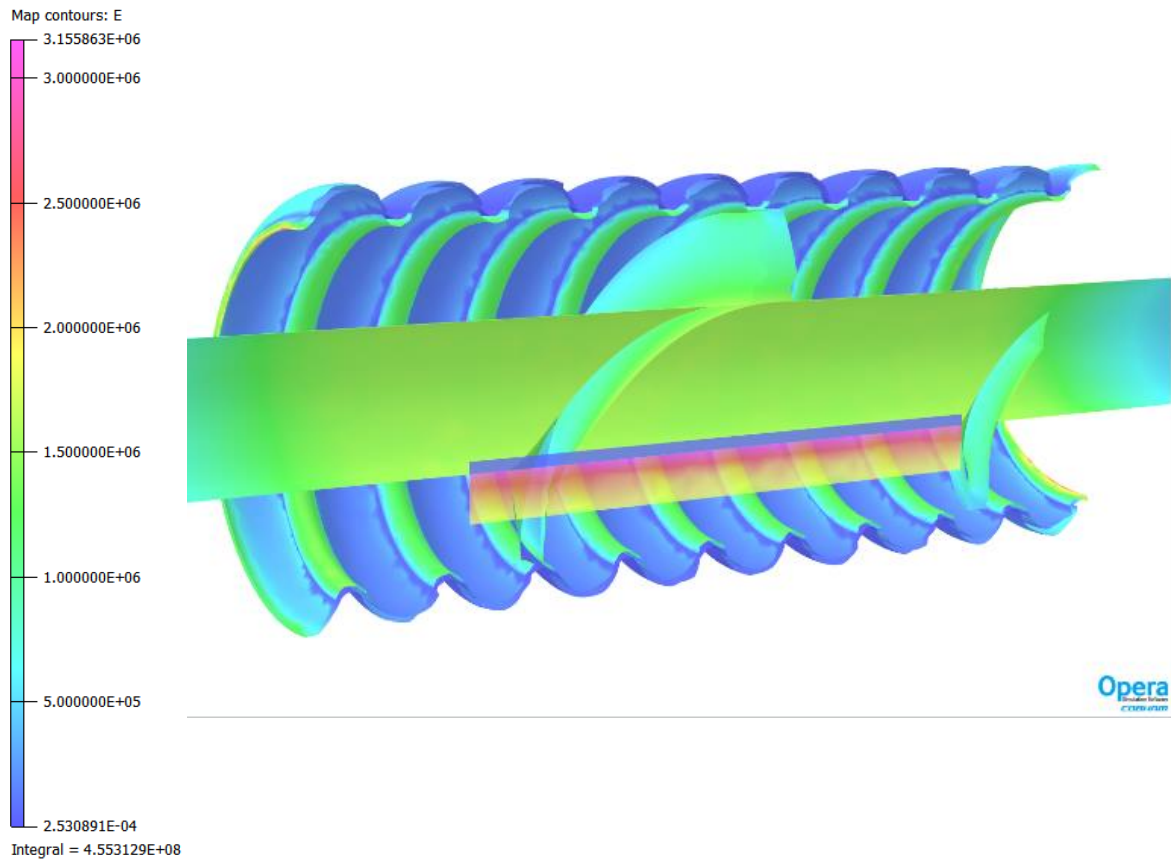
- Simulation #1



Again, the highest value of electric field is observed on the sharp edges of the outer conductor. It is almost the same value.

$$E_{\max} = 6.27596 \text{ MV/m}$$

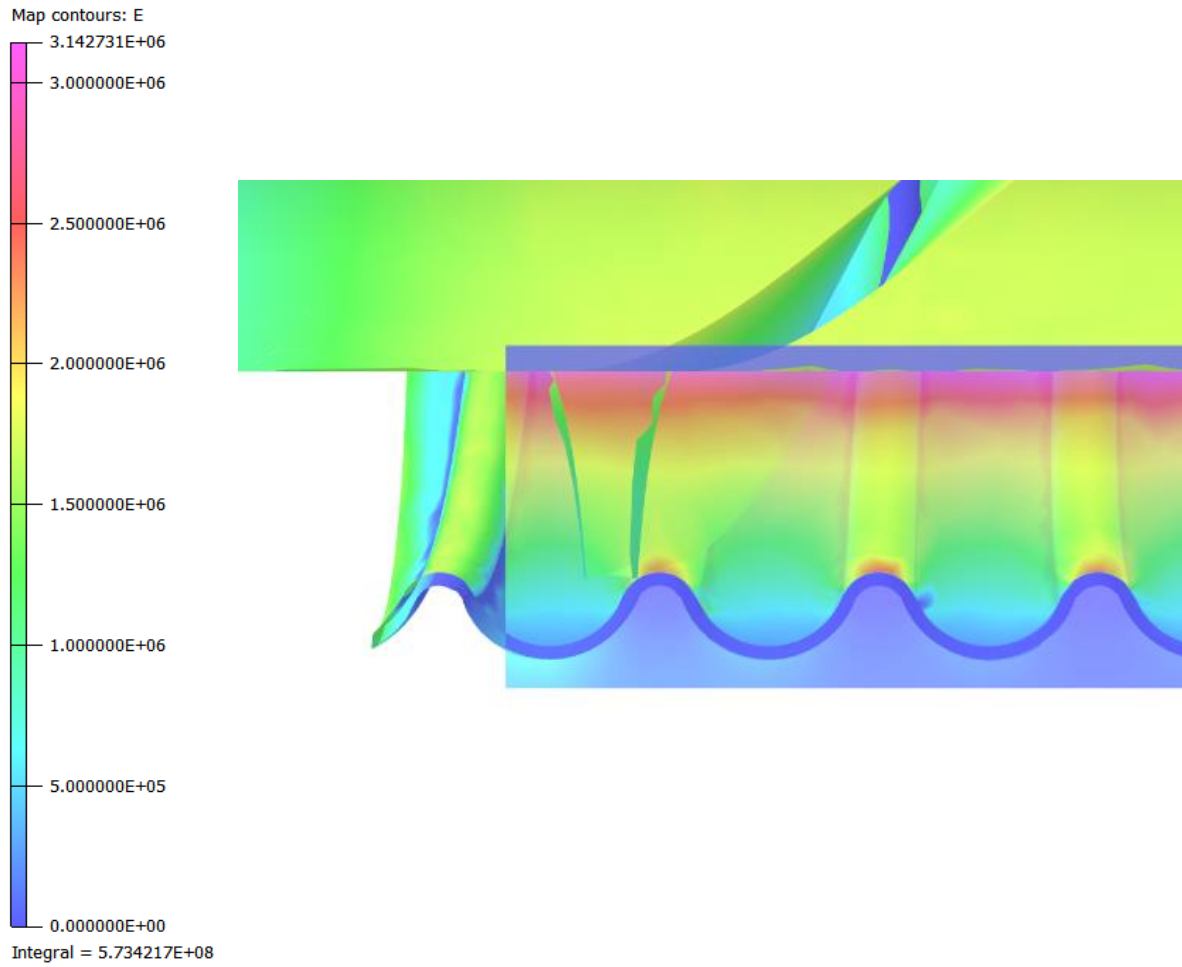
- Simulation #2



Again, using the same patch. The highest value of E-field, is close to the inner conductor.

$$E_{\max} = 3.1558 \text{ MV/m}$$

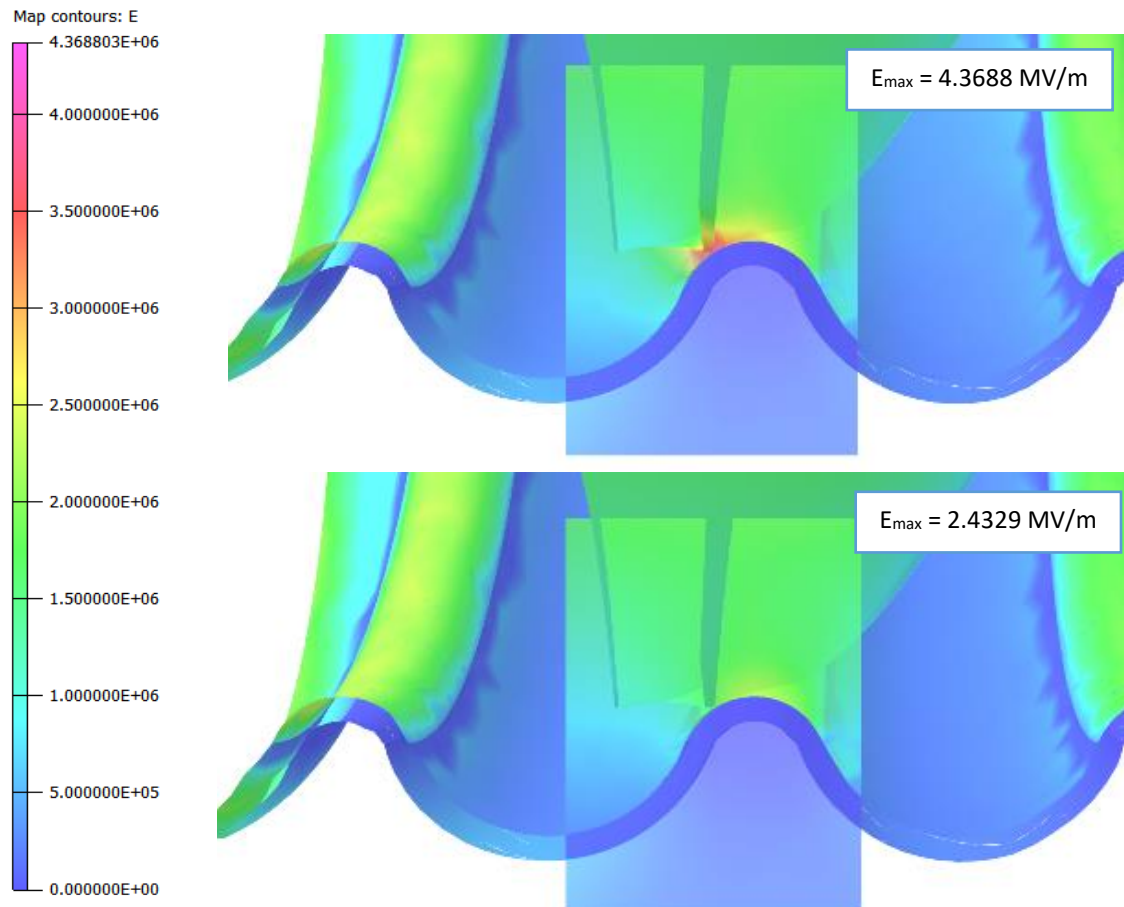
- Simulation #3



No high field close to the triple point, due to the presence of the oil. The highest E-field is still on the inner conductor.

$$E_{\max} = 3.1427 \text{ MV/m}$$

- Comparison of the same triple point in air (up) and in oil (down)



Εικόνα 87: The same triple point in air (up) and oil (down)

