



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μη-καταστροφικές διαγνωστικές μέθοδοι εντοπισμού
σφαλμάτων σε υποσταθμούς μέσης και υψηλής τάσης**

Εφαρμογές:

- Θερμογραφία σε υποσταθμούς υψηλής τάσης στη Δ.Ε.Η.
- Μετρήσεις μερικών εκκενώσεων σε καλώδια μέσης τάσης στο δίκτυο διανομής του CERN

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΓΕΝΙΑ ΒΟΥΛΓΑΡΗ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μη-καταστροφικές διαγνωστικές μέθοδοι εντοπισμού
σφαλμάτων σε υποσταθμούς μέσης και υψηλής τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΓΕΝΙΑ ΒΟΥΛΓΑΡΗ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή:

.....
Κωνσταντίνος Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτα Βασιλείου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2011

.....

Ευγενία Βούλγαρη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π

Copyright © Ευγενία Βούλγαρη, 2011

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική αναφέρεται σε μη-καταστροφικές μεθόδους ανίχνευσης σφαλμάτων στο δίκτυο μέσης και υψηλής τάσης.

Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η υπέρυθρη θερμογραφία, μια μέθοδος για εξ αποστάσεως μέτρηση της θερμοκρασίας. Οι υπέρυθρες κάμερες οπτικοποιούν τις αόρατες για το ανθρώπινο μάτι ακτίνες.

Η υπέρυθρη καταγραφή κατάστασης είναι μια τεχνική ικανή να εντοπίζει την παρουσία θερμικών ανωμαλιών στην επιφάνεια κάποιου ελαττωματικού εξαρτήματος. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κατάστασης των ηλεκτρικών στοιχείων ολόκληρου του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Συμπληρωματική μέθοδος περιλαμβάνει την καταγραφή των ρευματοφόρων τμημάτων με υπεριώδεις κάμερες που απεικονίζουν τις θέσεις ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου από τις οποίες εκπέμπονται ηλεκτρόνια προς τον περιβάλλοντα χώρο (φαινόμενο corona) στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στη θερμογραφική μέθοδο, το κάθε τμήμα ηλεκτρικού εξοπλισμού πριν την αστοχία φαίνεται να υπερθερμαίνεται σε αντίθεση με τις φυσιολογικές του συνθήκες, οπότε αυτό μπορεί να συνιστά ένδειξη για διορθωτικές ενέργειες, προληπτική συντήρηση και διασφάλιση αξιοπιστίας.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται επίσης στις στατικές επαφές, όπου η αντίσταση στένωσης ρυθμίζει την πυκνότητα ρεύματος, οπότε και η αντίσταση διάβασης επηρεάζεται από την εξαναγκασμένη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Στις λύομενες στατικές επαφές παρουσιάζονται φαινόμενα όπως το φαινόμενο σήραγγος, η θερμιονική εκπομπή και η εκπομπή πεδίου και η υψηλή θερμοκρασία καταγράφεται με τη θερμική κάμερα.

Πιο συγκεκριμένα με την υπέρυθρη θερμογραφία, θερμά σημεία και θερμοκρασιακές διαφορές εντοπίστηκαν σε υποσταθμούς υψηλής τάσης της Δ.Ε.Η. Μερικά από τα θερμά σημεία που καταγράφηκαν με το θερμογραφικό όργανο θεωρήθηκαν ως πιθανά ελαττωματικά σημεία, αφού η θερμοκρασία είναι ένας άριστος δείκτης της αξιοπιστίας και της μακροζωίας ενός ηλεκτρικού συστήματος.

Το δεύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής που εκπονήθηκε στο CERN στην Ελβετία, αναφέρεται στους διαγνωστικούς ελέγχους προληπτικής συντήρησης σε καλώδια μέσης τάσης του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας του CERN. Ειδικότερα, με τα συστήματα LPD monitor (On-line live partial discharge monitor) και OWTS (Oscillating wave test system), μετρήθηκαν οι μερικές εκκενώσεις, με διάφορες μεθόδους, υπό φορτίο και χωρίς φορτίο. Οι μερικές εκκενώσεις, θεωρούνται ένας από τους σημαντικότερους λόγους οι οποίοι συντελούν στη γήρανση και την τελική καταστροφή των ηλεκτρικών μονώσεων.

Σε ξεχωριστό κεφάλαιο, παρουσιάζεται η διαδικασία μέτρησης και ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων, καθώς και οι διορθωτικές ενέργειες που λήφθηκαν στα υπό μελέτη επιλεγμένα καλώδια μέσης τάσης των 18 kV.

Λέξεις κλειδιά:

Μη καταστροφικές μέθοδοι, υπέρυθη θερμογραφία, μέλαν σώμα, θερμική κάμερα, συντελεστής εκπομπής, στατικές επαφές, αντίσταση στένωσης, φαινόμενο σήραγγος, θερμοϊονική εκπομπή, μερικές εκκενώσεις

ABSTRACT

The current diploma thesis refers to non-destructive diagnostic methods in identifying faults in the power network in medium and high voltage.

In the first part infrared thermography is presented, a method for long distance temperature measurements. The infrared thermal cameras which are the main devices for capturing, visualize the invisible rays to the human eye.

Infrared condition monitoring is a technique capable of revealing the presence of thermal anomalies on the surface of a defective component. This technique is used for monitoring the condition of the electrical components of an entire power system. An additional method describes the monitoring of conductive parts using ultraviolet cameras, that specify the high electrical field positions from which electrons are emitted (corona phenomenon) in the environmental temperature.

In the infrared method, every part of the electrical equipment right before its failure, seems overheated in contrast to its normal condition, so this could be a sign for predictive and preventive maintenance and for quality assurance.

Special attention is given to stationary contacts, where the restrictive resistance and the contact resistance are affected by the electric current. Phenomena like tunneling, thermionic emission and field emission occur while high temperature is monitored with the infrared camera.

More explicitly with the infrared thermography hot spots and temperature differences are identified in high voltage substations in the greek power network. These hot spots are localized by the infrared equipment and are considered as possibly faulty spots, since the temperature is an excellent indicator of the reliability and lifetime of electrical equipment.

The second part of the current thesis that was effectuated at CERN in Switzerland, refers to the diagnostic tests and predictive maintenance, in CERN's power distribution cables. Specifically, it focuses on partial discharge measurements using on load and off load testing methods. Partial discharges were measured using LPD monitor (On-line live partial discharge monitor) and OWTS (Oscillating Wave Test System). Partial discharges are considered to be the major reason for aging, deterioration and eventual failure of electrical insulation.

The partial discharges measurement procedure and detection method along with the preventive maintenance actions, are also presented in a separate chapter of the current thesis. The measurements were effectuated in the selected cables of the 18 kV medium voltage network.

Key words:

Non-destructive testing, infrared thermography, black body, thermal camera, emissivity, stationary contacts, constriction resistance, tunneling, thermionic emission, partial discharges

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών κύριο Κωνσταντίνο Δέρβο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για τη βοήθεια που μου πρόσφερε στη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και την εμπύχωση κατά τη διάρκεια της παραμονής μου και εργασίας μου στο CERN στη Γενεύη.

Ευχαριστώ επίσης και τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, την κυρία Παναγιώτα Βασιλείου, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ και τον κύριο Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Θοδωρή Αργυρόπουλο, το Δρ. Γιάννη Μέργο και την υπ.διδ. Μαριάννα Αθανασοπούλου για τη βοήθεια κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων με τη θερμοκάμερα και εργασίας στο εργαστήριο.

Σημαντική ήταν και η βοήθεια του κυρίου Αθανασίου Δράτσα από τη Δ.Ε.Η. για τις συμβουλές του και τη βοήθεια του στις μετρήσεις στους υποσταθμούς υψηλής τάσης.

Το αγγλικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που αφορά τις μετρήσεις μερικών εκκενώσεων, γράφτηκε κατά τη διάρκεια εργασίας μου σαν technical student στο CERN. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μηχανικούς του section EL-EL-HT, με τους οποίους και συνεργάστηκα και ειδικά τους δύο supervisors μου Davide Bozzini και Slawomir Olek. Όπως επίσης και τους μηχανικούς της εταιρίας SebaKMT, για τη βοήθεια τους σχετικά με τον εξοπλισμό τους για την μέτρηση των μερικών εκκενώσεων και τις χρήσιμες πληροφορίες τους.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου -αυτούς που είναι πάντα εδώ- και την οικογένεια μου για την ψυχική και ηθική υποστήριξη, το ενδιαφέρον και την ανοχή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Όπως επίσης και στα παιδιά της Θεατρικής Ομάδας του ΕΜΠ για τις υπέροχες στιγμές που ζήσαμε μαζί.

Τέλος, πολλά ευχαριστώ από καρδιάς, στη φίλη μου Λήδα Κανάρη, όπως επίσης και στον συνάδελφο ηλεκτρολόγο μηχανικό Rahul Banerjee, χωρίς τη βοήθεια, την ενθάρρυνση και τη συμπαράσταση των οποίων δεν θα είχα αντλήσει το κουράγιο και την όρεξη να ολοκληρώσω το αγγλικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου, στην Ελβετία.

Γενεύη,

Μάρτιος 2011

*Τι συμφορά, ενώ είσαι καμωμένος
για τα ωραία και μεγάλα έργα
η άδικη αυτή σου η τύχη πάντα
ενθάρρυνσι κ' επιτυχία να σε αρνείται·
να σ' εμποδίζουν ευτελείς συνήθειες,
και μικροπρέπειες, κι αδιαφορίες...
Και τι φρικτή η μέρα που ενδίδεις
(η μέρα που αφέθηκες κ' ενδίδεις)...
και φεύγεις οδοιπόρος για τα Σούσα,
και παινείς στον μονάρχην Αρταξέρξη
που ευνοϊκά σε βάζει στην αυλή του,
και σε προσφέρει σατραπείες και τέτοια.
Και σύ τα δέχεσαι με απελπισία
αυτά τα πράγματα που δεν τα θέλεις.
Άλλα ζητεί η ψυχή σου, γι' άλλα κλαίει·
τον έπαινο του Δήμου και των Σοφιστών,
τα δύσκολα και τ' ανεκτίμητα Εύγε·
την Αγορά, το Θέατρο, και τους Στεφάνους.
Αυτά πού θα στα δώσει ο Αρταξέρξης,
αυτά πού θα τα βρεις στη σατραπεία·
και τι ζωή χωρίς αυτά θα κάμεις.*

Κωνσταντίνος Π. Καβάφης (1910)

Nous, partout et toujours ???

...

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ:	15
1. ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ	15
1.1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ.....	15
1.1.1 Εισαγωγικά, Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.....	15
1.1.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	18
1.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ.....	22
1.3 ΜΕΛΑΝ ΣΩΜΑ.....	23
1.3.1 Εισαγωγικά.....	23
1.3.2 Νόμος του Planck.....	24
1.3.3 Νόμος της μετατόπισης του Wien.....	25
1.3.4 Νόμος των Stefan-Boltzmann.....	26
1.3.5 Εφαρμογή του Νόμου των Stefan-Boltzmann για το ανθρώπινο σώμα.....	26
1.4 ΕMISSIVITY –ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ.....	27
1.5 ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	29
1.5.1 Εισαγωγικά.....	29
1.5.2 Θερμογραφία και emissivity.....	34
1.5.3 Πεδία εφαρμογής της υπέρυθρης θερμογραφίας.....	34
1.5.4 Τεχνικές Θερμογράφησης.....	42
1.5.5 Πλεονεκτήματα Υπέρυθρης θερμογραφίας.....	42
1.5.6 Κριτήρια επιλογής θερμικής κάμερας.....	43
2. ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ	45
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	45
2.2 ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ.....	45
2.3 ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΕΠΑΦΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΕΤΑΙ.....	50
2.4 ΟΞΕΙΔΙΑ ΣΕ ΕΠΑΦΕΣ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ.....	52
2.5 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ.....	54
2.6 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΗΡΑΓΓΟΣ ΣΤΙΣ ΕΠΑΦΕΣ - TUNNELING.....	57
2.7 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ.....	60
3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ	62
3.1 ΘΕΡΜΑ ΣΗΜΕΙΑ (HOT SPOTS).....	62
3.1.1 Εισαγωγή.....	62
3.1.2 Εμφάνιση θερμού σημείου χωρίς να υπάρχει σφάλμα.....	63
3.1.3 Σφάλματα.....	64
3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	65
4. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ FLIR	97
5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ – EMISSIVITY	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105
ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ:	108
ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ	108
DIAGNOSTIC METHODS FOR POWER ENERGY NETWORKS BASED ON PARTIAL DISCHARGES DETECTION	109
TERMS AND DEFINITIONS	110

6.	CERN'S ELECTRICAL NETWORK.....	111
6.1	INTRODUCTION.....	111
6.2	18 kV NETWORK.....	114
6.2.1	18kV SPS pulsed network.....	115
6.2.2	18kV SPS stable network.....	115
6.2.3	The pulsed load 18 kV substation (BE).....	115
6.2.4	The general services 18kV substation (BE9).....	115
7.	THEORY AND PHYSICS OF PARTIAL DISCHARGES	116
7.1	INTRODUCTION.....	116
7.1.1	Electrical Discharges.....	116
7.1.2	Electrical trees.....	119
7.1.3	Electrical aging.....	121
7.1.4	Equations.....	125
7.2	EFFECT OF PARTIAL DISCHARGE ACTIVITY IN CABLES	126
8.	PREDICTIVE MAINTENANCE.....	129
8.1	INTRODUCTION.....	129
8.2	TANA MEASUREMENTS	130
8.3	IRC METHOD.....	132
8.4	PARTIAL DISCHARGE ACTIVITY DETECTION.....	132
8.4.1	On load and off load partial discharge testing methods.....	132
8.4.2	Acoustic ultrasonic partial discharge detection method.....	134
9.	ON LOAD PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS WITH SEBAKMT'S LPD MONITOR	136
9.1	ON LOAD PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS.....	136
9.2	LPD MONITOR BY SEBAKMT.....	136
9.2.1	Basic characteristics	136
9.2.2	LPD monitor's sensors.....	137
9.3	METHOD USED FOR MEASURING.....	139
9.4	DATA CAPTURE METHOD.....	140
9.5	COLOR CODE.....	144
10.	ON LOAD PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS RESULTS PROCESSING	149
10.1	MEASURED FEEDERS AND CABLES.....	149
10.2	ON LOAD PARTIAL DISCHARGE RESULTS	151
10.2.1	BE-BA4 cable line	151
10.2.2	Current measurements and harmonic analysis in BE-BA4 cable line.....	155
10.2.3	LPD monitor color code results	160
10.2.4	LPD monitor waveforms results by SebaKMT	164
11.	OFF LOAD PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS	172
11.1	OWTS SYSTEM FOR OFF LOAD MEASUREMENTS.....	172
11.2	TIME DOMAIN REFLECTOMETRY.....	175
11.3	OWTS MEASUREMENTS IN BE-BA4 CABLE LINE.....	178
11.3.1	Test Object characteristics	178
11.3.2	Calibration	179
11.3.3	Test Results 1	182
11.3.4	Test Results 2.....	188
	CONCLUSIONS.....	191
	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	192
	REFERENCES.....	194
	ANNEX.....	195

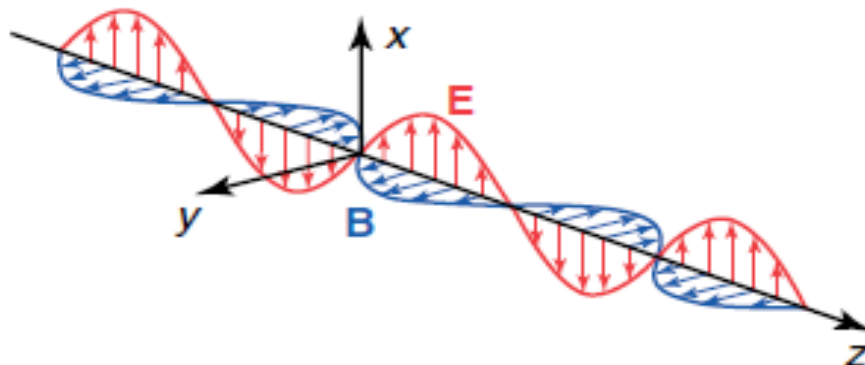
Πρώτο Μέρος:

1. ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

1.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

1.1.1 Εισαγωγικά, Ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Το φως όπως και οι άλλες μορφές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ταξιδεύουν στο χώρο με τη μορφή των κυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ταλαντώσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που μεταδίδονται στον ελεύθερο χώρο με την ταχύτητα του φωτός ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$). Όπως γνωρίζουμε, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα τόσο μεταξύ τους, όσο και με τη διεύθυνση διάδοσης τους κύματος.



Εικόνα 1.1: Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Η χωρική απόσταση ανάμεσα σε δύο μέγιστα ή ελάχιστα για τα δύο πεδία, τα οποία είναι σε συμφωνία φάσης σε ένα επίπεδο κύμα ονομάζεται μήκος κύματος λ . Μετριέται σε μέτρα (m), αν και εξίσου χρήσιμες υποδιαιρέσεις είναι το cm (10^{-2} m), το mm (10^{-3} m), το μm (10^{-6} m) και το nm (10^{-9} m).

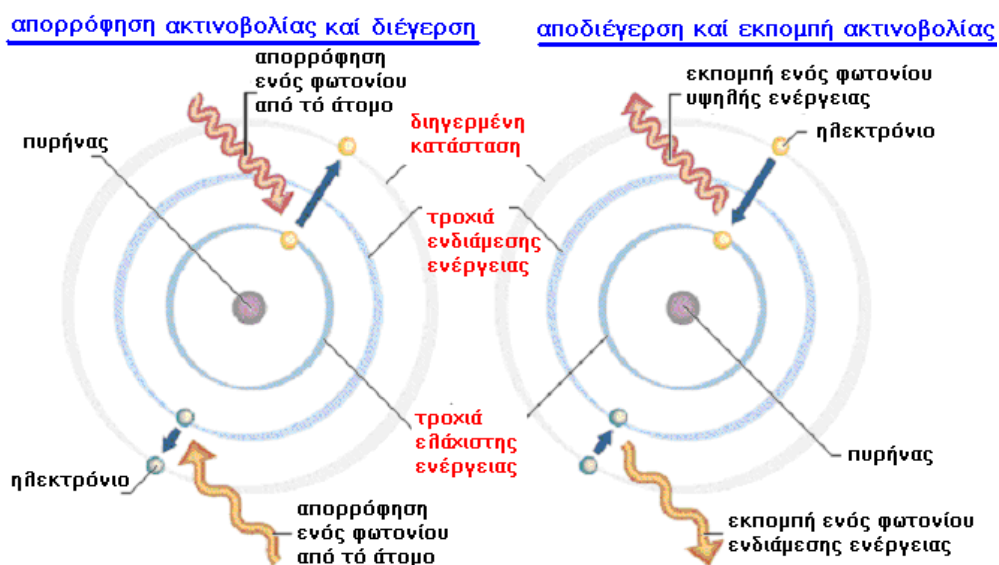
Ισχύει η σχέση:

$$c = \lambda * f \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

όπου το λ μετριέται σε m, η συχνότητα f σε Hz και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Όταν για κάποιο λόγο, όπως π.χ. με την επίδραση ακτινοβολίας, ή με κρούση με άλλο σωματίδιο, ένα ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει την τροχιά του και μεταβαίνει σε άλλη τροχιά υψηλότερης ενεργειακής στάθμης, προσλαμβάνοντας ενέργεια, τότε το άτομο διεγείρεται. Στην κατάσταση αυτή το άτομο δεν παραμένει για πολύ, αλλά επανέρχεται στην προηγούμενη σταθερή κατάσταση (αποδιέγερση) ενώ το ηλεκτρόνιο επιστρέφει στην τροχιά του αποδίδοντας την ενέργεια που προσέλαβε προηγουμένως. Η απόδοση της ενέργειας αυτής γίνεται με την μορφή ενός φωτονίου. Τα φωτόνια αυτά, που “δραπετεύουν” κατά κάποιο τρόπο από τα άτομα, συνιστούν αυτό που αντιλαμβανόμαστε ως ακτινοβολία. Αν τώρα, αυτό το μήκος κύματος των εκπεμπόμενων φωτονίων είναι ικανό να μπορεί να διεγείρει τον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού μιλάμε για το ορατό φως, αλλιώς έχουμε την αόρατη (υπεριώδη ή υπέρυθη) περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Με άλλα λόγια το σύνολο των συχνοτήτων που μπορούν να προκύψουν από την αποδιέγερση των ατόμων αποτελεί το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

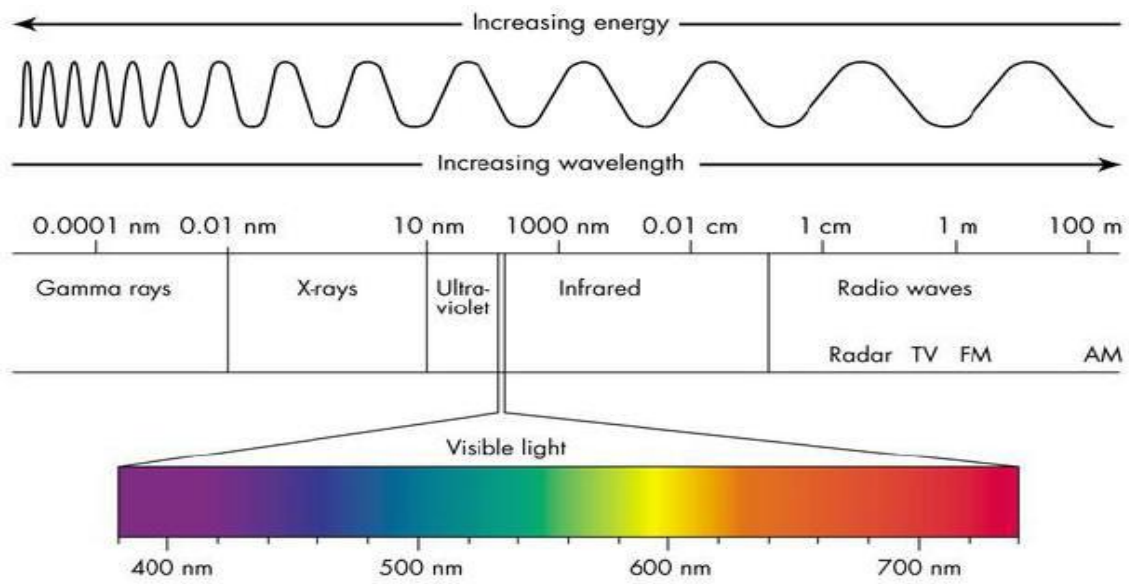
Ο μηχανισμός διέγερσης και αποδιέγερσης καθώς και η δημιουργία φωτονίου περιγράφονται στην εικόνα 1.2.



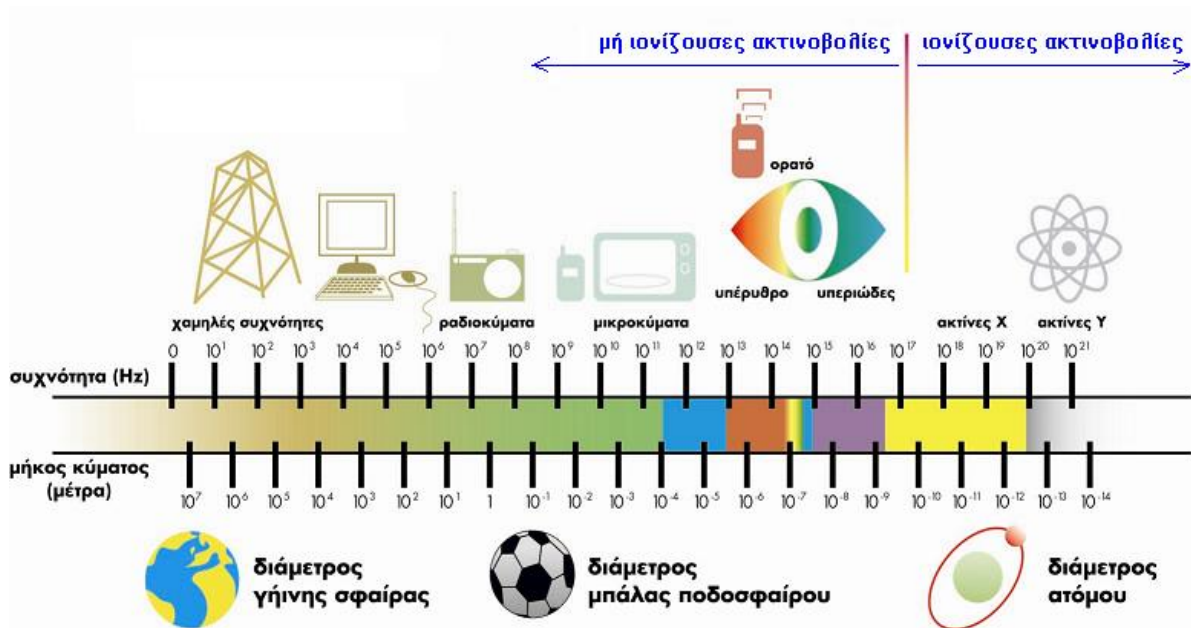
Εικόνα 1.2: Μηχανισμός διέγερσης και αποδιέγερσης, δημιουργία φωτονίου

Οπότε, ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάζεται το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Με βάση κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες. Αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθη ακτινοβολία, η ορατή ακτινοβολία, η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ.

Στη συνέχεια, στις εικόνες 1.3 και 1.4, φαίνεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και οι διάφορες περιοχές μήκους κύματος σε nm, στις οποίες αυτό χωρίζεται.



Εικόνα 1.3: Το Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα



Εικόνα 1.4: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα και επιμέρους περιοχές διάκρισης, σε μήκος κύματος και συχνότητες

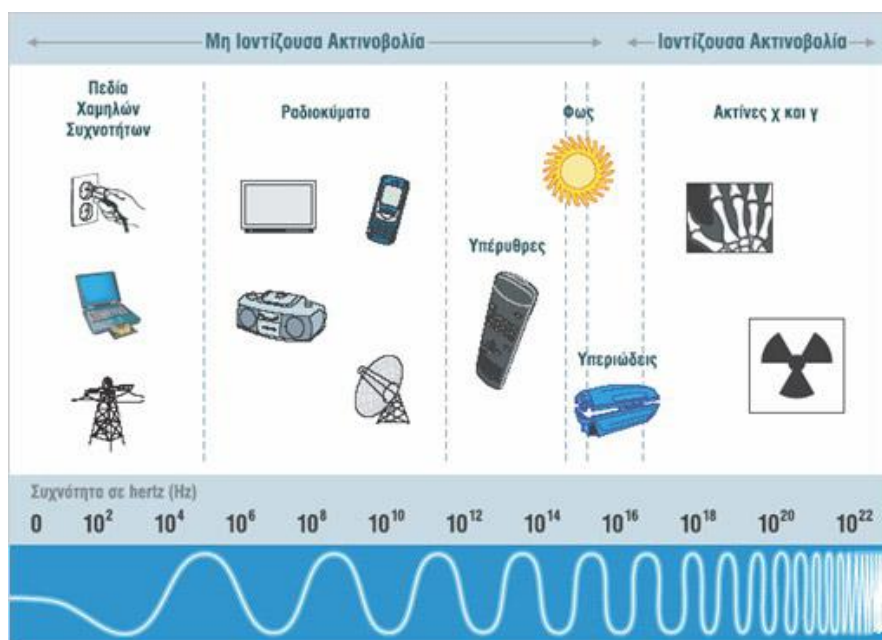
1.1.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες την ionίζουσα και τη μη ionίζουσα:

Ionίζουσα είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει μεγάλη ενέργεια, μεγαλύτερη από 10 eV και που είναι ικανή να εισχωρήσει στην ύλη και να προκαλέσει ionτισμό, να διασπάσει βίαια χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες σε ζώντες οργανισμούς τροποποιώντας το DNA τους. Ionίζουσες είναι οι υπεριώδεις ηλιακές ακτίνες, η κοσμική ακτινοβολία και οι ακτινοβολίες X και γ.

Μη ionίζουσα είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει σχετικά μικρή ενέργεια, ανίκανη κατά την αλληλεπίδραση να προκαλέσει άμεσα ionτισμό, αλλά ικανή να προκαλέσει θερμικές ή χημικές επιδράσεις στα κύτταρα, άλλοτε ευεργετικές και άλλοτε επιβλαβείς για τη λειτουργία τους. Γνωστότερες μη ionίζουσες ακτινοβολίες είναι η ορατή, η υπέρυθρη, η υπεριώδης, τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπουν οι ηλεκτρικές συσκευές.

Στην εικόνα 1.5 φαίνονται οι συχνότητες της ionίζουσας και αντίστοιχα της μη ionίζουσας ακτινοβολίας και δίνονται σχηματικά διάφορα παραδείγματα.



Εικόνα 1.5: Ionίζουσα και μη ionίζουσα ακτινοβολία

Στον πίνακα 1.1 απεικονίζονται συνοπτικά οι διάφορες περιοχές στις οποίες διαιρείται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, ανάλογα με το μήκος κύματος λ.

Πίνακας 1.1: Περιοχές ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και αντίστοιχο μήκος κύματος

Φασματική ζώνη		Μήκος κύματος
Ακτίνες γ		< 100pm
Ακτίνες Χ		0,01 – 10nm
Υπεριώδης ακτινοβολία <ul style="list-style-type: none"> • Εξαιρετικά υπεριώδεις -> 0,01 - 0,20μm • Άπω υπεριώδεις -> 0,20 - 0,30μm • Εγγύς υπεριώδεις -> 0,30 - 0,38μm 		0,01 – 0,38μm
Ορατό <ul style="list-style-type: none"> • Μπλε -> 0,4 – 0,5μm • Πράσινο -> 0,5 – 0,6μm • Ερυθρό -> 0,6 – 0,7μm 		0,4-0,7 μm
Εγγύς υπέρυθρο	Ανακλώμενο υπέρυθρο	0,72 – 1,3μm
Μέσο υπέρυθρο		1,3 – 3μm
Άπω υπέρυθρο	Θερμικό υπέρυθρο	3 – 15μm
Μικροκύματα		0,3 – 30cm
Ραδιοφωνικά κύματα (ραδιοκύματα)		> 30cm

Συνοπτικά αναλύουμε τις περιοχές στις οποίες χωρίζεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα δίνοντας προφανώς έμφαση στην υπέρυθρη (infrared) ζώνη που θα μας απασχολήσει στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς σε αυτή στηρίζεται η θερμογραφία υπέρυθρου.

- Τα **ραδιοκύματα** είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα σχετικά χαμηλών συχνοτήτων. Καλύπτουν την περιοχή συχνοτήτων από 0-300 MHz. Η ενέργεια των φωτονίων τους είναι πολύ χαμηλή και φτάνει μέχρι τα 10^{-5} eV. Παράγονται από κεραίες και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις τηλεπικοινωνίες. Χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες με βάση τη συχνότητα τους ή ισodύναμα με βάση το μήκος κύματός τους.
- Τα **μικροκύματα** θεωρούνται και αυτά τμήμα των ραδιοκυμάτων λόγω του ότι παράγονται από κεραίες και έχουν πλήθος εφαρμογών στις τηλεπικοινωνίες.

Παρουσιάζουν όμως και διαφορετικές ιδιότητες σε σχέση με τα υπόλοιπα ραδιοκύματα, λόγω της υψηλότερης ενέργειας των φωτονίων τους. Τα μικροκύματα καλύπτουν περιοχή συχνοτήτων από 300 MHz - 300 GHz και η ενέργεια των φωτονίων τους κυμαίνεται από 10^{-5} - 10^{-3} eV. Χωρίζονται και αυτά σε τρεις επιμέρους ζώνες, τη ζώνη των δεκατομετρικών μικροκυμάτων ή UHF, τη ζώνη των εκατοστομετρικών μικροκυμάτων ή SHF και τη ζώνη των χιλιοστομετρικών μικροκυμάτων EHF.

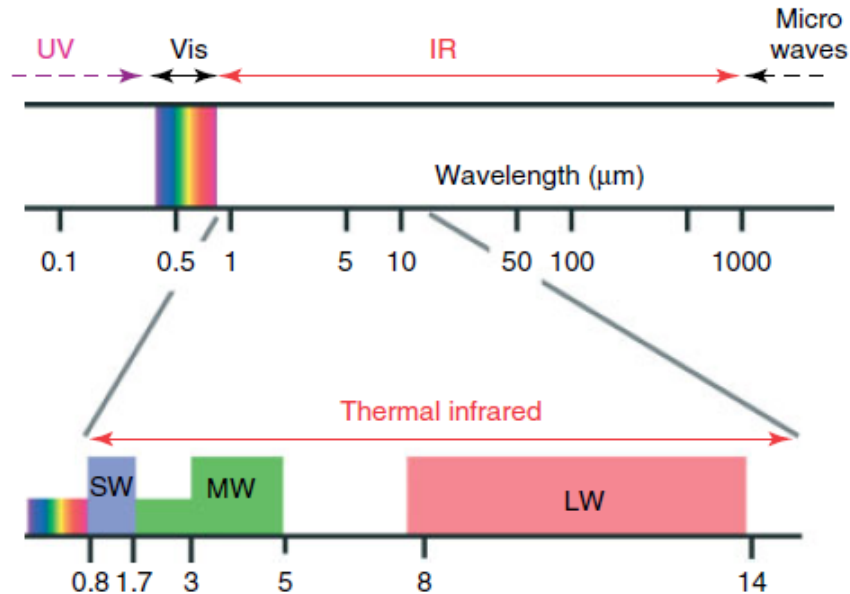
- **Ορατή ακτινοβολία ή ορατό φως.** Η ζώνη του ορατού φωτός είναι μία στενή ζώνη του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, στην οποία είναι ευαίσθητο το αισθητήριο της όρασης των ζωντανών οργανισμών και καλύπτει περιοχή συχνοτήτων 400 - 800 MHz και η ενέργεια των φωτονίων κυμαίνεται από 1,6 - 3,2 eV. Το ορατό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες τις οποίες το ανθρώπινο μάτι τις αντιλαμβάνεται ως διαφορετικά χρώματα. Οι ζώνες αυτές φαίνονται στον επόμενο πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Περιοχές ορατού φάσματος και μήκη κύματος

Χρώμα	Εύρος μήκους κύματος
Ιώδες	0,40-0,44 μm
Μπλε	0,44-0,49 μm
Πράσινο	0,49-0,54 μm
Κίτρινο	0,54-0,60 μm
Πορτοκαλί	0,60-0,63 μm
Κόκκινο	0,63-0,76 μm

- Η **υπεριώδης ακτινοβολία** καλύπτει την περιοχή συχνοτήτων από 800 THz - $3 \cdot 10^{17}$ Hz και η ενέργεια των φωτονίων της είναι μεταξύ 3 eV - 2000 eV . Εκπέμπεται από εξαιρετικά θερμά σώματα όπως τα άστρα. Η υπεριώδης είναι ακτινοβολία υψηλής ενέργειας και αρκετά επιβλαβής για τους ζωντανούς ιστούς.
- Η **ακτινοβολία X** εκτείνεται από $3 \cdot 10^{17}$ Hz – $5 \cdot 10^{19}$ Hz και η ενέργεια των φωτονίων της είναι 1200 eV - $2,4 \cdot 10^5$ eV. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος παραγωγής ακτίνων X είναι μέσω της επιτάχυνσης ηλεκτρονίων από δυναμικό τάξης μεγέθους των δεκάδων χιλιάδων Volt και πρόσπτωσή τους σε στόχο ο οποίος αποτελείται από μεταλλικό υλικό μεγάλου ατομικού αριθμού.
- Η **ακτινοβολία γ** είναι ακτινοβολία εξαιρετικά υψηλής συχνότητας που κυμαίνεται από $5 \cdot 10^{19}$ Hz – $3 \cdot 10^{22}$ Hz. Οι ενέργειες των φωτονίων της είναι πολύ υψηλές και κυμαίνονται 10^5 eV - 10^7 eV. Οι ακτίνες γ παράγονται από ραδιενεργούς πυρήνες και από τα αστέρια στο διάστημα.

- Η **υπέρυθη ακτινοβολία** τοποθετείται ως προέκταση της κόκκινης ορατής ακτινοβολίας στο φάσμα και το μήκος κύματός της κυμαίνεται περίπου από 750 nm έως 1 mm. Χωρίζεται σε τρεις επιμέρους περιοχές, σε σχέση με την απόστασή της από την περιοχή του ερυθρού χρώματος της ορατής ακτινοβολίας, οι οποίες είναι :
 - **Κοντινή (SW)** με μικρό μήκος κύματος, από $0,75 \cdot 10^{-6}$ έως $2 \cdot 10^{-6}$ (m)
 - **Μέση (MW)** με μεσαίο μήκος κύματος, από $2 \cdot 10^{-6}$ έως $5 \cdot 10^{-6}$ (m)
 - **Μακρινή (LW)** με μεγαλύτερο μήκος κύματος, από $7 \cdot 10^{-6}$ έως $14 \cdot 10^{-3}$ (m)



Εικόνα 1.6: Περιοχές υπέρυθρου IR φάσματος [Infrared Thermal Imaging Fundamentals, Research and Applications, Vollmer, Mollman]

Συνήθως, οι υπέρυθρες ακτίνες εκπέμπονται από όλα τα σώματα που έχουν κάποια θερμοκρασία. Τα σώματα με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία εκπέμπουν περισσότερες υπέρυθρες και αντίστροφα ισχύει, ότι τα σώματα που απορροφούν περισσότερες υπέρυθρες αυξάνουν την θερμοκρασία τους. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την ταλάντωση των σωματιδίων, αφού όταν ένα σώμα θερμανθεί, η θερμοκρασία του αυξάνεται, η ταλάντωση των μορίων του γίνεται πιο έντονη, επομένως και η μέση εκπεμπόμενη κυματική συχνότητα αυξάνεται. Η πιο συνηθισμένη και απλή εφαρμογή της αόρατης υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι στις συσκευές απομακρυσμένου ελέγχου (remote controlling). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η υπέρυθη ακτινοβολία, προτιμάται των ραδιοκυμάτων διότι δεν επιδρά σε συσκευές γειτονικών χώρων, γεγονός πολύ σημαντικό σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Για παράδειγμα, το τηλεκοντρόλ της τηλεόρασης στέλνει σήματα με ασθενείς δέσμες υπέρυθρων ακτίνων που ρυθμίζουν τη λειτουργία αυτών των συσκευών. Επίσης γίνεται μεταφορά δεδομένων και επικοινωνία σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ περιφερειακών συσκευών ενός Η/Υ χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα της IrDA (Infrared Data Association.). Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούν διόδους LEDs που κωδικοποιούν δεδομένα και οι δέκτες χρησιμοποιούν φωτοдиодούς πυριτίου που μετατρέπουν την υπέρυθη ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα.

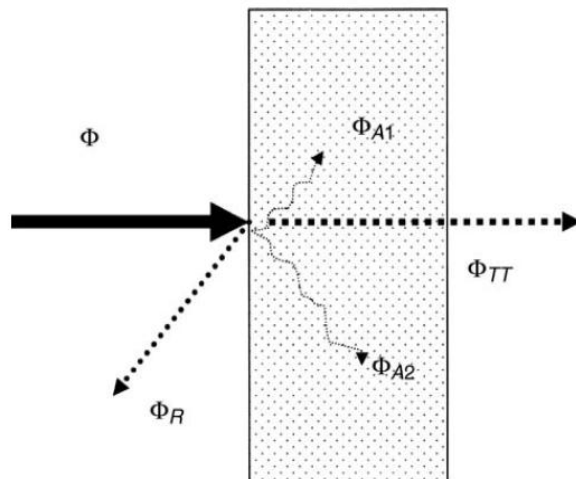
Η υπέρυθη ακτινοβολία χρησιμοποιείται φυσικά και στην θερμογραφία υπέρυθρου, που θα αναλυθεί διεξοδικά στην συνέχεια.

1.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη

Γενικά όταν προσπίπτει ακτινοβολία πάνω σ' ένα σώμα, είτε αυτό είναι στερεό ή υγρό ή αέριο, ένα κλάσμα της απορροφάται, ένα άλλο κλάσμα της ανακλάται, και το υπόλοιπο διαπερνά το σώμα. Ισχύει γενικά ότι:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.2)$$

όπου α είναι ο συντελεστής απορρόφησης, ρ ο συντελεστής ανάκλασης και τ ο συντελεστής διάδοσης.



Εικόνα 1.7: Ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε ένα σώμα συγκεκριμένου πάχους [Infrared thermography, Errors and Uncertainties, Minkina, Dudzik]

Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του 1mm. Για αυτά τα αδιαφανή υλικά ισχύει ότι $\tau = 0$, επομένως:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1.3)$$

1.3 Μέλαν σώμα

1.3.1 Εισαγωγικά

Μέλαν σώμα είναι ένα ιδανικό σώμα το οποίο απορροφά όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του. Ένα μέλαν σώμα δεν ανακλά ούτε διαχέει την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά εκπέμπει κάποια ακτινοβολία, που είναι ακριβώς ίση με αυτή που απορροφά, δηλαδή το φάσμα της οποίας εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του. Επομένως, ισχύει ότι

$$\alpha = \varepsilon = 1 \quad (1.4)$$

όπου α είναι ο συντελεστής απορρόφησης και ε ο συντελεστής εκπομπής

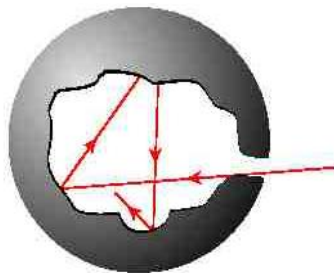
και έτσι, η εξίσωση (1.3) για τα αδιαφανή υλικά τροποποιείται ως εξής:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (1.5)$$

Στην πραγματικότητα, το μέλαν σώμα αποτελεί ένα εξιδανικευμένο μοντέλο της ύλης, που επινοήθηκε για να διευκολυνθεί η μελέτη της θερμικής ακτινοβολίας των πραγματικών σωμάτων. Ο όρος εισήχθη από τον Gustav Robert Kirchhoff το 1860 και η μελέτη της ακτινοβολίας που πραγματοποίησε, έπαιξε μεγάλο ρόλο στη ανάπτυξη της κβαντομηχανικής.

Ένα οποιοδήποτε σώμα, σε κάποια μη μηδενική θερμοκρασία, εκπέμπει ακτινοβολία και αν είναι τέλει μέλαν σώμα, ο συντελεστής εκπομπής του θα είναι ίσος με την μονάδα. Για κάθε πραγματικό σώμα όμως, ο συντελεστής εκπομπής είναι μικρότερος από την μονάδα. Ως συντελεστής εκπομπής ενός πραγματικού σώματος ορίζεται ο λόγος της ακτινοβολούμενης ενέργειας από το σώμα σε σχέση με την ακτινοβολούμενη ενέργεια ενός μελανού σώματος που βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία. Επομένως, το μέλαν σώμα αποτελεί ένα όριο το οποίο μπορούν να προσεγγίσουν σε κάποιο βαθμό τα φυσικά σώματα. Ο συντελεστής εκπομπής ενός πραγματικού σώματος μεταβάλλεται με την θερμοκρασία, την γωνία εκπομπής και το εξεταζόμενο μήκος κύματος. Πολλές φορές όμως, είναι χρήσιμο να υποθέτουμε ότι είναι σταθερός.

Παρακάτω στην εικόνα 1.8, φαίνεται πως μπορούμε να δημιουργήσουμε και να προσομοιώσουμε ένα μέλαν σώμα.