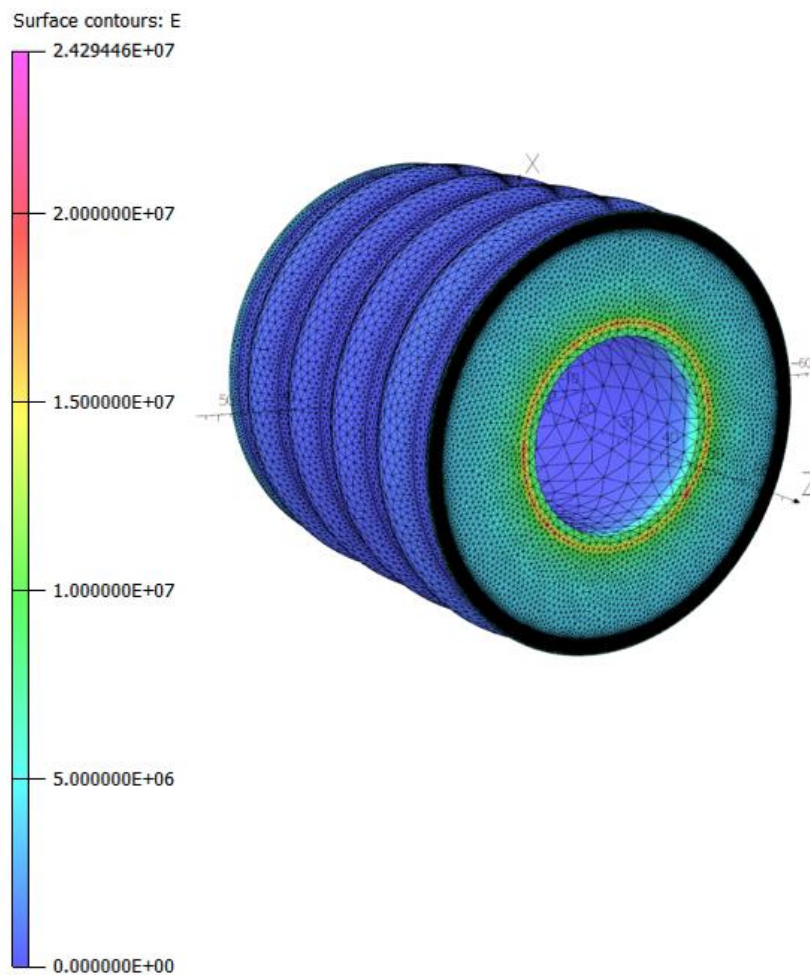
As it clearly shows from the previous comparison, using the same chromatic scale, one can see the impact of the oil on the triple point. Therefore, surrounding it there is a much less E-field, 2.4329 MV/m, compared to the same point in air 4.3688 MV/m.

Which means that we have a significant decrease of the E-field, near this area of the triple point, equal with **44.31%**.

7.3.3. Προσομοίωση του καλωδίου SF₆ στα 80 kV (Simulation of the SF₆ Cable at 80 kV)

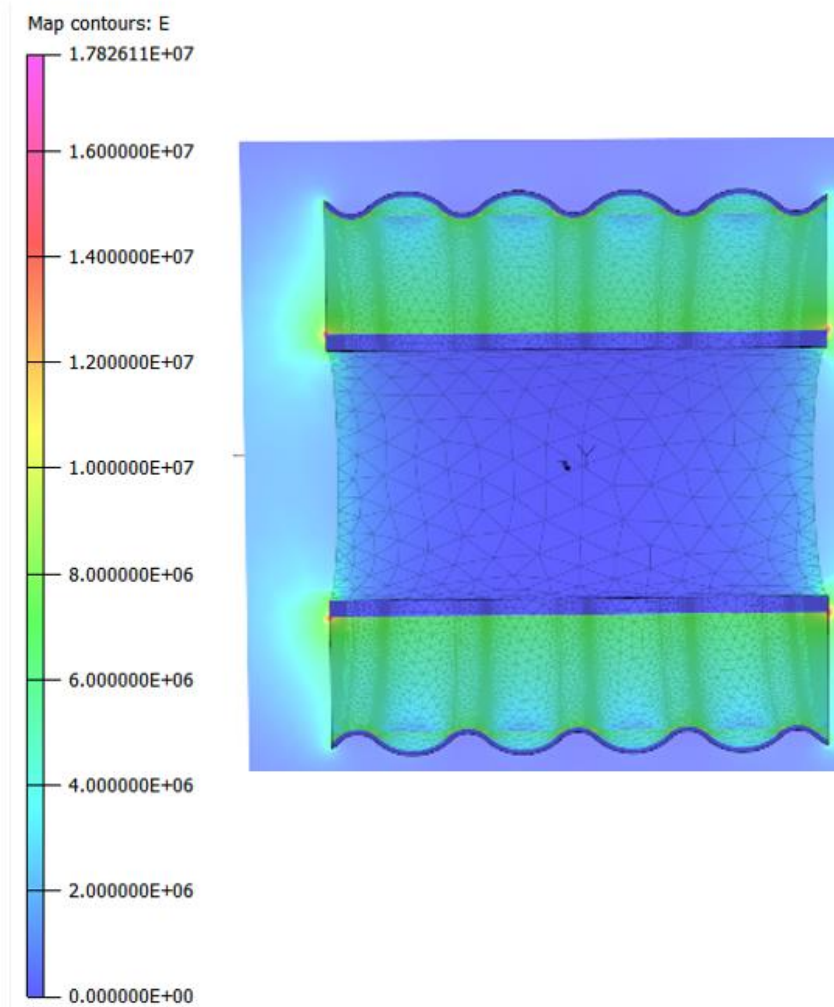
The next simulations were about the SF₆ coaxial cable at 80 kV. As before, we initially expect to detect the highest E-field values on either of the two ends of the cable, because we did not use terminations, or on the inner conductor, which is on HV.

- Simulation #1



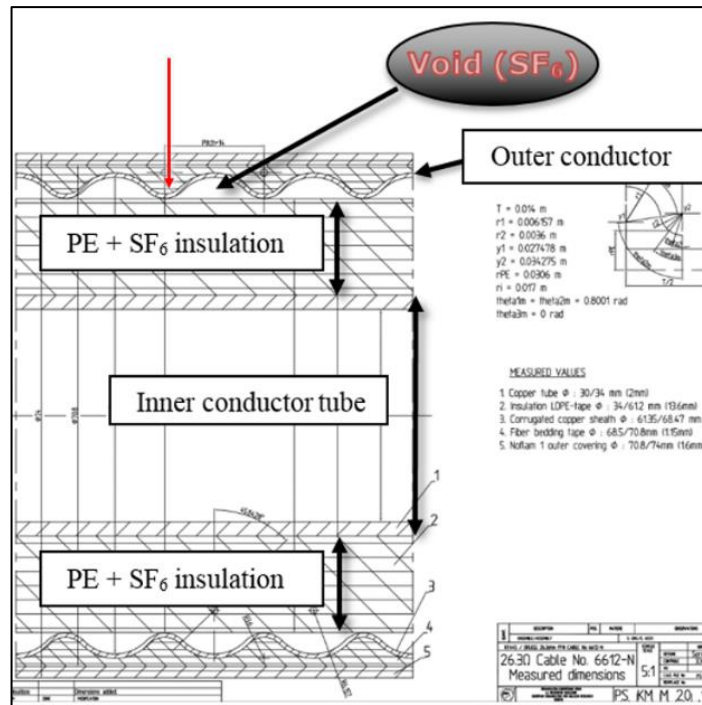
$$E_{\max} = 24.2945 \text{ MV/m}$$

- Simulation #2



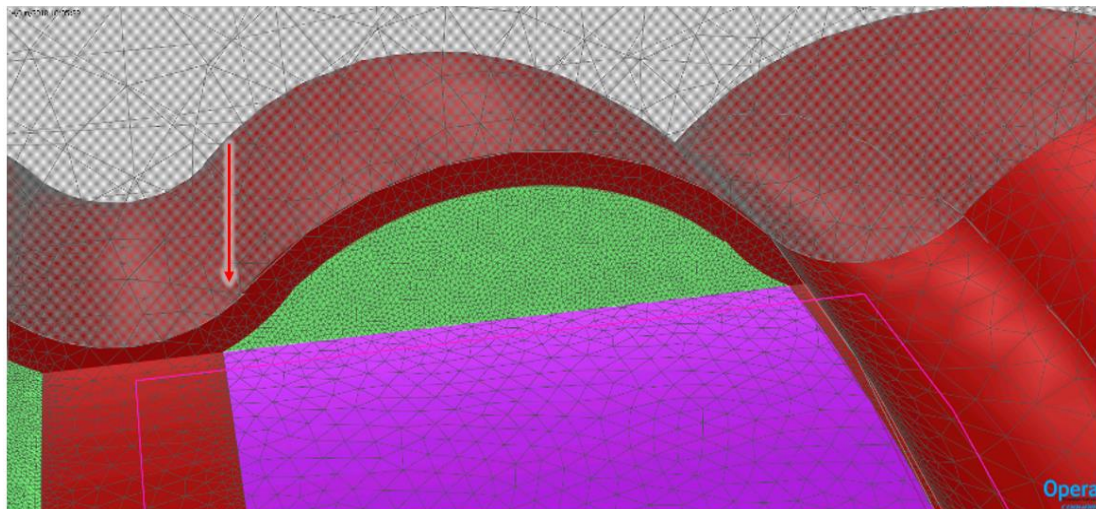
$$E_{\max} = 17.8261 \text{ MV/m}$$

Of course, the E-field will be high at the edges of the cable, but this is not of our concern. What we care for is inside the cable, since it will never be used without cable terminations. However, inside the SF₆ cable, as we have already seen, there are voids filled with SF₆ gas.

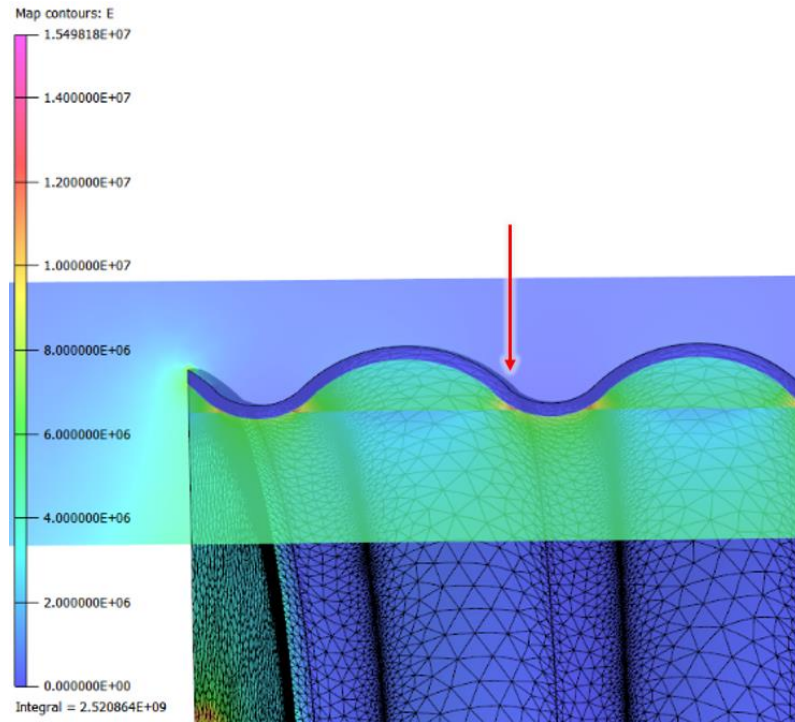


We tried to simulate the exact same geometry by using a fine mesh, in order to be sure that the results are correct. And we were able to confirm the accuracy by exploiting the fact that the program can integrate the voltage over a very small length, giving us quite accurate values of the Electric field, close to the triple point.

As suspected, the triple point that the red arrow shows in the figures, is definitely a candidate for extra high E-field values. The simulation below confirms our suspicions.

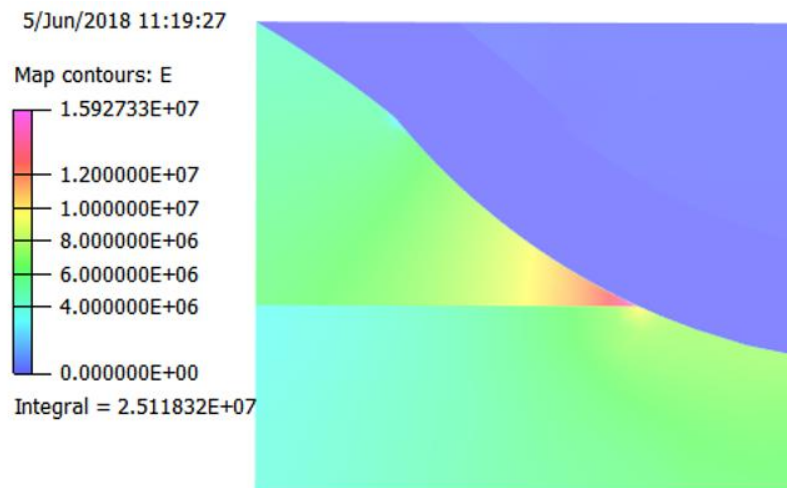


Εικόνα 88: Triple point inside the SF₆ gas cable



A closer look to the particular spot reveals the magnitude of the electric field, close to the triple point.

$$E_{\max} = 15.927 \text{ MV/m}$$



7.4. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων (Simulation Results)

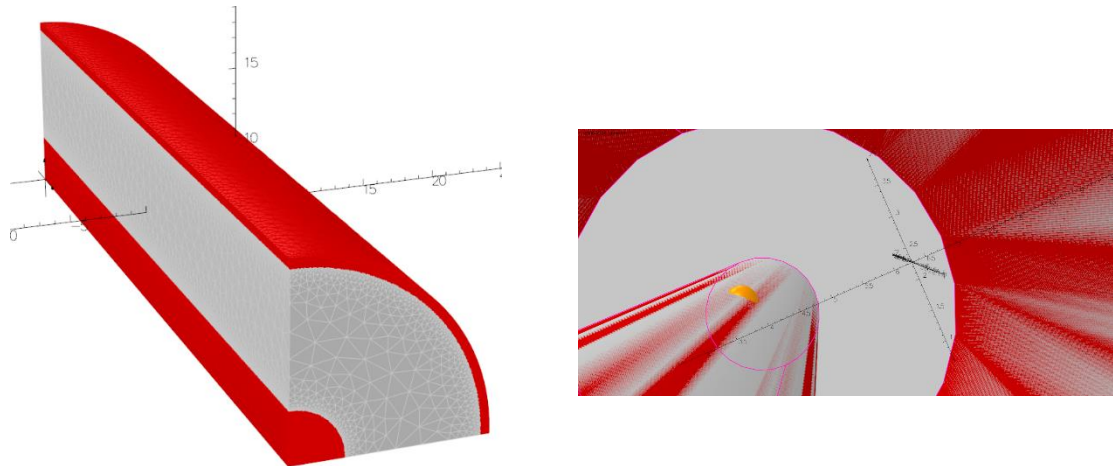
- The corrugation (although needed for such bulky structures) is useful for the flexibility of the cables, but not for the voltage holding.
- Because of the corrugated outer conductor, the PE does not fit smoothly to the copper in both cables.
- It creates triple points and areas with excessive high fields.
- Thus, is responsible for weak points of the cables, which subsequently show PDs and lower BDV.

Opera FEA Simulation Software proved to be a very useful and powerful tool which helped to confirm the predictions we had made during the tests in lab, concerning the shape and strength of the electric field, and how this is distributed around the inner and the outer conductor, on the surfaces of them and the spacer but mostly close to the areas surrounding the so-called ‘triple points’

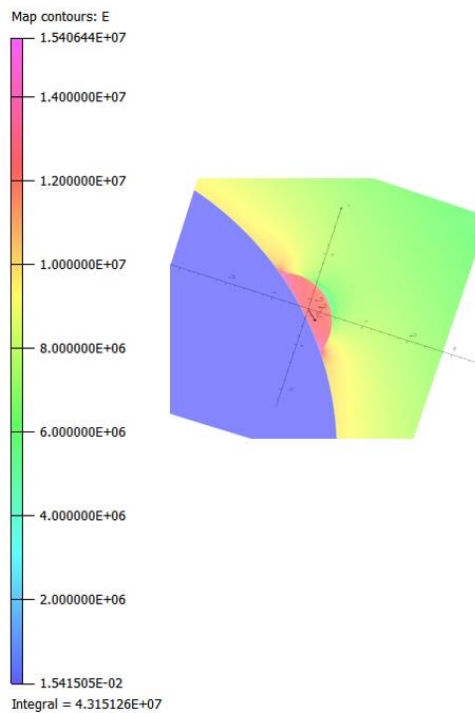
7.5. Άλλες Προσομοιώσεις (Other Simulations): CLP50

The more simple coaxial geometry of this cable, allowed us to simulate and analyze only a quarter of the structure, due to cylindrical symmetry.

It was simulated at 40, 60, and 96 kV. Also, some variations in the structure like small voids of the cable, in the form of an air bubble, were added, to check the behaviour of a real cable with imperfections. The air bubble was placed at the inner conductor and in the middle of the PE, to show the difference in E-field caused by the bubble.



Εικόνα 89: Simulation of the CLP50. On the left is shown from the inside of the cable, a small air bubble (in yellow)

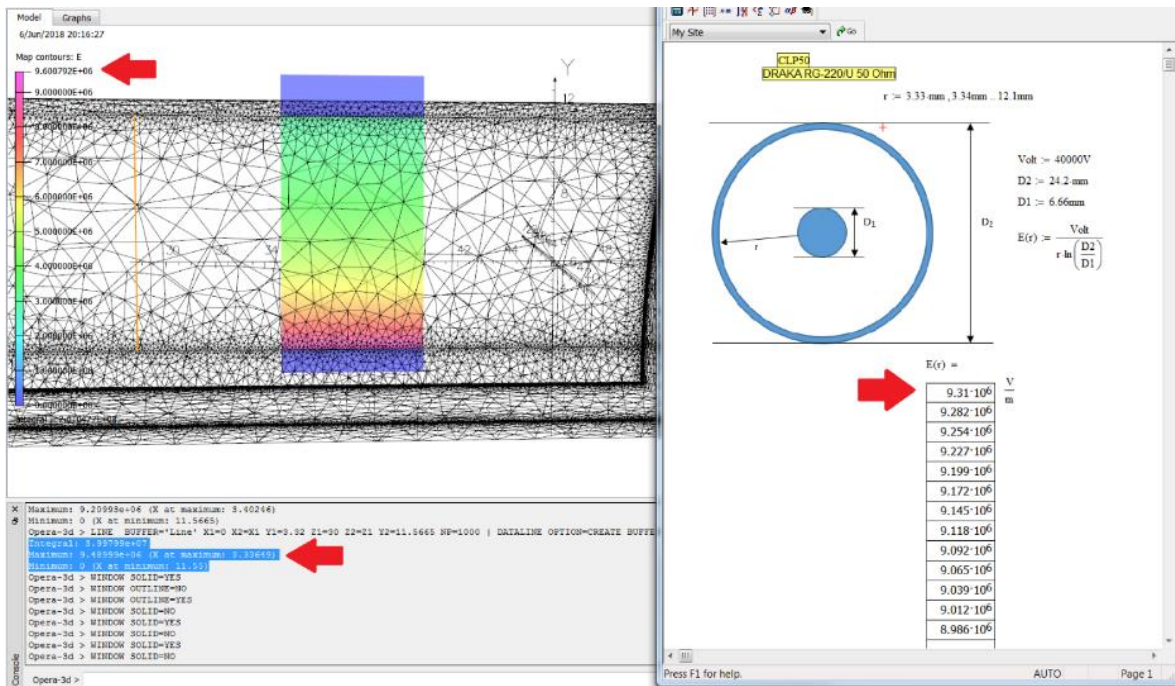


The simulation results inside and near the area of the bubble (for 40 kV) were:

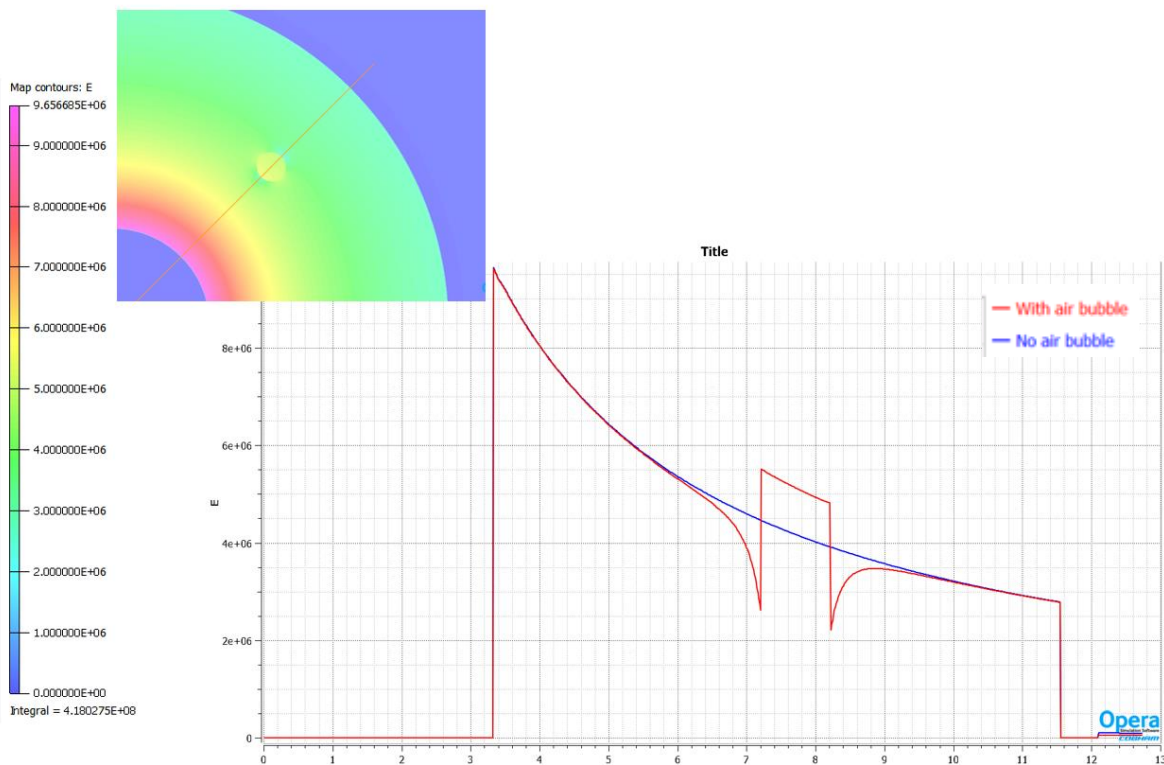
$$E_{\max} = 15.4 \text{ MV/m}$$

The standard cable without imperfections, was also simulated at 40 kV. For confirming the simulation result, we performed as well analytical calculations.