Εικόνα 1.8: Μέλαν σώμα

Το φως που εισέρχεται στην κοιλότητα από μια μικρή οπή, έπειτα από πολλαπλές αντανakλάσεις απορροφάται σχεδόν ολοκληρωτικά από τα τοιχώματα. Η πιθανότητα για ένα τμήμα της ακτινοβολίας που μπήκε μέσα στην κοιλότητα από την οπή να ξαναβγεί από αυτήν είναι πολύ μικρή, αν η οπή είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την κοιλότητα. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι μόνο ένα πολύ μικρό μέρος, σχεδόν μηδενικό, από το προσπίπτον φως ανακλάται από την οπή, ενώ το υπόλοιπο έχει απορροφηθεί. Αυτό συμβαίνει ανεξάρτητα από το υλικό των τοιχωμάτων και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, διότι, καθώς τα στερεά σώματα έχουν συνεχές φάσμα εκπομπής και απορρόφησης, όλα τα μήκη κύματος σταδιακά θα απορροφηθούν.

Εάν κατασκευάσουμε μια τέτοια ισόθερμη κοιλότητα με κατάλληλο θερμαντήρα, προκύπτει ο λεγόμενος ακτινοβολητής κοιλότητας. Μια ισόθερμη κοιλότητα που θερμαίνεται ομοιόμορφα σε μια θερμοκρασία παράγει ακτινοβολία μέλανος σώματος, τα χαρακτηριστικά της οποίας καθορίζονται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία της κοιλότητας. Τέτοιοι ακτινοβολητές κοιλότητας χρησιμοποιούνται συχνά ως πηγές ακτινοβολίας σε πρότυπα αναφοράς θερμοκρασίας στο εργαστήριο για τη βαθμονόμηση θερμογραφικών οργάνων, όπως π.χ. για μια θερμοκάμερα της FLIR Systems σαν αυτή που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις θερμοκρασίας στην παρούσα διπλωματική εργασία [1].

Εάν η θερμοκρασία της ακτινοβολίας μέλανος σώματος αυξηθεί πάνω από τους 525°C, τότε η πηγή αρχίζει να γίνεται ορατή και δεν φαίνεται πλέον μαύρη στο ανθρώπινο μάτι. Πρόκειται για την αρχική θερμοκρασία κόκκινου χρώματος, η οποία στη συνέχεια γίνεται πορτοκαλί ή κίτρινη καθώς αυξάνεται περαιτέρω η θερμοκρασία. Ως θερμοκρασία χρώματος ενός πραγματικού αντικειμένου ορίζεται η αντίστοιχη θερμοκρασία, στην οποία θα έπρεπε να φτάσει θερμαινόμενο ένα μέλαν σώμα για να έχει την ίδια εμφάνιση [1].

1.3.2 Νόμος του Planck

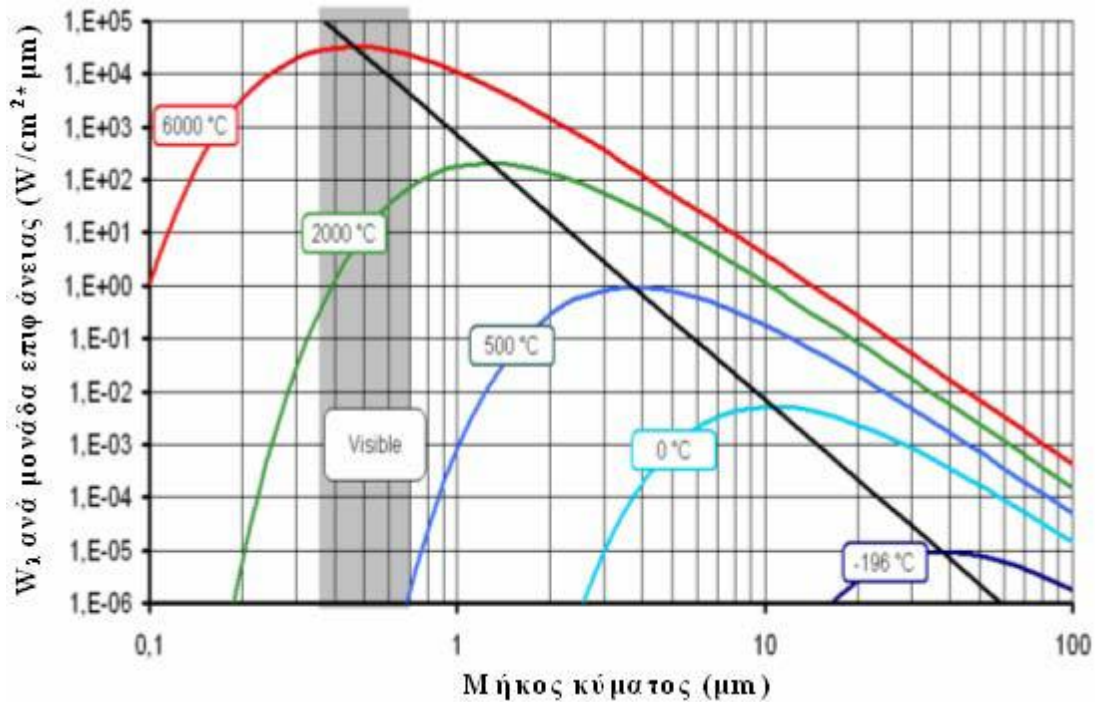
Ο Max Planck (1858–1947) κατάφερε να περιγράψει τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \cdot 10^{-6} \quad (1.5)$$

όπου για την προηγούμενη σχέση, $W_{\lambda b}$ είναι ο φασματικός συντελεστής εκπομπής μέσω ακτινοβολίας του μέλανος σώματος σε μήκος κύματος λ , c η ταχύτητα του φωτός που ισούται με $3 \cdot 10^8$ m/s, h η σταθερά του Planck που ισούται με $6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule*sec, k η σταθερά του Boltzmann που είναι ίση με $1,4 \cdot 10^{-23}$ Joule/K, T η απόλυτη θερμοκρασία ενός μέλανος σώματος σε K και λ το μήκος κύματος σε μm .

Ο νόμος του Planck για την ακτινοβολία, αποτελεί την βασική σχέση για τις μετρήσεις θερμοκρασίας χωρίς επαφή με το αντικείμενο και συνδέει την ένταση της φασματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος με το μήκος κύματος και την θερμοκρασία.

Ο μαθηματικός τύπος του Planck, εάν απεικονιστεί σε μορφή διαγράμματος για διάφορες θερμοκρασίες, παράγει μια οικογένεια καμπυλών, οι οποίες δεν τέμνονται μεταξύ τους. Παρατηρούμε από την εικόνα 1.9, ότι ένα μέλαν σώμα σε υψηλότερη θερμοκρασία εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία σε σχέση με ένα σε χαμηλότερη, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος.



Εικόνα 1.9: Ένταση φασματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ως προς το μήκος κύματος, σύμφωνα με το νόμο του Planck, σε μορφή γραφήματος για διάφορες απόλυτες θερμοκρασίες

1.3.3 Νόμος της μετατόπισης του Wien

Διαφορίζοντας το μαθηματικό τύπο του Planck ως προς λ και βρίσκοντας το μέγιστο, προκύπτει ο τύπος:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} (\mu\text{m}) \quad (1.6)$$

δηλαδή ο μαθηματικός τύπος του Wien, που πρακτικά εκφράζει με μαθηματικό τρόπο την κοινή παρατήρηση ότι τα χρώματα μεταβάλλονται από το κόκκινο προς το πορτοκαλί ή το

κίτρινο καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία ενός ακτινοβολητή θερμότητας. Το μήκος κύματος του χρώματος ταυτίζεται με εκείνο που υπολογίζεται για το λ_{\max} . Μια καλή προσέγγιση της τιμής του λ_{\max} για μια δεδομένη θερμοκρασία μέλανος σώματος λαμβάνεται με εφαρμογή της στρογγυλοποίησης $3.000/T$ μm .

Για παράδειγμα, εφαρμόζοντας τον τύπο προκύπτει ότι ένα πολύ θερμό άστρο όπως ο Σείριος (11.000 K), που εκπέμπει γαλαζωπό λευκό φως, ακτινοβολεί με τη μέγιστη τιμή του φασματικού συντελεστή εκπομπής μέσω ακτινοβολίας να βρίσκεται εντός του αόρατου φάσματος υπεριώδους, σε μήκος κύματος 0,27 μm . Ο Ήλιος (6.000 K) εκπέμπει κίτρινο φως, με μέγιστη τιμή συντελεστή εκπομπής στα 0,5 μm περίπου, στο μέσον δηλαδή του ορατού φάσματος.

1.3.4 Νόμος των Stefan-Boltzmann

Αν αντί να διαφορίσουμε ολοκληρώσουμε τον μαθηματικό τύπο του Planck μεταξύ $\lambda = 0$ και $\lambda = \infty$, λαμβάνεται ο συνολικός συντελεστής εκπομπής μέσω ακτινοβολίας (W_b) ενός μέλανος σώματος:

$$W_b = \sigma * T^4 \text{ (W / m}^2\text{)} \quad (1.7)$$

Αυτός είναι ο μαθηματικός τύπος των Stefan-Boltzmann, σύμφωνα με τον οποίο η συνολική ισχύς ενός μέλανος σώματος είναι ανάλογη προς την απόλυτη θερμοκρασία του, υψωμένη στην τέταρτη δύναμη.

1.3.5 Εφαρμογή του Νόμου των Stefan-Boltzmann για το ανθρώπινο σώμα

Το ανθρώπινο σώμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία, αλλά επειδή η θερμοκρασία του είναι χαμηλή, το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος της ακτινοβολίας αυτής βρίσκεται έξω από την περιοχή του ορατού, στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ταυτόχρονα, το σώμα μας απορροφά θερμική ακτινοβολία από το περιβάλλον. Η διαφορά της ισχύς της απορροφούμενης ενέργειας από την εκπεμπόμενη μας δείχνει πόση ενέργεια απελευθερώνουμε στο περιβάλλον υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας:

$$W_b = W_{emit} - W_{abso} = A * \sigma * (T^4 - T_0^4) \quad (1.8)$$

όπου A το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας του ανθρώπινου σώματος, που για ένα ενήλικο άτομο κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 2 m^2 (εδώ θα θέσουμε $A = 2\text{m}^2$). Ο συντελεστής εκπομπής της επιδερμίδας μας είναι πολύ κοντά στην μονάδα ($\epsilon = 0,98$). Η θερμοκρασία της ελεύθερης επιδερμίδας είναι γύρω στους 32 °C, (305 °K), αλλά τα ρούχα την μειώνουν κατά μερικούς βαθμούς. Έτσι, για τον υπολογισμό μας θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή των 301 °K. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες, αλλά αν

θεωρήσουμε ότι έχουμε θερμοκρασία δωματίου, 20 °C (293 °K), βρίσκουμε ότι η ισχύς της ακτινοβολούμενης ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα είναι:

$$W_b=95 \text{ Watts}$$

Βλέπουμε δηλαδή ότι το σώμα μας εκπέμπει ακτινοβολία περίπου ίση με ένα ηλεκτρικό λαμπτήρα των 100 Watt, με την διαφορά ότι εκπέμπει στο υπέρυθρο ή και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.

1.4 Emissivity –Συντελεστής εκπομπής

Επομένως σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, πολύ λίγα σώματα προσεγγίζουν το ιδανικό μέλαν σώμα. Τα πραγματικά σώματα, ουσιαστικά εκπέμπουν πολύ λιγότερη ακτινοβολία, δηλαδή ισχύει ότι $W_{\lambda 0} < W_{\lambda b}$. Ορίζεται έτσι το μέγεθος ε_λ που ονομάζεται φασματικός συντελεστής εκπομπής (emissivity).

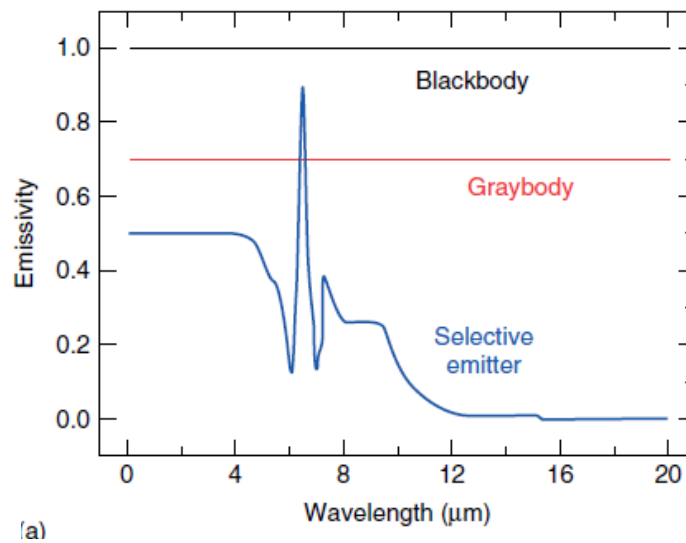
Ο συντελεστής εκπομπής, ή emissivity είναι ο λόγος της φασματικής ακτινοβολούμενης ισχύος που προέρχεται από ένα αντικείμενο προς εκείνης που προέρχεται από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία και μήκος κύματος. Δηλαδή το κλάσμα που περιγράφει μαθηματικά το emissivity είναι:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda 0}}{W_{\lambda b}} \quad (1.9)$$

όπου ισχύει ότι $0 < \varepsilon < 1$ για τα πραγματικά σώματα ενώ για το ιδεατό μέλαν σώμα $\varepsilon = 1$.

Συμπερασματικά λαμβάνοντας υπόψη το ιδανικό μέλαν σώμα αλλά και αυτά που ισχύουν για ένα πραγματικό μη ιδανικό αντικείμενο προκύπτουν τρία είδη πηγών ακτινοβολίας, τα οποία διακρίνονται μεταξύ τους από τον τρόπο με τον οποίο ο φασματικός συντελεστής εκπομπής μεταβάλλεται με το μήκος κύματος.

Αυτά τα είδη πηγών ακτινοβολίας είναι το μέλαν σώμα, για το οποίο $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$, το τεφρό σώμα, για το οποίο $\varepsilon_\lambda = \varepsilon =$ σταθερά μικρότερη του 1 και τέλος ο επιλεκτικός ακτινοβολητής, στον οποίο το ε μεταβάλλεται συναρτήσει του μήκους κύματος. Δηλαδή, ο φασματικός συντελεστής εκπομπής, εξαρτάται εξίσου και από το μήκος κύματος και από την ακτινοβολία.



Εικόνα 1.10: Emissivities για τα διάφορα είδη πηγών ακτινοβολίας [Infrared Thermal Imaging Fundamentals, Research and Applications, Vollmer, Mollman]

Στα αδιαφανή υλικά επειδή $\alpha + \rho = 1$ προκύπτει ότι $\varepsilon + \rho = 1$ ενώ για τα πολύ στιλβωμένα υλικά, το ε προσεγγίζει το μηδέν, συνεπώς για ένα πλήρως ανακλαστικό υλικό ή τέλειο καθρέπτη προκύπτει ότι $\rho = 1$.

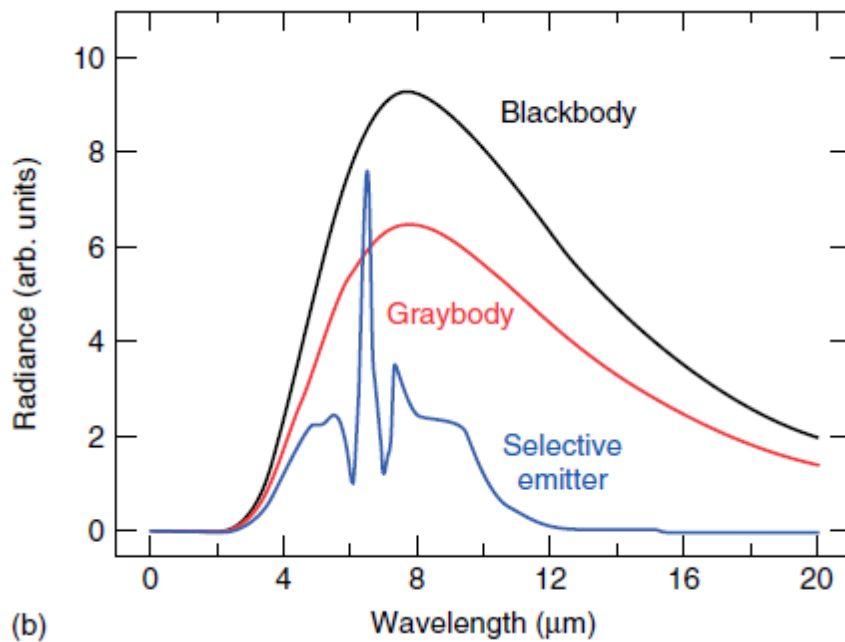
Για έναν ακτινοβολητή που είναι τεφρό σώμα, ο μαθηματικός τύπος των Stefan-Boltzmann τροποποιείται ως εξής:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \text{ (Watt / m}^2\text{)} \quad (1.10)$$

που σημαίνει ότι η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς ενός τεφρού σώματος είναι ίδια με εκείνη ενός μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία, μειωμένη όμως κατά την τιμή ε του τεφρού σώματος.

Ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται πάρα πολύ από την κατάσταση της επιφάνειας. Οι πιο πολλές επιφάνειες μετάλλων έχουν υψηλό συντελεστή εκπομπής, και συνήθως θεωρούνται τεφρές. Η ακτινοβολία από αγωγούς του ηλεκτρισμού, και ιδιαίτερα από στιλβωμένα μέταλλα, διαφέρει σημαντικά. Οι συντελεστές εκπομπής είναι πολύ χαμηλότεροι, και μεταβάλλονται με το μήκος κύματος. Επίσης, η ακτινοβολία που εκπέμπουν δεν είναι διάχυτη, ενώ ανακλούν σύμφωνα με τους νόμους της οπτικής.

Γενικά, οι διάφορες ακαθαρσίες και η οξείδωση, πάντα αυξάνουν το συντελεστή εκπομπής μιας επιφάνειας, αφού μειώνουν την αγωγιμότητα του υλικού. Στην εικόνα 1.11, φαίνεται πως μεταβάλλεται ο φασματικός συντελεστής εκπομπής μέσω ακτινοβολίας για τους τρεις τύπους ακτινοβολητών, το μέλαν σώμα, τον επιλεκτικό ακτινοβολητή και το τεφρό σώμα.



Εικόνα 1.11: Φασματικός συντελεστής εκπομπής μέσω ακτινοβολίας για τους τρεις τύπους ακτινοβολητών

1.5 Υπέρυθρη Θερμογραφία

1.5.1 Εισαγωγικά

Όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία και συνεπώς χάνουν ενέργεια. Εάν μπορούσαμε να απομονώσουμε ένα σώμα στο κενό, αυτό θα συνέχιζε να ακτινοβολεί και να χάνει ενέργεια, μέχρι να πέσει η θερμοκρασία του στο απόλυτο μηδέν. Όμως αφού κάτι τέτοιο δεν μπορεί να γίνει και η απομόνωση δεν είναι δυνατή, κάθε σώμα θερμαίνεται από το περιβάλλον του με έναν από τους τρόπους μετάδοσης θερμότητας, δηλαδή με αγωγή, με συναγωγή ή με ακτινοβολία. Εάν ένα σώμα τοποθετηθεί σε περιβάλλον ίδιας θερμοκρασίας με τη δική του, η θερμοκρασία του δεν πρόκειται να μεταβληθεί, αφού θα δέχεται από το περιβάλλον του ακριβώς όση ενέργεια ακτινοβολεί, σύμφωνα με την αρχή ανταλλαγής του Prevost.

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία ανιχνεύουμε και προσδιορίζουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Πιο συγκεκριμένα, η θερμική απεικόνιση, είναι μια μέθοδος προσδιορισμού της χρονικής εξάρτησης και της χωρικής κατανομής της θερμότητας στα υπό εξέταση αντικείμενα. Το σύστημα που χρησιμοποιείται για την θερμογράφιση, μετασχηματίζει μια υπέρυθρη εικόνα σε μια ορατή εικόνα και η λειτουργία του βασίζεται στο να δημιουργεί μια ορατή εικόνα με μια κατανομή ακτινοβολίας που είναι ανάλογη με την υπέρυθρη κατανομή ακτινοβολίας του αντικειμένου, δηλαδή τη χωρική κατανομή της θερμοκρασίας του $T(Y, z)$ ή την κατανομή του συντελεστή εκπομπής (emissivity) του $\varepsilon(Y, z)$ [4].

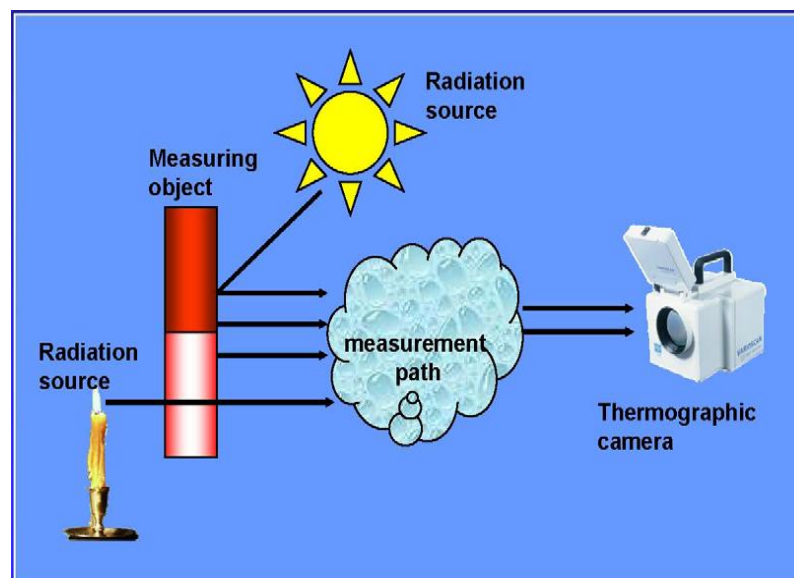
Επομένως, με την θερμογραφία δεν μετράται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας, αλλά η μεταβολή της επιφανειακής της ακτινοβολίας, οπότε οι διάφορες ανωμαλίες στο

υλικό δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία. Στο γεγονός αυτό στηρίζεται και η χρήση της θερμογραφίας για να ανιχνεύει τις ατέλειες στις επιφάνειες των διάφορων υλικών.

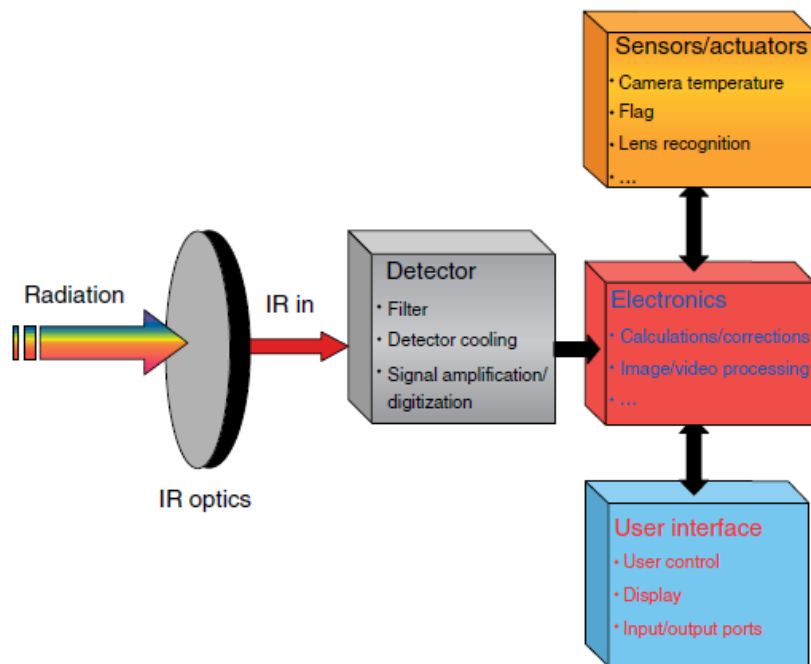
Ένα θερμογραφικό σύστημα ανιχνεύει τα φωτόνια που διαφεύγουν από το αντικείμενο που στοχεύουμε. Φωτόνια απελευθερώνονται από όλο τον όγκο του αντικειμένου, αλλά η πιθανότητα διαφυγής αυξάνεται πιο κοντά στην επιφάνεια, γι' αυτό και συχνά η θερμογραφία αναφέρεται ως επιφανειακό φαινόμενο αν και στη πραγματικότητα είναι ογκομετρικό. Το όργανο που μας επιτρέπει να απεικονίζουμε μια υπέρυθρη εικόνα με χρώματα του ορατού φάσματος ονομάζεται θερμική κάμερα (thermal imager, infrared thermal camera).

Συνοπτικά, η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μία μη καταστρεπτική τεχνική κατά την οποία καταγράφεται η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός υλικού ή ενός σώματος, στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι υπέρυθρες θερμικές κάμερες απεικονίζουν τις αόρατες υπέρυθρες ακτίνες, τις οπτικοποιούν για το ανθρώπινο μάτι και παρέχουν ακριβή ικανότητα εξ αποστάσεως μέτρησης θερμοκρασίας [9].

Η αρχή λειτουργίας της υπέρυθρης θερμογραφίας φαίνεται στην εικόνα 1.12, ενώ στην εικόνα 1.13 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα με τα βασικά στοιχεία μιας θερμοκάμερας.

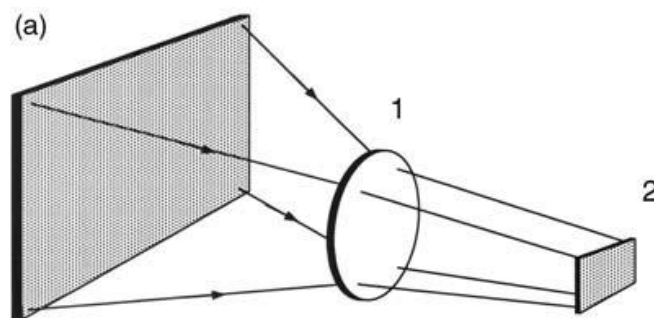


Εικόνα 1.12: Αρχή λειτουργίας θερμοκάμερας



Εικόνα 1.13: Block διάγραμμα των βασικών στοιχείων θερμοκάμερας

Ένα ραδιόμετρο (radiometer) μετατρέπει την ενέργεια που ακτινοβολείται από τα αντικείμενα στην υπέρυθη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, σε ηλεκτρονικό σήμα και τελικά σε ορατή εικόνα. Συγκεκριμένα η θερμική ενέργεια που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο προσλαμβάνεται από τον αισθητήρα, όπου περνά πρώτα απ' τον φακό, το φίλτρο και τελικά καταλήγει σ' έναν υπέρυθρο ανιχνευτή ή σ' έναν εστιακό αισθητήρα σειράς - Focal Plane Array (FPA), οι οποίοι μετατρέπουν την υπέρυθη ακτινοβολία σε ηλεκτρονικό σήμα. Οι αισθητήρες FPA κατασκευάζονται συνδυάζοντας την τεχνολογία της φωτολιθογραφίας και της τεχνικής επεξεργασίας πυριτίου και είναι πιο αποδοτικοί. Αποτελούνται από μία κρυσταλλική μονάδα που περιέχει πολλούς ανιχνευτές.



Εικόνα 1.14: Αρχή λειτουργίας εστιακού αισθητήρα σειράς - Focal Plane Array (FPA)

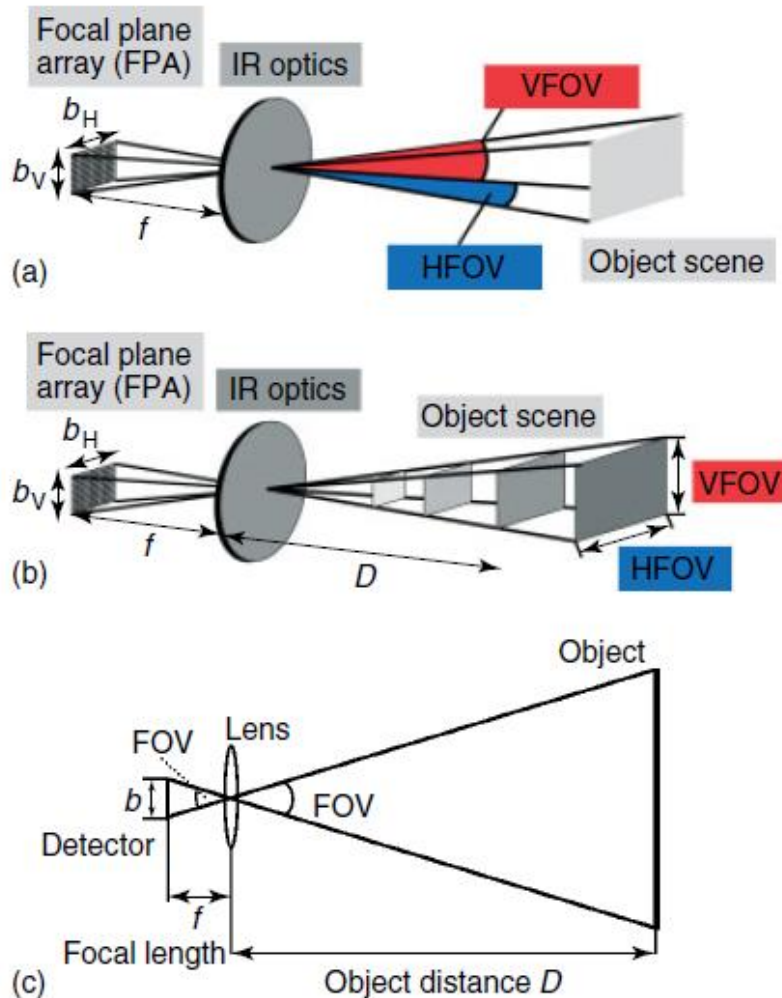
1: φακοί κάμερας, 2: συστοιχία ανιχνευτών

Τα παλαιότερα υπέρυθρα συστήματα, που αποτελούνται από έναν απλό ενιαίο ανιχνευτή, χρησιμοποιούν έναν επιπλέον μηχανισμό scanning και για αυτόν τον λόγο καλούνται συμβατικά υπέρυθρα ραδιόμετρα ανίχνευσης (IR Scanning Radiometer - IRSR). Οι μετρήσεις που γίνονται με τη βοήθεια των φασματικών ραδιομέτρων βασίζονται στον νόμο του Planck, που αναλύσαμε παραπάνω.

Στην πραγματικότητα, οι υπέρυθροι ανιχνευτές εκτελούν μετρήσεις σε δύο διαφορετικές περιοχές της υπέρυθρης ζώνης και όχι σε ολόκληρο το φάσμα υπέρυθρου, δηλαδή στην περιοχή short-wave SW και στην περιοχή long-wave LW. Η επιλογή της κατάλληλης φασματικής ζώνης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που συνδέονται με την επιφάνεια του αντικειμένου και την ατμοσφαιρική απορρόφηση και παρουσιάζει αντίστοιχα πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, μερικές επιφάνειες έχουν υψηλότερη ικανότητα ακτινοβολίας στη περιοχή SW και συνήθως η περιοχή SW μας παρέχει μετρήσεις υψηλότερης ακριβείας για αποστάσεις μεγαλύτερες του ενός μέτρου. Επίσης οι ανιχνευτές στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου είναι πολύ πιο οικονομικοί. Όμως, στην περιοχή LW επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση των θερμογραφικών συστημάτων λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιακών διαφορών που παρουσιάζονται [18].

Πριν φθάσει στον ανιχνευτή, η υπέρυθρη ακτινοβολία περνά μέσα από ειδικά σχεδιασμένους φακούς. Τα υλικά των φακών που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν υψηλή διαπερατότητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται υλικά όπως το γερμάνιο και το πυρίτιο. Ακόμα, οι φακοί πρέπει να επικαλυφθούν με ένα κατάλληλο υλικό για να επιτρέψουν τη μέγιστη δυνατή μετάδοση IR ακτινοβολίας. Η χρήση φίλτρων μας επιτρέπει, επίσης, να βλέπουμε μέσω ειδικών συνθηκών ή να μετράμε τη θερμοκρασία επιφάνειας αντικειμένων όπως το γυαλί, ή το πλαστικό. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι ανάλογα την περίπτωση είτε βαθυπερατά (LP) είτε υψιπερατά (HP).

Ο δείκτης FOV (Field of View) είναι χαρακτηριστικός μιας θερμικής κάμερας και είναι η γωνία υπό την οποία παρατηρείται το αντικείμενο. Διαφέρει ανάλογα με τη γεωμετρία και τους φακούς της κάθε κάμερας [20]. Στην εικόνα 1.15 παρουσιάζονται οι γωνίες FOV για ένα αντικείμενο που βρίσκεται σε απόσταση d από τους φακούς.



Εικόνα 1.15: Γωνίες FOV μιας θερμικής κάμερας ανάλογα με την απόσταση d του αντικειμένου [Infrared Thermal Imaging Fundamentals, Research and Applications, Vollmer, Mollman]

Τα δεδομένα που συλλέγονται μετατρέπονται σε ηλεκτρονικό σήμα από μια μονάδα επεξεργασίας και παρουσιάζονται σε οθόνη ή ακόμα και μεταφέρονται αυτόματα σε υπολογιστή, όπου μπορούν να αποθηκευτούν και να επεξεργαστούν.

Το εύρος των τιμών θερμοκρασίας που μετράει ένα τυπικό θερμογραφικό σύστημα κυμαίνεται περίπου από -20 ως 800 °C, και μπορεί να επεκταθεί μέχρι 1500 °C ή και 2000 °C με τη χρησιμοποίηση ειδικών φίλτρων. Κάθε θερμική κάμερα πρέπει να τίθεται σε διαδικασία calibration δηλαδή βαθμονόμησης από τον κατασκευαστή. Η βαθμονόμηση, είναι μια ειδική διαδικασία που γίνεται από τον κατασκευαστή με τη χρήση μελάνων σωμάτων αναφοράς και προσδιορίζει μέχρι ποια τιμή θερμοκρασίας μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια η θερμοκάμερα. Πέρα από τη θερμοκρασία της βαθμονόμησης, η θερμοκάμερα συνεχίζει να καταγράφει τιμές αλλά με μειωμένη ακρίβεια [10].

1.5.2 Θερμογραφία και emissivity

Ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας που πρέπει να προσέξουμε σε μετρήσεις με θερμική κάμερα είναι ο συντελεστής εκπομπής (emissivity). Επιφάνειες με χαμηλή ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας, λειτουργούν ως καθρέφτες και καθιστούν τις μετρήσεις δύσκολες, αφού οι ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τα θερμά γειτονικά σώματα διαταράσσουν τις μετρήσεις μέσω των ανακλάσεων. Στα μη μεταλλικά αντικείμενα η θερμογράφιση είναι εύκολη λόγω του υψηλού συντελεστή εκπομπής των υλικών. Αντίθετα στα μεταλλικά και γυάλινα αντικείμενα είναι δύσκολη λόγω της χαμηλού και εξαρτώμενου από το μήκος κύματος συντελεστή εκπομπής. Τα μη βαμμένα και μη οξειδωμένα μέταλλα έχουν $\varepsilon < 0,3$, ενώ αντίθετα για τα οξειδωμένα ισχύει ότι $0,5 < \varepsilon < 0,9$ ενώ για τα διηλεκτρικά υλικά ισχύει ότι $0,8 < \varepsilon < 0,95$. Ο πίνακας με τους συντελεστές εκπομπής για κάθε υλικό υπάρχει στο παράρτημα 2 στο τέλος του πρώτου μέρους της παρούσας εργασίας.

Η παράμετρος emissivity όμως δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το κάθε υλικό αλλά θεωρητικά είναι ασταθής και εξαρτάται και από το είδος της επιφάνειας και το σχήμα του εξεταζόμενου υλικού, τη γωνία παρατήρησης και την θερμοκρασία του αντικειμένου. Επομένως, πριν από κάθε θερμογράφιση, πρέπει να γνωρίζουμε το ε ώστε να κάνουμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις στη θερμοκάμερα. Σε περίπτωση που δεν μπορούμε να βρούμε το ε σε κάποιον από τους πίνακες προσδιορισμού συντελεστή εκπομπής ανάλογα με το υλικό, χρησιμοποιούμε την εμπειρική μέθοδο της «μαύρης ταινίας».

Σύμφωνα μ' αυτήν την τεχνική τοποθετούμε μια μαύρη ταινία στην επιφάνεια του σώματος που μας ενδιαφέρει και μετράμε με τη θερμοκάμερα τη θερμοκρασία της, όπου γνωρίζουμε ότι το $\varepsilon=1$ σύμφωνα με τον ορισμό για το μέλαν σώμα. Έπειτα εστιάζουμε με τη θερμοκάμερα στην ακάλυπτη περιοχή πάνω στην επιφάνεια του σώματος και αλλάζουμε το συντελεστή εκπομπής στο όργανο μας, μέχρι αυτό να μας δείξει την ίδια θερμοκρασία που μετρήσαμε και στην ταινία. Ο συντελεστής εκπομπής ε , που προκύπτει για την ίδια θερμοκρασία T που βρήκαμε στη μαύρη ταινία, είναι και ο ζητούμενος δείκτης emissivity του σώματος [10].

Υπάρχουν και άλλες πειραματικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του δείκτη emissivity όπως είναι η χρήση θερμοζεύγους, όπου θα πρέπει να βρεθεί η θερμοκρασία με το θερμοζεύγος σε επαφή και στη συνέχεια να ρυθμιστεί το ε στην θερμοκάμερα ώστε να προκύψει η ίδια θερμοκρασία. Άλλη μέθοδος για να βρούμε το συντελεστή εκπομπής, είναι η χρήση κάποιας ουσίας με γνωστό δείκτη ε σαν μογιά, όπου εφαρμόζουμε ξανά την ίδια διαδικασία που εξηγήθηκε με την μαύρη ταινία.

1.5.3 Πεδία εφαρμογής της υπέρυθρης θερμογραφίας

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι ένα πολύτιμο εργαλείο με πολλαπλές εφαρμογές, όπου μπορούμε μετρώντας από απόσταση τη θερμοκρασία να εντοπίσουμε προβληματικές περιπτώσεις ή περιπτώσεις που χρίζουν περισσότερης μελέτης εκεί που παρουσιάζεται θερμοκρασιακή διαφορά και απόκλιση από τις επιθυμητές ή προβλεπόμενες τιμές. Αποτελεί την κυριότερη και αποτελεσματικότερη μέθοδο μη καταστρεπτικού ελέγχου και αυτό είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της. Ακολουθούν κάποια από τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής της.

Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας- ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου (non-destructive evaluation) και προληπτικής συντήρησης (predictive maintenance) για όλες τις ηλεκτρικές και μηχανολογικές εγκαταστάσεις, αφού οι θερμικές κάμερες εντοπίζουν, μετρούν και απεικονίζουν τις κατανομές θερμότητας που αναπτύσσονται στα ηλεκτρικά και μηχανολογικά συστήματα ανιχνεύοντας σφάλματα και πιθανά σημεία αστοχίας.

Ο έλεγχος με τη θερμοκάμερα στα καλώδια, τους ζυγούς και τις συνδέσεις τους, τα συστήματα διανομής, τους μετασχηματιστές, τις μηχανές, τους αποζεύκτες και τις ασφάλειες γίνεται αναζητώντας και ελέγχοντας τα θερμά σημεία (hot spots) ή τις δυσαναλογίες θερμότητας που εμφανίζουν στην επιφάνειά τους. Έτσι έχουμε την δυνατότητα να προσδιορίσουμε μη ισορροπημένα φορτία και υψηλά ρεύματα, να ανιχνεύσουμε κακές συνδέσεις, υπερφορτίσεις, καθώς επίσης και να εντοπίσουμε αστοχίες υλικών, ρωγμές στην επιφάνεια και ατέλειες στην μόνωση.

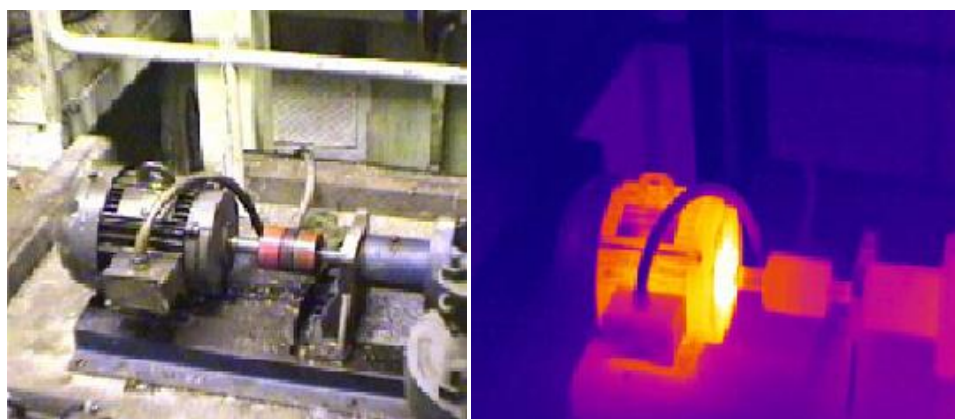
Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι ένας άριστος δείκτης των συνθηκών λειτουργίας, οπότε και της αξιοπιστίας και της μακροζωίας ενός ηλεκτρικού συστήματος. Κάθε τμήμα του εξοπλισμού πριν υποστεί βλάβη, παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενη θερμοκρασία που μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για πρόωρη ανίχνευση σφάλματος και διορθωτικές ενέργειες (preventive maintenance), πριν το τελικό στάδιο της βλάβης και την ολοκληρωτική καταστροφή του εξοπλισμού. Συνήθως παράγοντες που οδηγούν στην υποβάθμιση εξοπλισμού και στην πρόκληση σφαλμάτων είναι η διακύμανση των φορτίων και κυρίως τα υψηλά φορτία, οι δονήσεις, η καταπόνηση των μετάλλων και η παλαιότητα των υλικών. Ακόμα, οι ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και θερμοκρασίες, ο αέρας, οι χημικές ουσίες και οι ρύποι στην ατμόσφαιρα προκαλούν βλάβες όπως πχ η διάτρηση μονωτήρων. Χρησιμοποιώντας την υπέρυθρη θερμογραφία μπορούμε επομένως να διορθώσουμε σφάλματα, ώστε να προλάβουμε την καταστροφή του εξοπλισμού, που οδηγεί σε τεράστια οικονομικά έξοδα για αγορά νέου και μεγάλες ποσότητες απωλειών ενέργειας λόγω συντήρησης όταν το σύστημα θα είναι εκτός λειτουργίας.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των υπέρυθρων, είναι ότι οι μετρήσεις για προληπτικό έλεγχο και συντήρηση πραγματοποιούνται, ενώ ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός είναι υπό φορτίο, δηλαδή σε πλήρη λειτουργία, χωρίς η κάμερα υπέρυθρων να έλθει σε επαφή με τον εξοπλισμό και να προκληθεί κάποια ζημιά στο ανθρώπινο δυναμικό. Μπορούμε λοιπόν, εύκολα, άμεσα και από απόσταση, να ελέγξουμε τμηματικά όλο τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό υπό φορτίο και να εντοπίσουμε τα σημεία του εξοπλισμού που υπάρχει πιθανότητα μελλοντικής βλάβης και για αυτά θα ληφθούν οι κατάλληλες ενέργειες. Επομένως, όταν εφαρμόζεται σε τακτική βάση, η υπέρυθρη θερμογραφία αποτρέπει διακοπές υψηλού κόστους, μειώνει το κόστος συντήρησης και αυξάνει την αξιοπιστία [17].

Στις επόμενες εικόνες 1.16 και 1.17 απεικονίζονται η κανονική και η υπέρυθρη φωτογραφία αντίστοιχα, ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Περισσότερα παραδείγματα υπέρυθρων φωτογραφιών σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό υψηλής τάσης, αναφέρονται στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 1.16: Κανονική και θερμική φωτογραφία στατικών επαφών



Εικόνα 1.17: Κανονική και θερμική φωτογραφία κινητήρα

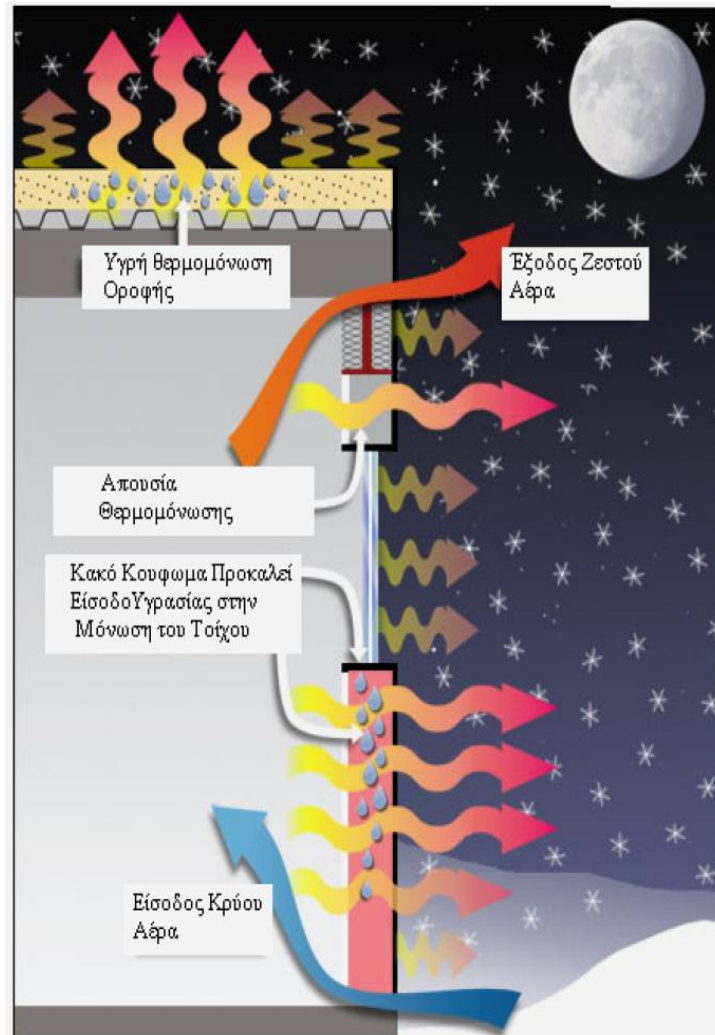
Κτιριακές εγκαταστάσεις

Η θερμογραφία χρησιμοποιείται επίσης στην μελέτη των κατασκευών και των κτιριακών εγκαταστάσεων και βοηθά στον εντοπισμό θερμικών γεφυρών κακής μόνωσης, διαφυγών θερμού αέρα μέσα από την κατασκευή και κενών ή ρωγμών σε επιφάνειες. Επίσης συμβάλει στην ανίχνευση υγρασίας και διαρροής νερού και σημείων πιθανής ανάπτυξης μούχλας μέσα στους τοίχους και ειδικά σε στέγες σπιτιών ή βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Χρησιμοποιείται από μηχανικούς για να προσδιορίσουν την ευστάθεια του τσιμέντου και των στρωμάτων του σε κατασκευές όπως γέφυρες ή σε περιπτώσεις που πίσω από μια ενιαία επιφάνεια υπάρχουν διαφορετικά υλικά (π.χ. ξύλο, πέτρα ή σκυρόδεμα κάτω από μία ενιαία επιχρισμένη επιφάνεια).

Ακόμη, καταλυτική είναι η χρησιμοποίηση της υπέρυθρης θερμογραφίας στην θερμική επιθεώρηση των κτιριακών εγκαταστάσεων προσδιορίζοντας την θερμική κατάστασή τους, τις διαρροές αέρα, κατεστραμμένες μονώσεις και υγρασία οπότε τελικά τις απώλειες θερμότητας και ενέργειας. Μας δίνει τη δυνατότητα να επισκευάσουμε το πρόβλημα πριν να επεκταθεί και να μελετήσουμε τη θερμική θωράκιση των κτιρίων. Τα προβλήματα θερμομόνωσης οφείλονται, κυρίως, σε μικρά κενά στις ενώσεις των κατασκευαστικών μελών μεταξύ τους. Οι ατέλειες στη θερμομόνωση και την αεροστεγανότητα ενός κτιρίου δε συνεπάγονται απλώς αυξημένες δαπάνες θέρμανσης και συντήρησης, αλλά επιπλέον

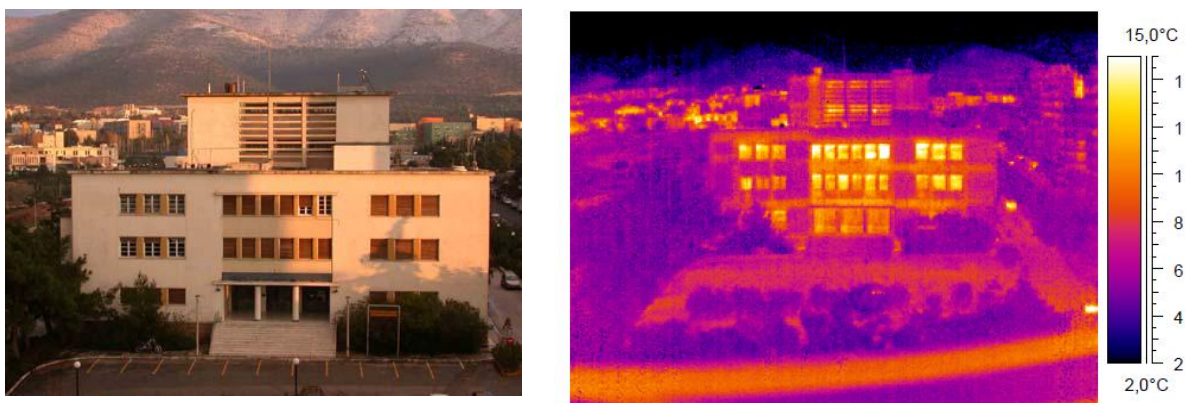
δημιουργούν κακές συνθήκες διαβίωσης στους εσωτερικούς χώρους, οπότε πρέπει να γίνει κάθε δυνατή προσπάθεια για επιδιόρθωση.

Στο επόμενο σχήμα, παρουσιάζεται μια σχηματική παράσταση του μηχανισμού απώλειας θερμότητας. Μόνο η υπέρυθρη θερμογραφία έχει την ικανότητα να εντοπίζει άμεσα τις περιοχές από τις οποίες διαφεύγει η θερμότητα, γι αυτό άλλωστε είναι και τόσο σημαντική [12,5].



Εικόνα 1.18: Μηχανισμός απώλειας θερμότητας σε ένα κτίριο

Τέλος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα ένα απλό παράδειγμα θερμογράφησης κτιρίου και συγκεκριμένα, το κτίριο υδραυλικής του Ε.Μ.Π.



Εικόνα 1.19: Όψη του κτηρίου Υδραυλικής του Ε.Μ.Π. και θερμογράφημα του κτηρίου Υδραυλικής

Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Η χρήση θερμογραφίας σε περιβαλλοντικές επιθεωρήσεις, συντελεί στον εντοπισμό των περιοχών ταφής αποβλήτων. Χρησιμεύει επίσης στη θερμική καταγραφή θαλάσσιας μόλυνσης από υδρογονάνθρακες, της μόλυνσης των ποταμών (π.χ. από θερμά πυρηνικά απόβλητα υγρής μορφής) και της παράκτιας μόλυνσης. Μπορεί να εντοπίσει και την ρύπανση των χωματερών και των βιομηχανικών και αστικών περιοχών, αλλά και τις διαρροές πετρελαίου σε εργοστάσια και πλοία.

Πετροχημικές εφαρμογές

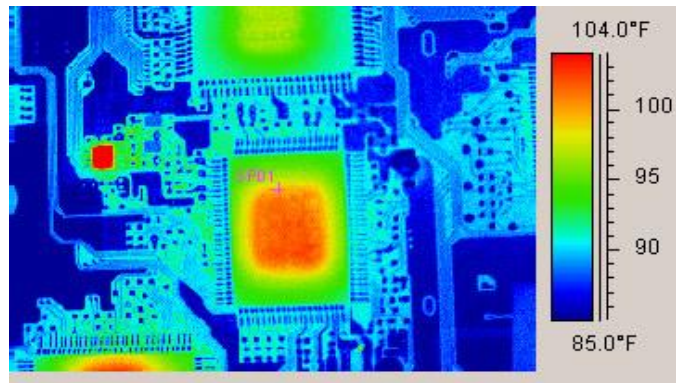
Η υπέρυθη θερμογραφία εφαρμόζεται και στα διυλιστήρια. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται για την αξιολόγηση των εγκαταστάσεων, τον εντοπισμό των απωλειών μόνωσης των καυστήρων και την ανίχνευση διαρροών. Με θερμικές κάμερες ελέγχονται ακόμα και οι σωλήνες, αλλά και η απόδοση των εναλλακτών θερμότητας.



Εικόνα 1.20: Θερμική απεικόνιση σε διυλιστήρια

Εφαρμογές ηλεκτρονικών

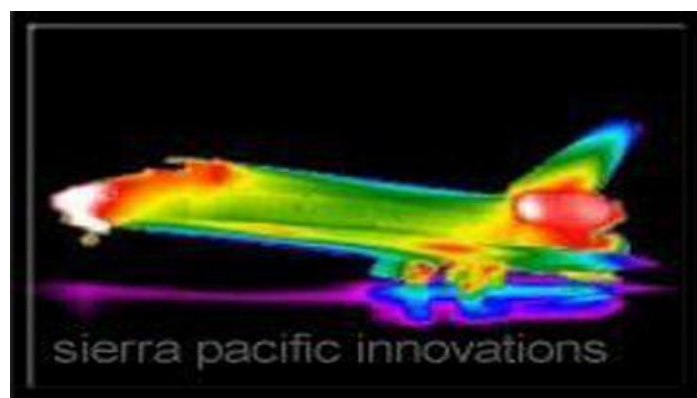
Η θερμογραφία χρησιμοποιείται και σε εφαρμογές ηλεκτρονικής και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Βοηθά στην ηλεκτρική και θερμική επιθεώρηση των συγκολλήσεων και των ενώσεων των διάφορων στοιχείων πάνω σε ένα κύκλωμα, την αξιολόγησή τους και την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Επίσης χρησιμοποιείται για τη θερμική χαρτογράφηση των ημιαγωγών.



Εικόνα 1.21: Θερμογράφιση ολοκληρωμένου κυκλώματος

Αεροδιαστημικές εφαρμογές

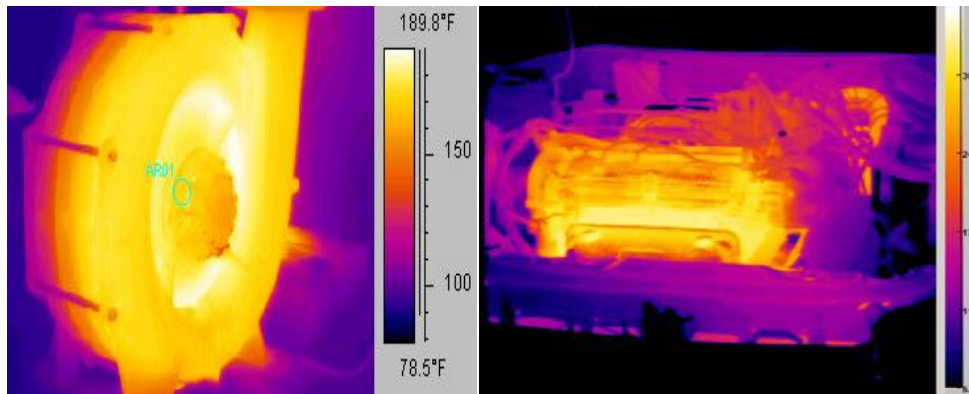
Η θερμογραφία στα αεροσκάφη χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σημείων εισροής νερού ή αέρα στην καμπίνα του αεροσκάφους καθώς και πιθανών ρωγμών και διαβρώσεων ή ατελειών στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνειά του. Χρησιμοποιείται, επίσης, στην επιθεώρηση της μηχανής, των φτερών, των ελαστικών, των φρένων και άλλων μηχανολογικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.



Εικόνα 1.22: Θερμογράφιση Αεροσκάφους

Σε αυτοκινητοβιομηχανίες

Πιθανό πεδίο εφαρμογής είναι αντίστοιχα και οι αυτοκινητοβιομηχανίες, όπου ελέγχεται η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα ελαστικά και τις αναρτήσεις. Ελέγχονται ακόμη και τα φρένα και οι κινητήρες.



Εικόνα 1.23: Θερμική απεικόνιση κινητήρα αυτοκινήτου

Διαστημική τεχνολογία

Η θερμογραφία χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλη κλίμακα και στη διαστημική τεχνολογία, όπου δορυφόροι καταγράφουν και επεξεργάζονται την εκπεμπόμενη και την ανακλώμενη υπέρυθη ακτινοβολία από πλανήτες, γαλαξίες, κομήτες και δίνουν ακριβείς εικόνες από την επιφάνειά τους.

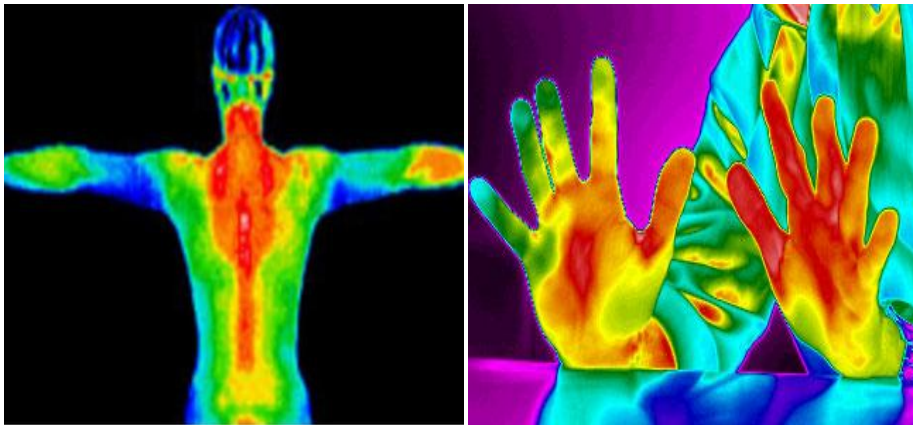
Γεωργία/Γεωπονία

Μια θερμική κάμερα μπορεί να παρέχει πολυδιάστατη γνώση για τη διαδικασία της δημιουργίας και εξάπλωσης πάγου στον πυρήνα των καρπών ή των λουλουδιών, των καρποφόρων δέντρων και άλλων ευαίσθητων στο πάγο φυτών. Μπορεί να αξιοποιηθεί με αυτόν τον τρόπο στην ανάπτυξη τεχνικών προστασίας των φυτών. Επίσης χρησιμοποιείται στην γεωργία, στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας των φυτών και της ωριμότητας των φρούτων και στην ανίχνευση παθογόνων ασθενειών [19].

Ιατρικές εφαρμογές

Η μελέτη της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της υγείας των ασθενών. Γι αυτό και η θερμογραφία αποτελεί μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες διαγνωστικές μεθόδους στην ιατρική, επιτρέποντας στον γιατρό να δει τις θερμικές ενδείξεις της ασθένειας στην επιφάνεια του δέρματος του ασθενή, με σκοπό την έγκαιρη και έγκυρη διάγνωση ενός ευρέως φάσματος ασθενειών πριν να εμφανισθούν σοβαρότερα και μη αντιστρέψιμα προβλήματα. Το κυριότερο από τα θετικά στοιχεία της θερμογραφίας είναι το γεγονός ότι είναι τελείως ανώδυνη, δεν προκαλεί καθόλου δυσφορία και δεν δυσκολεύει τον ασθενή.

Πιο απλό πρόσφατο παράδειγμα που βασίζοταν απλά στην μέτρηση της θερμοκρασίας, αποτέλεσε η τοποθέτηση θερμικών καμερών στα αεροδρόμια για την εξακρίβωση των εμπύρετων ασθενών της γρίπης H1N1. Η θερμογραφία σαν μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του καρκίνου του μαστού, αναπνευστικών ασθενειών, της αρθρίτιδας, προβλημάτων του θυρεοειδούς αδένος, των ωτών, του λάρυγγα και της ρινικής κοιλότητας και του δέρματος. Εφαρμόζεται, επίσης, για τον εντοπισμό και την εκτίμηση τραυματισμών αθλητών και για την αποθεραπεία τους, όπως επίσης και στην οδοντιατρική. Συμπερασματικά, η θερμογραφία επιβεβαιώνει την ακριβή τοποθεσία της πάθησης, αναγνωρίζει τις αλλαγές και είναι εντελώς ανώδυνη, αφού, στηρίζεται μόνο στην θερμική ένδειξη της ασθένειας και είναι μη επεμβατική.



Εικόνα 1.24: Θερμογραφικές απεικονίσεις ανθρώπινου σώματος

Συντήρηση πολιτιστικής κληρονομιάς- Ιστορικών κτιρίων

Οι μη καταστροφικές μέθοδοι αποτίμησης με υπέρυθρες χρησιμοποιούνται και στον τομέα συντήρησης πολιτιστικής κληρονομιάς σε κατασκευές σκυροδέματος ή λιθοσωμάτων.

Σε περίπτωση ιστορικού κτιρίου σε αντίθεση με τα άλλα κτίρια οι θερμικές ιδιότητες των υλικών είναι πολύ διαφορετικές και ο χρόνος της θέρμανσης είναι πολύ μεγαλύτερος. Επιπλέον τα υλικά που βρίσκονται στους ιστορικούς τοίχους είναι πολύ διαφορετικά μεταξύ τους. Γι αυτό και κατά την συντήρηση, αποκατάσταση και καθαρισμό των ιστορικών κτιρίων, με την θερμογραφία μελετούνται φυσικοχημικά τα υλικά και οι δομές τους και διευκολύνονται επεξεργασίες όπως ο καθαρισμός των πετρών και η σταθεροποίησή τους, επισκευές με κονιάματα, αποκάλυψη και συντήρηση μωσαϊκών.

Η θερμογραφία επομένως, είναι ένα αναγκαίο όργανο για την μελέτη και την αποκατάσταση αυτών των κτιρίων γιατί μας δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τα υλικά και τις τεχνικές που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για την προστασία τους [13,15].

1.5.4 Τεχνικές Θερμογράφισης

Η υπέρυθη θερμογραφία χωρίζεται γενικά σε δύο τεχνικές, την ενεργητική και την παθητική. Η παθητική θερμογραφία εξετάζει τα υλικά και τις δομές, που σε φυσιολογικές συνθήκες παρουσιάζουν διαφορετική θερμοκρασία από το περιβάλλον. Όμως, στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογράφισης, ένα εξωτερικό ερέθισμα είναι απαραίτητο για να προκαλέσει τις σχετικές θερμικές διαφορές που ανιχνεύει η θερμοκάμερα.

Επομένως στην τεχνική της παθητικής θερμογραφίας, που είναι και η απλούστερη και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη, καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθη ακτινοβολία, χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται στο πλήθος των εφαρμογών που αναλύσαμε προηγουμένως. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, εντοπίζονται ασυνήθιστες θερμοκρασίες σε σχέση με το περιβάλλον σαν θερμοκρασία αναφοράς και απεικονίζονται τα πιο θερμά σημεία, που χρειάζονται περισσότερη και διεξοδικότερη μελέτη.

Η ενεργητική θερμογραφία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η παθητική θερμογράφιση είναι αδύνατη και σε αυτήν απαιτείται ένα εξωτερικό ερέθισμα για να παράγει τις σχετικές διαφορές θερμοκρασίας. Ανάλογα με αυτό το ερέθισμα έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, όπως η θερμογραφία παλμού (PT), η θερμογραφία βηματικής θέρμανσης (SH), η θερμογραφία ασφαλείας (LT), και η θερμογραφία ταλαντώσεων (VT). Γνωστά χαρακτηριστικά αυτού του εξωτερικού ερεθίσματος επιτρέπουν τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ατέλειας, όπως για παράδειγμα την ανίχνευση του βάθους μιας ρωγμής [11].

1.5.5 Πλεονεκτήματα Υπέρυθρης θερμογραφίας

Κάθε τεχνική προληπτικού ελέγχου έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Στην περίπτωση της υπέρυθρης θερμογραφίας, τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει συνοπτικά είναι:

- Η γρήγορη και μη καταστροφική επιθεώρηση μεγάλων επιφανειών
- Η επιθεώρηση χωρίς επαφή και χωρίς ανάγκη διακοπής της εργασίας ή της λειτουργίας του προς μέτρηση συστήματος ή διάταξης
- Η ασφάλεια του προσωπικού
- Το γεγονός ότι τα αποτελέσματα είναι σχετικά εύκολο να μελετηθούν, δεδομένου ότι οι υπέρυθρες εικόνες μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία με υπολογιστή για να εξαχθούν περισσότερες πληροφορίες. Ακόμη και σε περίπτωση που μια φωτογραφία λήφθηκε με λάθος δεδομένα, μπορεί να τροποποιηθεί στον υπολογιστή με κατάλληλα προγράμματα (πχ να αλλάξουμε το δείκτη emissivity ή την θερμοκρασία περιβάλλοντος)
- Οι πολλαπλές και διαφορετικές εφαρμογές της
- Σημαντικό πλεονέκτημα, τέλος είναι το ότι ουσιαστικά προβλέπει τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, αφού εντοπίζει τις ενδεχόμενες μελλοντικές βλάβες και προβλήματα

Βέβαια εκτός από τις θετικές πλευρές της υπέρυθρης θερμογραφίας, παρουσιάζονται και μερικά μειονεκτήματα όπως :

- Η επίδραση των θερμικών, εκ μεταφοράς και ακτινοβολίας απωλειών συνήθως προκαλούν ψεύτικες μεταβολές θερμοκρασίας και έχουν επιπτώσεις στην αξιοπιστία της μέτρησης
- Το υψηλό κόστος του θερμογραφικού εξοπλισμού
- Η δυνατότητα επιθεώρησης ενός περιορισμένου πάχους υλικού κάτω από την επιφάνεια, άρα το γεγονός ότι μόνο τα επιφανειακά αποτελέσματα είναι αξιόπιστα
- Οι λάθος εκτιμήσεις σε περίπτωση άπειρου προσωπικού, γιατί αντί για θερμά σημεία εντοπίζονται ανακλάσεις από τον ήλιο ή χρησιμοποιούνται λανθασμένες γωνίες θερμογράφησης, οπότε τα αποτελέσματα δεν δείχνουν σφάλματα ή δείχνουν σφάλματα που δεν υπάρχουν
- Πολλές φορές υπάρχει πρόβλημα που αφορά την αδυναμία ή και δυσκολία προσδιορισμού του συντελεστή emissivity [11]. Όταν επίσης μελετούνται εξοπλισμοί ή αντικείμενα που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά, τα δεδομένα είναι εσφαλμένα όταν τοποθετείται ο ίδιος δείκτης emissivity που αφορά ένα μόνο υλικό

1.5.6 Κριτήρια επιλογής θερμικής κάμερας

Φαίνεται επομένως, ότι οι θερμικές κάμερες είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο με πολλαπλές εφαρμογές. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλές εταιρίες που παράγουν διαφορετικού τύπου θερμικές κάμερες που εξυπηρετούν διαφορετικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται.

Καθώς αυξάνεται η αναγκαιότητα για μη καταστροφικό και προληπτικό έλεγχο σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, αυξάνονται και οι δυνατότητες που παρέχουν οι θερμικές κάμερες που χρησιμοποιούνται για αυτό τον σκοπό.

Τα σημαντικότερα κριτήρια που πρέπει να προσέξουμε για την επιλογή του καταλληλότερου θερμογραφικού συστήματος, είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

Φορητότητα

Σε πολλές περιπτώσεις, η φορητότητα και το βάρος της κάμερας είναι πολύ σημαντικά, ανάλογα με την εφαρμογή και το μέρος που γίνεται η θερμική επιθεώρηση. Για παράδειγμα όταν μελετάται ο εξοπλισμός υψηλών τάσεων σε εγκαταστάσεις ή σε εργοστάσια το μέγεθος της κάμερας πρέπει να είναι μικρό ώστε να υπάρχει η απαραίτητη ασφάλεια.

Ευχρηστία

Είναι πολύ σημαντικό η κάμερα να είναι εύκολη στη χρήση και να διαθέτει το αντίστοιχο λογισμικό επεξεργασίας των θερμικών εικόνων. Με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα παρουσιάζουν τις λιγότερες αποκλίσεις από την πραγματικότητα, αφού μειώνεται η πιθανότητα λάθους.

Ποιότητα κάμερας

Παράγοντες όπως η δυνατότητα μέτρησης μεγαλύτερου εύρους θερμοκρασιών και μέτρησης με διάφορα εργαλεία όπως μέτρηση σε σημείο (cross), μέτρηση σε ευρύτερη περιοχή (box), ή μέτρηση πάνω ή κάτω από κάποιο συγκεκριμένο όριο (isotherm) είναι επίσης σημαντικοί και προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος δυνατοτήτων στη θερμική κάμερα.

Απομακρυσμένος Έλεγχος

Ανάλογα με την εφαρμογή, αν η θερμοκρασία της εξωτερικής περιοχής στην οποία επιθυμείται η μέτρηση είναι πολύ θερμή, είναι σημαντικό να υπάρχει η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου (remote controlling).

Αυτονομία

Επίσης ένας παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί πριν την επιλογή μιας θερμικής κάμερας, είναι η αυτονομία που αυτή παρέχει. Ειδικά όταν οι μετρήσεις γίνονται σε εξωτερικό χώρο χρειάζεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια τροφοδότησης από μπαταρίες καθώς η παροχή ρεύματος από το δίκτυο είναι δύσκολη.

Τιμή

Φυσικά σημαντικό κριτήριο είναι και η τιμή του θερμογραφικού οργάνου, ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται, αφού συνήθως το κόστος μιας θερμικής κάμερας είναι αρκετά υψηλό.

2. ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΠΑΦΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές επαφές είναι οι σύνδεσμοι μεταξύ των ρευματοφόρων μερών στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και διακρίνονται στις στατικές ηλεκτρικές επαφές (stationary electrical contacts) και τις ηλεκτρικές επαφές που έχουν ισχύ διακοπής (switching electrical contacts). Γενικότερα, σαν ηλεκτρική επαφή ορίζεται μία λυόμενη σύνδεση δύο αγωγών που έχει τη δυνατότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι στατικές ηλεκτρικές επαφές δεν έχουν ισχύ διακοπής, που σημαίνει ότι ο χειρισμός τους γίνεται μόνο όταν το κύκλωμα τεθεί εκτός τάσης. Παραδείγματα στατικών ηλεκτρικών επαφών αποτελούν οι ηλεκτρικές επαφές σε αποζεύκτες, γειωτές και ασφαλειοθήκες. Επίσης σαν στατικές επαφές, μπορούν να θεωρηθούν και οι διακόπτες που έχουν ισχύ διακοπής, μόνο όμως όταν βρίσκονται στην στατική τους κατάσταση. Λόγω της αδυναμίας σβέσης ηλεκτρικών τόξων, απαγορεύεται αυστηρά ο χειρισμός των στατικών επαφών υπό τάση.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας ηλεκτρικών επαφών είναι η μέγιστη επιτρεπτή ένταση ρεύματος που τις διαρρέει. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της στατικής μεταλλικής επαφής αλλά και η γεωμετρία της εξαρτώνται από αυτό το μέγιστο ρεύμα. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές ισχύος χρησιμοποιούνται κυρίως υλικά όπως το αλουμίνιο ή ο αποξειδωμένος χαλκός, ή και διάφορα κράματα τους, ενώ για ασθενή ρεύματα χρησιμοποιούνται ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις όπως η επινικέλωση, η επαργύρωση και η επιπλάτινωση. Στις υψηλές τάσεις χρησιμοποιούνται κυρίως ειδικά κράματα χαλκού με μικρές ποσότητες δύστηκτων μετάλλων όπως για παράδειγμα είναι το βολφράμιο ή το τιτάνιο.

Αντίθετα οι επαφές που έχουν ισχύ διακοπής, χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα τους να διακόπτουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να επηρεάζονται από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά το χειρισμό του φορτίου, όπως για παράδειγμα οι επαφές των διακοπών ισχύος και των διακοπών φορτίου. Ανάλογα με τον τρόπο σβέσης του δημιουργούμενου τόξου οι διακόπτες κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες όπως οι αεροδιακόπτες, οι διακόπτες ελαίου και οι διακόπτες κενού. Οι διακόπτες ελαίου χρησιμοποιούν μονωτικά έλαια και οι διακόπτες κενού λειτουργούν σε περιβάλλον κενού. Στις υψηλές και υπερυψηλές τάσεις χρησιμοποιούνται διακόπτες GIS που λειτουργούν με το αέριο μονωτικό SF₆ [21].

2.2 Στατικές επαφές

Σε μια στατική επαφή, η δύναμη η οποία συγκρατεί τα δύο μέρη της επαφής μεταξύ τους καλείται δύναμη σύσφιξης των επαφών F . Οι περιοχές των συνδέσμων που φέρουν το φορτίο σύσφιξης και που μπορούν να παραμορφωθούν πλαστικά ή ελαστικά εξαιτίας των δυνάμεων σύσφιξης ορίζουν την επιφάνεια σύσφιξης A_b . Η διέλευση του ρεύματος δεν γίνεται υποχρεωτικά μέσα από την επιφάνεια σύσφιξης αλλά μέσω μιας μικρότερης επιφάνειας A_c , που λόγω επικαθίσεων των οξειδίων των μετάλλων και σκόνης είναι μικρότερη από την A_b .

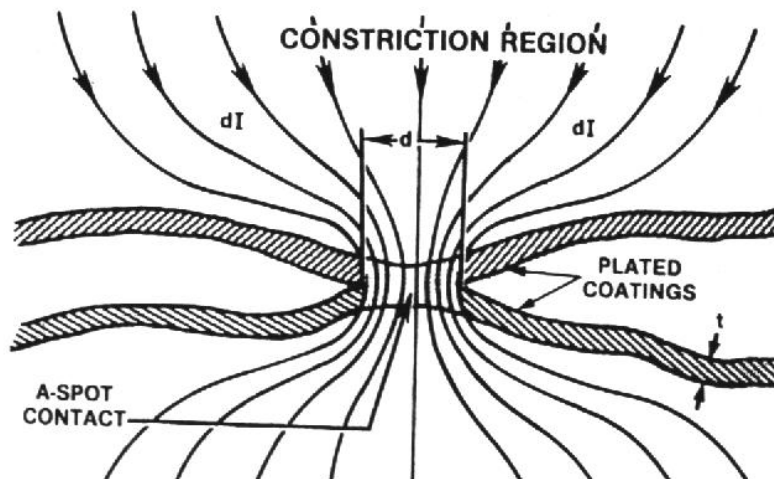
Επομένως, το ρεύμα άγεται μόνο μέσω της πραγματικής επιφάνειας επαφής που συμβολίζεται με A_c .

$$\text{Ισχύει ότι } A_c < A_b \quad (2.1)$$

Η επιφάνεια που καθορίζεται από μακροσκοπική οπτική παρατήρηση και περιλαμβάνει τις ιδανικά επαπτόμενες περιοχές, τις περιοχές από τα παράγωγα οξείδια μετάλλου και καύσης υδρογονανθράκων και τις κοιλότητες της διεπιφάνειας, είναι σαφώς μεγαλύτερη και συμβολίζεται ως A_a . Αυτή η επιφάνεια αποτελεί τη φαινόμενη διατομή της επαφής.

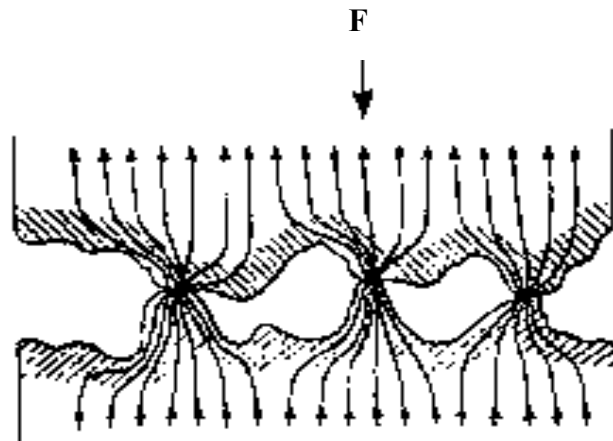
$$\text{Ισχύει επομένως ότι } A_c < A_b < A_a \quad (2.2)$$

Οι αγώγιμες περιοχές επαφής ονομάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία a-spots και φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



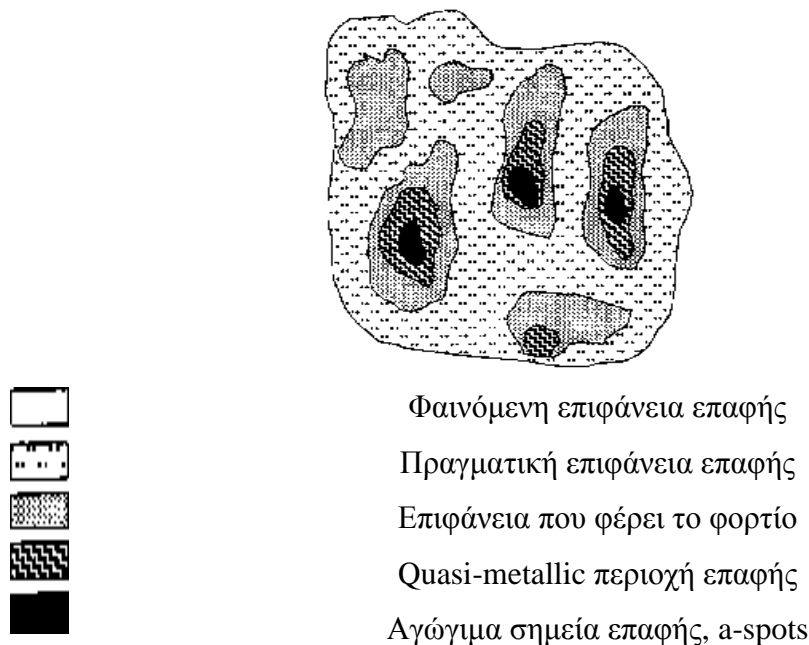
Εικόνα 2.1: Σχηματική παράσταση σημείων επαφής (a-spot) μεταξύ επιφανειών

Στην εικόνα 2.2 φαίνεται η δύναμη σύσφιξης των επαφών δύο επιφανειών, το ρεύμα που διαρρέει τις επαφές όπως επίσης και η πραγματική επιφάνεια επαφής.



Εικόνα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα στατικής επαφής [Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology]

Στην εικόνα 2.3 φαίνονται οι διάφορες περιοχές επιφανειών που χαρακτηρίζουν μια διεπιφάνεια μετάλλων που μεταφέρει ηλεκτρικά φορτία.



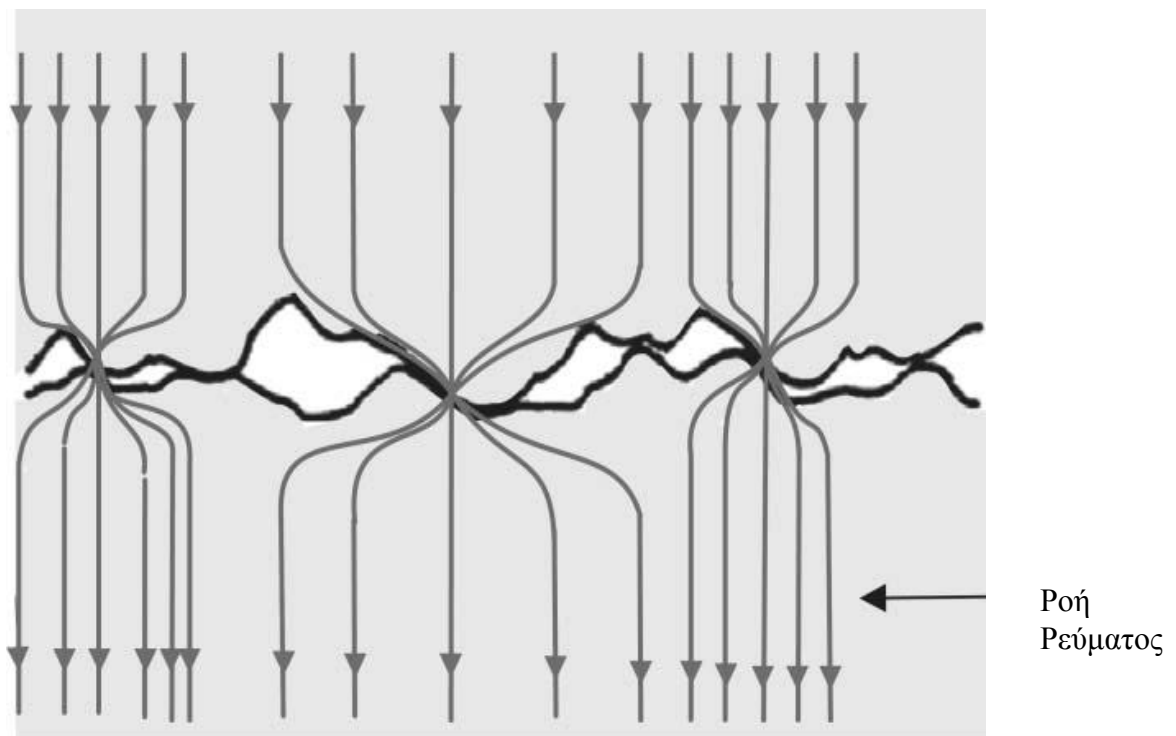
Εικόνα 2.3: Περιοχές επιφανειών σε μια ηλεκτρική επαφή [Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology]

Σαν αντίσταση διάβασης, χαρακτηρίζεται η ηλεκτρική αντίσταση που παρουσιάζει μία επαφή κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αντίσταση διάβασης R περιλαμβάνει την αντίσταση στένωσης R_c , (constriction resistance) και την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων στις επαφές R_f . Η αντίσταση στένωσης R_c , είναι αποτέλεσμα της εξαναγκασμένης ροής του ηλεκτρικού ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο και η αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων σχετίζεται με τη δυσκολία των ηλεκτρικών φορέων να διαπεράσουν το στρώμα αυτό. Για την διευκόλυνση της διάβασης του ρεύματος πρέπει να μειωθεί η αντίσταση διάβασης, της οποίας η τιμή επηρεάζεται από το είδος των

υλικών, τη δύναμη σύσφιξης των επαφών και τη γεωμετρία του λυομένου συνδέσμου. Επίσης την αντίσταση διάβασης επηρεάζει και η ικανότητα απαγωγής της θερμότητας Joule από ξένες επικαθίσεις όπως είναι τα οξείδια, οι οργανικές ουσίες και η σκόνη.

Κατά την κατασκευή των στατικών ηλεκτρικών επαφών, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των δοκιμών υπερθέρμανσης, μηχανικής αντοχής και δοκιμής στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Επομένως τα υλικά κατασκευής αλλά και η γεωμετρία των επαφών, μελετούνται διεξοδικά.

Η ακριβής διατύπωση μιας μαθηματικής σχέσης που να συνδέει τη δύναμη σύσφιξης και την αντίσταση διάβασης σε μία επαφή είναι δύσκολη, επειδή οι διάφορες επικαθίσεις επηρεάζουν την πραγματική επιφάνεια A_c . Επίσης, μια μικρή αύξηση της δύναμης σύσφιξης F , αυξάνει την επιφάνεια σύσφιξης A_b οπότε και την πραγματική επιφάνεια A_c , άρα μειώνει την αντίσταση διάβασης. Επομένως γενικά, η ολική αντίσταση της επαφής είναι αντιστρόφως ανάλογη της δύναμης σύσφιξης, παρά την ύπαρξη επικαθίσεων [22].



Εικόνα 2.4: Ηλεκτρική αντίσταση στένωσης [Holm, R., Electrical Contacts, Springer, New York, 1979]

Μια απλή προσέγγιση αποτελεί η σχέση:

$$F = \xi \cdot H \cdot A_b \quad (2.3)$$

όπου H είναι η σκληρότητα του μετάλλου, A_b η επιφάνεια σύσφιξης και ξ είναι ο παράγοντας πίεσης που εξαρτάται από το ποσό παραμόρφωσης των επαφών και κυμαίνεται συνήθως από 0,2 έως 1.

Η αντίσταση στένωσης για τις στατικές ηλεκτρικές επαφές σχετίζεται με τις βασικές ιδιότητες των μετάλλων, όπως για παράδειγμα η σκληρότητα και η ειδική αντίσταση.

Ο Holm απέδειξε πως η αντίσταση στένωσης για ένα μόνο σημείο (a-spot) μπορεί να εκφραστεί σαν:

$$R_c = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{4r} \quad (2.4)$$

όπου ρ_1 και ρ_2 είναι οι ειδικές αντιστάσεις των υλικών των δύο μετάλλων και r η ακτίνα της περιοχής επαφής που μπορεί να θεωρηθεί κυκλικής διατομής.

Αν έχουμε το ίδιο μέταλλο, τότε η αντίσταση στένωσης R_c για επιφάνεια A_c κυκλικής διατομής σε συνάρτηση με την ειδική αντίσταση του υλικού ρ και την ακτίνα r δίνεται από τη σχέση :

$$R_c = \frac{\rho}{2r} \quad (2.5)$$

Επειδή όμως η επιφάνεια επαφής δεν είναι ιδανικά καθαρή, η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος επηρεάζεται και από τα οξειδία μετάλλου και τις ακαθαρσίες που βρίσκονται στην επιφάνεια, οπότε ορίζεται και η αντίσταση στρώματος επικαθίσεων R_f [23]. Τελικά για μια επαφή με ακτίνα r και ειδική αντίσταση ρ , η αντίσταση διάβασης R (contact resistance) δίνεται από τη σχέση:

$$R = R_c + R_f \quad (2.6)$$

και

$$R = \frac{\rho}{2r} + \frac{\sigma}{\pi r^2} \quad (2.7)$$

όπου σ είναι η αντίσταση για το στρώμα των επικαθίσεων.

Η αντίσταση διάβασης είναι η πιο σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει τις ηλεκτρικές επαφές και λαμβάνεται ως αναπόσπαστο μέρος της συνολικής αντίστασης του κυκλώματος. Οπότε, αν και είναι σημαντικά μικρότερη από την συνολική αντίσταση, οποιεσδήποτε αλλαγές στην αντίσταση διάβασης, οι οποίες προέρχονται από αλλαγές στην επιφάνεια επαφής, επηρεάζουν αρκετά το κύκλωμα.

Η τιμή της αντίστασης στένωσης R_c επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Όταν η αντίσταση στένωσης μιας επαφής θερμανθεί από το ηλεκτρικό ρεύμα που τη διαπερνά σύμφωνα με τον νόμο Joule, τότε η τιμή της R_c δίνεται από τη σχέση :

$$R_c(T) = R_c(T_0) * [1 + a_x(T - T_0)] \quad (2.8)$$

όπου T_0 είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος και α_x ορίζεται ως ο θερμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης στένωσης.