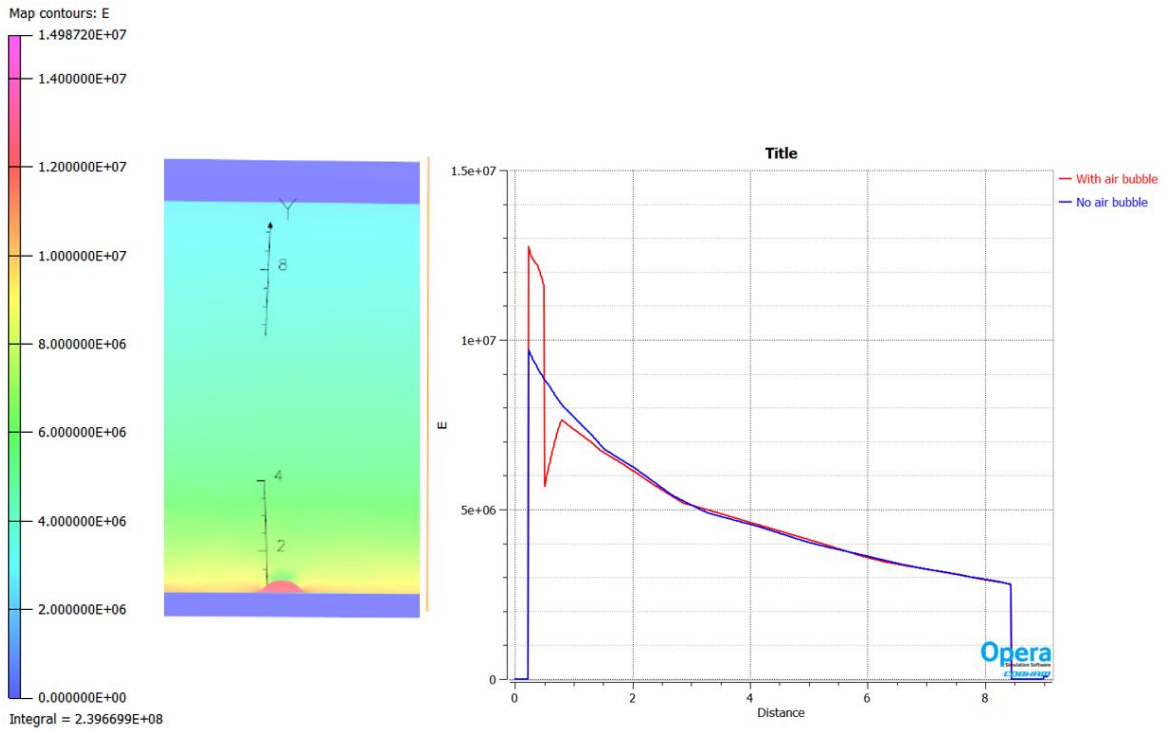
- at 40 kV, **9.6 MV/m**



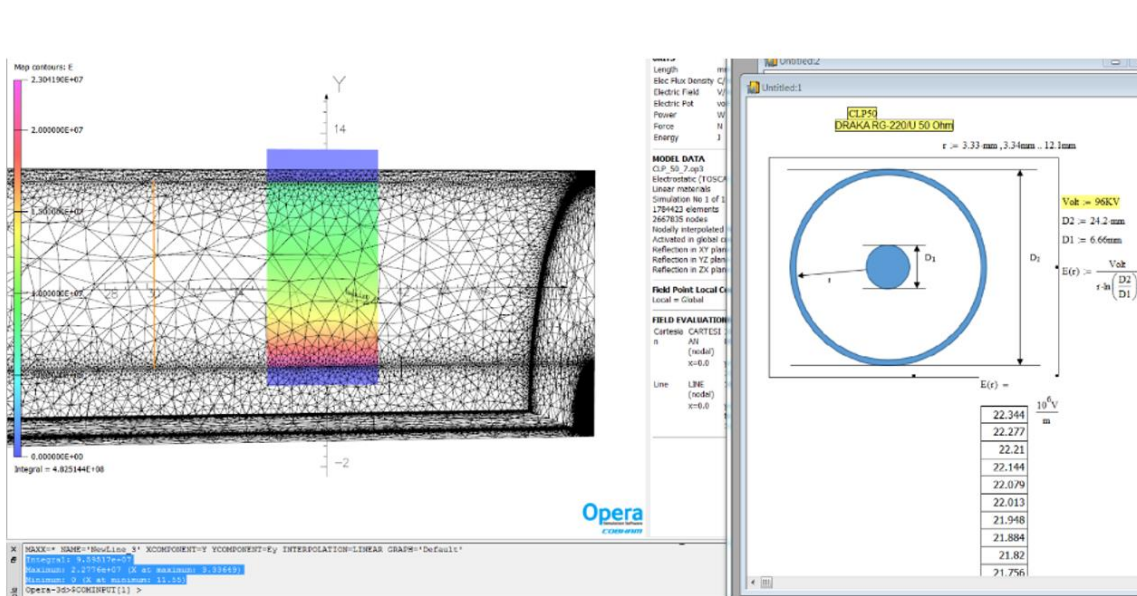
- With an air bubble in the middle: **9.656 MV/m**



- With an air bubble right in the middle of the surface of the inner conductor: **14.98 MV/m**



- At 96 kV, $E_{max} = 23.04 \text{ MV/m}$



7.6. Δυνατότητες Επέκτασης – Η Επόμενη Μέρα (Scalability – Future Developments)

The question arising from the whole project was whether there is the possibility to scale up the oil – filled Heliflex to a full-scale prototype that could withstand higher voltages and show fewer or no PDs, according to our needs. The idea was very simple: The small scale oil-filled did not BD at 20 kV, nor did it have PDs.

The maximum E-field at this voltage was simulated by Opera and was:

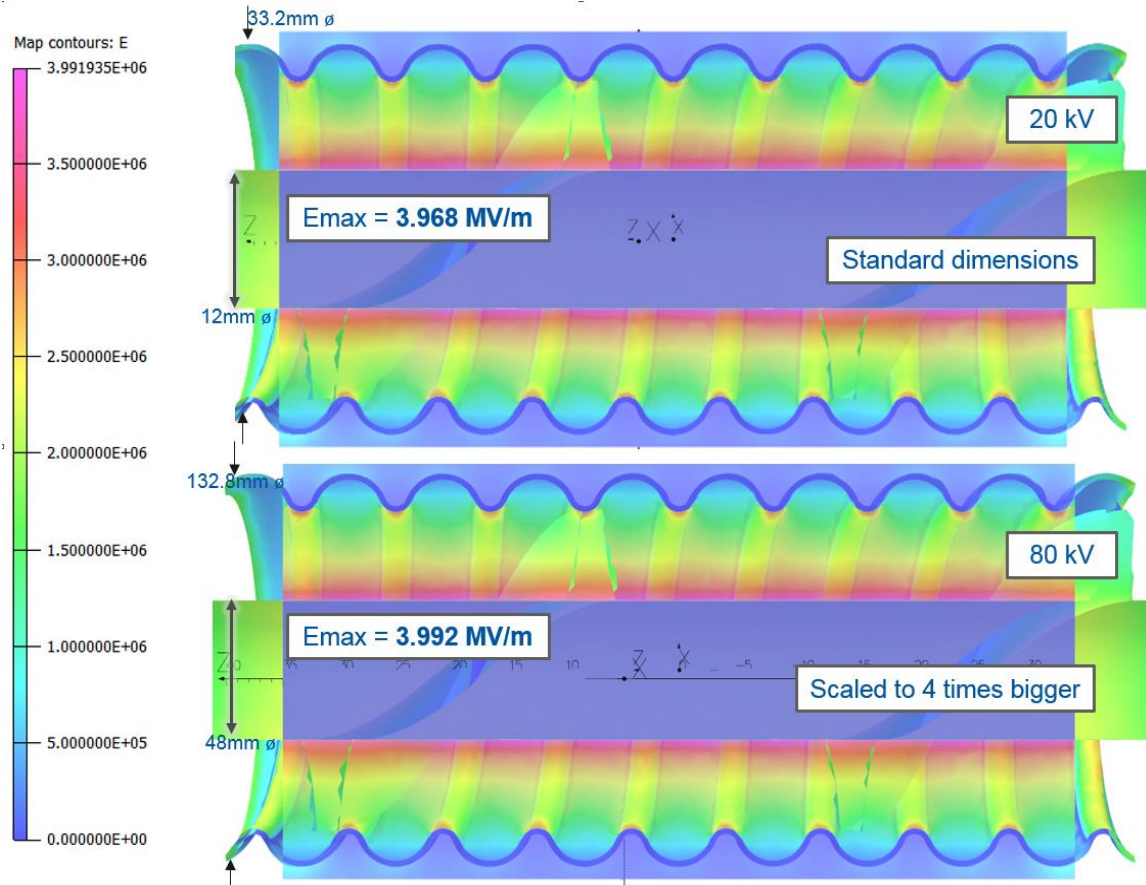
- 8.3637 MV/m (at cable ends)
- 3.96803 MV/m (inside, inner conductor)

Since we wanted to go to 80 kV, we decided to scale our model, to four times bigger the dimensions of it, and then run the simulation for 80 kV.

The maximum E-field now was:

- 9.699 MV/m (at cable ends)
- 3.992 MV/m (inside, inner conductor)

Which means that the maximum electric field inside the cable stayed almost the same, and that it could potentially work, in case there is such a cable available in the market.



Εικόνα 90: Scalability for future improvements

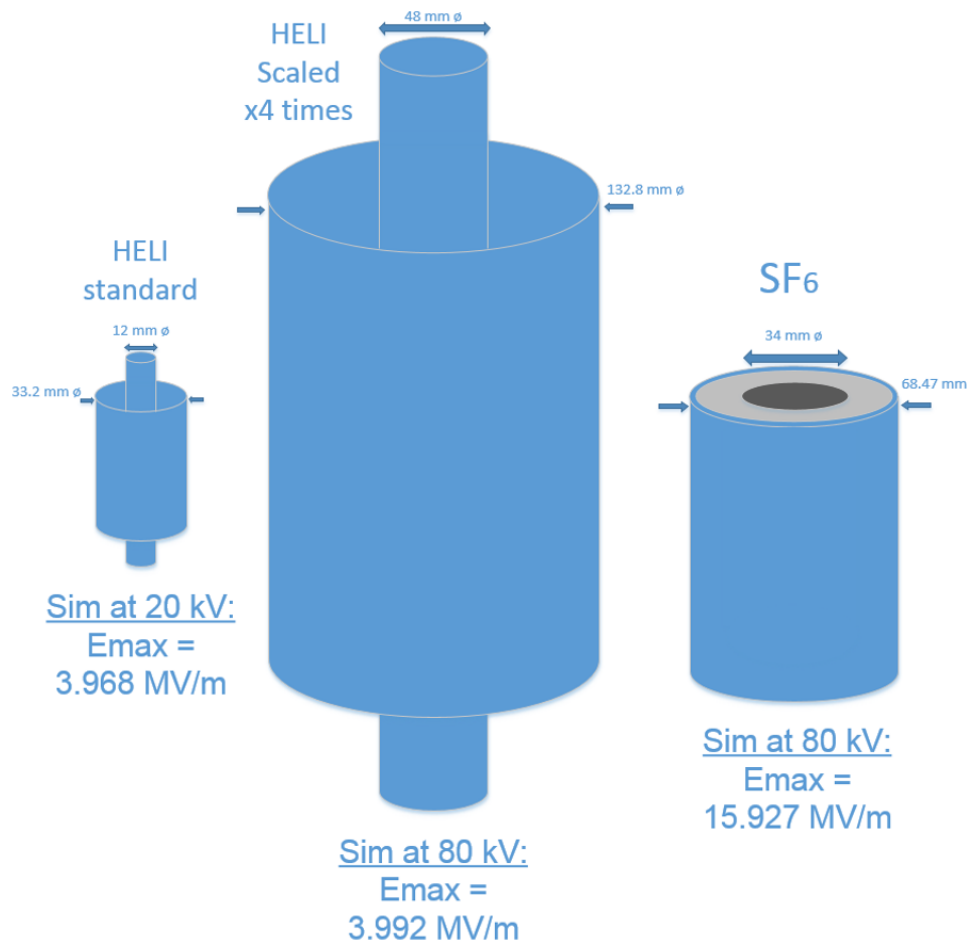
Here we can observe that, as expected, the increase of the scale by four times did not significantly change the value of the maximum electric field:

Standard dimensions Heliflex cable with oil dielectric:

$$E_{\max} = 3.968 \text{ MV/m}$$

Scaled to 4 times bigger Heliflex cable with oil dielectric:

$$E_{\max} = 3.992 \text{ MV/m}$$



Εικόνα 91: Comparison of the different models

Apparently, there is, such an off-the-shelf cable that meets these dimensions shown in Fig. 91, above. A suggestion for future investigation would be the 5-1/2” HCA550-50J Heliflex air-dielectric, 50 Ω , 1.5 dB/km at 50 MHz, with the undermentioned specifications:

Inner Conductor	mm (in)	58 (2.28) Corrugated Copper Tube
Dielectric	mm (in)	127 (5) Helical Polyethylene Spacer
Outer Conductor	mm (in)	140.5 (5.53) Corrugated Copper

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ (CONCLUSIONS)

As a summary, we could include some specific main points:

- It has been shown that an OTS cable can be easily modified to achieve higher breakdown voltages for use in high voltage applications (ratio ~3:1).
- The modified cable shows significantly higher attenuation compared to the SF₆ gas filled cable.
- Formation of gases inside the oil-filled cable was observed after PD inception voltage was reached, subsequently leading to a decrease of the PD inception voltage. The same was observed during breakdowns, which led to a constantly lower BDV.
- Each time the gas bubbles were removed, the inception and the BDV went back to the initial level.

Some thoughts on further improvements and the difficulties that may arise:

- ✓ Attenuation: It will need further studies to optimize this important parameter for a full-scale prototype. (Bigger inner diameter = less attenuation)
- ✓ Complexity: A constant circulation of the oil in the cable could reduce or avoid the observed degradation effects, provided that care is taken to avoid creation of air bubbles by the circulation.
- ✓ Filling a long cable with oil might be only achieved by vacuum pumping before filling with oil, in order to avoid trapped air.
- ✓ Impedance: The possibility to change the dielectric constant is considered a beneficial feature to perfectly match the cable to an existing system impedance.
- ✓ Furthermore, a mechanical design could serve the complete series of needs for different impedances. For this purpose,

different oil types and nanomaterials would need to be studied in detail.

- ✓ A major drawback will be the needed hydraulic system featuring a precise control and stabilization for temperature and dielectric constant.

9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (ANNEX)

MATHCAD: Code developed for PD calculations

Function to detect, measure, count, and integrate over the waveform of the current in order to calculate the magnitude of partial discharges

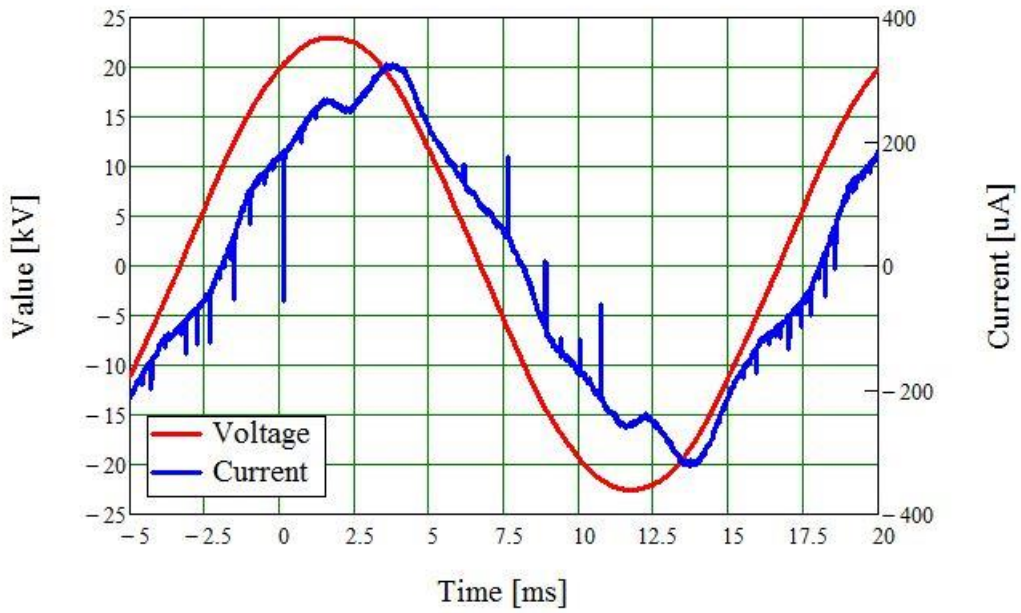
Set input data

Input := "45.61-p-p-voltage.Wfm.csv" Import of waveforms in the form of data (arrays), collected from the oscilloscope, in a .csv file.

Read input data

$t := \text{READFILE} \left[\text{Input}, "delimited", 1, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \cdot s$	<p>Time (s)</p>
$I := \frac{\text{READFILE} \left[\text{Input}, "delimited", 1, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right]}{6} \cdot A$	<p>Current (A), 1st probe channel</p> <p>Number of loops of the cable of the CT: 6</p>
$U := \text{READFILE} \left[\text{Input}, "delimited", 1, \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix} \right] \cdot 1000 \cdot V$	<p>Voltage (V), 2nd probe channel</p> <p>Scale of voltage division: 1000:1</p>