Ο συντελεστής α_x ορίζεται ίσος με τα 2/3 του θερμικού συντελεστή α για το υλικό των επαφών, οπότε η προηγούμενη σχέση μετασχηματίζεται σε:

$$R_c(T) = R_c(T_0) * [1 + \frac{2}{3} \alpha (T - T_0)] \quad (2.9)$$

2.3 Πτώση τάσης σε μια επαφή σε σχέση με την θερμοκρασία που αναπτύσσεται

Το σημαντικότερο μέγεθος που χαρακτηρίζει τις κλειστές μεταλλικές επαφές, είναι η πτώση τάσης κατά μήκος των επαφών καθώς και η αύξηση της θερμοκρασίας κατά την λειτουργία τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες σχέσεις που συνδέουν τη θερμοκρασία με την πτώση τάσης, με την προϋπόθεση ότι η διάδοση θερμότητας γίνεται μόνο με αγωγή και ότι δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας ή συναγωγής. Επίσης πρέπει να τηρείται η παραδοχή ότι τα δύο μέρη της επαφής είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό το οποίο είναι ισотροπικό, δηλαδή η ειδική του αντίσταση ρ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ , εξαρτώνται μόνο από την θερμοκρασία.

Για μία συμμετρική αντίσταση στένωσης, έχει προταθεί η σχέση:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T) \lambda(T) dT = \frac{U^2}{8} \quad (2.10)$$

όπου ΔT η διαφορά της θερμοκρασίας των σημείων επαφής από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_0 , λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και ρ η ειδική αντίσταση.

Εάν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του γινομένου $\overline{\rho\lambda}$ τότε η σχέση γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda} \Delta T = \frac{U^2}{8} \quad (2.11)$$

από όπου προκύπτει ότι η τάση είναι:

$$U = \sqrt{8 \overline{\rho\lambda} \Delta T} \quad (2.12)$$

Σε περίπτωση που μέρος της παραγόμενης θερμότητας διαφεύγει προς το περιβάλλον μέσο, όπως συμβαίνει στην πράξη, τότε η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$\overline{\rho\lambda\Delta T} \leq \frac{U^2}{8} \quad (2.13)$$

και επιλύοντας ως προς την πτώση τάσης,

$$U \geq \sqrt{8\overline{\rho\lambda\Delta T}} \quad (2.14)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το νόμο των Wiedemann - Franz - Lorenz, κατά τον οποίο:

$$\rho(T)\lambda(T) = LT \quad (2.15)$$

όπου $L = 2,4 \times 10^{-8} (\text{U}/^\circ\text{K})^2$, που είναι μία σταθερά ανεξάρτητη από το μέταλλο,

προκύπτει ότι:

$$\int_0^{\Delta T} \rho(T)\lambda(T)dT = \int_{T_0}^T LTdT = \frac{L}{2}(T^2 - T_0^2) \leq \frac{U^2}{8} \quad (2.16)$$

ή αλλιώς λύνοντας ως προς την πτώση τάσης,

$$U \geq 2\sqrt{L(T^2 - T_0^2)} \quad (2.17)$$

όπου T_0 είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν, παρέχουν τη δυνατότητα για κατά προσέγγιση υπολογισμό της πτώσης τάσης σε στατικές ηλεκτρικές επαφές χωρίς επικαθίσεις. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής της πτώσης τάσης σε καινούργιες επαφές [22].

2.4 Οξειδία σε επαφές διακοπών

Οι επικαθίσεις σε μια ηλεκτρική επαφή θεωρούνται σημαντική αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης, αφού επηρεάζουν το μέγεθος R_f της αντίστασης του στρώματος των επικαθίσεων. Οι επικαθίσεις σύμφωνα με την σύνθεσή τους, μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες. Στις χημικές ενώσεις, όπως είναι τα οξειδία του μετάλλου της επαφής και σε διάφορα παρασιτικά στοιχεία όπως η σκόνη, τα λιπαντικά και οι υδρατμοί.

Με διακριτικό στοιχείο το πάχος, μπορούμε να διακρίνουμε τις επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων, τις προστατευτικές επικαθίσεις, που είναι χημικές ενώσεις και οι οποίες δεν αυξάνονται όταν αποκτήσουν ένα συγκεκριμένο πάχος και τις επικαθίσεις που είναι χημικές ενώσεις, στις οποίες συμμετέχει το μέταλλο της επαφής, των οποίων το πάχος αυξάνει με το χρόνο.

Οι επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων χωρίζονται σε αυτές που τα άτομα τους ενώνονται με το μέταλλο της επαφής μέσω δυνάμεων Van der Waals και δεσμούς της τάξης των 0,05 eV, και σε εκείνες που ενώνονται με ελεύθερους δεσμούς ατόμων της επιφάνειας του μετάλλου, με ενέργεια από 1 eV έως 8 eV [26].

Ορισμένες χημικές ενώσεις στην επιφάνεια της επαφής, αυξάνουν από 10 Å έως 100 Å και προστατεύουν με αυτόν τον τρόπο την επιφάνεια των μετάλλων της επαφής από την επίδραση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας, καθώς και από άλλα χημικά στοιχεία. Το ανοξειδωτό ατσάλι και το αλουμίνιο έχουν εξαιρετικά προστατευτικά οξειδία και ανήκουν σε αυτή την κατηγορία [26].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορα μέταλλα που χρησιμοποιούνται σαν υλικά κατασκευής στατικών επαφών καθώς και τα χαρακτηριστικά τους.

Ο χαλκός είναι ένα μαλακό, ελατό και όλκιμο μέταλλο με υψηλή αγωγιμότητα και εξαιρετική συγκολλησιμότητα που χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτρικές εφαρμογές. Τα οξειδία του χαλκού δεν προστατεύουν αποτελεσματικά το αντίστοιχο μέταλλο αλλά συνεχίζουν να αυξάνονται αργά μεν αλλά συνεχώς στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχει διαπιστωθεί ότι μέχρι τους 400 °C στην επιφάνεια του χαλκού δημιουργείται Cu_2O ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες CuO . Όταν το πάχος των οξειδίων είναι μεγαλύτερο από 100 Å, τότε η ηλεκτρική επαφή μονώνεται ηλεκτρικά.

Σε θερμοκρασία δωματίου το νικέλιο οξειδώνεται πολύ αργά σε NiO . Η οξείδωση είναι ταχύτερη σε ατμόσφαιρα όπου υπάρχει υγρασία. Το νικέλιο χρησιμοποιείται συχνά σαν υλικό κατασκευής στατικών επαφών.

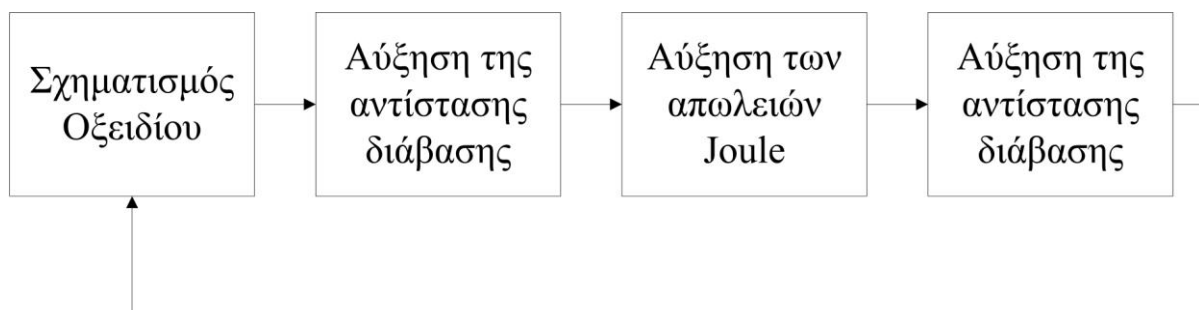
Ο ψευδάργυρος, καλύπτεται από ένα προστατευτικό στρώμα που δρα σαν μονωτικό και έχει χαμηλή σκληρότητα. Κατά την επαφή των δύο μερών το προστατευτικό αυτό στρώμα αποχωρίζεται από την επιφάνειά του, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αγωγίμες περιοχές οι οποίες οξειδώνονται επίσης με τον χρόνο. Σε αυτή τη περίπτωση η αντίσταση διάβασης γίνεται μεγαλύτερη, οπότε και η θερμοκρασία και έτσι αυξάνει δευτερογενώς η οξείδωση. Ο ψευδάργυρος δεν είναι ιδανικό υλικό για επαφές και για τον πρόσθετο λόγο ότι δεν έχει ικανοποιητική σκληρότητα με αποτέλεσμα να αυξάνει η επιφάνεια A_c , υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης και να μειώνεται αντίστοιχα η πίεση, πράγμα που βοηθάει στην οξείδωση της επιφάνειάς του.

Ο χρυσός δεν οξειδώνεται όπως είναι γνωστό στον αέρα. Προσβάλλεται όμως από το χλώριο στους 180°C περίπου και σχηματίζει υδατοδιαλυτό AuCl_3 . Η μόνη επικαθιση η οποία υπάρχει στην επιφάνεια επαφών από χρυσό είναι μία στοιβάδα ατόμων οξυγόνου, η οποία όμως δεν αυξάνεται με τον χρόνο και είναι διαπερατή στα ηλεκτρόνια λόγω του φαινομένου σήραγγος. Ο χρυσός είναι άριστο υλικό επαφών αλλά φυσικά με απαγορευτικό κόστος [24, 26].

Ο άργυρος οξειδώνεται σε Ag_2O σε συνήθη θερμοκρασία, μόνο με την παρουσία του όζοντος. Το οξείδιο του αργύρου έχει χαμηλή σκληρότητα, αποχωρίζεται μηχανικά από το μέταλλο και αποσυντίθεται στους 200°C. Το οξείδιο του αργύρου, δεν αυξάνει την αντίσταση διάβασης. Σε συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες ο άργυρος προσβάλλεται από ενώσεις του θείου και σχηματίζει ένα επιφανειακό ανθεκτικό στρώμα Ag_2S το οποίο δεν είναι προστατευτικό και αυξάνεται αργά αλλά σταθερά. Η ρύπανση γενικά του ατμοσφαιρικού αέρα, σε περιοχές με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα, καταστρέφει στις επαφές από άργυρο. Η ειδική αντίσταση του Ag_2S κυμαίνεται από 10 Ω έως 10^{10} Ω ανάλογα με την κρυσταλλική δομή του. Αυτή είναι περίπου και η ειδική αντίσταση του οξειδίου του χαλκού. Ορατά στρώματα του σουλφιδίου δρουν πρακτικά σαν μονωτές για τις επαφές. Δεδομένου ότι ο άργυρος είναι άριστο υλικό επαφών, έχει διερευνηθεί σε βάθος η προσβολή του σε Ag_2S και έχουν προταθεί διάφορα κράματα για πρακτικές εφαρμογές, καθώς και η δυνατότητα επιχρυσώσης του για μικροεπαφές [22, 24].

Συμπερασματικά, στις μεταλλικές επαφές, διάφορα λεπτά στρώματα νερού ή υγρασίας όπως επίσης και τα παραγόμενα οξείδια μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά ηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία με ηλεκτροχημική δράση οξειδώνουν τις επαφές. Η διεργασία οξείδωσης με την παρουσία υγρασίας είναι ταχύτερη από την οξείδωση στον ατμοσφαιρικό αέρα. Γι' αυτό και όσο πιο μολυσμένο είναι το περιβάλλον με σκόνη ή πιο κοντά σε υγρά κλίματα η οξείδωση των επαφών και γενικότερα η πιθανότητα αστοχίας των ηλεκτρικών εξαρτημάτων και η γήρανση, είναι μεγαλύτερες.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων και επικαθίσεων στις ηλεκτρικές επαφές ακολουθεί το φαινόμενο της ανακύκλωσης όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Γι αυτό και είναι σημαντικός ο σωστός αερισμός για την μείωση του ρυθμού γήρανσης [29].

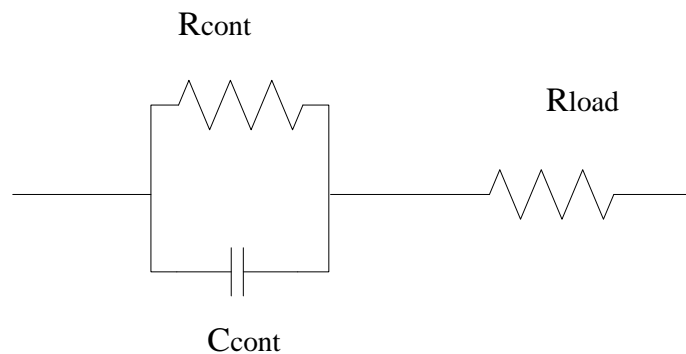


Εικόνα 2.5: Απλοποιημένη παράσταση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων[29]

2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα στατικής ηλεκτρικής επαφής

Διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα προσομοιάζουν μία λυόμενη στατική επαφή και ποικίλουν ανάλογα με την πολυπλοκότητα και το πλήθος των φαινομένων μεταφοράς. Για παράδειγμα μη γραμμικά στοιχεία όπως πυκνωτές και πηνία που είναι συγχρόνως χρονικώς μεταβλητά και εξαρτώνται από την πεδιακή ένταση και την θερμοκρασία, αποτελούν μια αυστηρή και πιο ακριβή προσέγγιση. Στην προσομοίωση με χρονικώς μεταβλητά στοιχεία λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα μεταφοράς που συμβαίνουν στην διεπιφάνεια των δύο υλικών.

Ένα πιο απλό ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται για λόγους ευχρηστίας και διαθέτει χρονικώς σταθερά και γραμμικά στοιχεία, φαίνεται στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6: Ισοδύναμο κύκλωμα στατικής επαφής

Για τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο ισοδύναμο κύκλωμα ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$C_{cont} = \sum_{j=1}^n C_j \quad (2.18)$$

και

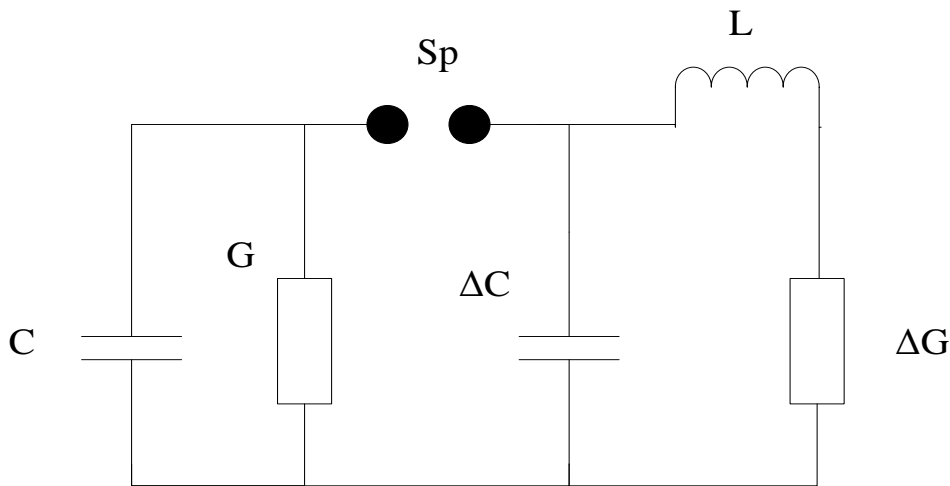
$$R_{cont} = \frac{1}{\sum_{j=1}^k \frac{1}{R_j}} \quad (2.19)$$

όπου k είναι ο συνολικός αριθμός των ιδανικά επαπτομένων περιοχών και n ο συνολικός αριθμός των μη ιδανικά επαπτομένων περιοχών.

Η αντίσταση της επαφής R_{cont} προκύπτει από τις παράλληλες αντιστάσεις R_j των ιδανικά επαπτομένων περιοχών, ενώ η χωρητικότητα της επαφής C_{cont} εισάγεται από τις επιφανειακές κοιλότητες.

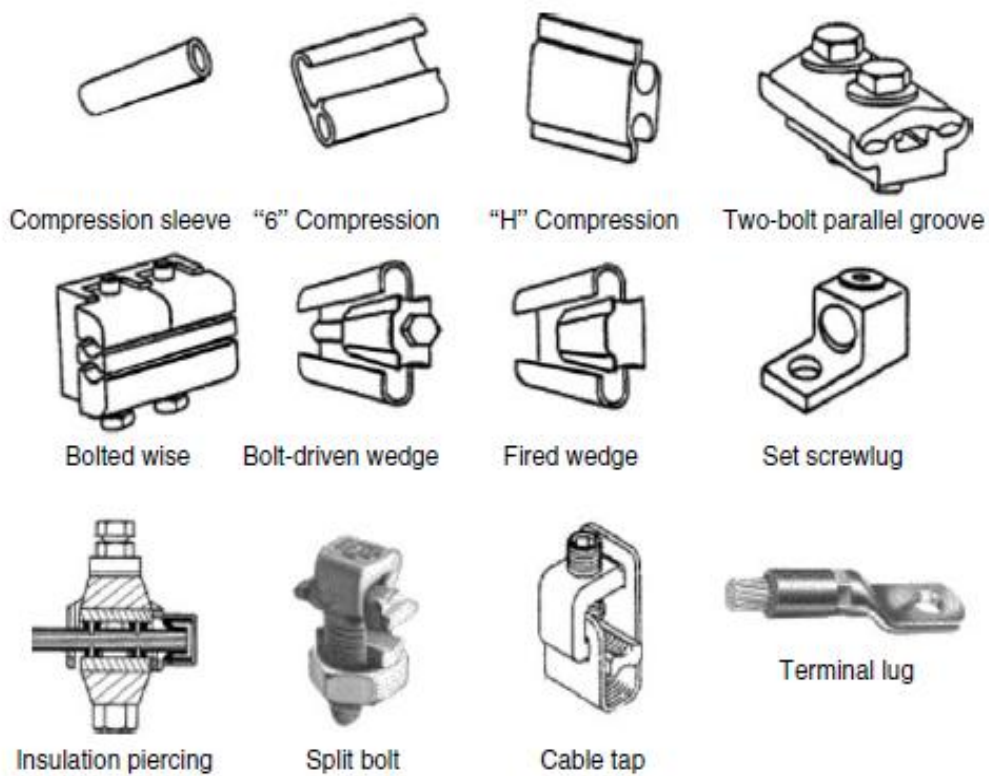
Η αντίσταση R_{load} του ισοδύναμου κυκλώματος, οφείλεται στην αντίσταση σειράς που προέρχεται από τον συνολικό όγκο του υλικού και είναι συνδεδεμένη σε σειρά με την διεπιφάνεια. Η ύπαρξη χωρητικής συμπεριφοράς από την διεπιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα την διαφορά φάσης μεταξύ της κυματομορφής της τάσης και του ρεύματος [21].

Σε περίπτωση που θέλουμε να απεικονίσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα με πιο πολύπλοκη μορφή, ώστε να φανούν και τα επιμέρους φαινόμενα που είναι υπεύθυνα για τη μη γραμμική συμπεριφορά στις ηλεκτρικές επαφές, θα χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff. Οι τιμές του πυκνωτή C και της αγωγιμότητας G εκφράζουν την ιδανική συμπεριφορά της επαφής, δηλαδή την αντίσταση στένωσης και την ύπαρξη χωρητικής συμπεριφοράς. Για τιμές ρεύματος που έχουν την ικανότητα να δημιουργήσουν ισχυρά τοπικά πεδία στις μικροδομές MIM (μέταλλο-μονωτής-μέταλλο) διασπάται ο σπινθηριστής S_p και στο κύκλωμα εισάγεται ο πυκνωτής ΔC , η μη γραμμική αγωγιμότητα των επικαθίσεων ΔG , και πιθανώς η επαγωγή L , η οποία αποδίδει την πιθανή επαγωγική συμπεριφορά των επαφών με την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος [26].



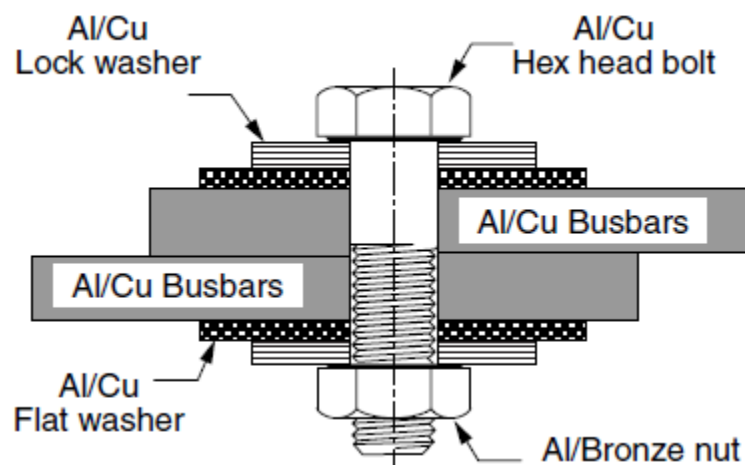
Εικόνα 2.7: Ισοδύναμο κύκλωμα στατικής επαφής με μη γραμμικά στοιχεία

Στην εικόνα 2.8 παρουσιάζονται σε σχηματική μορφή στατικές επαφές, που χρησιμοποιούνται σε ένα δίκτυο ισχύος. Στη παρούσα διπλωματική θα δοθεί έμφαση στις στατικές επαφές σε δίκτυα διανομής υψηλής τάσης, καθώς και στη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτές.



Εικόνα 2.8: Επαφές σε ηλεκτρικό δίκτυο [Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology]

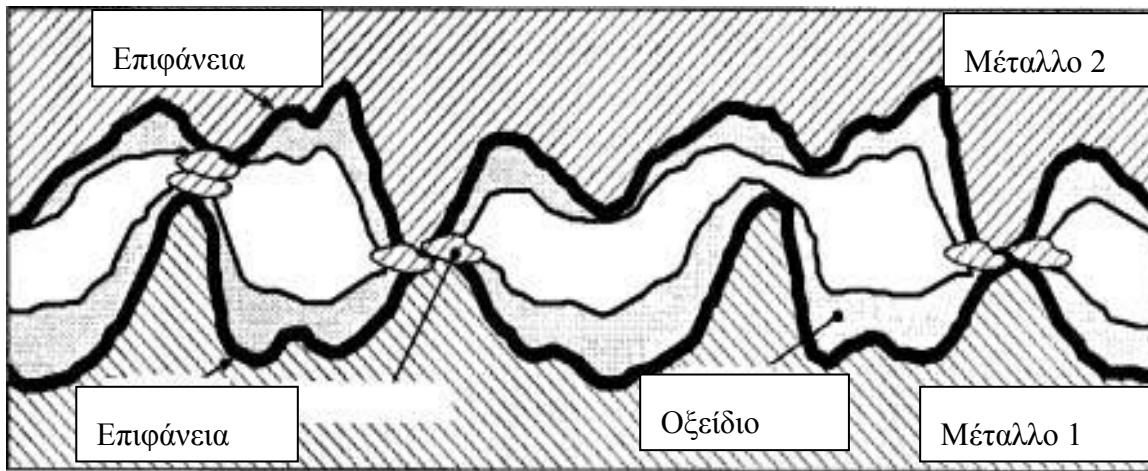
Στην εικόνα 2.9 παρουσιάζεται ένας στατικός λυόμενος σύνδεσμος σε ζυγούς αλουμινίου/χαλκού.



Εικόνα 2.9: Παράδειγμα λυόμενης επαφής σε ζυγούς

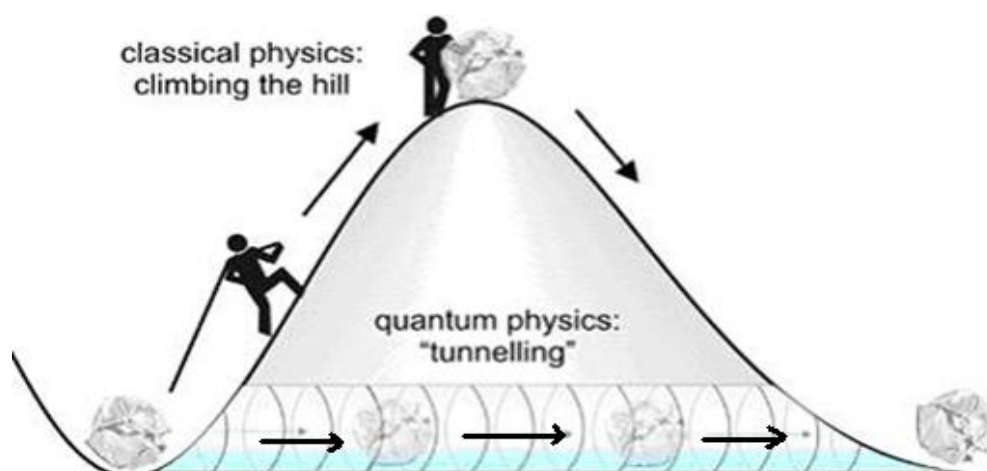
2.6 Φαινόμενο σήραγγος στις επαφές - Tunneling

Όπως εξηγήθηκε διεξοδικά, στις μεταλλικές ηλεκτρικές επαφές, τα δύο μέταλλα δεν βρίσκονται ποτέ σε απόλυτη επαφή, λόγω των επιφανειακών ανωμαλιών. Η διαφορά της πραγματικής από την επιφάνεια σύσφιξης και τη φαινόμενη επιφάνεια εξηγήθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.10, τα επιφανειακά στρώματα οξειδίων των μετάλλων παρουσιάζουν μονωτική ή μερικές φορές ημιαγώγιμη συμπεριφορά και μονώνουν ηλεκτρικά τα δύο μέρη μιας στατικής επαφής.



Εικόνα 2.10: Επιφάνεια επαφής δύο μετάλλων και ασυνεχείς δομές MIM (κοιλότητες)

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, οι ασυνεχείς αυτές δομές και επικαθίσεις μονώνουν ηλεκτρικά τα δύο μέταλλα, οπότε είναι αδύνατον να ρέει ρεύμα μεταξύ των επαφών. Σύμφωνα όμως με την κβαντική φυσική, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να διαπεράσουν λεπτά στρώματα μονωτικών υλικών σαν κύματα De Broglie [22]. Συγκεκριμένα, κβαντικό φαινόμενο σήραγγας είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα σωματίδιο μπορεί να περάσει «διαμέσου» ενός φράγματος δυναμικού, το οποίο είναι υψηλότερο από την ενέργεια του σωματιδίου. Το φαινόμενο αυτό που είναι αδύνατο να συμβεί, σύμφωνα με όσα ισχύουν στην κλασική φυσική, στην κβαντική φυσική όμως, εντάσσεται στη γενικότερη κατηγορία των φαινομένων σκέδασης (scattering). Σχηματικά αυτό απεικονίζεται στην εικόνα 2.11:



Εικόνα 2.11: Το κλασσικό ανάλογο του φαινομένου σήραγγας

Οι ενδιάμεσες κοιλότητες που σχηματίζονται μεταξύ των επαφών, όπως φαίνονται στην εικόνα 2.10, αποτελούν μικροδομές MIM δηλαδή μέταλλου-μονωτή-μέταλλου και προκαλούν μη γραμμική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια επαφής των δύο μετάλλων δεν ακολουθεί τον νόμο του Ohm, παρά μόνο κάτω από παραδοχές.

Στις ιδανικά επαπτόμενες περιοχές των ηλεκτρικών επαφών, η μεταφορά των ηλεκτρικών φορτίων γίνεται με την εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος. Το φαινόμενο σήραγγος εξαρτάται από το εύρος του φράγματος δυναμικού και είναι ανεξάρτητο από τη θερμοκρασία. Σύμφωνα με το θεώρημα σήραγγος, όταν η περιοχή ενός φράγματος δυναμικού γίνει μικρότερη από 100 Angstroms, τότε ο ηλεκτρικός φορέας μπορεί να περάσει απευθείας το φράγμα δυναμικού. Κατά το φαινόμενο σήραγγος δεν χρειάζεται η διέγερση του φορέα σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες και η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου πριν και μετά την μεταφορά, παραμένει αμετάβλητη [21].

Στις στατικές επαφές η εκδήλωση του φαινομένου σήραγγος εξαρτάται από το πάχος s του μονωτικού στρώματος λόγω των οξειδίων και επικαθίσεων μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και από την τιμή του φράγματος δυναμικού που εισάγει το παραπάνω λεπτό μονωτικό στρώμα. Σε μία επαφή με επίπεδες επιφάνειες από το ίδιο μέταλλο και με απόσταση s μεταξύ των δύο μερών της, τα επίπεδα Fermi των δύο μεταλλικών μερών της επαφής συμπίπτουν, όταν δεν εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Όταν εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού, τότε οι στάθμες Fermi διαφοροποιούνται μεταξύ τους με αποτέλεσμα τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος από την επαφή με το υψηλότερο δυναμικό προς την επαφή με το χαμηλότερο. Σαν ϕ_0 ορίζεται η μέγιστη τιμή του ύψους του φράγματος δυναμικού της επαφής και σαν Φ το έργο εξόδου του μετάλλου.

Για ένα ηλεκτρόνιο με μάζα m και ταχύτητα v που πλησιάζει ένα φράγμα δυναμικού μιας επαφής ισχύει η σχέση :

$$\frac{1}{2}mv^2 = q\phi_x \quad (2.20)$$

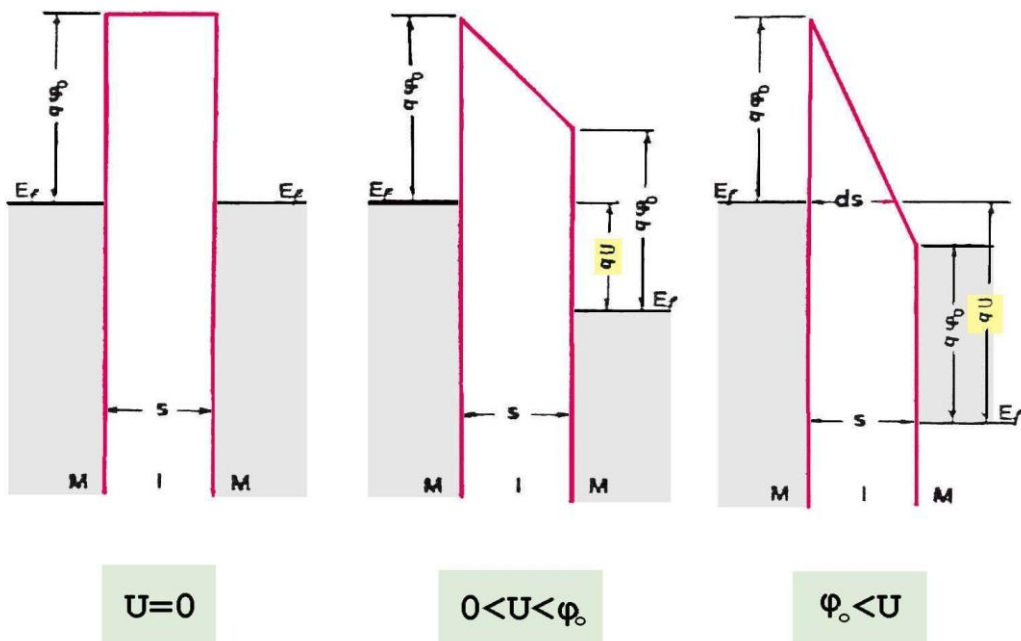
όπου ϕ_x είναι το δυναμικό του ηλεκτρονίου και q το φορτίο του.

Σε περίπτωση που η απόσταση s είναι μικρή, αν $\phi_x < \phi_0$ τότε, σύμφωνα με την κλασική φυσική έχουμε ανάκλαση του ηλεκτρονίου ενώ κατά την κβαντική φυσική έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου σήραγγος.

Σε περίπτωση που $\phi_x > \phi_0$ το ηλεκτρόνιο θα βρεθεί στην άλλη πλευρά της επαφής όπου και θα αποδώσει το περίσσειμα ενέργειας υπό μορφή ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό λέγεται θερμιονική εκπομπή [26].

Όμως, στις μη ιδανικά επαπτόμενες περιοχές μιας ηλεκτρικής επαφής, το εύρος του φράγματος δυναμικού εκτείνεται πέραν των 100 Angstroms οπότε το συνηθισμένο φαινόμενο σήραγγος δεν μπορεί να εκδηλωθεί. Όσο αυξάνεται όμως η ένταση του πεδίου, μπορούν να αναπτυχθούν άλλα φαινόμενα μεταφοράς, όπως η θερμιονική εκπομπή και η εκπομπή πεδίου. Η πιθανότητα εκδήλωσής αυτών των φαινομένων εξαρτάται από την θερμοκρασία.

Συνοπτικά, για δομές MIM παρουσιάζονται στην εικόνα 2.12 τα διαγράμματα δυναμικής ενέργειας για πάχος s που δεν επιτρέπει το φαινόμενο σήραγγος για μικρή διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια. Όταν $U=0$, δηλαδή η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική, η επαφή δεν άγει. Όταν $0 < U < \phi_0$ τότε, ενώ δεν έχει επιτευχθεί η αναγκαία διαφορά δυναμικού, η ροή ρεύματος οφείλεται σε θερμιονική εκπομπή πάνω από το φράγμα δυναμικού. Τέλος όταν $U > \phi_0$ η επαφή άγει δια του φαινομένου σήραγγος επειδή το πάχος έχει μειωθεί σε ds .



Εικόνα 2.12: Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων για συμμετρική δομή MIM και για διαφορετικές τιμές δυναμικού

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι στις διεπιφάνειες μετάλλων οι κοιλότητες εισάγουν απωστικές δυνάμεις μεταξύ των δύο επιφανειών. Οι δυνάμεις αυτές δημιουργούνται εξαιτίας των μαγνητικών απωστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στις επιφανειακές κοιλότητες όταν είναι μονωμένες, ή από τον ιονισμό του μέσου των κοιλοτήτων που μπορεί να οδηγήσει σε κατάσταση πλάσματος. Οι απωστικές δυνάμεις μπορούν να οδηγήσουν σε ολική ή μερική λύση της ηλεκτρικής επαφής, ειδικά σε περιπτώσεις γηρασμένου ηλεκτρικού εξοπλισμού, όπου τα αναπτυσσόμενα φαινόμενα μεταφοράς είναι πιο έντονα.

2.7 Έλεγχος της αξιοπιστίας στατικών ηλεκτρικών επαφών

Για τον έλεγχο της κατάστασης και την αύξηση της αξιοπιστίας των ηλεκτρικών επαφών υπάρχει μια σειρά προληπτικών δοκιμών οι οποίες πρέπει να πραγματοποιηθούν και οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Δοκιμή υπερθέρμανσης

Η δοκιμή υπερθέρμανσης, αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος, δηλαδή του μέγιστου ρεύματος συνεχούς λειτουργίας ενός ηλεκτρικού εξοπλισμού και στην συγκεκριμένη περίπτωση των στατικών επαφών. Η μέτρηση του ονομαστικού ρεύματος ενός στατικού ηλεκτρικού συνδέσμου βασίζεται κυρίως, κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης, στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας ΔT ως προς το περιβάλλον, που αναπτύσσεται σε αυτόν. Η τιμή ΔT θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από 1°C . Στην πράξη συμβαίνει αυτό συνήθως για ΔT περίπου 55°C . Η τιμή του ρεύματος, κατά την οποία επιτυγχάνεται η ανωτέρω σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, αποτελεί και το ονομαστικό ρεύμα I_N της επαφής.

Διηλεκτρικές δοκιμές διακοπών

Οι διηλεκτρικές δοκιμές στοχεύουν στην εξακρίβωση της διηλεκτρικής αντοχής και της ικανότητας μόνωσης. Συνήθως μετράται, εκτός από την ονομαστική τάση και η μέγιστη τάση λειτουργίας, που είναι φυσικά μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση. Οι μετρήσεις, που γίνονται για τον έλεγχο της ικανότητας μόνωσης, αφορούν κυρίως τις μέγιστες λειτουργικές καταστάσεις, δηλαδή τις υπερτάσεις που αναπτύσσονται από κεραυνούς ή από χειρισμούς.

Δοκιμή μηχανικής αντοχής

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής, αναφέρεται στην ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των στατικών επαφών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής, δηλαδή διάφορες παραμορφώσεις των επαφών ή τυχόν αποσυναρμολογήσεις. Μετά το τέλος της δοκιμής αυτής, θα πρέπει να γίνει ξανά δοκιμή υπερθέρμανσης.

Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα

Με τη δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα ελέγχεται η καταπόνηση μιας ηλεκτρικής επαφής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα. Η δοκιμή διαρκεί 1 sec, αρκετό δηλαδή χρόνο, ως προς εκείνον της ενεργοποίησης των μέσων προστασίας του δικτύου. Κατά τη δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα, μετρώνται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ βραχυκύκλωσης, που καθορίζεται από τη θέση της συσκευής στο δίκτυο. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν, μετά το τέλος της, δεν έχουν αναιρεθεί η μονωτική ικανότητα και

η ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα. Στη συνέχεια επομένως, πραγματοποιούνται στο συγκεκριμένο δοκίμιο οι διηλεκτρικές δοκιμές και η δοκιμή υπερθέρμανσης [22,25].

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

3.1 Θερμά σημεία (Hot Spots)

3.1.1 Εισαγωγή

Μία μέθοδος μη καταστροφικού, προληπτικού και ποιοτικού ελέγχου σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, που ουσιαστικά απεικονίζει περιπτώσεις υπερθέρμανσης, δηλαδή πιθανά σφάλματα είναι η θερμογράφιση. Στις θερμικές φωτογραφίες απεικονίζονται τα θερμά σημεία, που αποτελούν σημεία που θα πρέπει να γίνει διεξοδικότερος έλεγχος και θα πρέπει να μελετηθούν ιδιαίτερος ως πιθανά για αστοχία.

Πολλοί είναι οι λόγοι εμφάνισης και παρατήρησης θερμού σημείου (hot spot) σε μια θερμική φωτογραφία. Πιο συγκεκριμένα, το σημείο αυτό εμφανίζει σημαντική και υπολογίσιμη διαφορά θερμοκρασίας συγκριτικά με τα υπόλοιπα γειτονικά του σημεία. Μερικοί από τους λόγους εμφάνισης του αναλύονται στη συνέχεια.

Στα ηλεκτρικά δίκτυα, και πιο συγκεκριμένα, σε μία ηλεκτρική επαφή, πολλές φορές εμφανίζεται αυξημένη αντίσταση. Η θερμότητα δημιουργείται στο σημείο που αλλάζει η αντίσταση και επάγεται στο μέταλλο της στατικής επαφής. Η θερμική κάμερα στο σημείο αυτό εντοπίζει ένα θερμό σημείο, πολύ θερμότερο από τα γειτονικά του. Μερικές ελαττωματικές συνδέσεις υψηλής αντίστασης οδηγούν σε υπερφόρτωση στα πολύκλινα καλώδια, με ένα μόνο καλώδιο να δέχεται το υψηλότερο φορτίο ρεύματος. Αυτό το φαινόμενο ανιχνεύεται εύκολα με την θερμογραφία και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προβλεφθεί κάποιο σφάλμα, πριν την καταστροφή και την αστοχία του συστήματος.

Η θερμότητα που εμφανίζεται σε έναν αγωγό είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος που τον διαρρέει. Επομένως μια αλλαγή στο ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό μπορεί να οδηγήσει στην παρατήρηση μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς. Οι αστάθειες φορτίου και οι υπερφορτώσεις μπορούν να αναγνωριστούν συγκρίνοντας τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των τριών φάσεων. Γι' αυτό και η θερμογραφία είναι μια συγκριτική μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου. Γιατί εκμεταλλευόμενοι τα τριφασικά χαρακτηριστικά του δικτύου μελετάμε την υπερθέρμανση ορισμένων στοιχείων με αναφορά στα υπόλοιπα. Αναλόγως των κυκλωματικών στοιχείων που μεσολαβούν, οι αστάθειες φορτίου είναι ένας βασικός λόγος πρόκλησης αστοχιών και προβλημάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1.2 Εμφάνιση θερμού σημείου χωρίς να υπάρχει σφάλμα

Θα πρέπει να τονιστεί ότι πολλές φορές εμφανίζεται σημαντική απόκλιση θερμοκρασίας σε ένα θερμογράφημα, που όμως δεν σημαίνει απαραίτητα την ύπαρξη κάποιου σφάλματος. Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Ένας σημαντικός παράγοντας για την εμφάνιση διαφορετικής θερμοκρασίας, δηλαδή λανθασμένης, που πρέπει να μελετηθεί διεξοδικά είναι ο παράγοντας emissivity που εξαρτάται από το κάθε υλικό. Επομένως αναλόγως με τον δείκτη εκπομπής (emissivity) κάθε υλικού, απότομη αλλαγή θερμοκρασίας δεν σημαίνει υποχρεωτικά και εντοπισμό σφάλματος, αλλά διαφορετικό υλικό με διαφορετικό δείκτη. Η αξιολόγηση της μέτρησης πρέπει να γίνεται από έμπειρους μηχανικούς και πολλές φορές για την ορθή αναπαράσταση της θερμοκρασίας στο θερμογράφημα απαιτείται η χρήση ειδικού λογισμικού που ανάλογα με το κάθε υλικό, επιτρέπεται η αλλαγή του δείκτη emissivity στην εικόνα που γίνεται η επεξεργασία. (Σχετικά με το κάθε υλικό και τον δείκτη emissivity αναφορά γίνεται στο κεφάλαιο 1 και στο παράρτημα 2 στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.)

Ένας άλλος σημαντικός λόγος που μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση θερμού σημείου είναι η θέρμανση από τον ήλιο. Στην πραγματικότητα όταν ένα σημείο του ηλεκτρικού εξοπλισμού που δέχεται άμεσα το φως του ήλιου φανεί στην θερμογραφική απεικόνιση θερμό, αυτό δεν μπορεί να ερμηνευτεί σαν σφάλμα. Για την σωστή αξιολόγηση θα πρέπει να λαμβάνονται θερμικές φωτογραφίες από διάφορες γωνίες ή σε διαφορετικές ώρες της μέρας ώστε να φανεί αν τελικά υπάρχει όντως πρόβλημα αυξημένης θερμοκρασίας. Σημαντική προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι θερμογράφιση κάτω από έντονο ηλιακό φως μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια του πραγματικού θερμού σημείου, επειδή θα φαίνεται ότι βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιφάνεια που δέχεται το ηλιακό φως, επομένως θα είναι δύσκολος ο εντοπισμός του.

Πολλές φορές παρανόηση ως προς την εμφάνιση θερμών σημείων γίνεται λόγω της ύπαρξης ανακλάσεων από γειτονικές πηγές θερμότητας, αφού η θερμογραφική κάμερα αντιλαμβάνεται κάθε ακτινοβολία που εισέρχεται στο φακό της και όχι μόνον εκείνη που προέρχεται από το αντικείμενο που σκοπεύουμε. Τις περισσότερες φορές, τα ηλεκτρικά εξαρτήματα λειτουργούν ως καθρέπτες για την υπέρυθη ακτινοβολία, αφού τα άβαφα μεταλλικά μέρη είναι ιδιαίτερα στιλπνά.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των ανακλάσεων και της διαφοροποίησης τους από τα πραγματικά θερμά σημεία, είναι η αλλαγή της θέσης από την οποία λαμβάνεται η θερμική φωτογραφία. Αν το «θερμό σημείο» αλλάζει θέση ή αλλάζει θερμοκρασία προέρχεται από ανάκλαση, αν όμως παραμένει σταθερό σημαίνει ότι είναι πραγματικό σφάλμα. Στην περίπτωση αυτή, οι γειτονικές πηγές δεν επηρεάζουν τη θερμοκρασία των ηλεκτρικών στοιχείων που μελετάμε. Σε κάθε περίπτωση είναι αναγκαίο να προσέχουμε ώστε οι γειτονικές πηγές υπέρυθρης ακτινοβολίας και τα υλικά που χαρακτηρίζονται από υψηλό δείκτη ανάκλασης, να μην επηρεάζουν τη μέτρηση μας και αλλοιώνουν τα πραγματικά θερμοκρασιακά δεδομένα. Συστήματα υπέρυθρης θερμογραφίας που λειτουργούν στην περιοχή του μακρινού υπέρυθρου (8-14 μm) μειώνουν τα προβλήματα που σχετίζονται με την ανακλαστικότητα.