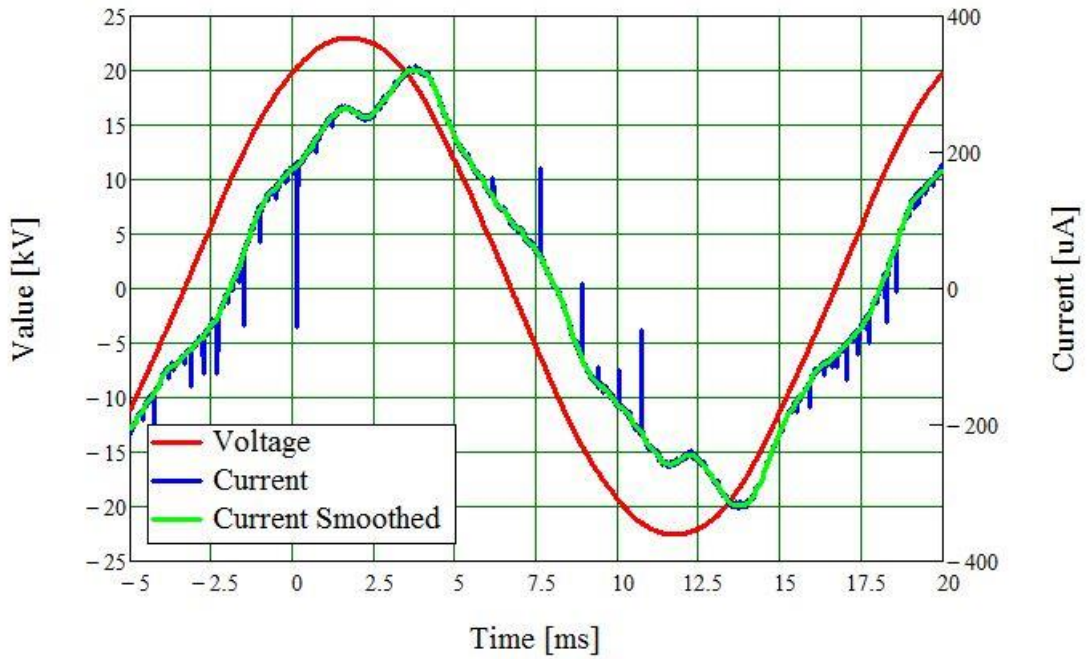
Voltage and Current waveforms



Use of smoothing function
to cutoff the peaks
in the waveform of the current

$$I_{\text{Smoothed}} := \text{medsmooth}(I, 59)$$

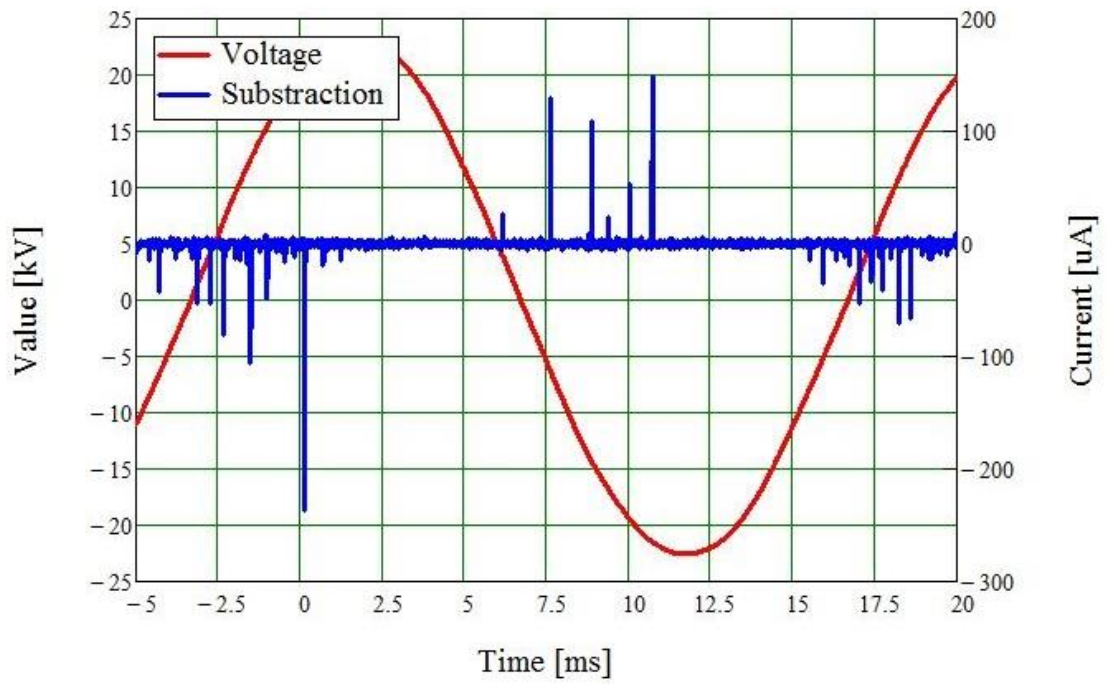
Overlay of the smoothed current (green line)
over the initial signal (blue line)



$x := 0 \dots \text{length}(I) - 1$

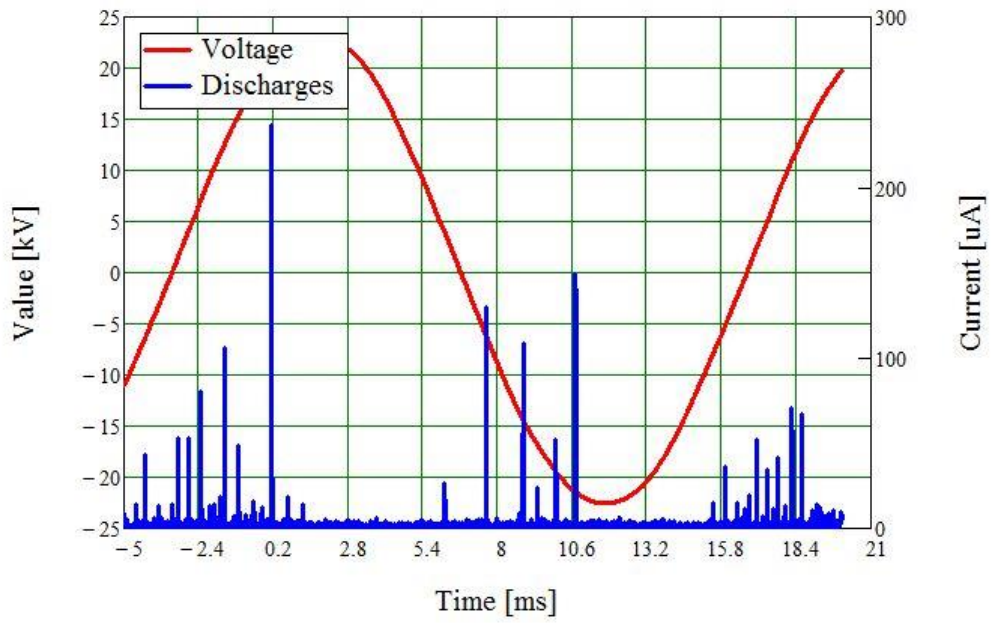
$$\text{Current}_x := I_x - I_{\text{Smoothed}_x}$$

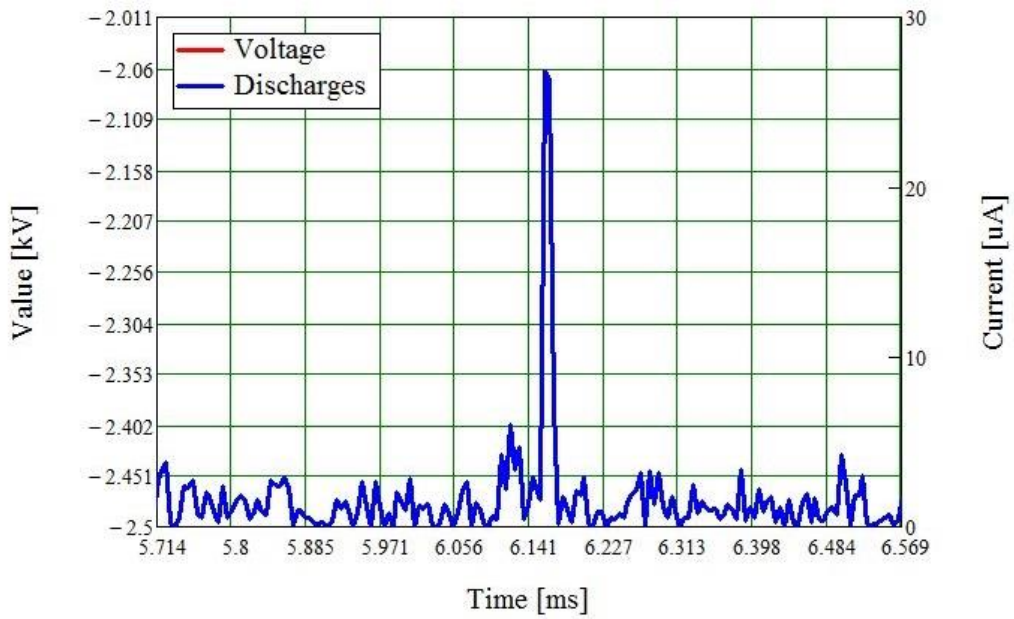
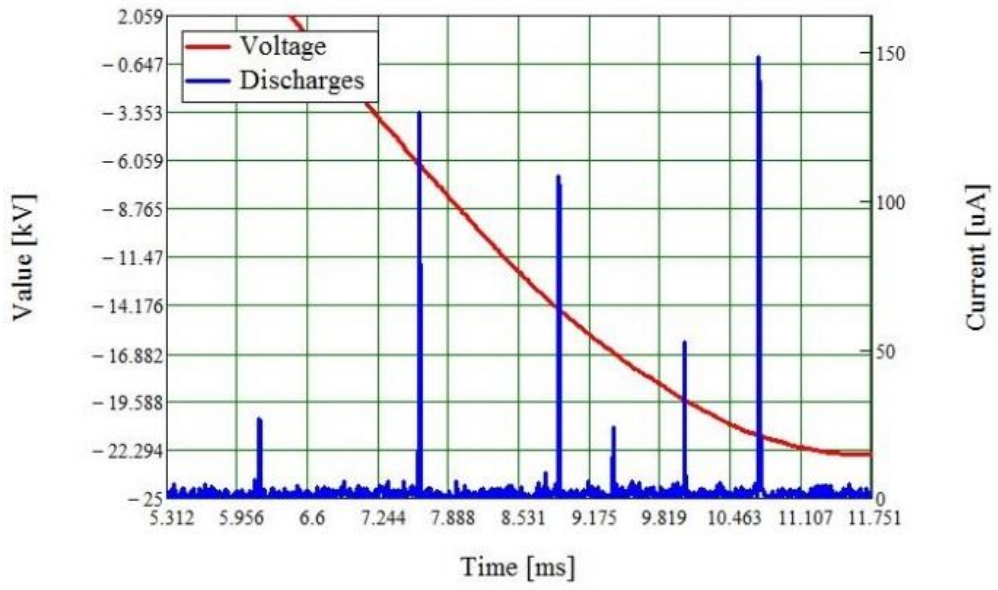
Substraction of the smoothed current from the initial signal leaves only the peaks
(=partial discharges)



$$\text{Current}_{\text{Absolute}_x} := |I_x - I_{\text{Smoothed}_x}|$$

Showing the absolute values of the discharges





$$\begin{array}{l}
 \underline{PD_{count}} := \text{for } i \in 1 \dots \text{length}(\text{CurrentAbsolute}) - 1 \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 \text{if } (\text{CurrentAbsolute}_i > PD_{\text{threshold}}) \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 \text{if } \text{CurrentAbsolute}_{i-1} < PD_{\text{threshold}} \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 PD_{\text{count}} \leftarrow PD_{\text{count}} + 1 \\
 \text{start} \leftarrow i - 1 \\
 1
 \end{array} \right. \\
 \text{otherwise} \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 \text{if } \text{CurrentAbsolute}_{i-1} > PD_{\text{threshold}} \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 \text{stop} \leftarrow i \\
 Q_{PD_{\text{count}}} \leftarrow \sum_{i = \text{start}}^{\text{stop}} \left[\frac{\text{CurrentAbsolute}_i + \text{CurrentAbsolute}_{i+1}}{2} \cdot (t_{i+1} - t_i) \right] \\
 1
 \end{array} \right. \\
 PD_{\text{count}}
 \end{array} \right.
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \end{array}$$

Number of discharges:

$PD_{\text{count}} = 90$

Total charge Q:
$$Q_{\text{total}} := \sum_{i=0}^{\text{length}(I)-2} \left[\text{CurrentAbsolute}_i \cdot (t_{i+1} - t_i) \right] = 49.896 \cdot \text{nC}$$

start := 0 stop := 0 PD_{count} := 0

PD_{threshold} = $5 \cdot 10^{-6}$ A

Q := for i ∈ 1..length(CurrentAbsolute) - 1

```

    if (CurrentAbsolutei > PDthreshold)
        if CurrentAbsolutei-1 < PDthreshold
            PDcount ← PDcount + 1
            start ← i - 1
        1
    otherwise
        if CurrentAbsolutei-1 > PDthreshold
            stop ← i
            QPDcount ←  $\sum_{i=\text{start}}^{\text{stop}} \left[ \frac{\text{CurrentAbsolute}_i + \text{CurrentAbsolute}_{i+1}}{2} \cdot (t_{i+1} - t_i) \right]$ 
        1
    Q
  
```

Total charge of the PDs:

$$Q_{\text{partialdischarges}} := \sum_{i=0}^{\text{length}(Q)-1} Q_i = 18.259 \cdot \text{nC}$$

	0	
0	118.532	
1	57.03	
2	167.071	
3	316.9	
4	63.946	
5	136.127	
6	45.805	
7	100.616	
Q = 8	47.155	pC
9	517.231	
10	49.664	
11	390.496	
12	66.648	
13	730.556	
14	124.869	
15	79.129	
16	178.586	
17	...	