Με την υπέρυθη θερμογραφία μπορεί να εντοπιστεί θέρμανση από επαγωγικά δινορρεύματα Eddy και εμφάνιση θερμού σημείου στη διαδρομή του ρεύματος. Έχει αναφερθεί ότι, σε κάποιες περιπτώσεις πολύ υψηλών εντάσεων ρεύματος σε συνδυασμό με την ύπαρξη άλλων μεταλλικών αντικειμένων σε μικρή απόσταση, προκλήθηκαν σοβαρές

πυρκαγιές. Αυτό γενικά συμβαίνει όταν η απόσταση μεταξύ της γραμμής μεταφοράς του ρεύματος και της γης δεν είναι επαρκής και μπορεί να εντοπιστεί σε πολλές περιπτώσεις γραμμών μεταφοράς τριφασικών γραμμών υψηλής τάσης που δεν είναι εγκατεστημένες σωστά. Τις περισσότερες φορές θέρμανση από ρεύματα Eddy εμφανίζεται σε σιδηρομαγνητικά υλικά κοντά σε πηνία και μετασχηματιστές. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να μελετάται ιδιαίτερα και να αξιολογείται σωστά, ώστε να αποφευχθεί ο πιθανός κίνδυνος για την καταστροφή του ηλεκτρικού συστήματος. Ο προγραμματισμένος έλεγχος και στη συνέχεια οι επιδιορθώσεις σε ελαττωματικά σημεία, οδηγούν στη μείωση της αστοχίας του ηλεκτρικού συστήματος [14].

3.1.3 Σφάλματα

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει λανθασμένη εκτίμηση πιθανού σφάλματος, όπως συμβαίνει στις προηγούμενες περιπτώσεις, τότε η θερμοκάμερα θα εντοπίσει αυξημένη θερμοκρασία σε ένα σημείο, συγκριτικά με τα γειτονικά του, αν για παράδειγμα υπάρχουν θερμές στατικές επαφές λόγω χαλαρής σύνδεσης ή λόγω οξειδωσης και γήρανσης. Επίσης θερμά σημεία εμφανίζονται σε συνδέσμους που δεν είναι δεμένοι σωστά, ή που διαρρέονται από πολύ μεγάλα ρεύματα σε σχέση με τα ονομαστικά. Όλα αυτά τα σημεία που λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς εντοπίζονται από την υπέρυθη θερμογραφία, αποτελούν στοιχεία του συστήματος που ενδέχεται να αποτύχουν στο μέλλον, οπότε η προληπτική διόρθωση των σφαλμάτων πριν αυτά συμβούν οδηγεί στην βέλτιστη λειτουργία του.

Εμπειρικά, ανάλογα με την διαφορά θερμοκρασίας που παρουσιάζουν τα διάφορα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα σε σύγκριση με τα τριφασικά γειτονικά τους, αφού μιλάμε για επαναλαμβανόμενες διατάξεις, μπορούμε να διακρίνουμε τις προτεραιότητες επιδιόρθωσης με τη σειρά που φαίνονται στον πίνακα 3.1. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον πίνακα μπορούν να ταξινομηθούν οι πιθανότητες αστοχίας ανάλογα με την απόκλιση θερμοκρασίας, αν και πολύ σημαντικός παράγοντας είναι πάντα ο ρόλος και η θέση του κυκλώματος στο δίκτυο.

Πίνακας 3.1: Προτεραιότητες επιδιόρθωσης ανάλογα με την θερμοκρασιακή διαφορά

Προτεραιότητα 0	Διαφορά θερμοκρασίας 0-10 °C	Δεν απαιτούνται διορθωτικά μέτρα
Προτεραιότητα 1	Διαφορά θερμοκρασίας 10-20 °C	Διορθωτικές μέτρα στον επόμενο έλεγχο
Προτεραιότητα 2	Διαφορά θερμοκρασίας 20-30 °C	Διορθωτικά μέτρα την επόμενη περίοδο
Προτεραιότητα 3	Διαφορά θερμοκρασίας 30-100 °C	Διορθωτικά μέτρα το συντομότερο δυνατό
Προτεραιότητα 4	Διαφορά θερμοκρασίας μεγαλύτερη από 100 °C	Διορθωτικά μέτρα άμεσα!!!

3.2 Μετρήσεις και θερμικές φωτογραφίες

Σε τρεις υποσταθμούς υψηλής τάσης του δικτύου της Δ.Ε.Η., λήφθηκαν θερμικές εικόνες που μελετήθηκαν, για την ύπαρξη υπερθερμάνσεων και σφαλμάτων.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη θερμοκάμερα FLIR P620 της εταιρίας FLIR.



Εικόνα 3.1 : Θερμοκάμερα FLIR P620

Η θερμική κάμερα ρυθμίστηκε σύμφωνα με τη θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος και η απόσταση από το μετρούμενο αντικείμενο τοποθετήθηκε προσεγγιστικά. Επίσης ανάλογα με το υλικό του οποίου τη θερμοκρασία θέλαμε να μετρήσουμε, άλλαζε ο δείκτης emissivity. Σχετικά με τον τρόπο ρύθμισης και λειτουργίας της θερμικής κάμερας κατά την θερμογράφηση, δίνονται πληροφορίες στο κεφάλαιο 4.

Στη συνέχεια οι εικόνες επεξεργάστηκαν με το λογισμικό FLIR Quick Report 1.2, που παρείχε τη δυνατότητα αλλαγής όλων των προηγούμενων παραμέτρων σε περίπτωση σφάλματος κατά την μέτρηση. Επίσης ρυθμίστηκε για κάθε θερμική φωτογραφία η κλίμακα χρωμάτων ανάλογα με τη θερμοκρασία και ανάλογα με το εύρος το οποίο θέλαμε να απεικονίσουμε.

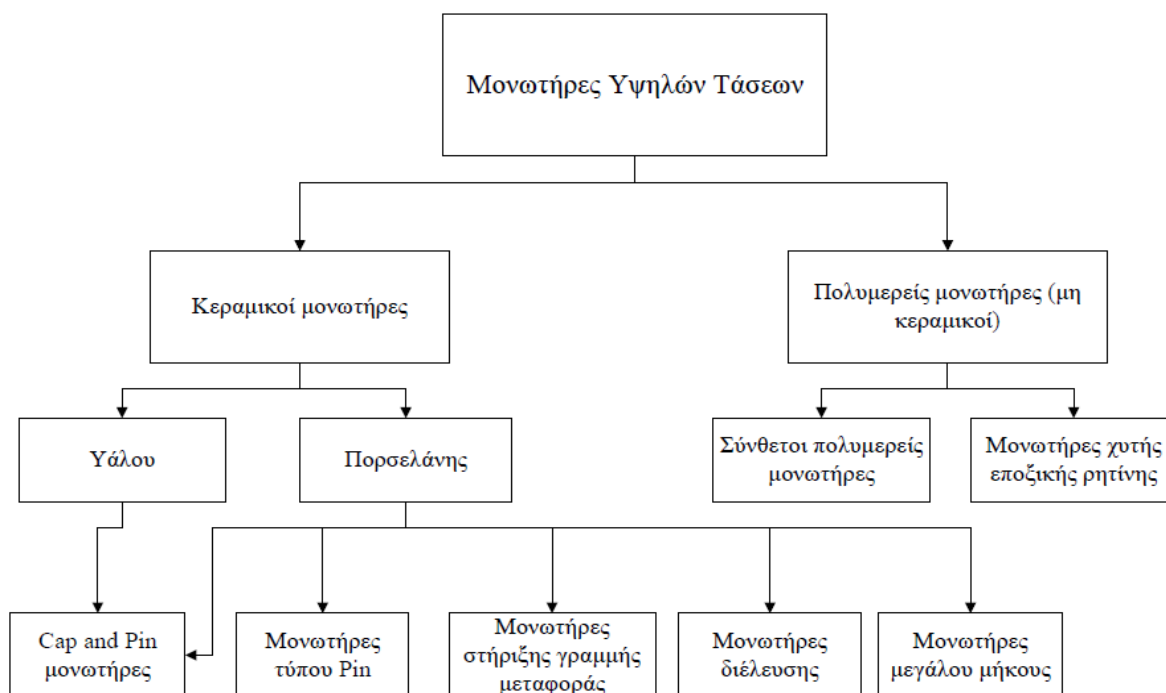
Οι υποσταθμοί υψηλής τάσης θερμογραφήθηκαν και αναζητούνταν πιθανά θερμά σημεία και περιοχές ύπαρξης αυξημένης θερμοκρασίας σε σχέση με τις γειτονικές τους. Τα αποτελέσματα και οι σημαντικότερες θερμικές εικόνες που λήφθηκαν κατά την μελέτη παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Μονωτήρες

Στις επόμενες εικόνες, αρχικά θερμογραφήθηκαν οι μονωτήρες των υποσταθμών υψηλής τάσης.

Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [8]. Το πιο συνηθισμένο πεδίο εφαρμογής τους είναι τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς υψηλής τάσης [6].

Στο διάγραμμα της εικόνας 3.2 φαίνονται οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μονωτήρες υψηλών τάσεων. Έμφαση δίνεται στους κεραμικούς μονωτήρες πορσελάνης ή υάλου οι οποίοι και μετρήθηκαν θερμικά στους υποσταθμούς της Δ.Ε.Η..



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα παρουσίασης μονωτήρων υψηλών τάσεων

Ανεξάρτητα του είδους του μονωτήρα και του υλικού του, όλοι οι μονωτήρες έχουν εξωτερικές επιφάνειες που ρυπαίνονται όσο χρησιμοποιούνται. Μέσω της ρύπανσης και των ατελειών θα μεταφέρεται το ρεύμα διαρροής. Το επιφανειακό στρώμα, ενός αντιπροσωπευτικά ρυπαρού μονωτήρα, θα περιέχει αδρανή ορυκτή ύλη, ηλεκτρικά αγωγίμη σκόνη, όπως άνθρακα ή οξείδια μετάλλου, διαλυτά άλατα στο νερό και υγρασία. Αυτό το στρώμα θα συμπεριφέρεται σαν ένας μεταβλητός, μη γραμμικός αντιστάτης, ασταθής στις περισσότερες περιπτώσεις στην εμφάνιση ηλεκτρικών πεδίων. Το ρεύμα διαρροής θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας, των ηλεκτροχημικών προϊόντων ηλεκτρόλυσης και των ηλεκτρικών μερικών εκκενώσεων. Στη συνέχεια, στο δεύτερο στάδιο των επιπτώσεων της ρύπανσης, μπορεί να εμφανιστεί ηλεκτροχημική διάβρωση μέχρι και εξέλιξη του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων που σταδιακά μπορεί να οδηγήσουν στην υπερπήδηση του μονωτήρα και το σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου στο περιβάλλον μέσο [6, 28].

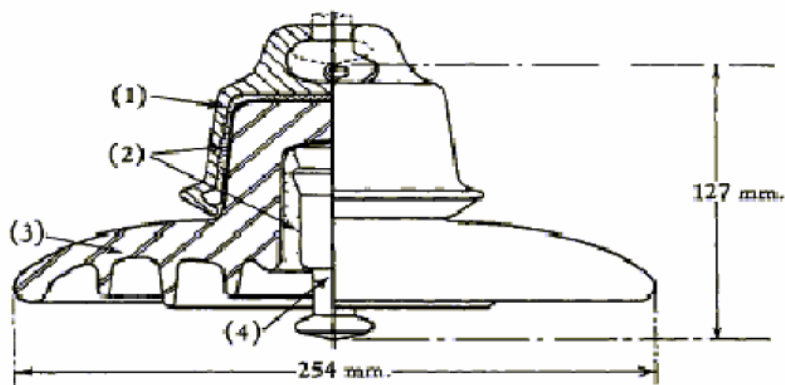
Γενικότερα, οι μονωτήρες χάνουν την μονωτική τους ικανότητα και παρουσιάζουν σφάλματα σε περίπτωση που συμβεί διάσπαση ή διάτρηση, υπερπήδηση ή αναπτύχθει ισχυρό ρεύμα ερπυσμού. Όταν η διαφορά δυναμικού ξεπεράσει την τάση διάσπασης του υλικού, τότε παρατηρείται ηλεκτρική διάσπαση του μονωτήρα (διάτρηση) και εκκένωση ρεύματος δια μέσου της μάζας του. Η μεγάλη θερμοκρασία και η υπερθέρμανση που δημιουργεί η διέλευση πολύ μεγάλου ρεύματος προκαλεί τοπικά την τήξη, καύση ή εξαέρωση του υλικού για τα στερεά υλικά. Προκαλείται, επομένως, καταστροφή του υλικού και μόνιμη απώλεια της μονωτικής του ικανότητας.

Ένας ακόμη λόγος που οδηγεί σε απώλεια της μόνωσης σε μια διάταξη μονωτήρα είναι η ανάπτυξη ενός ισχυρού ρεύματος ερπυσμού στην επιφάνεια του υλικού. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, εφαρμόζονται στους μονωτήρες προστατευτικοί δακτύλιοι ή «σπινθηριστές» με τους οποίους οδηγείται το ηλεκτρικό τόξο που πιθανώς σχηματίζεται σε εκτόνωση, μακριά από το στερεό μονωτικό [16].

Όταν, η μεταξύ των δυο ακρότατων σημείων του μονωτήρα, επιβαλλομένη τάση υπερβεί μια κρίσιμη τιμή σημειώνεται υπερπήδηση (flashover) του μονωτήρα, δηλαδή γεφύρωση με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει δια μέσου του αέρα του διακένου.

Η υπερπήδηση των μονωτήρων από επιφανειακό ρεύμα ερπυσμού ή μέσω εναέριου ηλεκτρικού τόξου εξηγείται από το γεγονός ότι, η διηλεκτρική αντοχή των υλικών κατασκευής των μονωτήρων είναι μεγαλύτερη από τη διηλεκτρική αντοχή του περιβάλλοντος αέρα.

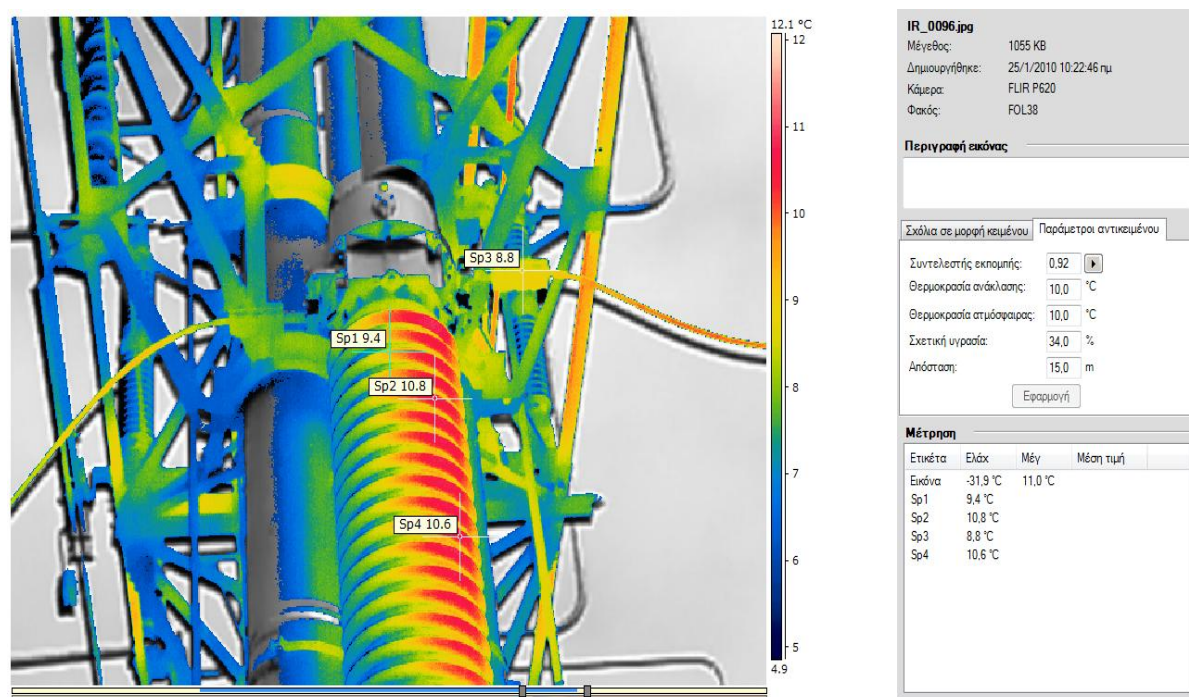
Το σχήμα ενός μονωτήρα τύπου cap and pin δηλαδή ενός μονωτήρα που αποτελείται από πείρους και χαλύβδινα καλύμματα παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3. Μια αλυσίδα από τέτοιους μονωτήρες χρησιμοποιείται για την κατασκευή των μονωτήρων ανάρτησης και στήριξης των γραμμών μεταφοράς [16].



Εικόνα 3.3: Τυπικός cap and pin μονωτήρας (1): Γαλβανισμένη μεταλλική θήκη (cap), (2): Τσιμέντο, (3): Πορσελάνη, (4): μεταλλικός πείρος (pin)

Γενικά η θερμογραφία, μπορεί να εφαρμοστεί σε κεραμικούς και πολυμερείς μονωτήρες για τον εντοπισμό ελαττωμάτων και σφαλμάτων. Ένας υγιής μονωτήρας παράγει θερμότητα κοντά στην περιοχή του μεταλλικού άκρου του (pin area) υπό υγρές συνθήκες, όπως π.χ. κατά τη διάρκεια πλυσίματος, αντίθετα με έναν ελαττωματικό μονωτήρα που θα παραμείνει κρύος. Χρησιμοποιώντας μία υπέρυθη θερμοκάμερα, η παρουσία ζεστών και θερμών περιοχών μπορεί να υποδηλώσει την ύπαρξη ή όχι σφάλματος στον μονωτήρα [28].

Για τις επόμενες θερμικές εικόνες, ο συντελεστής εκπομπής ή δείκτης emissivity, ρυθμίζεται ανάλογα με το υλικό που θέλουμε να μετρήσουμε την θερμοκρασία του, σύμφωνα με τους ειδικούς πίνακες συντελεστών εκπομπής, σαν αυτόν που περιλαμβάνεται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια, όπου θερμογραφούνται μονωτήρες, για την πορσελάνη ο δείκτης εκπομπής είναι 0.92 και για το γυαλί κυμαίνεται από 0.92-0.94 και τοποθετείται επίσης ίσος με 0.92.



Εικόνα 3.4: Θερμική φωτογραφία μονωτήρα μετασχηματιστή έντασης

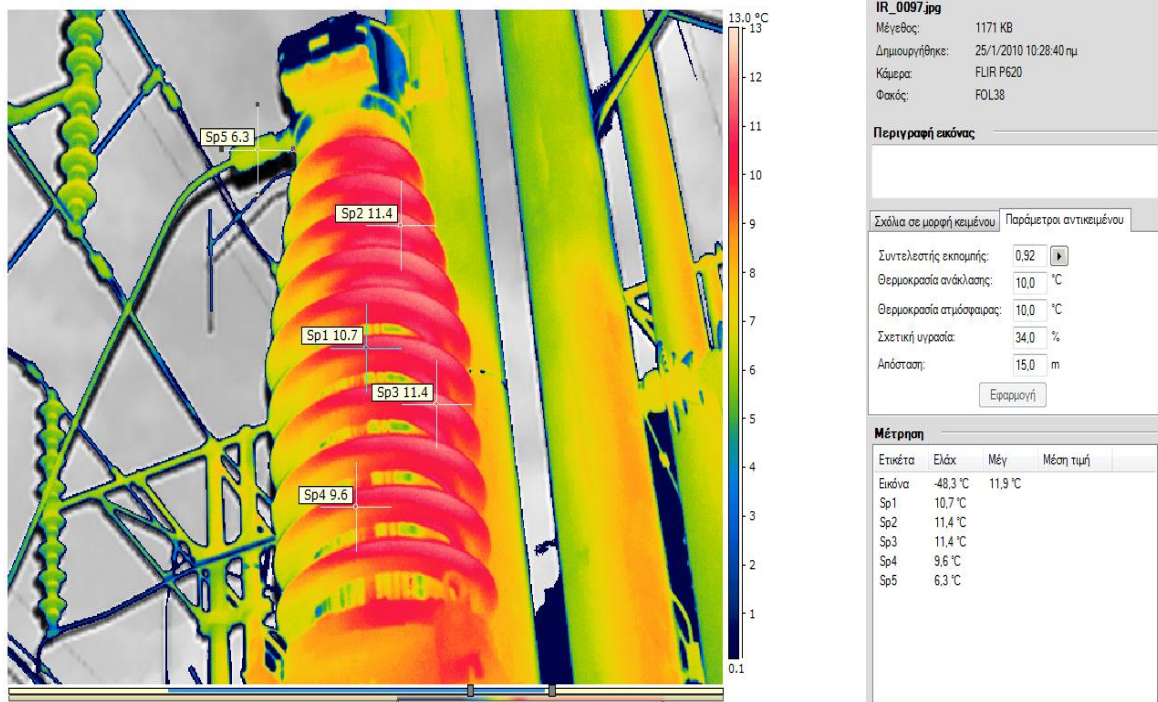
Πίνακας 3.2: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	9.4
Σημείο 2	10.8
Σημείο 3	8.8
Σημείο 4	10.6

Οι μετασχηματιστές έντασης, σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές ισχύος, είναι μετασχηματιστές μετρήσεως και υποβιβάζουν κατά έναν γνωστό λόγο ένα ρεύμα που πρέπει να μετρηθεί.

Στον μονωτήρα του μετασχηματιστή εντάσεως της εικόνας 3.4 παρατηρούμε στην επιφάνεια του μονωτήρα διαφορά θερμοκρασίας ενός ή δύο βαθμών. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας οφείλεται σε θέρμανση από τον ήλιο της μίας πλευράς. Σε περίπτωση που αλλάξει η γωνία θερμογράφησης αλλάξει και η θερμική εικόνα, δηλαδή η πλευρά προς τον ήλιο θερμαίνεται πάντα περισσότερο, χωρίς αυτό να σημαίνει την ύπαρξη κάποιου σφάλματος.

Όμως, σε ενδεχόμενη μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας στη μία μόνο πλευρά του μονωτήρα εξαιτίας διάτρησης ή επαφής με κάποιο θερμό αντικείμενο, λόγω θερμικής διαστολής στη μία πλευρά, θα υπήρχε κίνδυνος καταστροφής του μονωτήρα.



Εικόνα 3.5: Θερμική φωτογραφία μονωτήρα μετασχηματιστή έντασης

Πίνακας 3.3: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	10.7
Σημείο 2	11.4
Σημείο 3	11.4
Σημείο 4	9.6
Σημείο 5	6.3

Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται ακόμα ένας μετασχηματιστής εντάσεως ο οποίος θερμαίνεται και αυτός περισσότερο προς την πλευρά του που φωτίζεται από τον ήλιο. Η μικρή κλιμάκωση της θερμοκρασίας προς την φωτισμένη πλευρά δεν υποδηλώνει την ύπαρξη κάποιου σφάλματος.

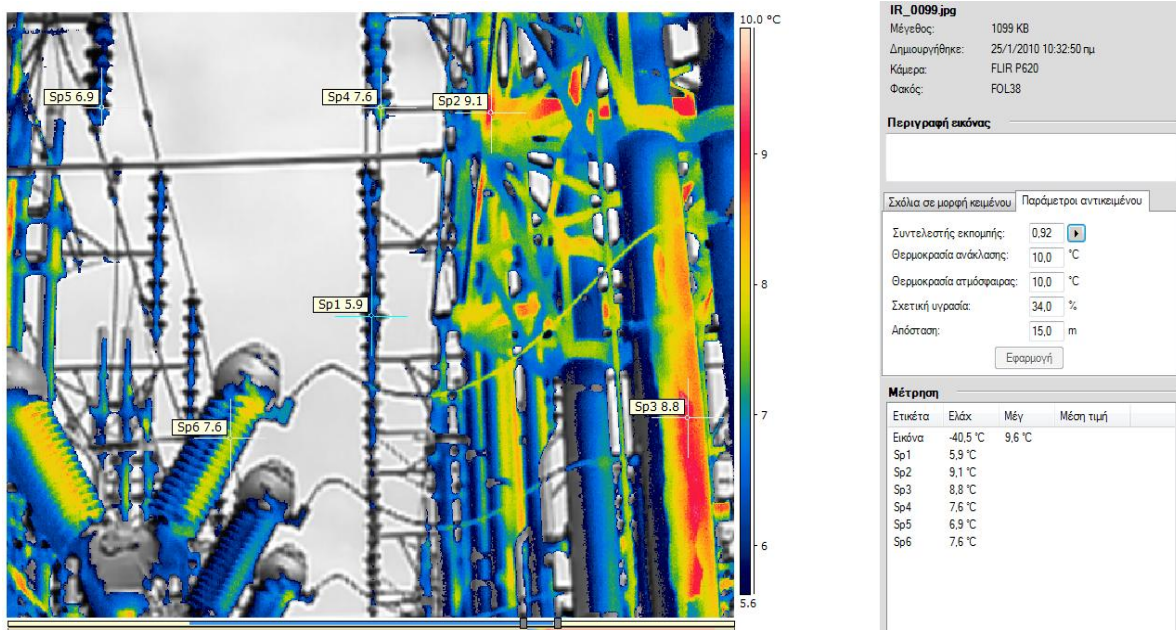
Η ορατή εικόνα της προηγούμενης διάταξης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.6, όπου και φαίνονται οι επαναλαμβανόμενες διατάξεις του δικτύου. Η δυνατότητα θερμικής φωτογράφισης ίδιων στοιχείων που παρουσιάζουν παρόμοια θερμικά χαρακτηριστικά και η ποιοτική σύγκριση τους χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της κατάστασης των εξαρτημάτων του δικτύου.



Εικόνα 3.6: Φωτογραφία της διάταξης του δικτύου που μελετήθηκε θερμικά

Επίσης στην προηγούμενη εικόνα διακρίνονται και οι μονωτήρες ζυγών οι οποίοι θερμογραφήθηκαν κι αυτοί, όπως παρατηρούμε στην θερμική εικόνα 3.7. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μονωτήρων που βρίσκονται στην ίδια σειρά αλλά σε διαφορετική απόσταση από το σημείο αναφοράς που είναι ο φακός της κάμερας, δικαιολογείται και από την διαφορά ως προς την απόσταση καθώς η θερμική κάμερα ήταν ρυθμισμένη για απόσταση 15 m.

Αφού οι μονωτήρες είναι πορσελάνινοι ο δείκτης emissivity ρυθμίζεται και πάλι στο 0.92.



Εικόνα 3.7: Θερμική φωτογραφία μονωτήρων ζυγών

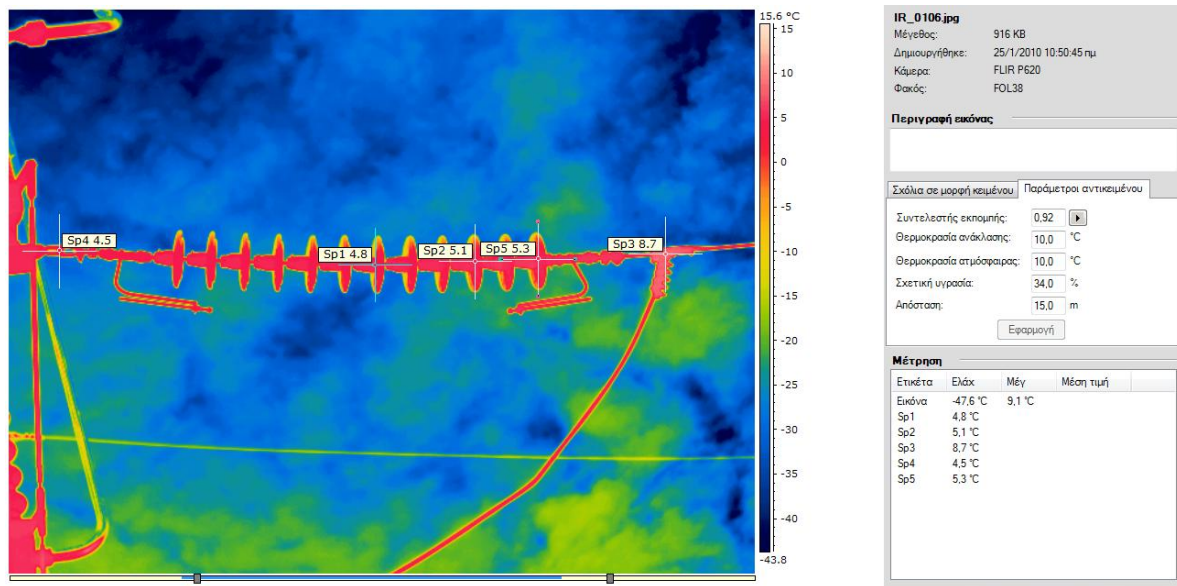
Πίνακας 3.4: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	5.9
Σημείο 2	9.1
Σημείο 3	8.8
Σημείο 4	7.6
Σημείο 5	6.9
Σημείο 6	7.6

Εκτός από τους μονωτήρες τύπου πορσελάνης στις υψηλές τάσεις χρησιμοποιούνται και γυάλινοι μονωτήρες με δείκτη emissivity 0.92-0.94, όπως φαίνεται από τους πίνακες με τους συντελεστές εκπομπής.

Ο γυάλινος μονωτήρας της εικόνας 3.8 δεν παρουσιάζει κάποιο αξιοσημείωτο θερμό σημείο, παρά μόνο στην περιοχή πρόσδεσης στην στατική επαφή, όπου η θερμοκρασία είναι 8.7 °C. Βέβαια, σε αυτό το σημείο επειδή το μέταλλο έχει διαφορετικό συντελεστή εκπομπής, η θερμοκρασία μπορεί να αποκλίνει ελάχιστα από την πραγματική. Μελετάται όμως συγκριτικά με την άλλη πλευρά πρόσδεσης όπου η θερμοκρασία είναι 4.5 °C και η οποία δεν διαρρέεται από ρεύμα, γι αυτό και δεν εμφανίζει αύξηση θερμοκρασίας λόγω φαινομένου Joule.

Ο γυάλινος μονωτήρας είναι μονωτήρας ανάρτησης της γραμμής και χρησιμοποιείται για την απομόνωση του ρευματοφόρου αγωγού από το σημείο μηχανικής στήριξης στον πυλώνα. Χρησιμοποιείται λοιπόν ένας αγωγός για την παράκαμψη (by-passing) του ρεύματος ενώ ο ίδιος ο μονωτήρας μονώνει ηλεκτρικά. Η λειτουργία του μονωτήρα φαίνεται καλύτερα στην φωτογραφία 3.10 όπου παρουσιάζεται το μέρος του δικτύου που μελετάται θερμικά.

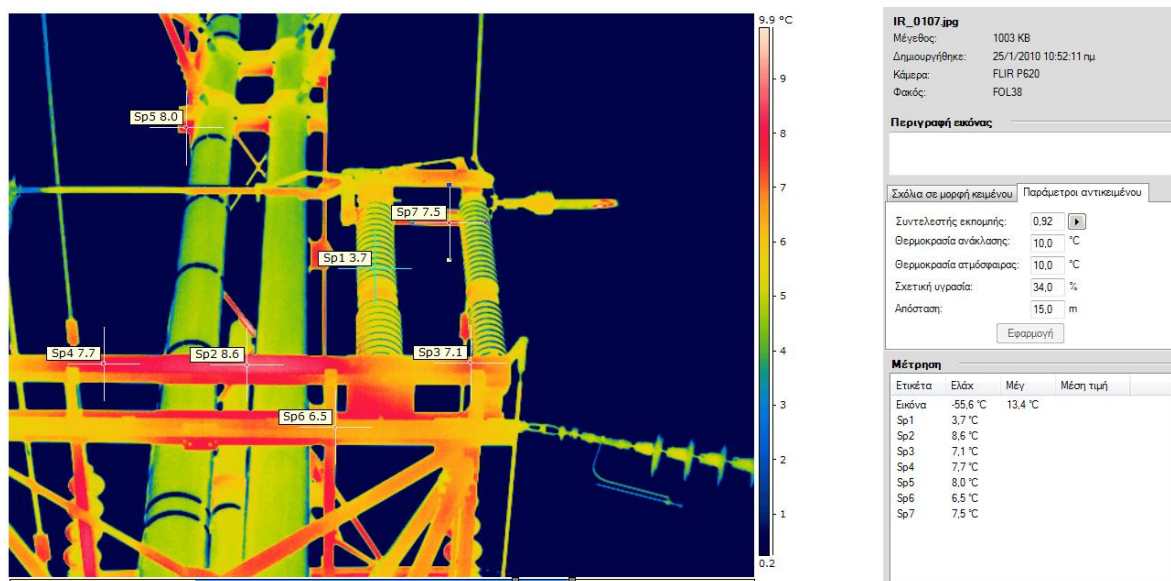


Εικόνα 3.8: Θερμική φωτογραφία γυάλινου μονωτήρα ανάρτησης

Πίνακας 3.5: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	4.8
Σημείο 2	5.1
Σημείο 3	8.7
Σημείο 4	4.5
Σημείο 5	5.3

Στη συνέχεια, στην εικόνα 3.9, φαίνεται ο πυλώνας και οι μονωτήρες στήριξης, χωρίς κάποια ιδιαίτερη θερμοκρασιακή διαφορά. Τα ελάχιστα «θερμά σημεία» πάνω στον πυλώνα οφείλονται σε θέρμανση από τον ήλιο.



Εικόνα 3.9: Θερμική φωτογραφία μονωτήρων

Πίνακας 3.6: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

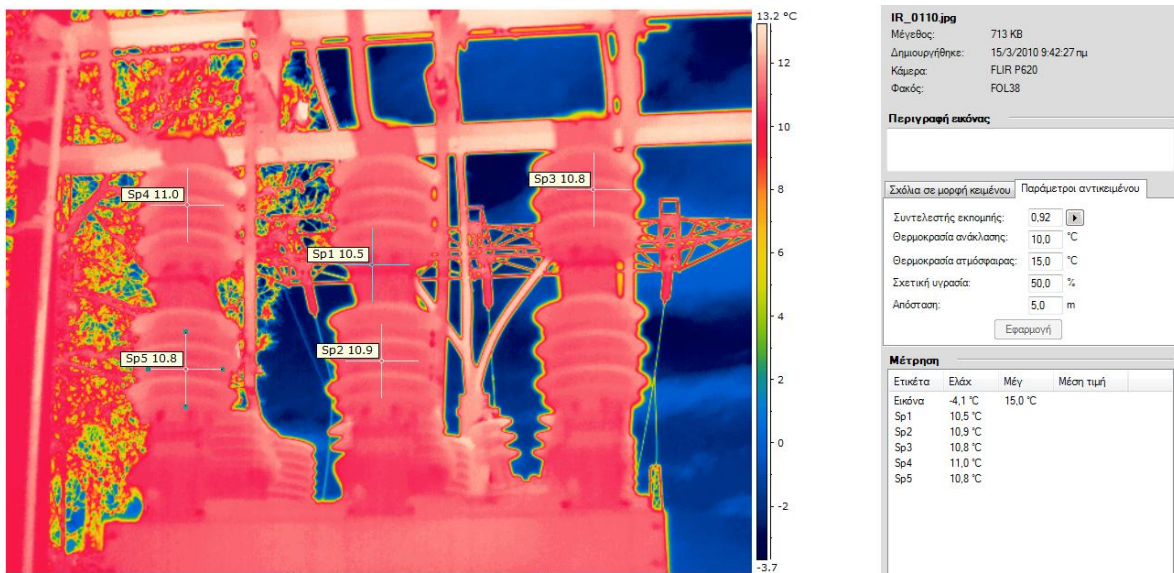
	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	3.7
Σημείο 2	8.6
Σημείο 3	7.1
Σημείο 4	7.7
Σημείο 5	8
Σημείο 6	6.5
Σημείο 7	7.5

Η ορατή φωτογραφία της εικόνας 3.10 απεικονίζει το τμήμα του δικτύου που θερμογραφήθηκε, όπου και διακρίνεται ο γυάλινος μονωτήρας και οι μονωτήρες στήριξης της εικόνας 3.9. Η ορατή εικόνα σε αντίθεση με τις θερμικές δίνει πληροφορίες για τη δομή του δικτύου.



Εικόνα 3.10: Φωτογραφία της διάταξης του δικτύου που μελετήθηκε θερμικά

Στους μονωτήρες του διακόπτη SF6 που απεικονίζονται στην εικόνα 3.11, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει απόκλιση θερμοκρασίας που να υποδηλώνει την ύπαρξη κάποιας ατέλειας ή σφάλματος.



Εικόνα 3.11: Θερμική φωτογραφία μονωτήρων

Πίνακας 3.7: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	10.5
Σημείο 2	10.9
Σημείο 3	10.8
Σημείο 4	11
Σημείο 5	10.8

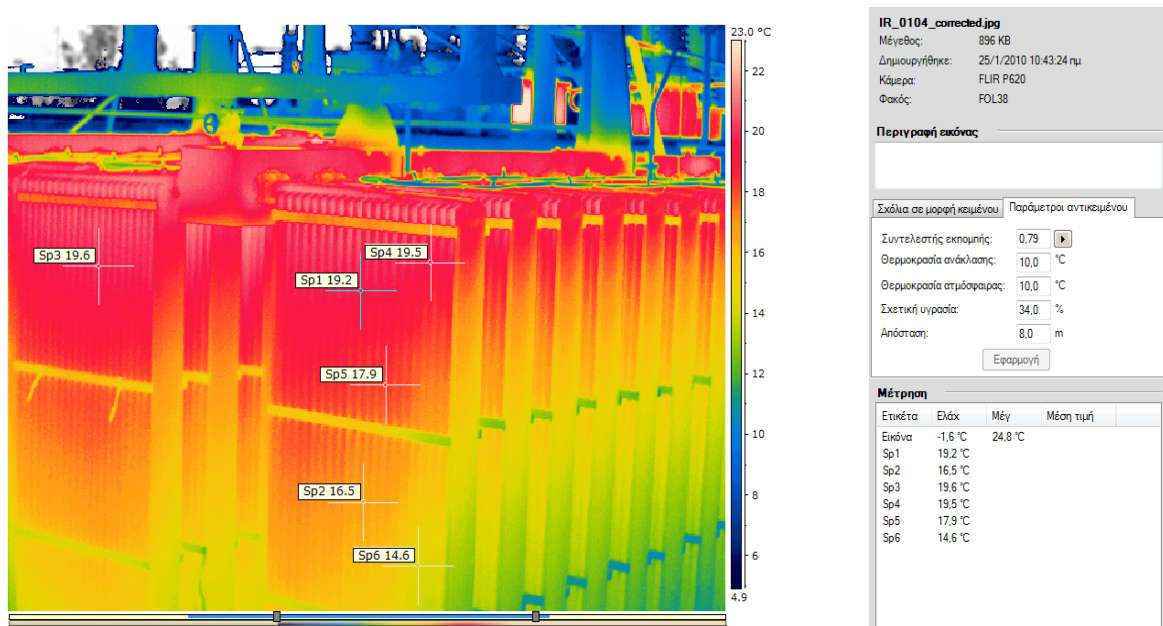
Μετασηματιστές

Όπως είναι γνωστό, δεν υπάρχει απόλυτα ιδανικός μετασηματιστής, οπότε οι ενεργειακές απώλειες κυρίως εμφανίζονται με τη μορφή θερμότητας. Για την απαγωγή της θερμότητας στους μετασηματιστές, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι που εξαρτώνται κυρίως από το μέγεθος του μετασηματιστή. Στους υποσταθμούς υψηλής τάσης έχουμε τεράστιους μετασηματιστές σαν αυτούς που παρουσιάζονται στις εικόνες 3.13 και 3.15.

Το μονωτικό λάδι που χρησιμοποιείται στους μετασηματιστές, εκτός του να λειτουργεί σαν μονωτής, χρησιμοποιείται και σαν ψυκτικό μέσο για να απάγεται η παραγόμενη θερμότητα, όταν περνάει μέσα από αγωγούς κοντά στις πηγές θερμότητας.

Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζεται ένας μετασηματιστής και η κατανομή της θερμότητας στην επιφάνεια του. Ο δείκτης emissivity τοποθετήθηκε ίσος με 0.79, όσος δηλαδή είναι για το ατσάλι, υλικό που βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια του μετασηματιστή.

Συγκεκριμένα, τα σημεία που βρίσκονται ψηλότερα φαίνονται να παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερη θερμοκρασία που φτάνει τους 5 °C σε σχέση με τα χαμηλότερα σημεία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ψύχεται το λάδι που κυκλοφορεί μέσα στο μετασηματιστή.



Εικόνα 3.12: Θερμική εικόνα μετασχηματιστή

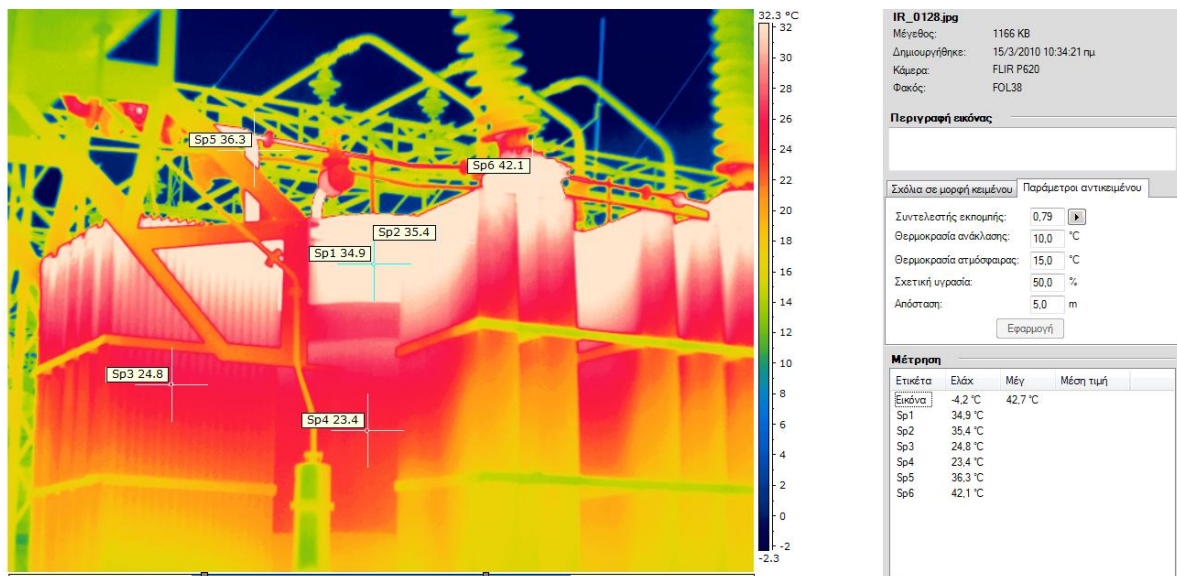


Εικόνα 3.13: Φωτογραφία του μετασχηματιστή που μελετήθηκε θερμικά

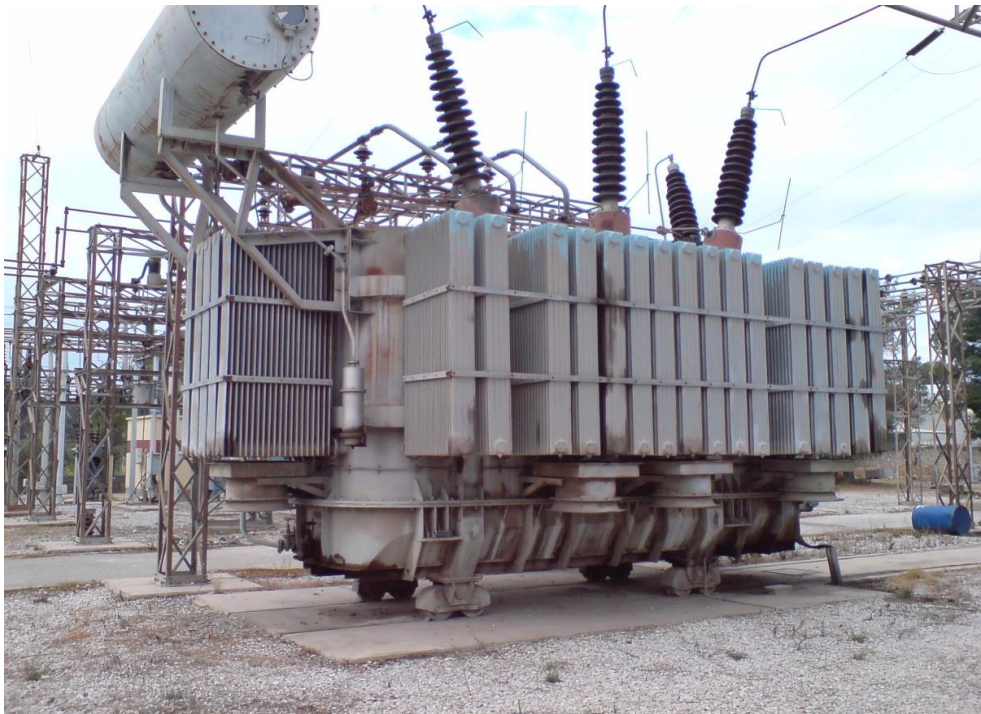
Πίνακας 3.8: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	19.2
Σημείο 2	16.5
Σημείο 3	19.6
Σημείο 4	19.5
Σημείο 5	17.9
Σημείο 6	14.6

Στον επόμενο μετασχηματιστή ενός άλλου δικτύου, παρατηρείται επίσης μεγαλύτερη θερμοκρασία στο επάνω μέρος του μετασχηματιστή από ότι στο κάτω. Η αναμενόμενη αυτή διαφορά θερμοκρασίας, οφείλεται στα λάδια του μετασχηματιστή που είναι πιο θερμά πάνω και πιο ψυχρά κάτω κατά τη διαδικασία ψύξης τους. Ο μετασχηματιστής της εικόνας 3.14 παρουσιάζει γενικά πολύ υψηλότερη θερμοκρασία από αυτόν της εικόνας 3.12.