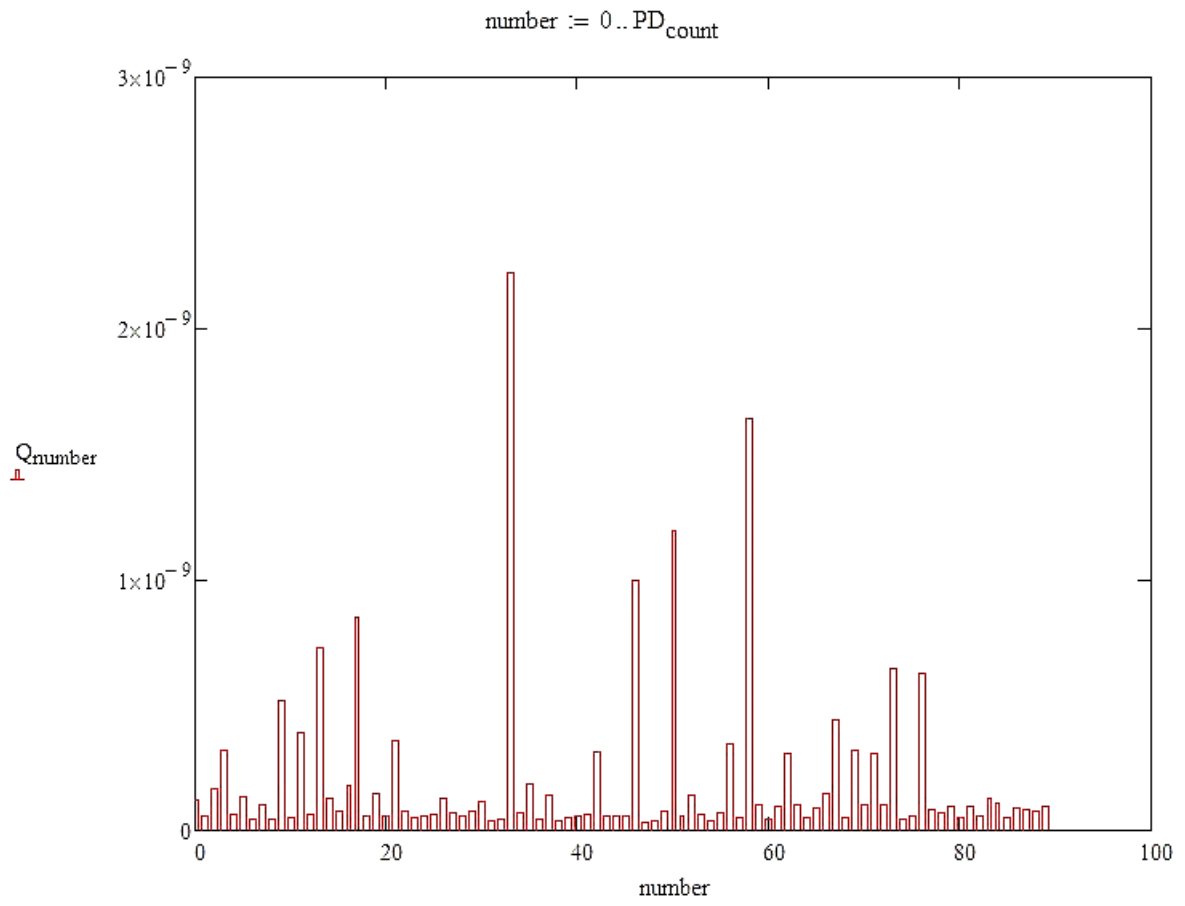
$$\underline{\underline{TOL}} := 10^{-20}$$

Highest_Discharge := max(Q)

Highest_Discharge = 2.221 nC

At_position_number := match(max(Q), Q)

At_position_number = (33)



10. ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ (TABLE OF FIGURES)

Εικόνα 1: Η υπόγεια σήραγγα του LHC και η εναέρια διάταξη [2]	12
Εικόνα 2: Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων - The Large Hadron Collider (LHC) [2]	13
Εικόνα 3: Συμβάντα συγκρούσεων τύπου «πρωτόνιο - πρωτόνιο στο κέντρο της μάζας», ενέργειας 8 TeV, καταγεγραμμένα από τον ανιχνευτή CMS το 2012 [5]	14
Εικόνα 4: Το σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN [7]	15
Εικόνα 5: Ένας από τους kicker μαγνήτες που χρησιμοποιείται για να ευθυγραμμίσει μια εισερχόμενη δέσμη στην τροχιά που κυκλοφορεί στον SPS [6].....	16
Εικόνα 6: Απλοποιημένο διάγραμμα ενός kicker συστήματος [3]	17
Εικόνα 7: Απλοποιημένο διάγραμμα του κυκλώματος σχηματισμού του παλμού [35]	17
Εικόνα 8: Ομοαξονικά καλώδια 20Ω, 40Ω [39]	18
Εικόνα 9: Ομοαξονικά καλώδια και σύνδεσμοι 20Ω [39]	18
Εικόνα 10: Ομοαξονικά καλώδια υψηλής τάσης [27]	18
Εικόνα 11: Διατομή ομοαξονικού καλωδίου	19
Εικόνα 12: Δομή ομοαξονικού καλωδίου τύπου RG-220/U στην οποία φαίνονται τα διάφορα στρώματα των υλικών [34]	19
Εικόνα 13: Ομοαξονικό καλώδιο με τα ανά μονάδα στοιχεία του	20
Εικόνα 14: Διατομή ομοαξονικού καλωδίου	21
Εικόνα 16: Χαρακτηριστικά ενός ορθογώνιου παλμού ενός kicker που χρησιμοποιείται στον LHC για εισαγωγή δέσμης [42].....	26
Εικόνα 15: Ο ορθογώνιος παλμός ενός kicker και μέρος της PFL [42].....	27
Εικόνα 17: Γραμμές σχηματισμού παλμών αποτελούμενες από καλώδιο με αέριο SF ₆ [19]	28
Εικόνα 18: Σύνδεσμος M30311h (Spinner) για το ομοαξονικό καλώδιο RFS HCA118-50J Heliflex [26]	30
Εικόνα 19: Διατομή σε CAD ενός συνδέσμου ομοαξονικού καλωδίου γεμισμένου με αέριο SF ₆ [30].....	30
Εικόνα 20: Σχέδιο συναρμολόγησης συνδέσμου καλωδίου τύπου RG 220/U [13].....	30
Εικόνα 21. LEMO HT50 σύνδεσμος, σε χρήση για συστήματα τάσεων έως 40kV [19]	31
Εικόνα 22. Εκτροπέας (Deflector)	31
Εικόνα 23. Άκρο ομοαξονικού καλωδίου 40 Ω [39].....	32
Εικόνα 24. Είδη μερικών εκκενώσεων [16]	33
Εικόνα 25. Ισοδύναμο κύκλωμα ενός καλωδίου ισχύος στο οποίο υπάρχει κενό στο διηλεκτρικό (κοιλότητα), μέσα στο οποίο δημιουργείται εκκένωση [28]	35
Εικόνα 26. Φυσαλίδα αέρα μέσα στη μόνωση του καλωδίου [40], [36]	37
Εικόνα 27. Ισοδύναμο κυκλωματικό διάγραμμα [16].....	37
Εικόνα 28. Οι διάφορες πηγές μερικών εκκενώσεων παράγουν διαφορετικά μοτίβα ME [17]	38
Εικόνα 29. Η συσκευή σύζευξης CD σε σειρά με τον πυκνωτή σύζευξης C _k [14]	39
Εικόνα 30. Κύκλωμα ελέγχου της μεθόδου του επαγωγικού μετασχηματιστή ρεύματος [15]	40
Εικόνα 31. Ο μετασχηματιστής ρεύματος [32]	40
Εικόνα 32. Παράδειγμα ME όπως αυτό φαίνεται σε στιγμιότυπο από παλμογράφο, στον οποίο αποτυπώνονται ως κορυφές «spikes» στην κυματομορφή του ρεύματος (μωβ χρώμα), το οποίο αναπαρίσταται ως το σήμα εξόδου του CT	41
Εικόνα 33: “Jura 2”, the test-cage where the first tests took place	44
Εικόνα 34: The ‘Saleve 6’ HV test cage in b.867	44
Εικόνα 37: Data sheet of the Baur PGK 110 HV test set. The load diagram shows that the maximum output current (AC) is 14mA.	45

Εικόνα 35: BAUR PGK 110 operating unit	45
Εικόνα 36: The High Voltage unit	45
Εικόνα 38: 30 kV Non-Destructive Insulation Tester	46
Εικόνα 39: 160 kV DC Power Supply	46
Εικόνα 40: Necessary calculations for determining the maximum length of the cable	46
Εικόνα 41: The CT that was used during the experiments.....	47
Εικόνα 42: Outline diagram of the CT	47
Εικόνα 43: The HV divider, with the toroidal conductor placed on top	48
Εικόνα 44: Specifications of the device	48
Εικόνα 45: Safe working distances / vicinity area	49
Εικόνα 46: Electrical safety measures.....	49
Εικόνα 47: The Tektronix oscilloscope.....	50
Εικόνα 48: Schematic diagram of the AC test circuit used for measuring partial discharges in the laboratory.....	51
Εικόνα 49: Our results (left), PRPD pattern that reveals internal PDs (right) [17].....	53
Εικόνα 50: Screenshot from Mathcad program with the final results of the PD measurements	55
Εικόνα 51: Agilent E5071C Vector Network Analyzer.....	56
Εικόνα 52: The Kabelwerke Brugg SF ₆ gas filled cable.....	57
Εικόνα 53: The RFS HCA118-50J Heliflex.....	58
Εικόνα 54: The DRAKA CLP50.....	59
Εικόνα 55: The DRAKA new CLP30	59
Εικόνα 56: (Left) Illustration of ‘triple points’ and (right) the graph of the electric field around the area of one point	63
Εικόνα 57: Cross-section of the cable	63
Εικόνα 58: Mathcad calculations and graph of the electric field inside the CLP50 cable	64
Εικόνα 59: Mathcad calculations and graph of the electric field inside the CLP30 cable	64
Εικόνα 60: Design printout of the 26.3 Ω Brugg SF ₆ cable	65
Εικόνα 61: Schematic representation of the inside of an SF ₆ gas filled coax cable (not in scale).....	66
Εικόνα 62: The above schematic, simplified.....	66
Εικόνα 63: Schematic diagram of the Heliflex cable, showing the weak (triple) points	67
Εικόνα 64: E-field for the Heliflex, close to a triple point (left), total (right).....	68
Εικόνα 65: Theoretical comparison of the attenuation over frequency.....	69
Εικόνα 66: First test of the Heliflex cable (standard-air-dielectric) in AC	71
Εικόνα 67: The set-up for recording breakdowns in DC	71
Εικόνα 68: An electric arc (breakdown) in air during DC test.....	71
Εικόνα 69: HV DC tests in oil with soldered corona rings	72
Εικόνα 70: First tests of AC HV testing in oil	73
Εικόνα 71: Partial Discharges of the oil-filled Heliflex in AC high voltage	76
Εικόνα 72: The Spinner connector tests	79
Εικόνα 73: The CLP50 cable HV tests.....	80
Εικόνα 74: Cable ends in oil	81
Εικόνα 75: Graphs of PD values over voltage, for the CLP50 coaxial cable	83
Εικόνα 76: The instrument with the measured cable	84
Εικόνα 77: Specially made connector for connecting with the VNA cable.....	84
Εικόνα 78: The setup for the impedance measurement.....	84
Εικόνα 79: Taken from the data sheet of the ‘family’ of oils, from which the oil we used belongs. [22].....	85
Εικόνα 80: The actual model to simulate (up) and the Opera simulation (down)	87