Εικόνα 3.14: Θερμική εικόνα μετασχηματιστή



Εικόνα 3.15: Φωτογραφία του μετασχηματιστή που μελετήθηκε θερμικά

Πίνακας 3.9: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

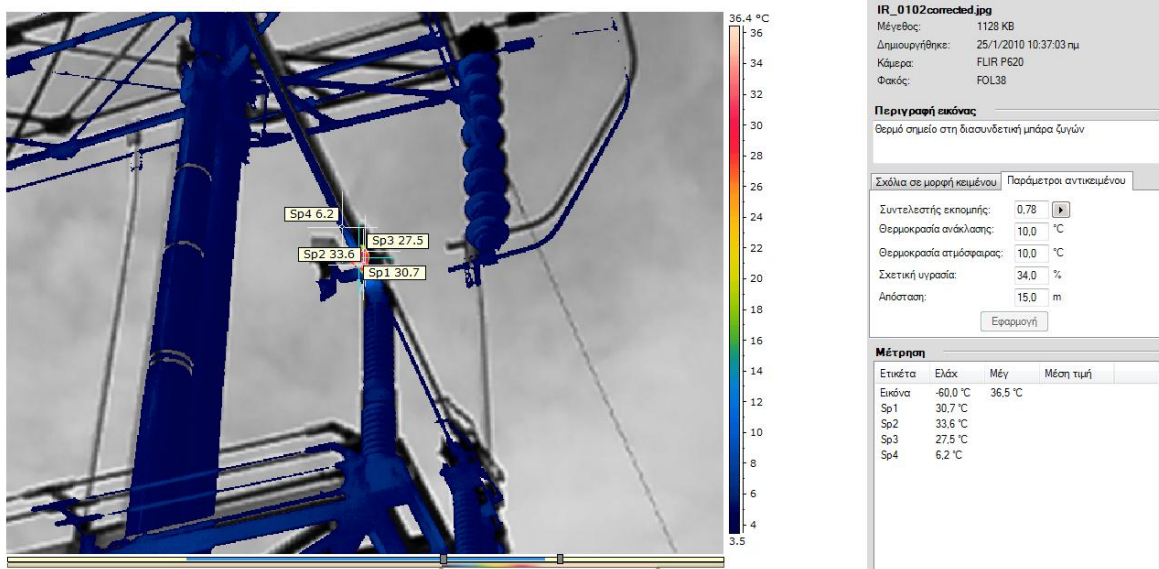
	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	34.9
Σημείο 2	35.4
Σημείο 3	24.8
Σημείο 4	23.4
Σημείο 5	36.3
Σημείο 6	42.1

Στατικές επαφές

Στη διασυνδεδετική μπάρα ζυγών της εικόνας 3.16 εντοπίζεται κάποιο θερμό σημείο στην στατική επαφή, η θερμοκρασία του οποίου φαίνεται αυξημένη σε σχέση με τα γειτονικά του σημεία κατά περίπου 28 °C. Ο συντελεστής εκπομπής τοποθετείται ίσως με 0.78, που λήφθηκε από τους πίνακες δεικτών emissivity για θερμό οξειδωμένο χαλκό στην επιφάνεια του οποίου υπάρχει λεπτό στρώμα οξειδίου.

Σύμφωνα με τον πίνακα προτεραιοτήτων 3.1 το θερμό σημείο κατηγοριοποιείται σαν προτεραιότητα 2, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας 20-30 °C, που σημαίνει ότι διορθωτικά μέτρα πρέπει να ληφθούν, την επόμενη περίοδο.

Πιθανός λόγος ύπαρξης αυτής της αύξησης θερμοκρασίας στην στατική επαφή και εντοπισμού του θερμού σημείου από την θερμοκάμερα, μπορεί να είναι η χαλάρωση της δύναμης σύσφιξης και η ύπαρξη μεγάλου ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση διάβασης της επαφής. Η αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται στο σημείο όπου υπάρχουν ελάσματα στήριξης για την διαστολή και τη συστολή του ζυγού, στο σημείο δηλαδή που προσδένεται ο ζυγός. Υπάρχει ακόμη η πιθανότητα να μην μπορεί να απάγεται η αναπτυσσόμενη θερμότητα στην επαφή, λόγω πολλών ξένων επικαθίσεων και σκόνης.

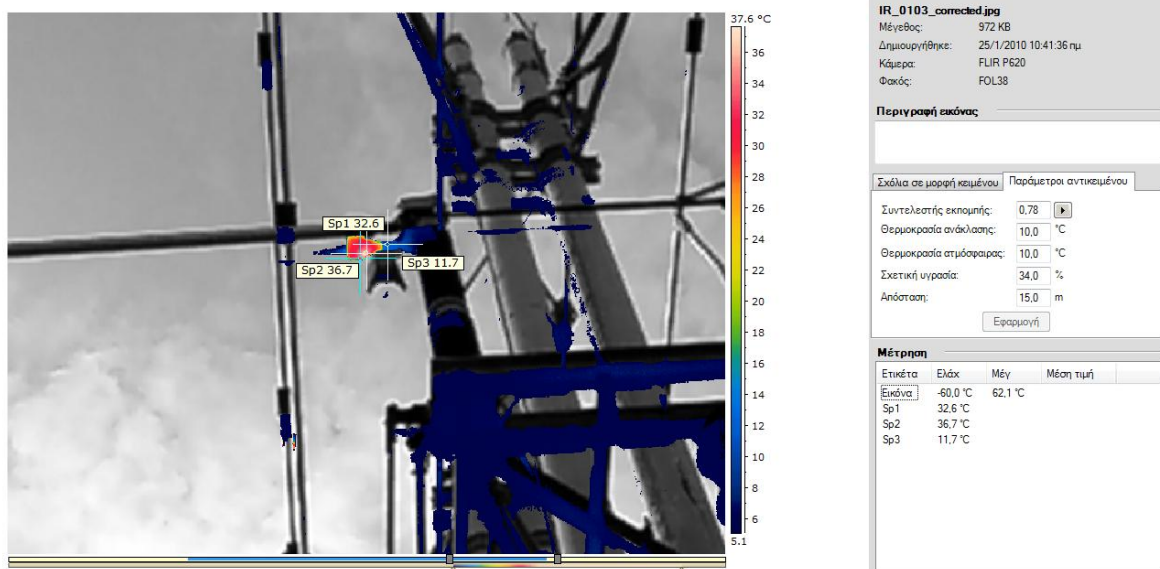


Εικόνα 3.16: Θερμό σημείο στη στατική επαφή διασυνδεδετικής μπάρας ζυγών

Πίνακας 3.10: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	30.7
Σημείο 2	33.6
Σημείο 3	27.5
Σημείο 4	6.2

Αφού το θερμότερο σημείο παρουσιάζει μέγιστη θερμοκρασία 36.5 °C, που συγκριτικά με τα γειτονικά σημεία είναι υψηλή, διορθωτικά μέτρα θα πρέπει να ληφθούν προσεχώς. Τα διορθωτικά βήματα, σχετίζονται με το σφίξιμο της στατικής επαφής η οποία έχει χαλαρώσει, εξαιτίας των απωστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται, ή τον καθαρισμό της από τις ξένες επικαθίσεις που δυσκολεύουν την απαγωγή θερμότητας.



Εικόνα 3.17: Θερμό σημείο στη στατική επαφή διασυνδετικής μπάρας ζυγών

Πίνακας 3.11: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	32.6
Σημείο 2	36.7
Σημείο 3	11.7

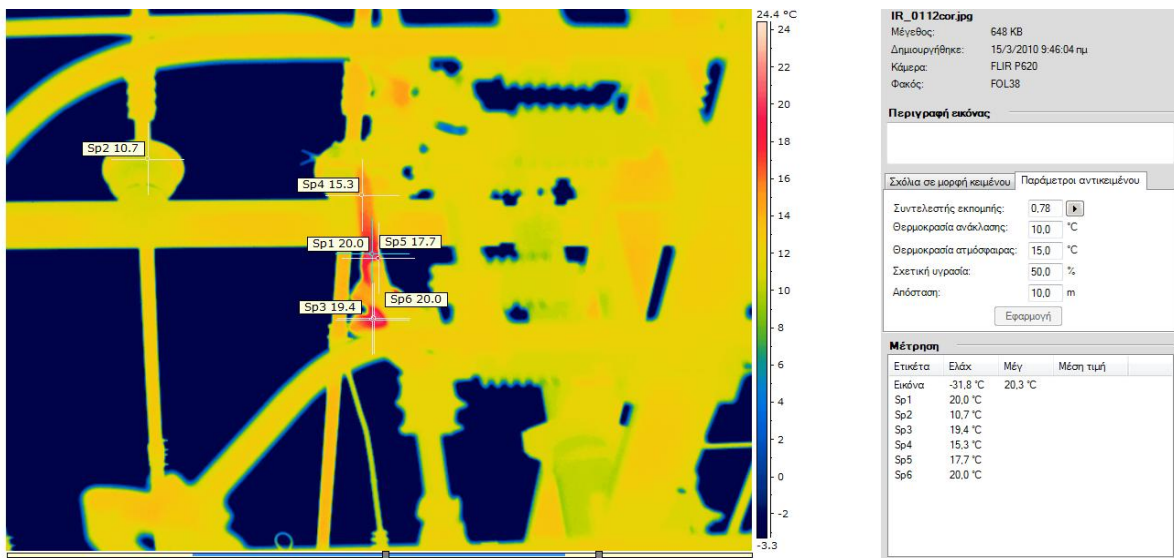
Στην εικόνα 3.18 παρουσιάζεται η φωτογραφία της στατικής επαφής που εμφανίζει θερμό σημείο με μέγιστη θερμοκρασία 36.7 °C, όπου φαίνεται καθαρά το σημείο πρόσδεσης του ζυγού.



Εικόνα 3.18: Φωτογραφία της στατικής επαφής της διάταξης που μελετήθηκε θερμικά

Φαινόμενα μεταφοράς, όπως το φαινόμενο σήραγγας, η θερμιονική εκπομπή και η εκπομπή πεδίου, είναι πιθανόν να εμφανίζονται στην επαφή που παρουσιάζεται αύξηση της θερμοκρασίας σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.

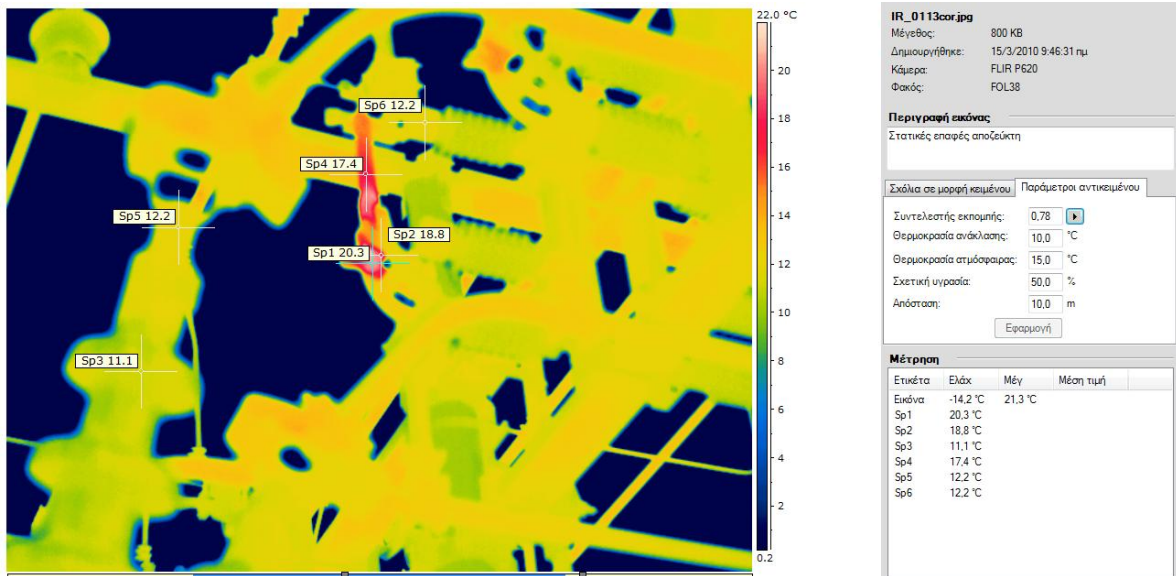
Στις θερμικές εικόνες 3.19 και 3.20 παρουσιάζονται οι στατικές επαφές ενός αποζεύκτη, στις οποίες αναπτύσσεται μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με τα γειτονικά σημεία. Η μέγιστη θερμοκρασία στην στατική επαφή είναι περίπου 20 °C και στα γειτονικά της σημεία κυμαίνεται από 15-19 °C. Λόγω του γεγονότος ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της στατικής επαφής είναι ελάχιστη, εκτιμάται ότι δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα και η ύπαρξη θερμού σημείου δικαιολογείται λόγω της ύπαρξης της αντίστασης στένωσης.



Εικόνα 3.19: Στατικές επαφές αποζεύκτη

Πίνακας 3.12: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	19.9
Σημείο 2	18
Σημείο 3	17.5
Σημείο 4	19.3
Σημείο 5	18.3
Σημείο 6	20.7



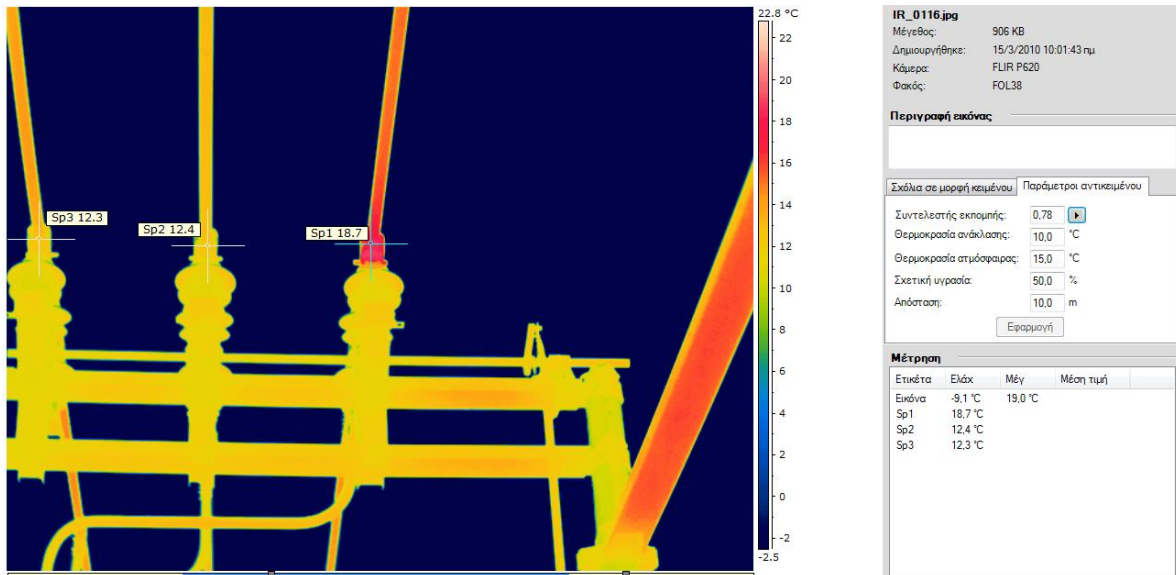
Εικόνα 3.20: Στατικές επαφές αποζεύκτη

Πίνακας 3.13: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	20.3
Σημείο 2	18.8
Σημείο 3	11.1
Σημείο 4	17.4
Σημείο 5	12.2
Σημείο 6	12.2

Στις στατικές επαφές, η χαλάρωση της μηχανικής σύσφιξης λόγω των απωστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στις δύο επιφάνειες των επαφών, όπως επίσης και η οξείδωση, οδηγούν στη μείωση της ενεργού διατομής και στην εμφάνιση θερμών σημείων και αυξημένης θερμοκρασίας.

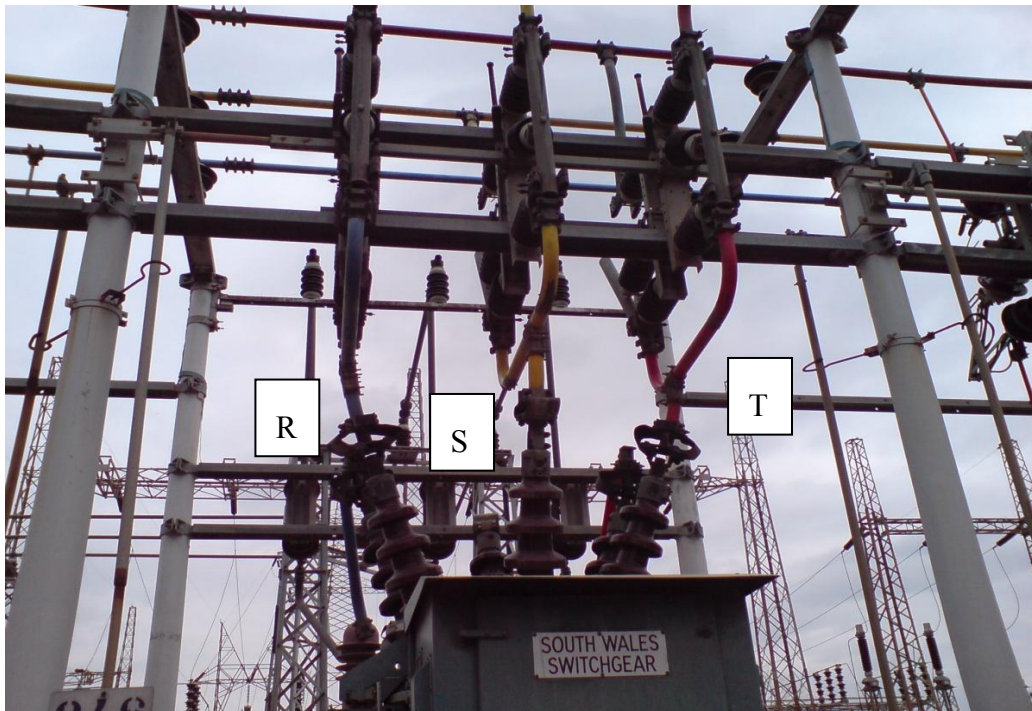
Στη θερμική εικόνα 3.21 παρουσιάζεται υπερθέρμανση, σε μία φάση στη γραμμή μεταφοράς. Συγκρίνοντας τις τρεις φάσεις φαίνεται ότι οι δύο φάσεις εμφανίζουν θερμοκρασία 12 °C ενώ η τρίτη φάση παρουσιάζει θερμοκρασία 19 °C. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά είναι το αποτέλεσμα της διέλευσης περισσότερου ρεύματος, οπότε και συγκέντρωσης περισσότερης θερμότητας λόγω νόμου Joule στην τρίτη φάση της γραμμής μεταφοράς.



Εικόνα 3.21: Θερμική εικόνα γραμμών μεταφοράς

Πίνακας 3.14: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	18.7
Σημείο 2	12.4
Σημείο 3	12.3

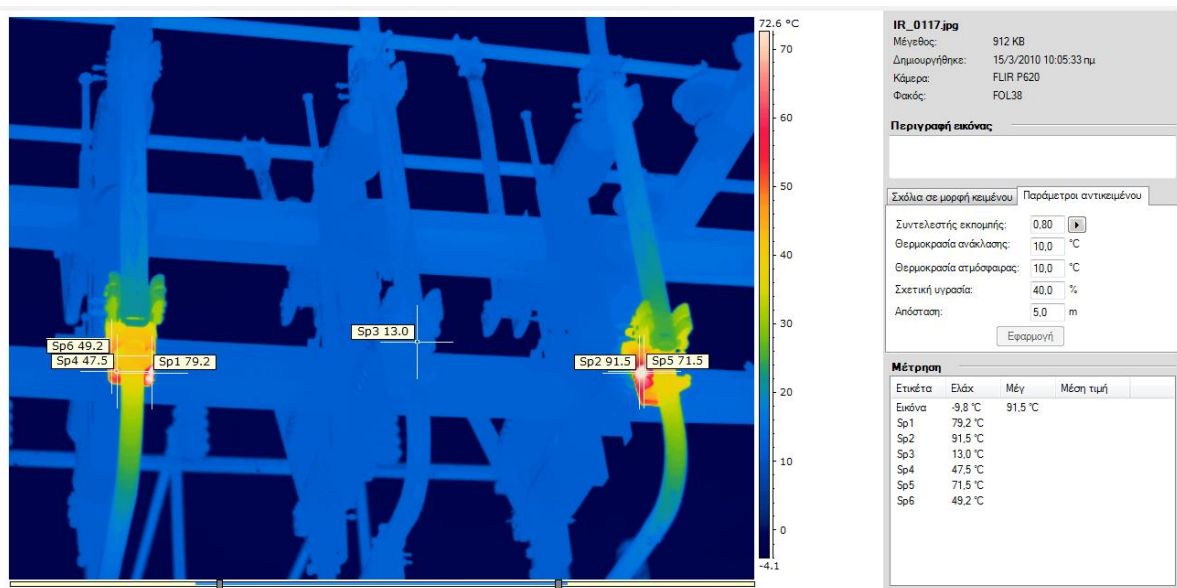


Εικόνα 3.22: Φωτογραφία του δικτύου που θερμογραφήθηκε

Από την προηγούμενη φωτογραφία παρατηρούμε τις τρεις φάσεις του δικτύου, την R που είναι βαμμένη μπλε, την S που είναι βαμμένη κίτρινη και την T που είναι βαμμένη κόκκινη.

Στη θερμική φωτογραφία της εικόνας 3.23 παρουσιάζονται δύο φάσεις ενός αποζεύκτη και συγκεκριμένα η μπλε και η κόκκινη, δηλαδή οι φάσεις R και T, οι οποίες σε αντίθεση με τη μεσαία φάση παρουσιάζουν μεγάλη υπερθέρμανση.

Ειδικότερα, το πιο θερμό σημείο της R φάσης του αποζεύκτη έχει θερμοκρασία 79.2 °C, ενώ το πιο θερμό σημείο της φάσης T έχει θερμοκρασία 91.5 °C. Στη μεσαία φάση η θερμοκρασία κυμαίνεται στους 13 °C.



Εικόνα 3.23: Θερμική εικόνα συστήματος αποζευκτών

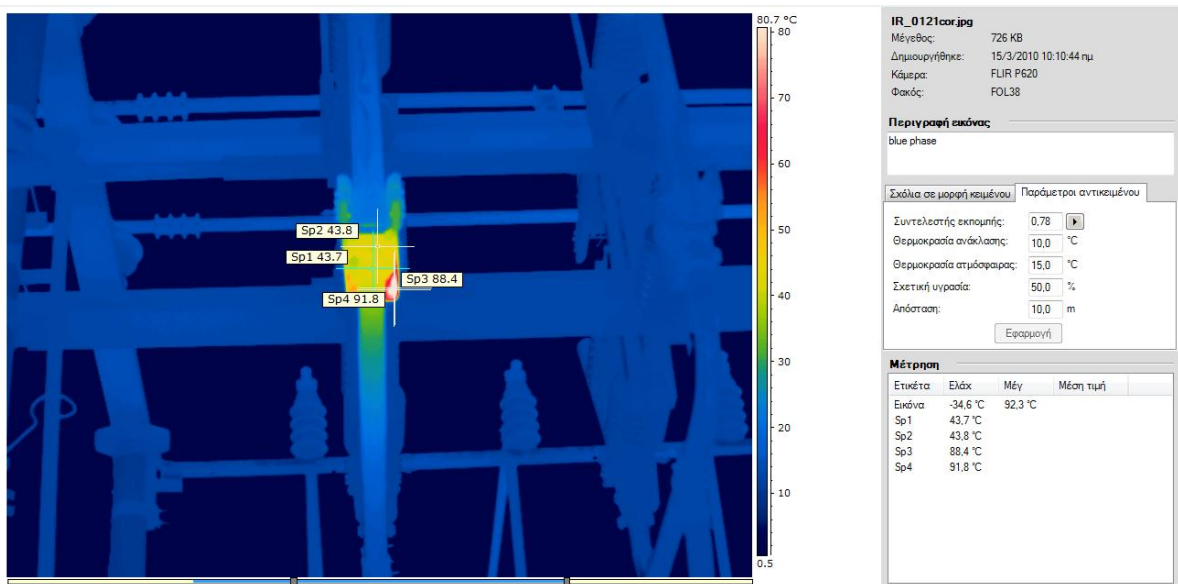
Πίνακας 3.15: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	79.2
Σημείο 2	91.5
Σημείο 3	13
Σημείο 4	47.5
Σημείο 5	71.5
Σημείο 6	49.2

Είναι προφανές ότι η διαφορά θερμοκρασίας είναι πολύ μεγάλη δηλαδή 78.5 °C, γεγονός που κατηγοριοποιεί τις δύο φάσεις του αποζεύκτη σύμφωνα με τον πίνακα 3.1 στην προτεραιότητα 3. Δηλαδή, σύμφωνα με τον σκοπό του μη καταστροφικού ποιοτικού ελέγχου, πρέπει σύντομα να ληφθούν διορθωτικά προληπτικά μέτρα στο συγκεκριμένο αποζεύκτη.

Το πρόβλημα της αύξησης της θερμοκρασίας οφείλεται πιθανότατα στην αντίσταση διάβασης της στατικής επαφής. Όπως γνωρίζουμε, σαν αντίσταση διάβασης, χαρακτηρίζεται η ηλεκτρική αντίσταση που παρουσιάζει μία επαφή κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αντίσταση διάβασης περιλαμβάνει την αντίσταση στένωσης και την αντίσταση του στρώματος των επικαθίσεων στις επαφές. Σε περίπτωση που το στρώμα των επικαθίσεων είναι μεγάλο, η ικανότητα απαγωγής θερμότητας μειώνεται οπότε και παρουσιάζεται αυξημένη θερμοκρασία. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται καθαρισμός ή και αλλαγή των προβληματικών στοιχείων της διάταξης.

Επίσης πιθανός λόγος ύπαρξης της αυξημένης θερμοκρασίας είναι η διάβαση πολύ ισχυρού ρεύματος από αυτές τις δύο φάσεις σε αντίθεση με τη μεσαία, όπως και η χαλάρωση των επαφών. Η διαφορά θερμοκρασίας είναι όμως πολύ μεγάλη, γεγονός που δεν εξηγείται μόνο από την διάβαση περισσότερου ρεύματος αλλά και από άλλα φαινόμενα που έχουν σχέση με την οξείδωση της επαφής λόγω επικαθίσεων και σκόνης.

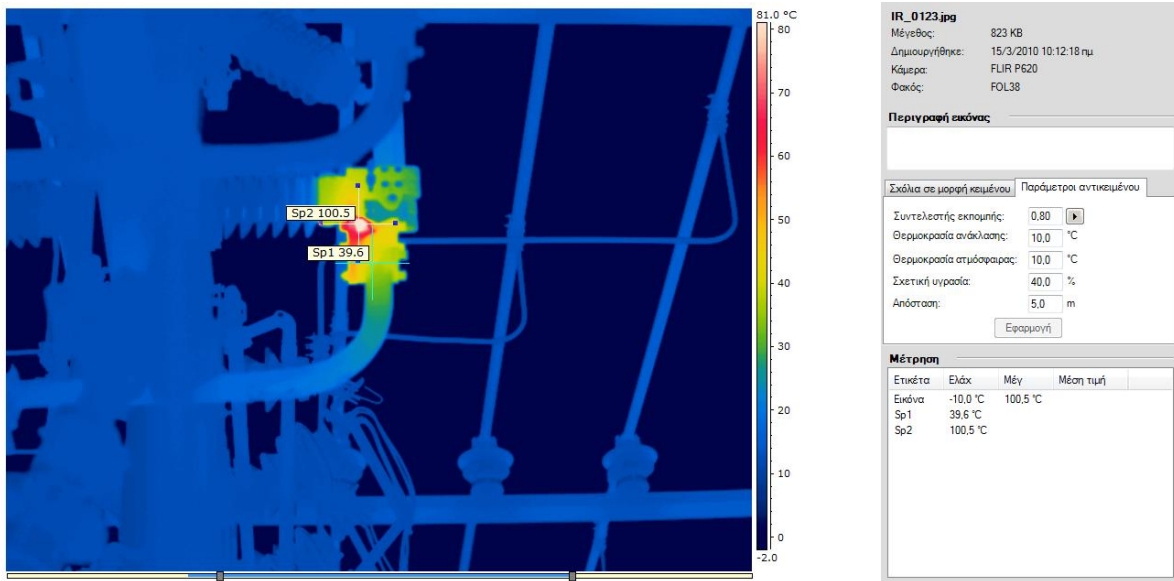


Εικόνα 3.24: Θερμική εικόνα φάσης R αποζεύκτη

Πίνακας 3.16: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	43.7
Σημείο 2	43.8
Σημείο 3	88.4
Σημείο 4	91.8

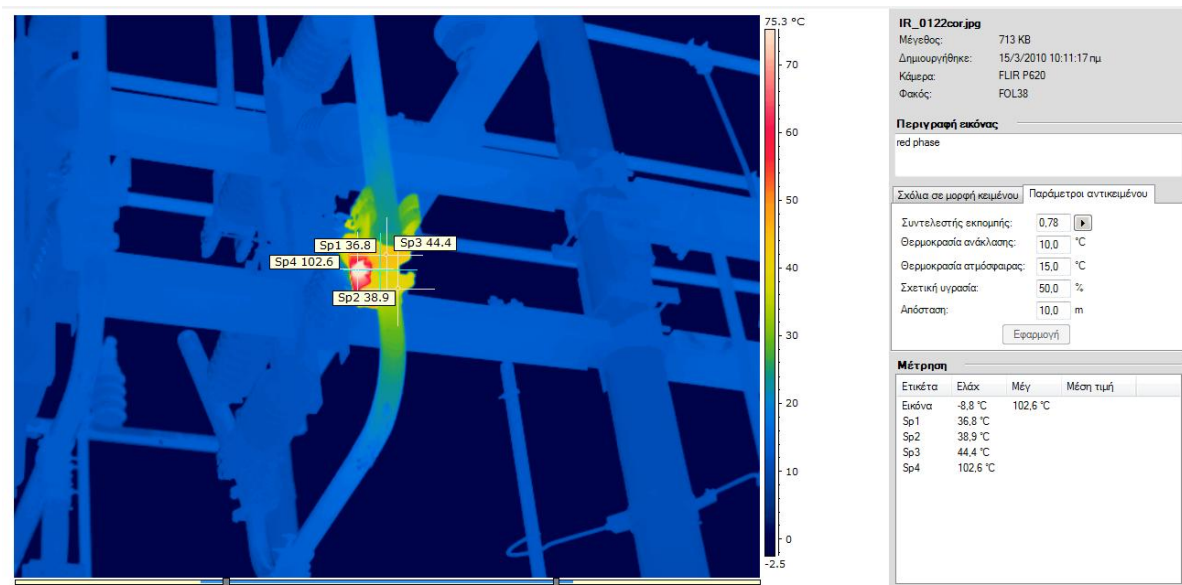
Η φάση R του αποζεύκτη φαίνεται στη θερμική εικόνα 3.23 και 3.24 όπως και τα διάφορα σημεία της με τις θερμοκρασίες τους. Το θερμότερο σημείο εντοπίζεται στους 100.5 °C και κατατάσσει τον αποζεύκτη στην κατηγορία των άμεσων διορθωτικών μέτρων.



Εικόνα 3.25: Θερμική εικόνα φάσης R αποζεύκτη

Πίνακας 3.17: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	39.6
Σημείο 2	100.5



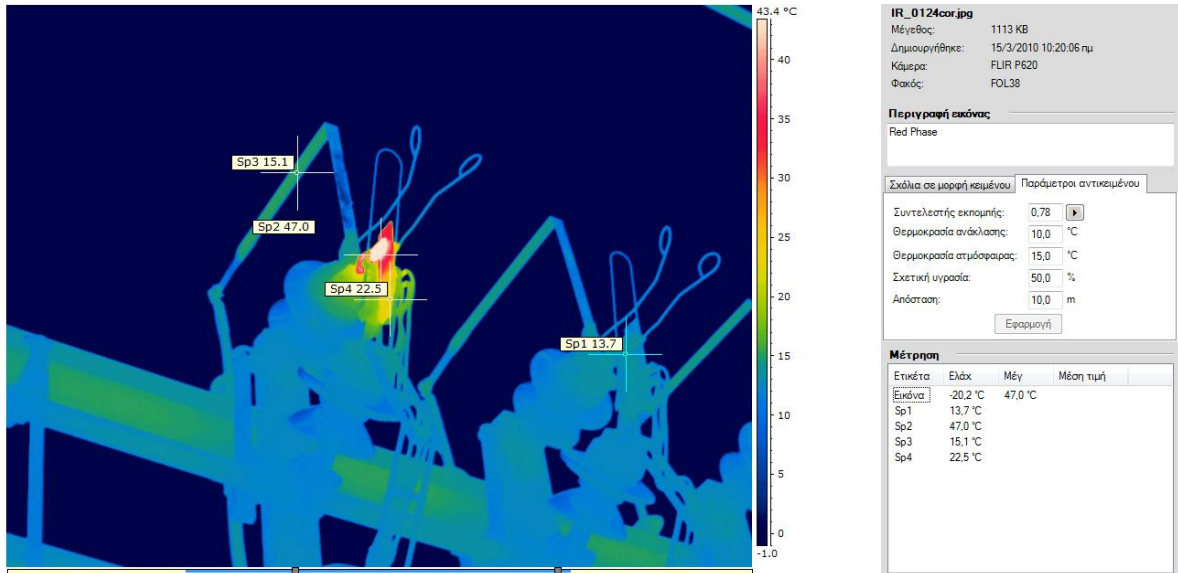
Εικόνα 3.26: Θερμική εικόνα φάσης T αποζεύκτη

Πίνακας 3.18: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	36.8
Σημείο 2	38.9
Σημείο 3	44.4
Σημείο 4	102.6

Αντίστοιχα, η φάση T η οποία παρουσιάζει την υψηλότερη θερμοκρασία που είναι 102.6 °C παρουσιάζεται στην εικόνα 3.26. Η υπερβολικά αυξημένη θερμοκρασία δηλώνει την ύπαρξη σοβαρού προβλήματος στην επαφή του αποζεύκτη και διορθωτικά μέτρα πρέπει να ληφθούν άμεσα.

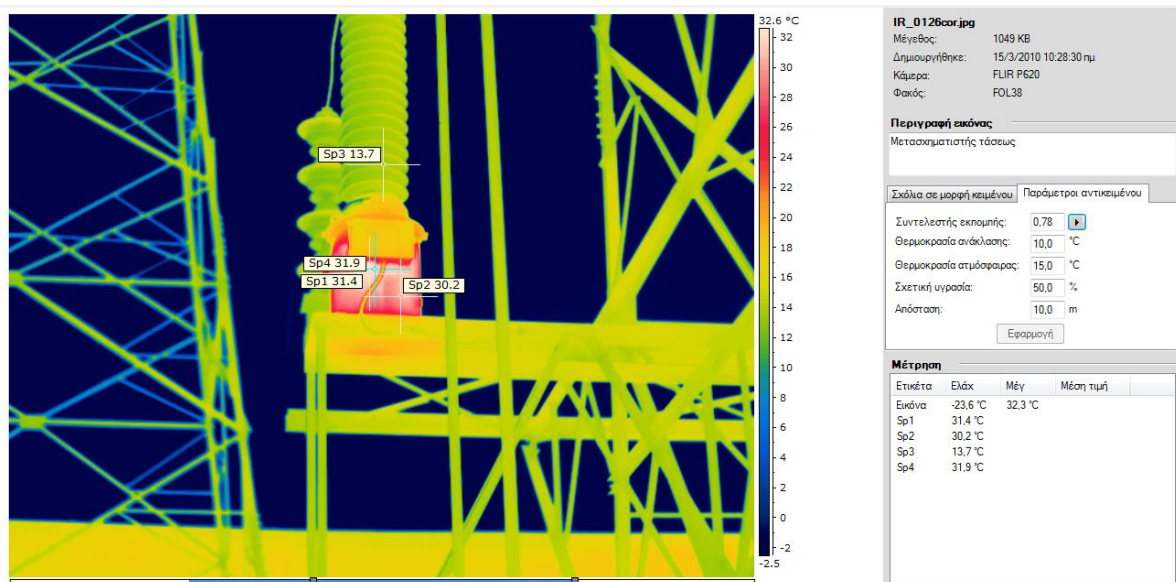
Στη θερμική εικόνα 3.27, απεικονίζεται η κόκκινη φάση T ενός αποζεύκτη αγωγού (καλωδίου), η μέγιστη θερμοκρασία του οποίου είναι 47 °C. Συγκριτικά με τη διπλανή της φάση της οποίας η θερμοκρασία είναι 13.7 °C παρουσιάζεται μια θερμοκή απόκλιση 33.3 °C, η οποία κατηγοριοποιεί τον προληπτικό έλεγχο στην κατηγορία 3 για άμεσες διορθωτικές ενέργειες.

**Εικόνα 3.27:** Θερμική εικόνα αποζεύκτη καλωδίου

Πίνακας 3.19: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

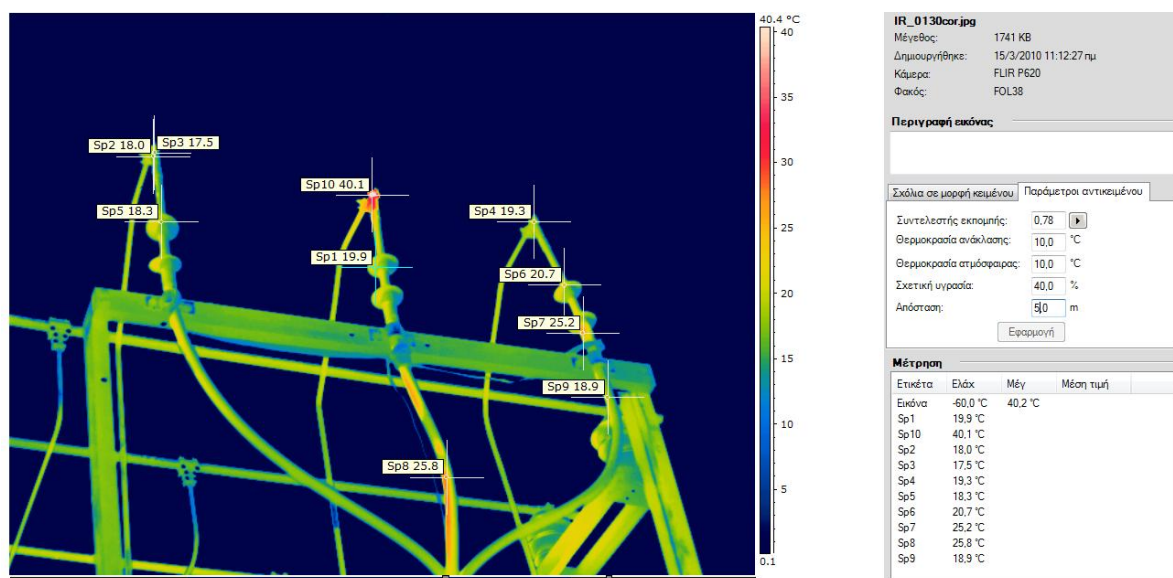
	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	13.7
Σημείο 2	47
Σημείο 3	15.1
Σημείο 4	22.5

Στη θερμική εικόνα 3.28 απεικονίζεται ένας μετασχηματιστής έντασης, στον οποίο φαίνεται θερμό το δοχείο λαδιού του.

**Εικόνα 3.28:** Θερμική εικόνα μετασχηματιστή έντασης**Πίνακας 3.20:** Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	31.4
Σημείο 2	30.2
Σημείο 3	13.7
Σημείο 4	31.9

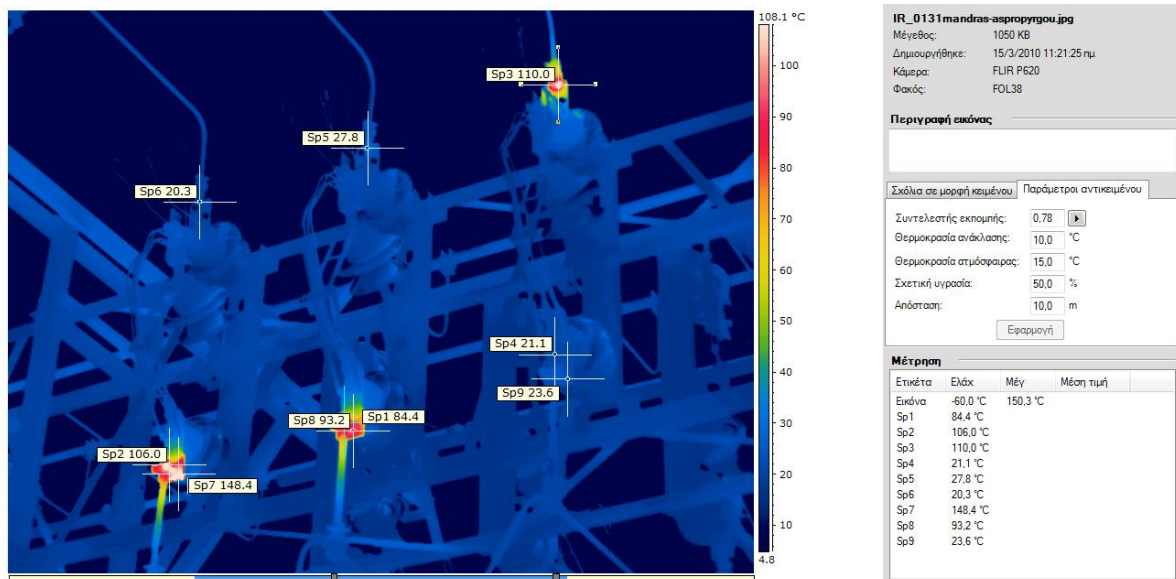
Στην κορυφή του επόμενου αποζεύκτη παρουσιάζεται στη μεσαία φάση ένα θερμό σημείο με θερμοκρασία 40.1 °C. Αντίθετα στις άλλες δύο φάσεις του ίδιου αποζεύκτη η θερμοκρασία κυμαίνεται κοντά στους 18-19 °C.



Εικόνα 3.29: Θερμική εικόνα στη μεσαία φάση αποζεύκτη

Πίνακας 3.21: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	19.9
Σημείο 2	18
Σημείο 3	17.5
Σημείο 4	19.3
Σημείο 5	18.3
Σημείο 6	20.7
Σημείο 7	25.2
Σημείο 8	25.8
Σημείο 9	18.9
Σημείο 10	40.1



Εικόνα 3.30: Θερμική εικόνα αποζεύκτη

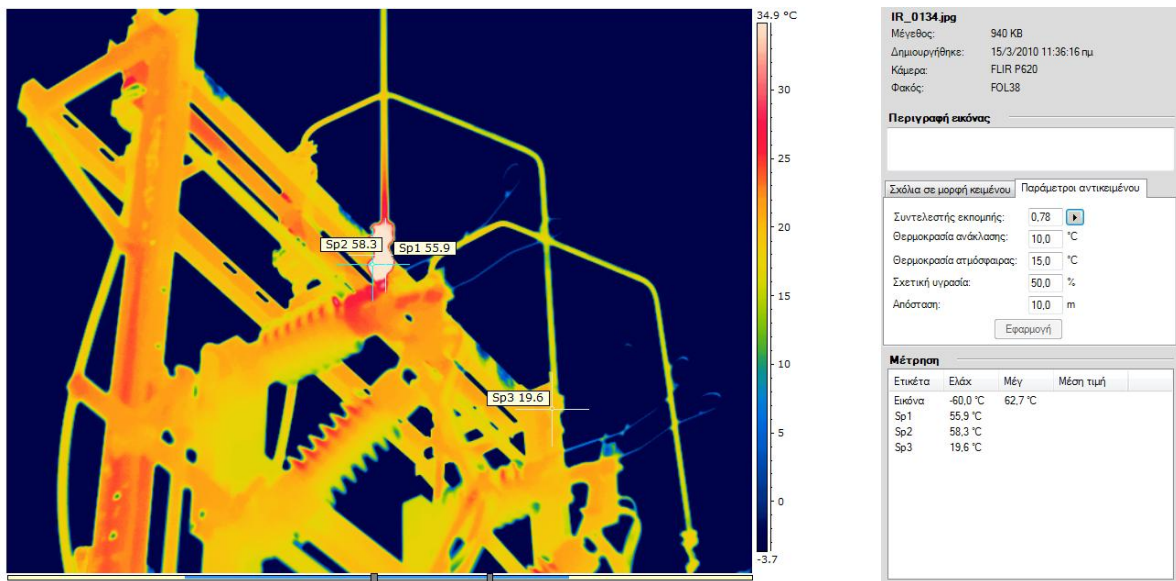
Πίνακας 3.22: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	84.4
Σημείο 2	106
Σημείο 3	110
Σημείο 4	21.1
Σημείο 5	27.8
Σημείο 6	20.3
Σημείο 7	148.4
Σημείο 8	93.2
Σημείο 9	23.6

Στον αποζεύκτη της εικόνας 3.30 στο σημείο 7 παρουσιάζεται θερμοκρασία 148.4 °C στη φάση R. Η θερμοκρασία αυτή αποτελεί τη μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με τη φάση T είναι περίπου 125 °C, δηλαδή η επαφή κατατάσσεται στην προτεραιότητα 4 για άμεσα διορθωτικά μέτρα.



Εικόνα 3.31: Φωτογραφία του συστήματος αποζευκτών που μελετήθηκε θερμικά

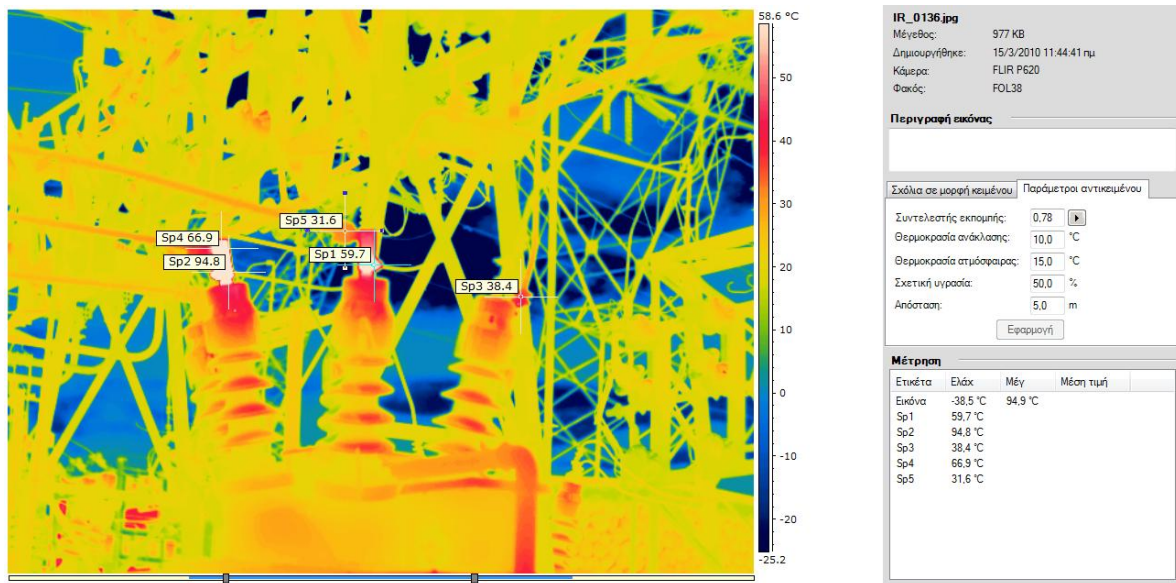


Εικόνα 3.32: Θερμική εικόνα αποζεύκτη καλωδίου

Πίνακας 3.23: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	55.9
Σημείο 2	58.3
Σημείο 3	19.6

Η θερμική εικόνα που ακολουθεί απεικονίζει τα ακροκιβώτια ενός διακόπτη ελαίου στα οποία εμφανίζονται διαφορετικές θερμοκρασίες.

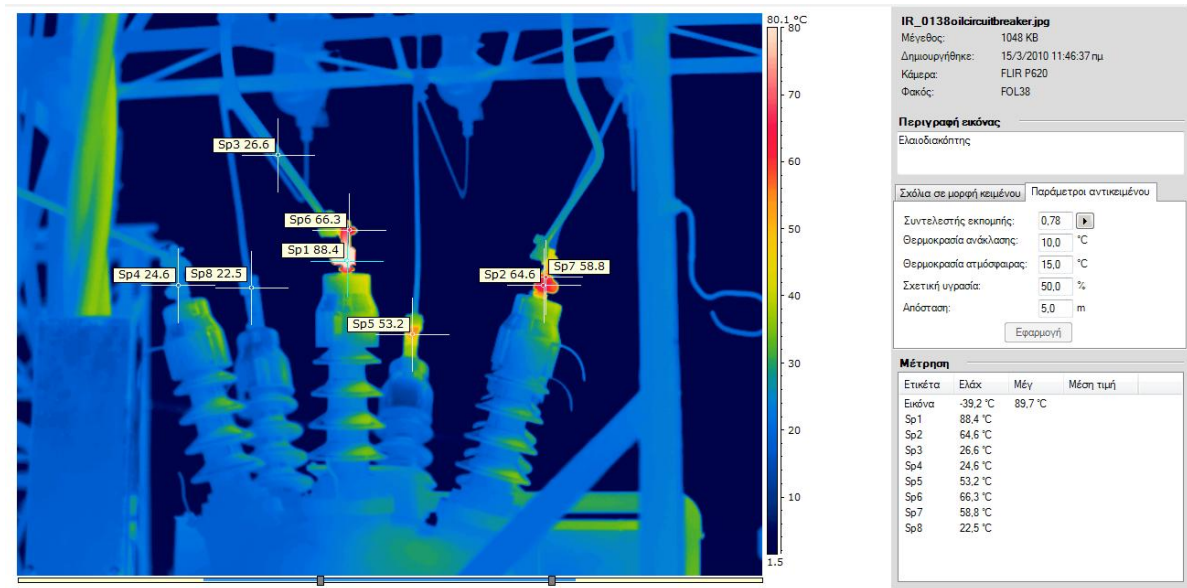


Εικόνα 3.33: Θερμική εικόνα διακόπτη ελαίου

Πίνακας 3.24: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	59.7
Σημείο 2	94.8
Σημείο 3	38.4
Σημείο 4	66.9
Σημείο 5	31.6

Στις στατικές επαφές του ελαιοδιακόπτη της εικόνας 3.34, φαίνεται μεγάλη κλιμάκωση θερμοκρασιών από 22.5 °C στο σημείο 8 μέχρι 64.6 °C στο σημείο 2 και 88.4 στο σημείο 1. Η μεγάλη αυτή διαφορά θερμοκρασίας στις διάφορες στατικές επαφές, πιθανότατα οφείλεται στα διαφορετικά ρεύματα που διαρρέουν τα ακροκιβώτια (bushings) του διακόπτη ελαίου και που λόγω φαινομένου Joule θερμαίνουν διαφορετικά τις επαφές. Άλλος λόγος ύπαρξης της διαφοράς θερμοκρασίας μπορεί να είναι το γεγονός ότι δεν μπορεί να απάγεται η αναπτυσσόμενη θερμότητα στην επαφή, λόγω πολλών ξένων επικαθίσεων και σκόνης.



Εικόνα 3.34: Θερμική εικόνα διακόπτη ελαίου

Πίνακας 3.25: Κλιμάκωση θερμοκρασίας

	Θερμοκρασία (°C)
Σημείο 1	88.4
Σημείο 2	64.6
Σημείο 3	26.6
Σημείο 4	24.6
Σημείο 5	53.2
Σημείο 6	66.3
Σημείο 7	58.8
Σημείο 8	22.5

Η ορατή φωτογραφία του ελαιοδιακόπτη που εξετάστηκε θερμικά προηγουμένως απεικονίζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 3.35: Φωτογραφία του διακόπτη ελαίου που μελετήθηκε θερμικά

Συμπερασματικά, μελετήθηκαν τρεις υποσταθμοί υψηλής τάσης της Δ.Ε.Η. θερμικά και παρουσιάστηκαν οι υπέρυθρες εικόνες που λήφθηκαν μαζί με φωτογραφίες που δείχνουν τη δομή του δικτύου. Σε πίνακες παρουσιάστηκαν οι θερμοκρασίες των εξαρτημάτων που μετρήθηκαν. Έμφαση δόθηκε στις θερμοκρασίες μονωτήρων, μετασχηματιστών έντασης και τάσης και κυρίως στις στατικές επαφές που γενικότερα παρουσίαζαν αυξημένη θερμοκρασία. Η μελέτη της θερμοκρασίας και αντίστοιχα της υπερθέρμανσης έγινε συγκριτικά μετρώντας τις τρεις φάσεις ή και γειτονικές ίδιες επαναλαμβανόμενες διατάξεις. Ακολουθώντας έναν πίνακα προτεραιοτήτων ανάλογα με την απόκλιση από τη φυσιολογική θερμοκρασία των γειτονικών ηλεκτρικών στοιχείων που μετρούνταν, κατηγοριοποιήθηκαν τα θερμά σημεία και τα σφάλματα.

4. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ FLIR

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή της θερμικής κάμερας που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στους υποσταθμούς υψηλών τάσεων, καθώς και ο τρόπος λειτουργίας της. Η υπέρυθρη κάμερα ήταν το μοντέλο P620 της εταιρίας FLIR.

FLIR P620

INFRARED CAMERA



Εικόνα 4.1 : Θερμική κάμερα FLIR P620

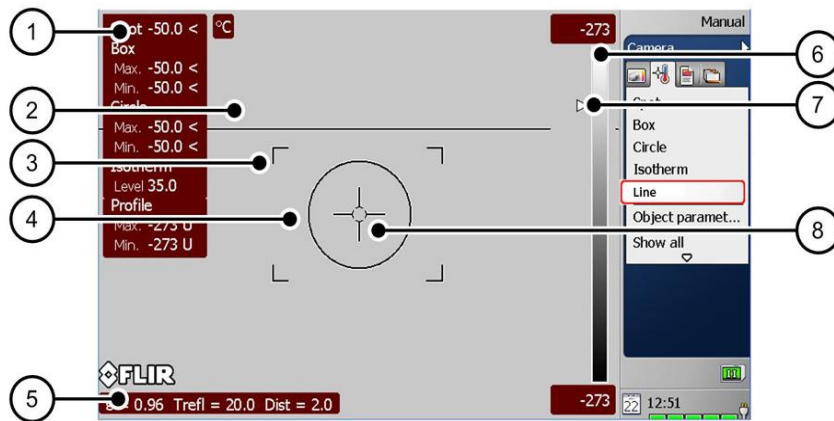
Μετά την ενεργοποίηση της κάμερας με το κουμπί ON/OFF, στη βασική οθόνη εμφανίζεται η οθόνη της εικόνας 4.2:



Εικόνα 4.2: Βασική οθόνη

Επιλέγοντας την Camera ρυθμίζουμε τις βασικές παραμέτρους που είναι διαφορετικοί για κάθε θερμογράφιση και είναι ο συντελεστής emissivity (ϵ), η ανακλώμενη θερμοκρασία (Trefl) και η απόσταση από το αντικείμενο που θέλουμε να μετρήσουμε (Dist). Για να είναι οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σωστές πρέπει αυτές οι παράμετροι να είναι σωστά ρυθμισμένες, αλλιώς τα αποτελέσματα διαφέρουν από τα πραγματικά.

Στην εικόνα 4.3, στα αριστερά φαίνονται τα αποτελέσματα θερμοκρασίας και συγκεκριμένα οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες στα σημεία μέτρησης, ενώ στο menu στα δεξιά ρυθμίζονται τα διάφορα εργαλεία μέτρησης και οι παράμετροι ανάλογα με τη θερμογράφηση που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε.



Εικόνα 4.3: Ρυθμίσεις θερμικής κάμερας

- 1) Πίνακας αποτελεσμάτων
- 2) Γραμμή (εργαλείο μέτρησης)
- 3) Κουτί (εργαλείο μέτρησης)
- 4) Κύκλος (εργαλείο μέτρησης)
- 5) Γραμμή κατάστασης
- 6) Κλίμακα θερμοκρασίας
- 7) Ισοθερμικό (εργαλείο μέτρησης)
- 8) Μετρητής σημείου (εργαλείο μέτρησης)

Μόλις ρυθμιστούν όλες οι παράμετροι πρέπει να γίνει εστίαση στο σημείο του αντικειμένου που θέλουμε να μετρήσουμε και αυτό γίνεται αυτόματα ή και χειροκίνητα. Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται με το κουμπί Focus και το κουμπί Auto/ Manual.

Για να κάνουμε προεπισκόπηση μιας εικόνας, πατάμε το κουμπί Preview/ Save.

Αν το ξαναπατήσουμε, επιστρέφουμε σε τρόπο λειτουργίας ζωντανής εικόνας live.

Για να αποθηκεύσουμε μια εικόνα, πατάμε και κρατάμε πατημένο το κουμπί Preview/ Save για λίγα δευτερόλεπτα.

Για να αλλάξουμε τα όρια της θερμοκρασίας που θέλουμε να μετρήσουμε και την κλίμακα εύρους θερμοκρασιών και να τροποποιήσουμε ανάλογα τα χρώματα της παλέτας και πως θα αντιστοιχούν σε κάθε θερμοκρασία, δηλαδή για να αλλάξουμε την κλίμακα των μετρήσεων, από την εργαλειοθήκη επιλέγουμε Max/ Min και με το joystick αλλάζουμε τα όρια.

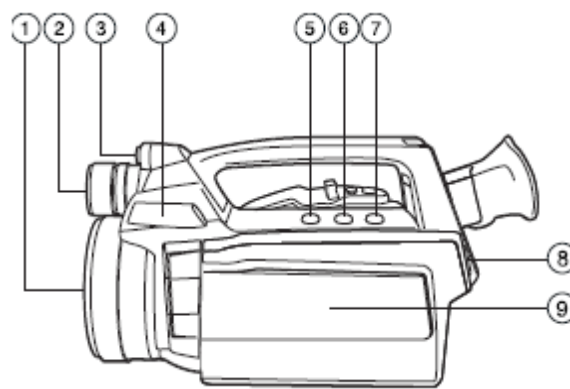
Μπορούμε επίσης σε μία εικόνα να αλλάζουμε την θέση του spot ώστε να κινούμαστε στην επιφάνεια της και να βρίσκουμε όλες τις θερμοκρασίας. Επομένως σε μία εικόνα μπορούμε να βρούμε τη θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο της.

Σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο κάμερας, υποστηρίζεται και φωνητική λειτουργία και ηχογράφηση και γραπτή υποσημείωση.

Τέλος στο αρχικό menu στον φάκελο Archive μπορούμε να βρούμε όλες τις αποθηκευμένες φωτογραφίες.

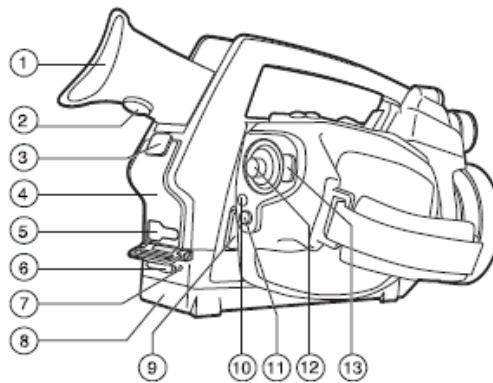
Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι υπάρχει κατάλληλο λογισμικό με το οποίο μπορούμε να ανοίξουμε οποιαδήποτε εικόνα και να την τροποποιήσουμε αλλάζοντας όλες τις παραμέτρους και να την επεξεργαστούμε.

Ακολουθούν σύντομες περιγραφικές εικόνες όπου φαίνονται με νούμερα τα αντίστοιχα εξαρτήματα ή κουμπιά της θερμοκάμερας P620 της FLIR. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν φυσικά να βρεθούν στο manual της υπέρυθρης κάμερας [1].



Εικόνα 4.4: Επεξήγηση λειτουργιών

- 1) Φακός υπέρυθρων
- 2) Ψηφιακή κάμερα
- 3) Δείκτης λέιζερ
- 4) Προβολέας ψηφιακής κάμερας
- 5) Κουμπί laser
- 6) Κουμπί που ορίζεται από το χρήστη #1
- 7) Κουμπί που ορίζεται από το χρήστη #2
- 8) Κουμπί απασφάλισης οθόνης
- 9) Οθόνη LCD



Εικόνα 4.5: Επεξήγηση λειτουργιών

- 1) Σκόπευτρο
- 2) Κουμπί ρύθμισης για διοπτρική
διόρθωση
- 3) Κουμπί απασφάλισης καπακιού φως
- 4) Κάλυμμα για χώρο φως
- 5) Κάλυμμα για φως βίντεο
- 6) Κάλυμμα για φως
- 7) Ενδεικτικό LED κατάστασης μπαταρίας
- 8) Μπαταρία
- 9) Κουμπί απασφάλισης μπαταρίας
- 10) Ενδεικτικό LED τροφοδοσίας
- 11) Κουμπί On/Off
- 12) Joystick
- 13) Κουμπί τρόπου λειτουργίας

5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ – EMISSIVITY

Surface Material	Emissivity Coefficient
	e
Alloy 24ST Polished	0.09
Alumina, Flame sprayed	0.8
Aluminium Commercial sheet	0.09
Aluminium Foil	0.04
Aluminium Commercial Sheet	0.09
Aluminium Heavily Oxidized	0.2 - 0.31
Aluminium Highly Polished	0.039 - 0.057
Aluminium Anodized	0.77
Aluminium Rough	0.07
Aluminium paint	0.27 - 0.67
Antimony, polished	0.28 - 0.31
Asbestos board	0.96
Asbestos paper	0.93 - 0.945
Asphalt	0.93
Basalt	0.72
Beryllium	0.18
Beryllium, Anodized	0.9
Bismuth, bright	0.34
Black Body Matt	1.00
Black lacquer on iron	0.875
Black Parson Optical	0.95
Black Silicone Paint	0.93
Black Epoxy Paint	0.89
Black Enamel Paint	0.80
Brass Dull Plate	0.22
Brass Rolled Plate Natural Surface	0.06

Brass Polished	0.03
Brass Oxidized 600oC	0.6
Brick, red rough	0.93
Brick, fireclay	0.75
Cadmium	0.02
Carbon, not oxidized	0.81
Carbon filament	0.77
Carbon pressed filled surface	0.98
Cast Iron, newly turned	0.44
Cast Iron, turned and heated	0.60 - 0.70
Chromium polished	0.058
Concrete	0.85
Concrete, rough	0.94
Concrete tiles	0.63
Cotton Cloth	0.77
Copper electroplated	0.03
Copper heated and covered with thick oxide layer	0.78
Copper Polished	0.023 - 0.052
Copper Nickel Alloy, polished	0.059
Glass smooth	0.92 - 0.94
Glass, pyrex	0.85 - 0.95
Gold not polished	0.47
Gold polished	0.025
Granite	0.45
Gypsum	0.85
Ice smooth	0.966
Ice rough	0.985
Inconel X Oxidized	0.71
Iron polished	0.14 - 0.38
Iron, plate rusted red	0.61

Iron, dark gray surface	0.31
Iron, rough ingot	0.87 - 0.95
Lampblack paint	0.96
Lead pure unoxidized	0.057 - 0.075
Lead Oxidized	0.43
Lime wash	0.91
Magnesium Oxide	0.20 - 0.55
Magnesium Polished	0.07 - 0.13
Marble White	0.95
Masonry Plastered	0.93
Mercury liquid	0.1
Mild Steel	0.20 - 0.32
Molybdenum polished	0.05 - 0.18
Nickel, elctroplated	0.03
Nickel, polished	0.072
Nickel, oxidized	0.59 - 0.86
Nichrome wire, bright	0.65 - 0.79
Oak, planed	0.89
Oil paints, all colors	0.92 - 0.96
Paper offset	0.55
Plaster	0.98
Platinum, polished plate	0.054 - 0.104
Porcelain, glazed	0.92
Paint	0.96
Paper	0.93
Plaster, rough	0.91
Plastics	0.91
Porcelain glazed	0.93
Quartz glass	0.93
Roofing paper	0.91
Rubber, hard glossy plate	0.94

Rubber Nat Hard	0.91
Rubber Nat Soft	0.86
Sand	0.76
Sawdust	0.75
Silicon Carbide	0.83 - 0.96
Silver Polished	0.02 - 0.03
Steel Oxidized	0.79
Steel Polished	0.07
Stainless Steel, weathered	0.85
Stainless Steel, polished	0.075
Stainless Steel, type 301	0.54 - 0.63
Steel Galvanized Old	0.88
Steel Galvanized New	0.23
Tile	0.97
Tin unoxidized	0.04
Titanium polished	0.19
Tungsten polished	0.04
Tungsten aged filament	0.032 - 0.35
Water	0.95 - 0.963
Wood Beech, planned	0.935
Wood Oak, planned	0.885
Wrought Iron	0.94
Zink Tarnished	0.25
Zink polished	0.045

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Εγχειρίδιο χρήστη Flir600 series User's manual
- [2] Infrared Thermography, Errors and Uncertainties, Minkina, Dudzik, Wiley
- [3] Θερμομετρία Θερμογραφία, Ολυμπία Ζώγου, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών, Βόλος, Νοέμβριος 2007
- [4] G.Gaussorges, Microwave Technology Series 5, Infrared Thermography, Chapman& Hall
- [5] Υπέρυθρη θερμογραφία ως εργαλείο μη καταστροφικού ελέγχου σε θέματα ενδιαφέροντος πολιτικού μηχανικού, Διπλωματική εργασία Νικόλαου Δερμιτζάκη, Πάτρα 2006
- [6] Κ.Θ. Δέρβος, “Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων”, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2001
- [7] Μετρήσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας των μετασχηματιστών του δικτύου διανομής, Διπλωματική εργασία, Βασίλειος, Κ. Τσόλκας Στυλιανός, Α. Τυρέκογλου Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008
- [8] Ι.Α. Σταθόπουλος, “Υψηλές Τάσεις Ι”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
- [9] Θερμικός έλεγχος και μοντελοποίηση θερμικής συμπεριφοράς ολοκληρωμένων κυκλωμάτων
- [10] Εφαρμογές θερμογραφίας σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- [11] X. Maldague, Introduction to NDT by Active Infrared thermography, Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval, Quebec City (Que.) Canada G1K
- [12] Θερμογραφία, Α.Γ. Κορωνάιος Καθηγητής ΕΜΠ, Φ.Σαργέντης, Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών Τεύχος 2 ΑΘΗΝΑ 2003
- [13] Η θερμογραφία ως εργαλείο για τη συντήρηση μνημείων και έργων τέχνης, Γραικού, Δέσποινα (2008)
- [14] Maldague, Xavier P.V – “Infrared methodology and technology”, 1994
- [15] Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, N.P.Avdelidis , A. Moropoulou
- [16] Διπλωματική εργασία, Πεδιακή κατανομή πλησίον αλυσοειδών μονωτήρων, Σοφία Κ. Ζυγογιάννη
- [17] Η θερμογραφία υπερύθρων ως διαγνωστικό μέσο στην προβλεπτική συντήρηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, Φώτης Τσουκάλης
- [18] A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements T. Astarita, G. Cardone, G.M. Carlomagno, C. Meola
- [19] Applications of Thermal Imaging in Agriculture and Food Industry—A Review R. Vadivambal & Digvir S. Jayas

- [20] Infrared Thermal Imaging, Fundamentals, Research and Applications, Vollmer, Mollmann, Wiley
- [21] Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και βασικές διατάξεις, 3 εξάμηνο ΗΜΜΥ Κ.Θ Δέρβος
- [22] Θερμική Συμπεριφορά Στατικών Ηλεκτρικών Επαφών υπό Συνεχές ή Κεραυνικό Ρεύμα, Διδακτορική διατριβή, Μιλτιάδη Παίσιου
- [23] Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology, Milenko Braunovic, Valery V. Konchits, and Nikolai K. Myshkin, 2006
- [24] Electrical Contacts, Ragnar Holm
- [25] Μετρήσεις σε Βιομηχανικές Διατάξεις και Υλικά. Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004, Μπούρκας, Καραγιαννόπουλος
- [26] Διερεύνηση φαινομένων σε ηλεκτρικές επαφές, Χρήστου Κουτσογιώργα
- [27] Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων, S. Kasap
- [28] Power Systems Engineering Research Center (PSERC) “Evaluation of Critical Components of Non-Ceramic Insulators in-service: Role of Defective Interfaces “. Final Project Report, Publication 04-32, August 2004
- [29] Καραγιαννόπουλος Κ.Γ.. Μη γραμμικά φαινόμενα σε στατικές ηλεκτρικές επαφές. PhD thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 1992
- [30] Diagnostic methods for power energy networks based on partial discharges detection, EDMS Id: 1137918 v.1, E. Voulgari
- [31] Current measurements in 18 kV SMB feeders and SPS pulsed loop feeders, EDMS Id: 1137511 v.1, E. Voulgari
- [32] Partial discharges measurements with LPD Monitor, EDMS Id: 1137032 v.1, E.Voulgari

Δεύτερο Μέρος:

Διαγνωστικές μέθοδοι για ηλεκτρικά δίκτυα ενέργειας βασισμένες στην ανίχνευση μερικών εκκενώσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εργασία που εκπονήθηκε και συγγράφηκε στο CERN σαν μέρος της παρούσας διπλωματικής, σχετικά με την ανίχνευση μερικών εκκενώσεων στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση και την μέτρηση των μερικών εκκενώσεων στα καλώδια μέσης τάσης των 18 kV είναι μη-καταστροφικές και εντάσσονται στις μεθόδους για διαγνωστικούς ελέγχους σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Μία από αυτές είναι και η θερμογραφία, που εξετάστηκε στο πρώτο μέρος.

Το δεύτερο μέρος παρουσιάζεται στην αγγλική γλώσσα όπως συγγράφηκε αρχικά και αποτελείται από έξι κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας του CERN.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία και το φυσικό φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται γενικά στις υπάρχουσες μεθόδους για τον εντοπισμό των σφαλμάτων σε καλώδια και στους προληπτικούς ελέγχους.

Το τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζει τη μέθοδο εντοπισμού μερικών εκκενώσεων υπό φορτίο, χρησιμοποιώντας το LPD monitor της εταιρίας SebaKMT και το πέμπτο παρουσιάζει τα αποτελέσματα και την επεξεργασία τους.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο, τα καλώδια στα οποία εντοπίστηκαν αυξημένες μερικές εκκενώσεις, μετρούνται ξανά, με μία άλλη μέθοδο χωρίς φορτίο ώστε να γίνει ο ακριβής εντοπισμός του σφάλματος στο μήκος του καλωδίου που εμφανίζεται. Διορθωτικές ενέργειες και αντικατάσταση, πραγματοποιούνται στη συνέχεια και μετά τα καλώδια μετρούνται εκ νέου ώστε να φανεί αν εξαφανίστηκαν οι μερικές εκκενώσεις.



ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

CERN EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH

Group Code: ELG-HVNET-PR-0003

EDMS No.: 1137918 v.1

**DIAGNOSTIC METHODS FOR POWER ENERGY
NETWORKS BASED ON PARTIAL DISCHARGES
DETECTION**

Evgenia Voulgari

National Technical University of Athens

Technical Student 2010-2011

Terms and Definitions

Term	Definition
SPS	Super Proton Synchrotron accelerator
SMB	SPS Main Bending power lines
PD	Partial Discharge
LPD	Live Partial Discharge
XLPE	Cross Linked Polyethylene
PILC	Paper Insulated Lead Cable
VLF	Very Low Frequency
HFCT	High Frequency Current Transformer
TEV	Transient Earth Voltage
DAC	Damped AC
OWTS	Oscillating Wave Test System
PDIV	PD Inception Voltage
PDEV	PD Extinction Voltage
TDR	Time Domain Reflectometry
CNGS	CERN Neutrinos to Gran Sasso
PS	Proton Synchrotron

6. CERN'S ELECTRICAL NETWORK

6.1 Introduction

The CERN's accelerator complex is presented in the figure 1. CERN's accelerator complex is a succession of particle accelerators that can reach increasingly higher energies. Each accelerator boosts the speed of a beam of particles, before injecting it into the next one in the sequence.

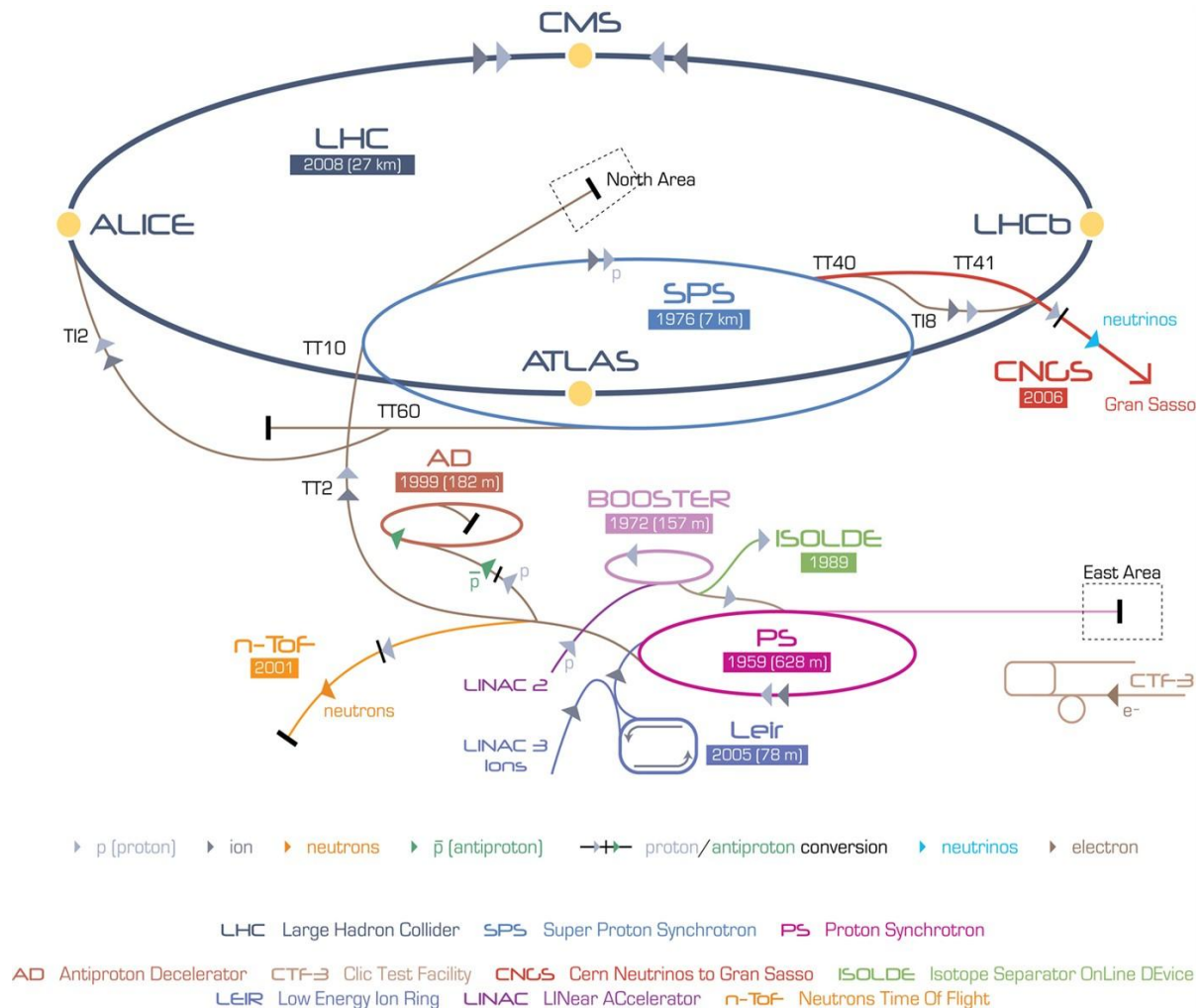
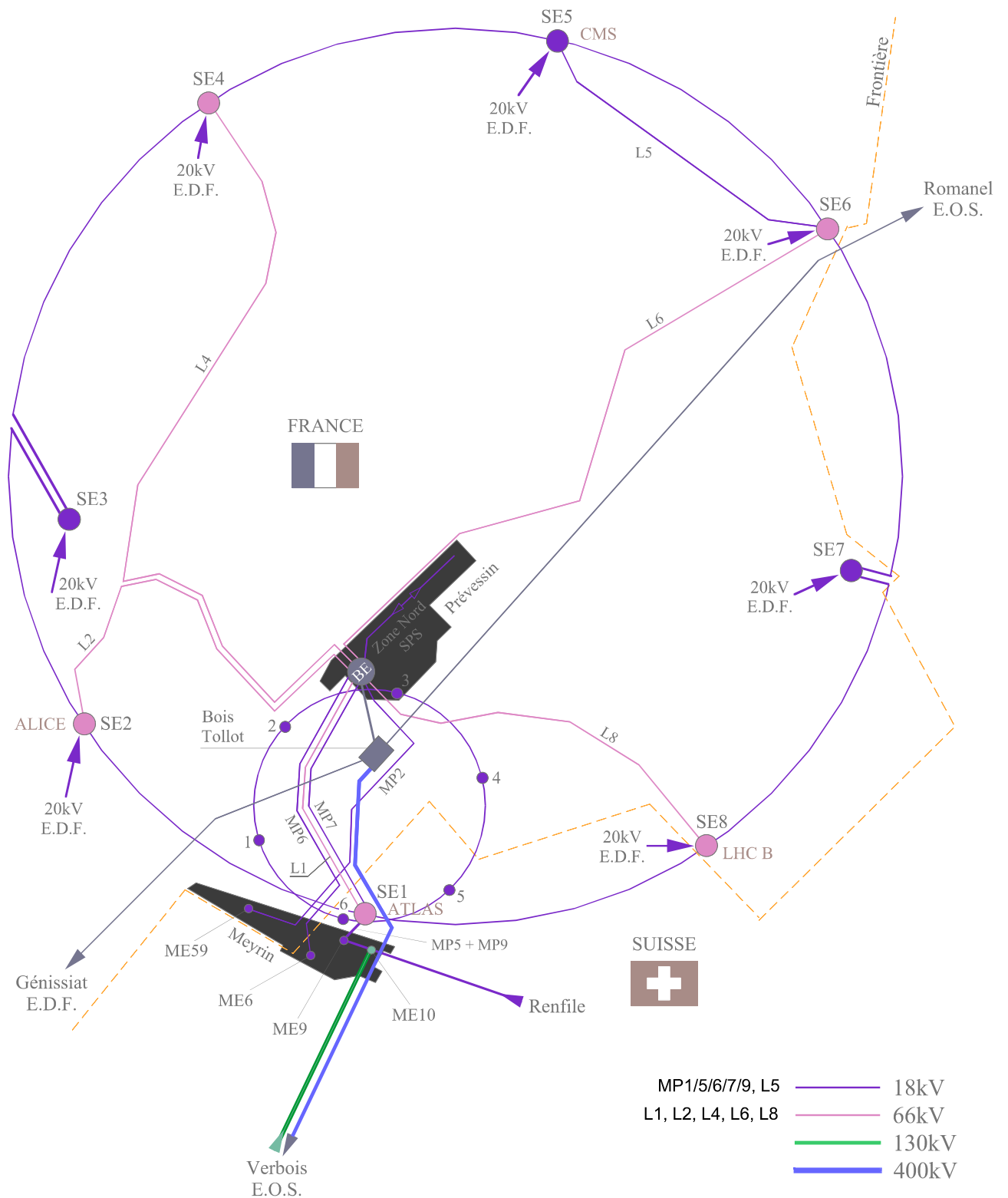


Figure 1: CERN's accelerator complex

The CERN's electrical network is presented in the figure 2. The main power lines of medium and high voltage which are the 18 kV, 66 kV and 400 kV respectively and also the substations in which the network is divided are presented in this general lay-out.



Geographical overview of the CERN power supply network
Figure 2: General lay-out of the CERN power network

A simplified single-line diagram of the network is plotted in the figure 3. In this report special interest is given in BE-BE9 cable line.

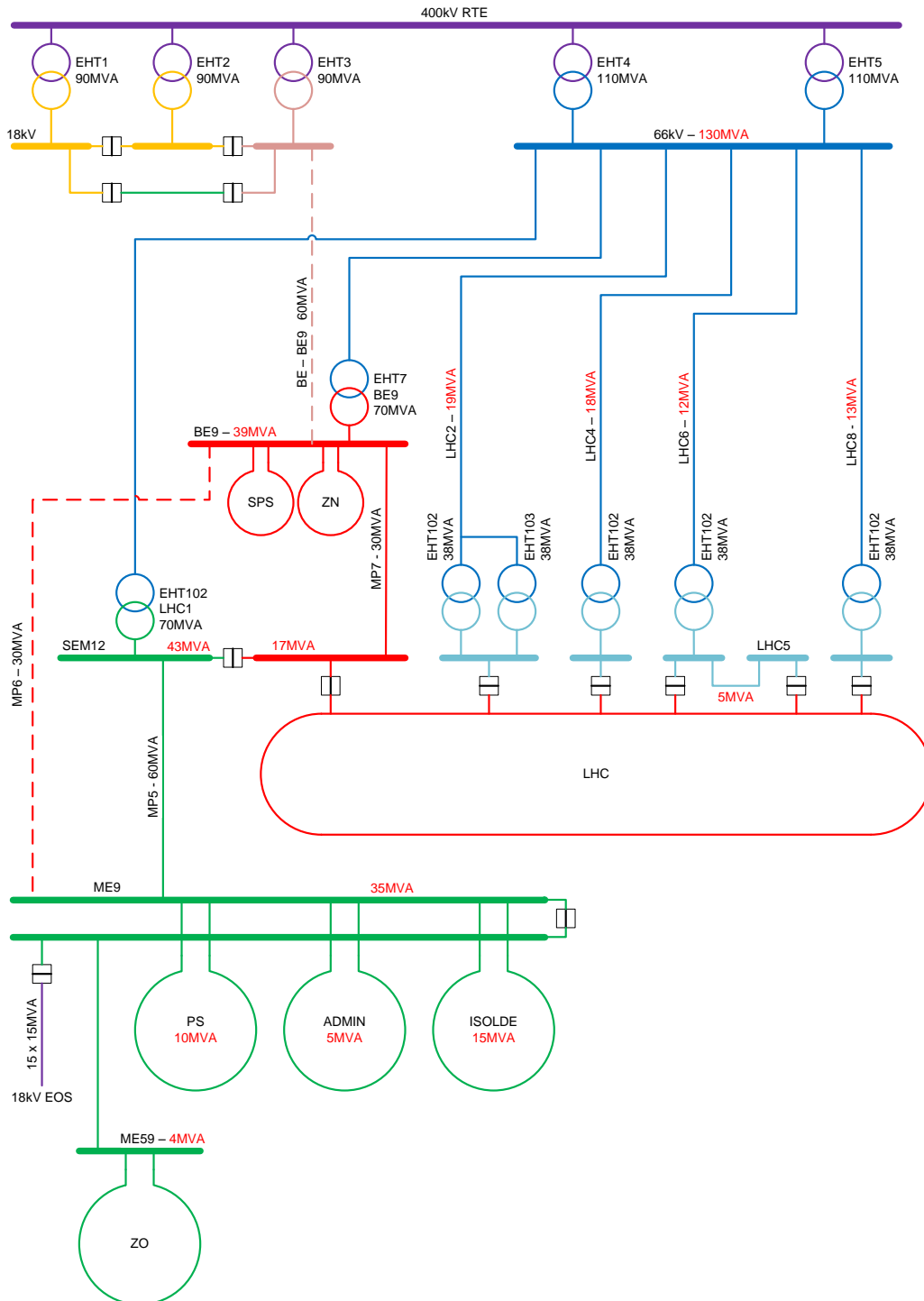


Figure 3: Simplified single-line diagram of CERN network

6.2 18 kV network

The best way to assure the normal function of the network and schedule the next steps for its renovation is the execution of diagnostic tests for predictive maintenance. Special interest is given to the consolidation of the SPS network and particularly in the 18 kV pulsed network. Brief information is being given for this 18 kV network. The SPS accelerator is based on a cyclic operation: injection of particles from PS, acceleration with the RF system while ramping the bending magnets, then slow extraction and finally the dumping of the residual beam. The energy stored in the main magnets is re-injected on the 18 kV network. A typical cycle period is approximately 14.4 seconds. The figure 4 shows the variation of active and reactive power on the main 18 kV bus bar.