Εικόνα 81: Designing the outer conductor of the Heliflex cable	88
Εικόνα 82: Using cutting blocks to cut the edges of the outer conductor in order to be closer to the reality (sharp edges)	89
Εικόνα 83: The complete RFS Heliflex coaxial cable model	90
Εικόνα 84: The actual spirally corrugated OC and the helical spacer.....	90
Εικόνα 85: Producing the spiral shape of the PE helical spacer	90
Εικόνα 86: The SF ₆ coaxial cable and its simulation model	91
Εικόνα 87: The same triple point in air (up) and oil (down).....	98
Εικόνα 88: Triple point inside the SF ₆ gas cable	101
Εικόνα 89: Simulation of the CLP50. On the left is shown from the inside of the cable, a small air bubble (in yellow).....	104
Εικόνα 90: Scalability for future improvements	108
Εικόνα 91: Comparison of the different models	109

11. ΑΝΑΦΟΡΕΣ (REFERENCES)

- [1] CERN, "About CERN," 2012. [Online]. Available: <http://home.cern/about>.
- [2] CERN, "CERN brochure 2017," 2017. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2255762/files/CERN-Brochure-2017-002-Eng.pdf>.
- [3] Barnes, M J; Ducimetière, L; Fowler, T; Senaj, V; Sermeus, L, "Injection and extraction magnets: kicker magnets," CERN Document Server, 2011. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/1334789?ln=en>.
- [4] Mesyats, G. A., Pulsed Power, New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2005.
- [5] D. Pozar, Microwave Engineering, 4th Edition, Wiley, 2011 .
- [6] Shugg, W.T. and IEEE Dielectrics and Electrical Insulation, Handbook of electrical and electronic insulating materials, New York: IEEE Press, 1995.
- [7] Brandt, D., "Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School: Magnets," in *CERN-2010-004*, Bruges, Belgium, 16 – 25 June 2009.
- [8] D. Kontelis, A. Ferrero Colomo, I. Gonos, T. Kramer, T. Stadlbauer, "Evaluation, Optimization and Test of a Standard Air-Dielectric Coaxial Cable Filled with Oil for Possible use in HV Kicker Systems at CERN," in *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Athens, Greece, 2018.
- [9] R. Van Brunt, "Present and future environmental "problems" with SF₆ and other fluorinated gases," in *IEEE International Conference on Plasma Science*, Boston, MA, 96CH35939, p.145, 1996.
- [10] D. Woog, J. Holma, "Inductive Adders for CLIC DR Kickers and FCC Injection Kicker Systems," in *PULSE POWER for Kicker Systems (PULPOKS) Workshop 2018 CERN*, Geneva, 13.Mar.2018.
- [11] L. M. Redondo, A. Kandratsyev and M. J. Barnes, "Marx Generator Prototype for Kicker Magnets Based on SiC MOSFETs," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. PP, no. 99, 2018.
- [12] *1-1/8" HELIFLEX® Air-Dielectric Coaxial Cable, HCA118-50J*, Radio Frequency Systems, RFS, 11.Feb.2012.
- [13] Mayer M., Schröder G., "Coaxial 30 kV Connectors for the RG220/U Cable - 20 Years of Operational Experience," in *High Voltage Workshop, Dielectric and Electric Insulation Society of the IEEE*, Newport Beach, CA, May 6-8,1997.
- [14] International Electrotechnical Commission , IEC 60270 - International Standard - High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, GENEVA, SWITZERLAND: IEC Central Office, 2000.
- [15] Stadlbauer, Tobias, "Partial discharge measurements, ABTEF," Tuesday 14 Aug 2018. [Online]. Available: https://indico.cern.ch/event/739636/contributions/3053164/attachments/1700433/2738318/20180814_PD_Measurements_TST.PPTX.
- [16] Omicron Academy Training Material, Rene Hummel, Stephan Korber, Daniel Gebhardt, Ulrike Broniecki, "Coupling Methods for PD Measurement," Omicron Academy Training Material.
- [17] Omicron Academy Training Material, Rene Hummel, Stephan Korber, Daniel Gebhardt, Ulrike Broniecki, "Interpretation of PRPD Pattern," Omicron Academy Training Material.

- [18] Parametric Technology Corporation, *Mathcad 15.0*, 2010.
- [19] Kramer, Thomas, "Overview of HV Cables and Connectors, Cable Procurement and Future Work," in *PULse POver for Kicker Systems (PULPOKS) workshop 2018*, Geneva, 2018.
- [20] L. Sermeus, "KFA45 / BRUGG 26.3ohm PFN CABLE No 6612-N," 1994. [Online]. Available:
[\cern.ch\dfs\Departments\TE\Groups\ABT\BT\Sections\KPS\KPS_MACHINES_&_E XP-AREAS\Cables_general\BRUGG\PS-KM-M20-110-A.pdf](https://cern.ch/dfs/Departments\TE\Groups\ABT\BT\Sections\KPS\KPS_MACHINES_&_E XP-AREAS\Cables_general\BRUGG\PS-KM-M20-110-A.pdf) .
- [21] Cobham Software, *OPERA Simulation Software, Opera 18R2 x64*, Cobham Software.
- [22] Bluestar Silicones, *Rhodorsil® Oils 47 Technical information*, Bluestar Silicones.
- [23] les cables de Lyon, "Cables Coaxiaux 26,3 Ω et 52,6 Ω sous pression de SF₆," les cables de Lyon, Lyon, 1978.
- [24] A. Ferrero Colomo, L. Ducimetière, T. Kramer, L. Sermeus, "Measurement and Characterization of Cable Losses for High Voltage Coaxial Cables Used in Kicker Systems," in *IPAC2017*, Copenhagen, Denmark, 2017.
- [25] A. E. Corporation, *Dino-Lite Digital Microscope*, Dino-Lite Edge.
- [26] "1 5/8" EIA connector HCA118-50 air dielectric cable 1 1/8"-50," SPINNER, [Online]. Available: <https://products.spinner-group.com/1-5-8-eia-connector-hca118-50-air-dielectric-cable-1-1-8-50-bn858210>.
- [27] Borburgh, J., "An introduction to HV cables," CERN.
- [28] Lemke, E., "Analysis of the partial discharge charge transfer in extruded power cables," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. vol. 29, no. no. 1, pp. pp. 24-28, January-February 2013.
- [29] CERN, "CERN Brochure 2017," 2017. [Online]. Available:
<https://cds.cern.ch/record/2255762/files/CERN-Brochure-2017-002-Eng.pdf>.
- [30] GIMENEZ, PIERRE, "CERN Drawing Number: PSBRKPFL0015, HELICOIDAL CABLE CONNECTOR - ASSEMBLY, CERN Drawings Directory," [Online]. Available:
https://edms5.cern.ch/cdd/plsql/c4w.display_details?cookie=2161502&p_drob_id=893953&p_version=**.
- [31] McCauley, Thomas, "CMS Higgs Search in 2011 and 2012 data: candidate tau-tau event (8 TeV)," CERN Document Server, 2013. [Online]. Available:
<https://cds.cern.ch/record/1633370>.
- [32] Electronics Tutorials, "Electronics Tutorials - Home / Transformers / The Current Transformer," [Online]. Available: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html>.
- [33] DFS, CERN, "G:\Departments\TE\Groups\ABT\BT\BT-FPNEW\System\Components\Cables\20 & 40 & 50 Ohm connectors," [Online]. Available: cern.ch.
- [34] Draka Multimedia Cable, "HF-Pulse Cable RG220/U FRNC-C," 02.09.03.
- [35] Barnes, M J; Ducimetière, L; Fowler, T; Senaj, V; Sermeus, L, "Injection and extraction magnets: kicker magnets," CERN Document Server, 2011. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/1334789?ln=en>.
- [36] Omicron Academy Training Material, Rene Hummel, Stephan Korber, Daniel Gebhardt, Ulrike Broniecki, "Introduction, History and Theory of Partial Discharge Measurement," Omicron Academy Training Material.

- [37] Laurent Guiraud, "One of the 'kicker magnets' used to kick an injected beam into SPS," CERN Document Server, 2000. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/41264>.
- [38] Mobs, Esma Anais, "The CERN accelerator complex," CERN Document Server, 2016. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/2225847>.
- [39] CERN, "CERN DFS," 2002. [Online]. Available: <G:\Departments\TE\Groups\ABT\BT\BT-FPNEW\System\Components\Cables\20 & 40 & 50 Ohm connectors\40 Ohm connector>.
- [40] A. Küchler, Hochspannungstechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [41] CERN, "About CERN," 2012. [Online]. Available: <http://home.cern/about>.
- [42] M. Barnes, "CAS: Beam Injection, Extraction & Transfer," CERN, 14/03/2017. [Online]. Available: <https://cas.web.cern.ch/sites/cas.web.cern.ch/files/lectures/erice-2017/barnesi.pdf>.

12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (BIBLIOGRAPHY)

Mesyats, G. A., Pulsed Power, New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2005.

D. Pozar, Microwave Engineering, 4th Edition, Wiley, 2011 .

Shugg, W.T. and IEEE Dielectrics and Electrical Insulation, Handbook of electrical and electronic insulating materials, New York: IEEE Press, 1995.

International Electrotechnical Commission , IEC 60270 - International Standard - High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, GENEVA, SWITZERLAND: IEC Central Office, 2000.