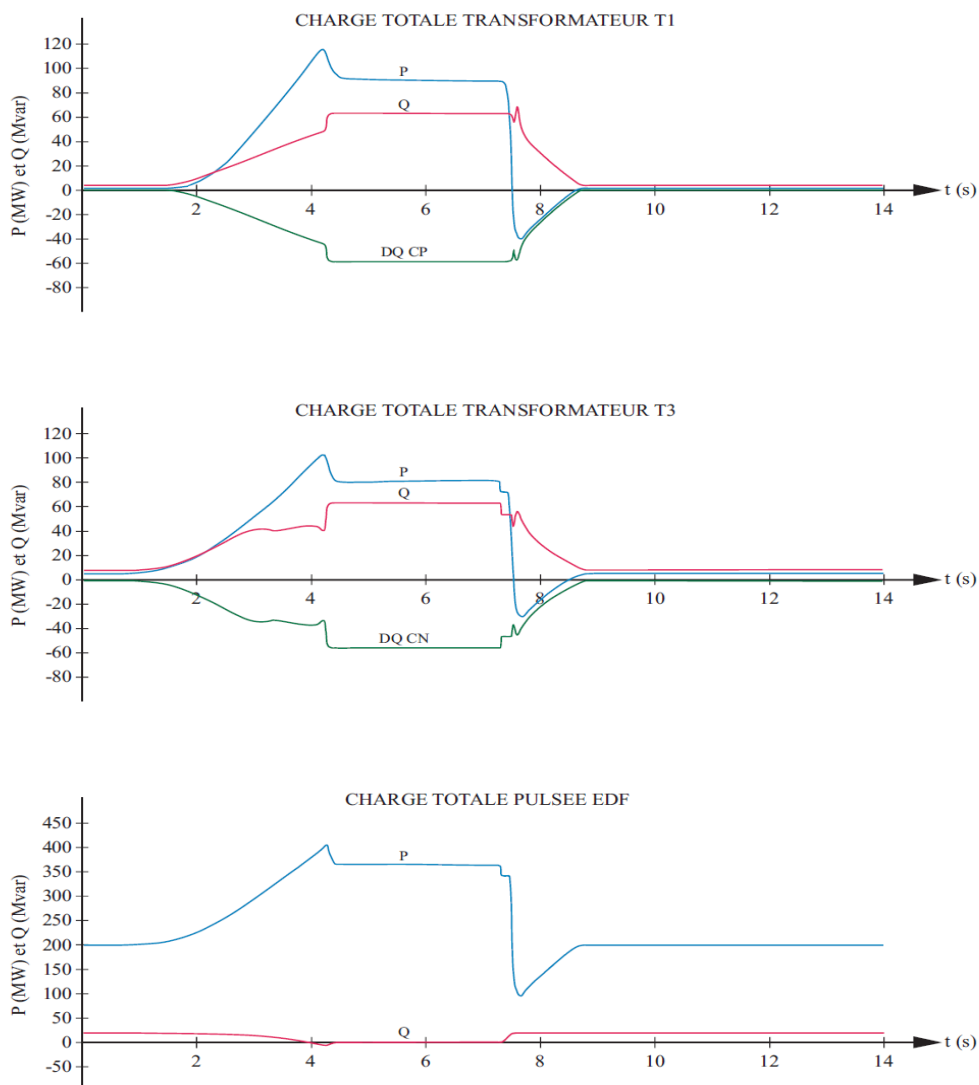


Figure 4: Power Pulses and Active and Reactive Power

6.2.1 18kV SPS pulsed network

Figures 2 and 3 illustrate the general lay-out and the single-line diagram of the CERN power network. The 18 kV network that consists of the SPS pulsed and SPS stable network can be seen.

Briefly, the 18 kV SPS pulsed network consists of:

- BE substation
- Sixteen links from the substation BE to the BA's (Auxiliary Buildings) of the SPS machine, supplying the conversion stations.
- SPS pulsed loop passing through SPS1, SPS2, SPS3, SPS6 SPS7 auxiliary buildings and supplying the auxiliary converters.
- A link from the substation BE to the SPS4, TI8 and CSGS loads.
- North Area pulsed loop passing through the north experimental area auxiliary buildings and supplying the auxiliary and experimental converters.

6.2.2 18kV SPS stable network

The 18 kV SPS stable network is supplied from the BE9 substation and specifically it comprises:

- an 18 kV loop supplying the SPS auxiliary buildings including the Prévessin heating plant,
- an 18 kV link supplying the Assembly Hall, workshops, storage and office buildings

6.2.3 The pulsed load 18 kV substation (BE)

The 18 kV BE substation is devoted entirely to the SPS pulsed loads. It consists of three power sections each equipped with a 400/18 kV, 90 MVA transformer, compensator and filter [25].

6.2.4 The general services 18kV substation (BE9)

The 18kV BE9 substation is, as opposed to the BE substation, devoted entirely to the CERN stable loads. It supplies the SPS stable network, the LHC general services and assures the power exchange between the Preveessin and Meyrin sites via the point 1 of LHC.

The accelerators require large amounts of pulsed power, supplied through thousands of controlled rectifier stations. Apart from the large fluctuating active power, the rectifiers also consume a high level of reactive power and produce large harmonic currents, injected back in the mains network during the operation. To limit the propagation of this pollution, the network is divided into several sectors. The parts that contain large quantities of rectifiers, and in particular several with pulsed operation, are equipped with compensating equipment to reduce the pollution to an acceptable level. Fluctuations of the reactive power consumption are compensated with thyristor-controlled reactors or saturated reactors [19].

7. THEORY AND PHYSICS OF PARTIAL DISCHARGES

7.1 Introduction

7.1.1 Electrical Discharges

Electrical discharges involve processes by which atoms or molecules become electrically charged due to ionization by avalanches of hot carriers, mostly starting in the medium of gas state. According to the IEC 60270 (Partial Discharge Measurements), the term “partial discharge” is defined as a localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which may or may not occur adjacent to them. In general, partial discharges (sometimes referred as PD) can be classified in corona discharges, surface discharges, internal discharges and electrical treeing. The partial discharges phenomena may occur in insulation systems when defects are present, under high voltage stress. In figure 5, four different types of electrical discharges are presented.

In figure 5(a) a corona discharge can be recognized where usually there is a sharp point or edge of a metallic contact or a conducting particle. There, the surrounding field is extremely high. The discharge occurs because of the ionization of the fluid that surrounds the conductor while the electrical field exceeds a certain value. In figure 5(b) a surface discharge occurs on the surface of a dielectric material and in figure 5(c) the internal discharges that usually occur in insulations, cavities or voids inside a material are shown. The electrical treeing shown in figure 5(d) is a combination of corona and internal discharges where in general both phenomena happen and over time lead to the formation of, a partially conductive, branching 3D tree-like figure within the dielectric. The tree can grow to the point that it eventually causes complete electrical failure of the dielectric [4].

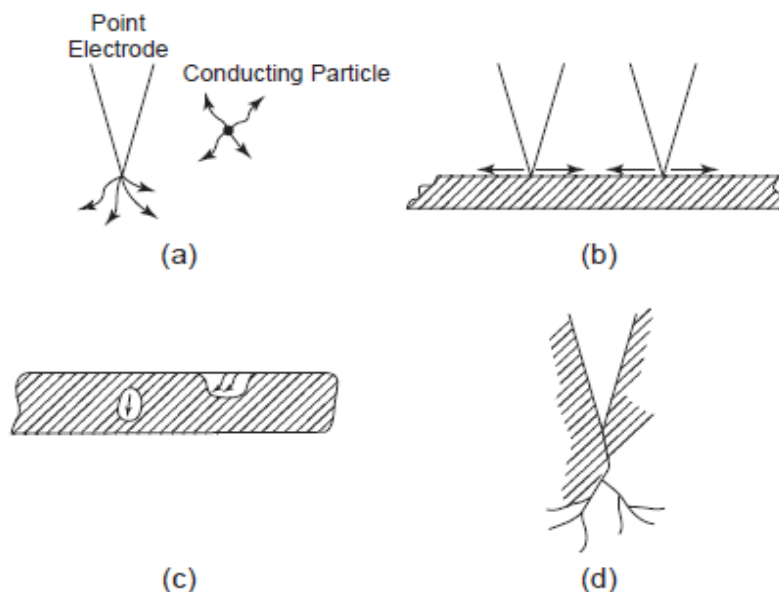


Figure 5: (a) Corona Discharges, (b) Surface Discharges, (c) Internal Discharges, (d) Electrical Treeing [Source: Dielectric phenomena in solids, Kwan Chi Kao]

Partial discharges usually begin within voids and cracks in solid dielectrics, or in bubbles within liquid dielectrics. Partial discharges can also occur along the boundary between different insulating materials. Even if the local electrical field in the void exceeds a threshold and a discharge occurs, it is limited within the void because the surrounding insulation is strong enough to avoid a complete breakdown. Partial discharges in a void are considered to be harmful, especially in high voltage systems. From the viewpoint of engineering they cause power loss and gradually degrade the insulation. The power loss is connected to the dissipation factor ($\tan \delta$) that has a non-linear behavior as the electric field strength increases [24]. This is due to the conduction component of loss current that is field dependent, so as the electric field is increasing, the loss current and the power loss are increasing.

As the voltage increases, the electric field in the cavity increases as well, and is considerably greater than the field in the surrounding dielectric as a result of the lower dielectric constant of the gas in the cavity. The magnitude of the electric field also depends on the cavity's shape and location. When the field becomes sufficiently high inside the cavity and the voltage stress across the void is increased above the corona inception voltage that the gas can break down, partial discharge phenomena will be generated. During this process the external field goes from non-conducting to conducting, and the internal field in the cavity goes from very high to nearly zero immediately after the discharge [1]. The discharges are effectively small sparks that deteriorate the insulation because they may cause permanent changes in the chemical structure of the material's molecules and eventually result in complete insulation failure.

From the subatomic scope, the electrons and ions are continuously bombarding the cavity or void boundaries and the ultraviolet photon irradiation chemically deteriorates and transforms the material. Actually it burns the polymer and changes it into gas, carbon or other low-molecular weight substances [4]. The decomposition of the air in the cavity releases a characteristic odor which is called "smell of corona" which is indeed ozone (O_3).

In the circuit of figure 6 the partial discharge inception in a small void inside an insulating system is represented.

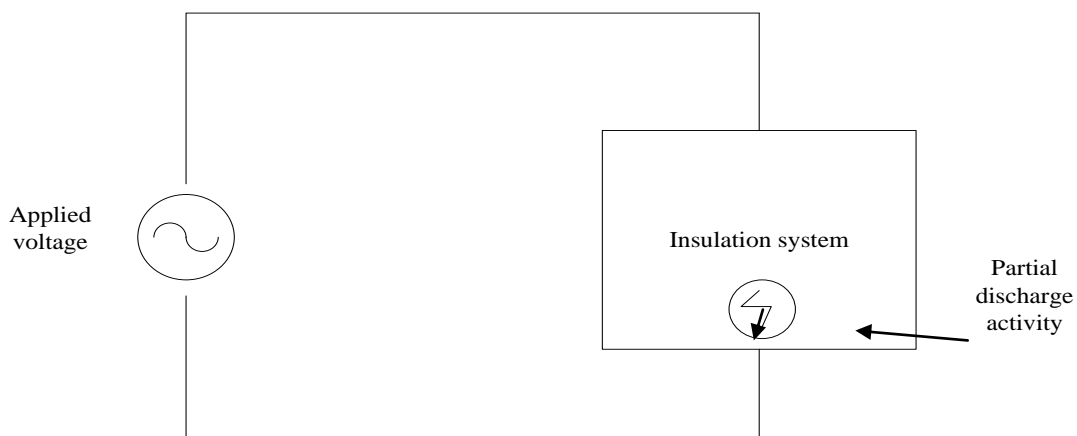


Figure 6: Localized partial discharge system in a larger insulation system

In the figure 7, the two electromagnetic fields, the external and the internal that exist and are responsible for the discharge, are shown inside a solid material and in a gas [3]. The external exists because of the current that flows through the conductor and the internal is created inside the void.



Gas filled void in insulator

Corona in gas

Figure 7: External field E_0 and internal field E_i for two different defect types

The equivalent circuit of partial discharges can be represented as three capacitances. There is a capacitive voltage divider in parallel with another capacitor, as shown in figure 8. The C_c capacity represents the parallel combination of the capacitances in series with the void, whereas the C_b represents the capacitance of the void. The C_a is the remaining capacitance of the specimen.

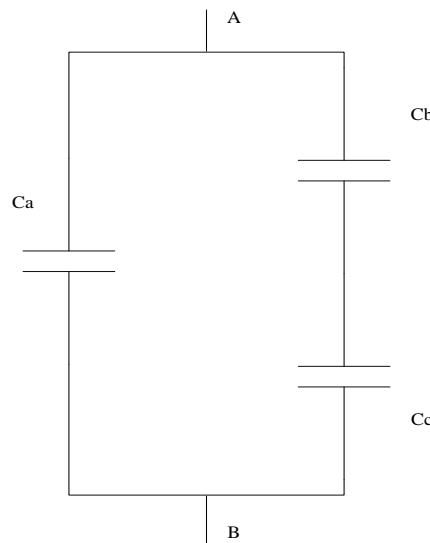


Figure 8: The three-capacitance equivalent circuit model

In figure 9 the diagram Time-Voltage is plotted for the three-capacitances circuit model. The sinusoidal $v(t)$ represents the voltage in the cavity with no discharge and the $u(t)$ is the voltage in the cavity when the discharge occurs. There is a repetitive change from V_i^+ to V_r^+ and then to the negative from V_i^- to V_r^- . The thick solid line denotes the actual voltage $u(t)$ between the discharge gap. When it reaches the inception voltage V_i^+ , a discharge occurs and the value changes discontinuously to V_r^+ , respectively. The thin solid line denotes the applied voltage $v(t)$, which is the voltage where no discharge is assumed to occur [2].

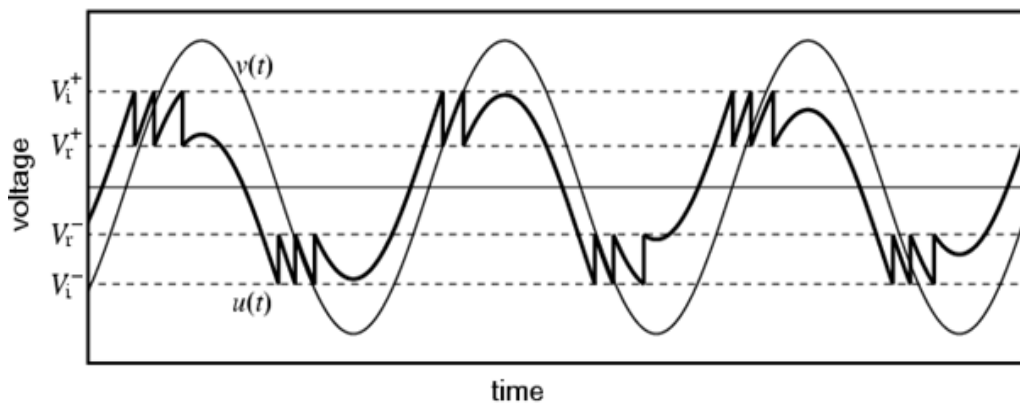


Figure 9: Time evolution of the three-capacitance equivalent model

A complete understanding of partial discharges involves analyses of materials, electromagnetic fields, arcing characteristics, wave propagation, sensors calibration and noise and data interpretation. Mathematically, the partial discharge phenomena can be described by a set of coupled differential equations and the different discharge types can respond to the different solutions for different boundary conditions. But since the behaviour is fractal-type a full model of equations for describing the partial discharges cannot be presented [12].

7.1.2 Electrical trees

When electrical field is present, humidity inside insulating materials increases and migrates, so water trees initiate in the direction of the applied electrical field inside the material. The so called “water trees” that are a specific kind of electrical aging, appear in electrically stressed polymers because of the moisture but have the property to disappear by heating. Specifically, a tree-like pattern appears because of the conversion of the hydrophobic polymer to hydrophilic. Water trees lead to decreased insulation resistance and a very slight increase in leakage current but do not directly produce failure. In laboratory testing, water trees are visible only under a microscope because of the large number of water-filled micro cavities along the electro-oxidized tracks once the trees are enhanced with a coloring agent. The presence of water trees inside an insulating system like a cable, leads to the development of electrical treeing. The conversion of water trees to electrical trees is caused by lighting, impulse switching or field testing. Although an electrical tree is difficult to initiate, once initiated it may finally cause a breakdown [1,4,10].

Electrical treeing in general is regarded as an electrical pre-breakdown phenomenon. The path that is formed because of partial discharges inside the material resembles the form of a tree as seen in figures 10 and 11. The possible initial points for a tree formation are the same as for the partial discharge activities imperfections such as contaminant particles or voids or bad adhesion at polymer interface [11]. Since electrical trees are considered as a combination of corona and internal discharges, the same physical and chemical procedures that are developed during partial discharge activity exist in treeing or the so called “Lichtenberg figures”.

Electrical treeing can be divided into three different phases. The first one is the tree initiation phase, during which no detectable partial discharge appears. The second is the growth phase and during that phase, the tree propagates. In the final stage, one or more channels bridge the electrodes to produce failure. If electrical trees are initiated, they grow rapidly until the insulation is weakened to the point that it can no longer withstand the applied voltage and an electrical fault occurs at the electrical tree location.

The shape of an electrical tree depends on many parameters, like the magnitude of the applied stressing voltage, the waveform of the stressing voltage, the frequency of the AC voltages, and the structure of the material under consideration [4]. Electrical trees may look like dendrites, branchlike or bushlike trees, spikes and strings as it can be seen in the next figures 10 and 11.



Figure 10: Electrical tree grown inside a water tree in laboratory conditions.

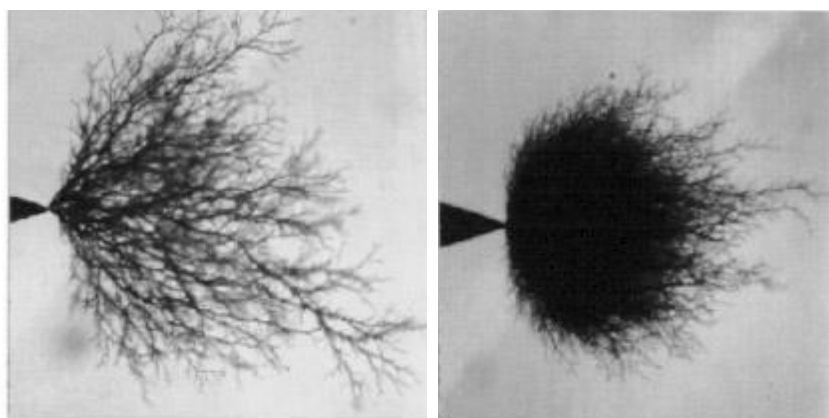


Figure 11: Tree growth in different electric field stressed conditions [Source: Systematic and reproducible partial discharge patterns during electrical tree growth in an epoxy resin, V Champion and S J Dodd]

7.1.3 Electrical aging

Electrical aging is the process that an insulating material is undergoing when it is subjected continuously or periodically to an electrical stress generated from an electric field. The material's properties tend to change and the lifetime of it is reduced according to the magnitude and the intensity of the stress.

From a microscopic point of view, the phenomena that happen in insulating materials randomly and periodically are described for polyethylene. Since the energy gap of most metals is smaller than 4 eV and the energy gap of most insulating materials, including polyethylene, is larger than 8 eV, the potential barrier height of the metal–insulator contact for electron injection is generally smaller than that for hole injection. Assuming that the electrical contacts are neutral contacts, the electrons may be injected into the insulator by a thermionic emission process or by an electron tunneling process, as shown in figure 12. It is possible that after prolonged electrical stressing, the field may become high enough to cause an internal discharge, leading to final, destructive breakdown [4].

In figure 12 the procedures of thermionic emission and electron tunneling are described. The E_F is the Fermi level and the E_c and E_v are the level of the bottom of the conduction band and the top of the valence band respectively. When the electric field is zero $F=0$ the two Fermi levels are equal and when an electric field exists, there are the phenomena of thermionic emission and electron tunneling as shown in figure 12(b). When the field is very high the phenomena are more intensive and they are shown in figure 12(c).

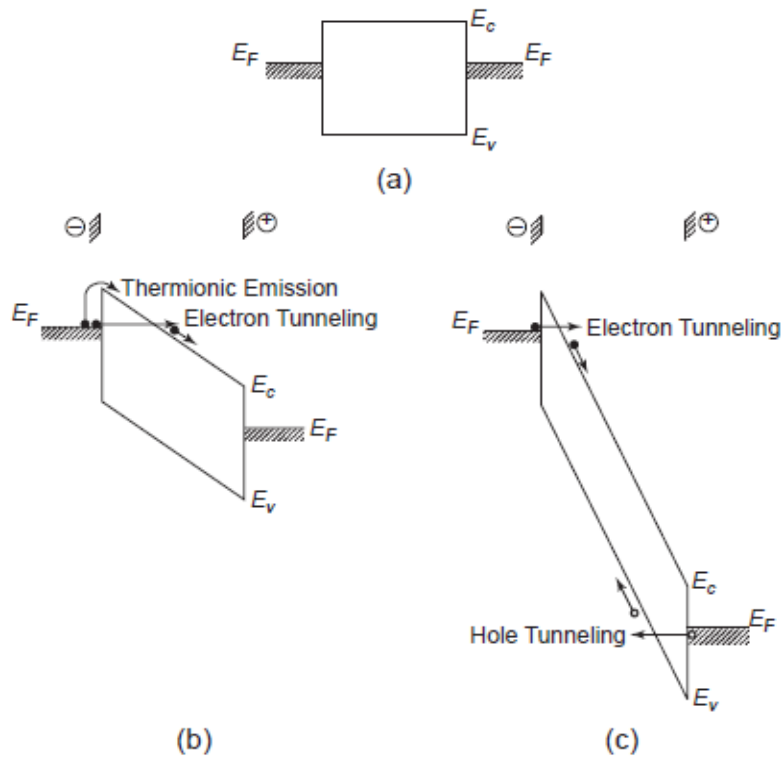


Figure 12: Possible processes of charge carriers injected from neutral contacts
 [Source: Dielectric phenomena in solids, Kwan Chi Kao]

For a better understanding of the mechanism of the whole partial discharges phenomena that were explained before, the figures 13 to 15 show the process for the formation of partial discharges arcing in a circuit breaker bushing.

At the beginning, irregular surfaces with needle end points create a high electric field which ionizes the surrounding air which is becoming conductive. Partial discharges occur in this region and the electrons and ions are collected around the needle. The electrical tree that starts initiating can be seen.

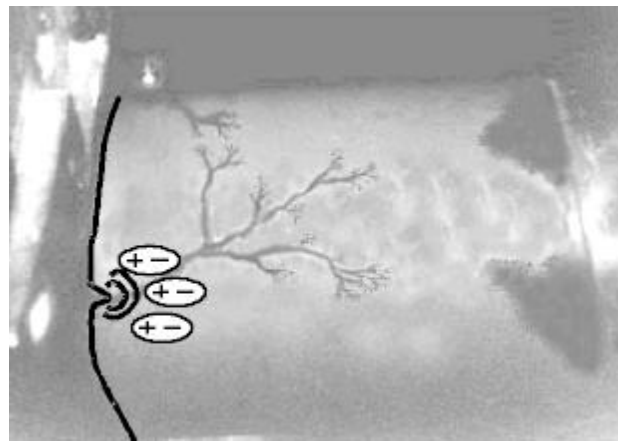


Figure 13: Start of an electrical tree [Source: Partial discharge theory and technologies, Paoletti and Golubev]

Additional surface contamination and moisture creates a leakage current path. The temperature rises from the leakage current and evaporates the moisture, creating tiny islands or very small voids. The current which was flowing is now interrupted across these tiny island voids.

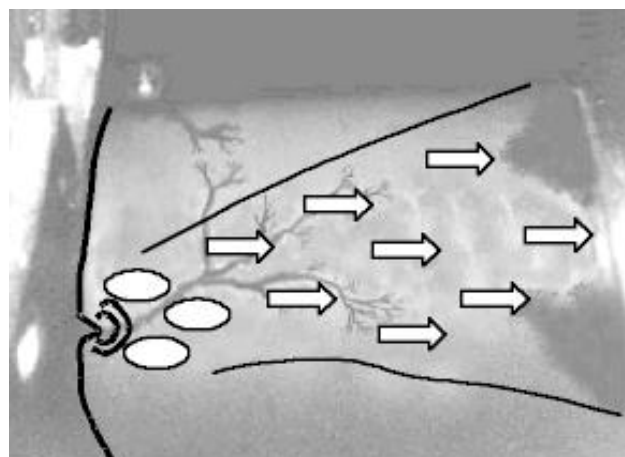


Figure 14: Current path and small voids that are created [Source: Partial discharge theory and technologies, Paoletti and Golubev]

Since all the remaining surface is still conductive, most of the voltage drop will be applied to the dry surface creating an arc across it. Partial discharge arcing occurs in the region of the ionized air and burns the insulation material after creating a permanent carbon path. The generated end points are even finer needles and the process continues across the insulation until permanent degradation [5].

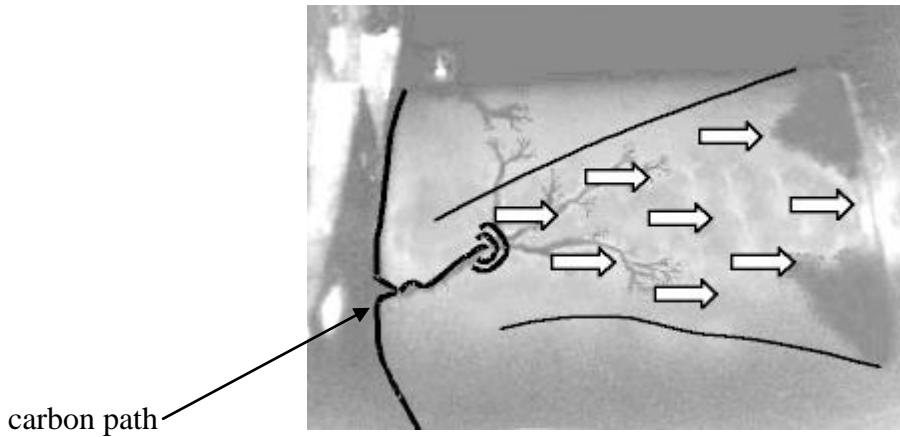


Figure 15: Burn of the insulation material and carbon path [Source: Partial discharge theory and technologies, Paoletti and Golubev]

The small void or imperfections from manufacturing or handling processes, inside an insulation system under voltage lead to the inception of a non-deterministic, unpredictable phenomenon that is characterized by its chaotic and fractal type behaviour, which involves both physical and chemical processes. The two processes that simultaneously degrade the insulation are chemical production of by-products and physical attack by bombardment of particles (nitrogen ions) [6].

In conclusion, partial discharge, is a localized discharge in a limited space and needs a cavity with high electrical field and stress to propagate. The electrons are emitted because of the electric field, this causes the increase of the internal electric field which causes ions that lead to the initiation of chemical processes. The chemical processes are responsible for the by-products and the surface modifications. It is crucial to understand that the partial discharges phenomena do not follow a logical chain mode but a complex model, as explained in the block diagram of figures 16 and 17. In these diagrams, the process that includes discharge initiation because of electrons, electric field and its results and the chemical change and decay are shown, in a short term and also in a long term.

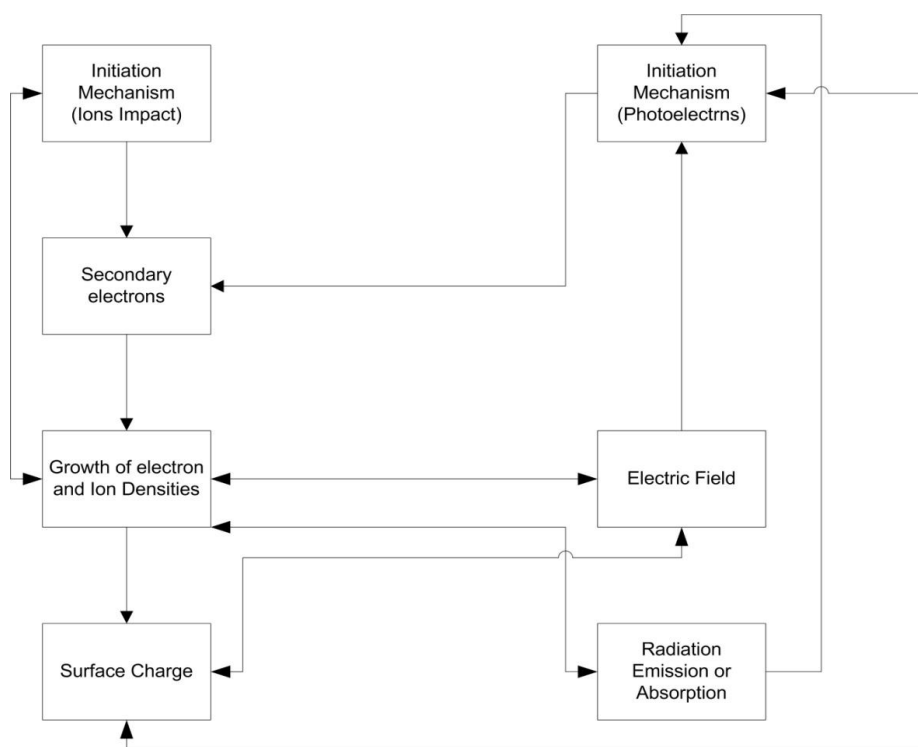


Figure 16: Block diagram model of a discharge that applies in a short time frame in which the partial discharge induced aging can be neglected

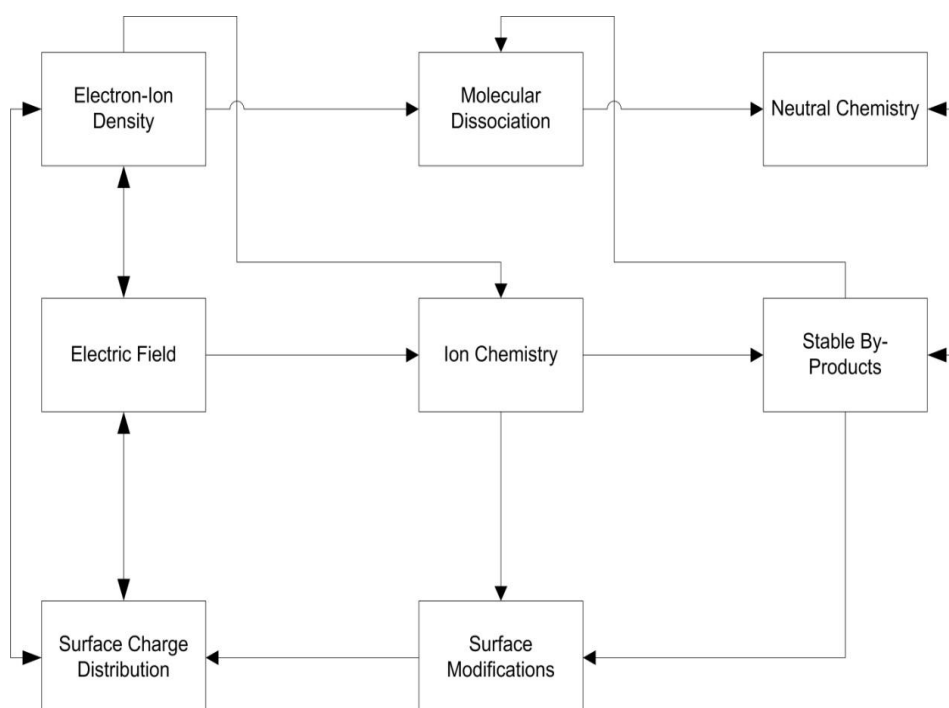


Figure 17: Block diagram of a model for discharge that includes both physical and chemical changes due to aging for a long time period

7.1.4 Equations

For the inception of the partial discharges activity, a critical voltage much lower than the breakdown voltage is needed. The voltage applied to the composite dielectric system initiating electrical discharge in the gas layer is called the discharge inception voltage of the system V_i , which is given by the following equation:

$$V_i = V_g \cdot \left(1 + \frac{\epsilon_r \cdot d_s}{d_g}\right) \quad (1)$$

where V_g is the breakdown voltage of the gas layer and d_g and d_s are, respectively, the thicknesses of the gas and of the solid layers. The term ϵ_r is the relative permittivity (or the dielectric constant) of the solid layer and the dielectric constant of the gas layer is assumed to be unity as the gas is considered to be air. For $d_s / \epsilon_r = 0$, we have $V_i = V_g$ where the system reduces to a gas gap between two metallic electrodes.

The equivalent circuits of the three capacities model including the dielectric and the cavity are presented in figure 18.

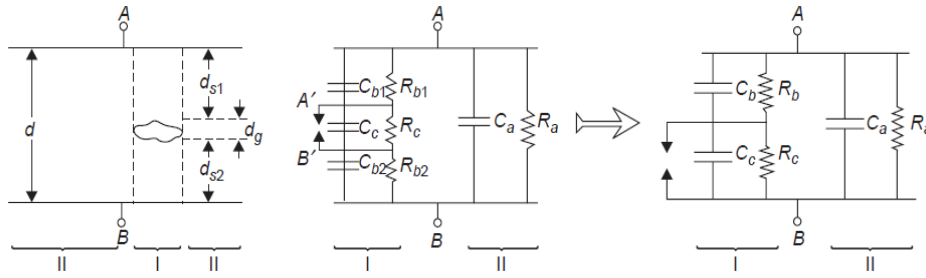


Figure 18: Equivalent circuits of a dielectric solid containing a cavity [Source: Dielectric phenomena in solids, Kwan Chi Kao]

The column with cavity is marked with I and the remaining solid without cavities, where $d = d_g + d_{s1} + d_{s2}$ and $d_s = d_{s1} + d_{s2}$ is marked with II.

In AC voltage conditions the voltage across the cavity without discharges is given by the equation:

$$V_c = V_{AC} \cdot \left(\frac{C_b}{C_b + C_c}\right) = V_{AC} \cdot \left(\frac{\epsilon_r d_g}{d_s + \epsilon_r d_g}\right) \quad (2)$$

It has been proven that the discharge magnitude Q_d is:

$$Q_d = \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b}\right) \cdot (V_g - V_e) \approx (C_c + C_b) \cdot \left(\frac{C_b}{C_b + C_a}\right) \cdot V_i \approx C_b V_i \quad (3)$$

where V_e , that is the discharge extinction voltage is very small and $C_a \gg C_b$.

Actually, C_a is the only capacitance that can be measured and is practically equal to the capacitance of the whole specimen, as seen in figure 18.

During the discharge the voltage drop across C_a can be evaluated by:

$$\begin{aligned} \delta V_a &= \frac{C_b}{C_a + C_b} (V_g - V_e) \\ &\approx \frac{C_b}{C_a} V_g \approx \left(\frac{C_b}{C_a} \right) \left(\frac{C_b}{C_b + C_a} \right) V_i \end{aligned} \quad (4)$$

According to IEC 270, the apparent discharge magnitude is defined as the largest value of repeatedly occurring discharges.

Since $V_g > V_e$ and $C_a > C_b$ the apparent discharge magnitude is:

$$Q_{ad} = C_a \cdot \delta V_a = \frac{C_b^2}{C_b + C_c} \cdot V_i \approx \left(\frac{C_b}{C_c} \right) \cdot C_b V_i \quad (5)$$

The apparent discharge magnitude is used for the comparison of discharge magnitudes.

The energy dissipated per discharge is given by:

$$\begin{aligned} W_d &= \frac{1}{2} \cdot \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) \cdot (V_g^2 - V_e^2) \\ &\approx \frac{1}{2} \cdot (V_g - V_e) \cdot C_b V_i \\ &\approx \frac{1}{2} \cdot Q_{ad} \cdot V_i \end{aligned} \quad (6)$$

The further analysis of these equations and their proof are given in the book “Dielectric phenomena in solids” by Kwan Chi Kao [4].

7.2 Effect of partial discharge activity in cables

Reliability in a power distribution network is considered one of the most important parameters for the proper function of the network. Reliability and preventive maintenance of the insulation systems are of high importance for high and medium voltage systems. It is necessary to qualify, evaluate and prevent failures especially when the reason is known. However, if a defect or a cavity is present in the insulation of a cable, this can lead to the inception of a partial discharge which can gradually degrade the insulation to complete failure. The period before complete breakdown, will vary with the intensity, the number of discharges and other environmental parameters like high humidity which can also accelerate breakdown [7,8].

High voltage power cables, switchgears and terminations are subject to partial discharges existence. The cables that cover many kilometres and are the major asset for the electrical utility, should be properly monitored, otherwise in case of a discharge, this could be the indication for a dielectric breakdown and the failure of the system.

The cross linked polyethylene cables or XLPE cables, are increasingly replacing conventional oil-filled paper insulated cables for higher service voltage up to 400 kV. These cables are environmental friendly because they do not contain oil, they are not affected by environmental and weather conditions and they require less maintenance actions. In the current thesis, the XLPE cables will be further investigated for partial discharges.

The structure of XLPE single-core and three-core cables is shown in figures 19 and 20.

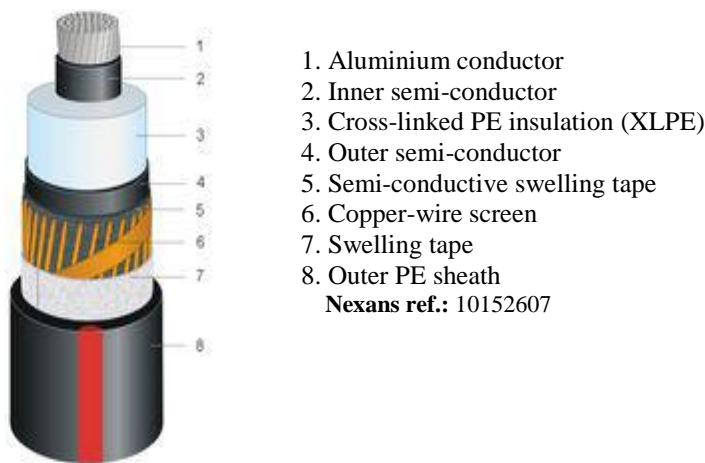


Figure 19: Single-core XLPE cable [Source: Nexans]

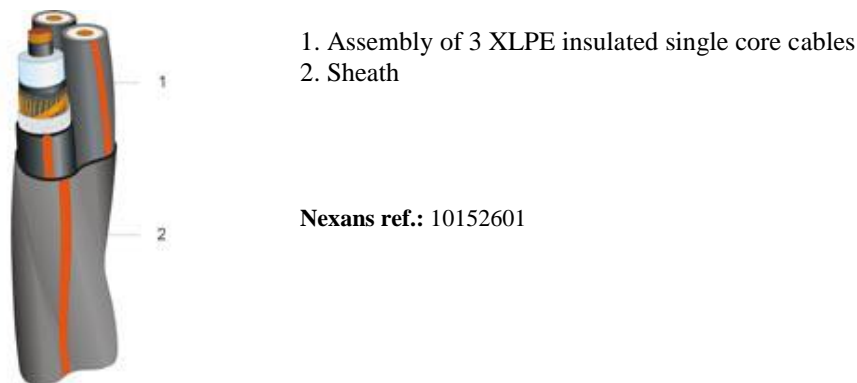


Figure 20: 20 kV three-core XLPE cable [Source: Nexans]

For a better comprehension of the partial discharge activity in cables and especially in XLPE cables, a detailed knowledge of the dielectric properties and of the materials which are used for the cable production is essential. Afterwards the methods for detecting partial discharges can be studied and developed.

The cross section of a single-core cable is presented in figure 21.

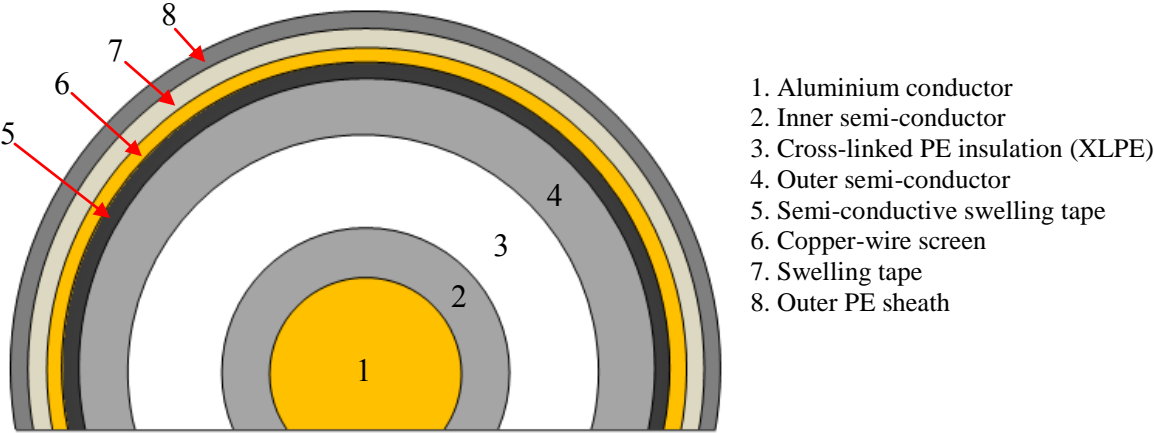


Figure 21: Typical single-core XLPE cable

The three-core XLPE cable cross section is plotted in figure 22 where the insulations and the conductors can be easily recognized. The conductor and the earth screen are indicated in yellow and the semiconducting layers in grey [9].

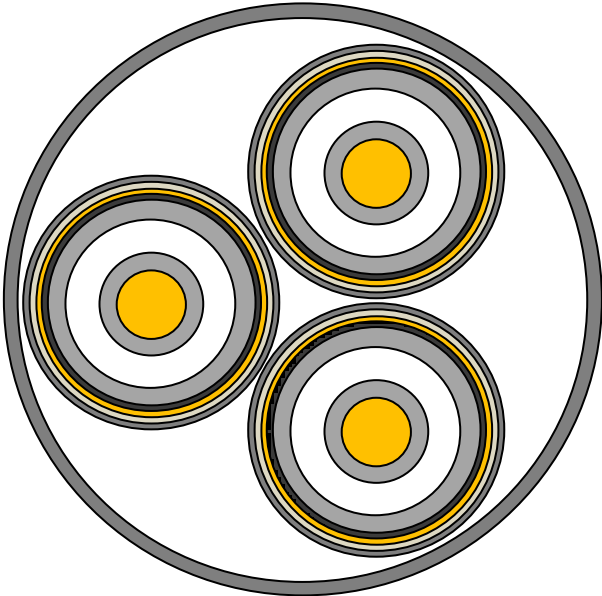


Figure 22: A three-core XLPE cable with semiconducting layers around each conductor

8. PREDICTIVE MAINTENANCE

8.1 Introduction

The possibility of a problem to arise in a power network is increasing as the parts of the network are becoming old. Aging power transmission networks are very expensive to be fully replaced and if there is a failure it usually leads to large amounts of undelivered energy and emergency repair costs. This is one of the reasons why the need of acquiring more experience in degradation processes and system assessment is justified. This knowledge about the possible system's faults or problems is used for the early diagnosis and predictive maintenance.

Predictive maintenance is the determination of the condition of in service equipment, in order to predict when maintenance should be performed. It offers cost savings over routine or time-based preventive maintenance, because tasks are performed only when warranted.

Preventive maintenance is a schedule of planned maintenance actions aimed at the prevention of breakdowns and failures. The primary goal of preventive maintenance is to prevent the failure of equipment before it occurs and it actually protects the equipment, improves system reliability, reduce cost of replacement, reduce system's downtime and prevents injuries to personnel.

Diagnostics in general, is the most important factor for the reliability of a system. The diagnostic methods for the detection of weak points in cables and terminations that may fail in the future, are categorized in the figure 23. The diagnostic methods are divided into methods for measuring and mapping local partial discharges and into methods for identifying integral partial discharges. The methods for integral partial discharges are IRC and $\tan\delta$. These diagnostic methods are non-destructive techniques. The methods for detecting local partial discharges, both on load and off load will be explained in detail in this document.

There are also, many forms of testing for the condition assessment of a power system that are based on the application of DC or AC voltages in the cables. Methods like DC testing, or VLF will not be further analysed in this document that focuses in diagnostics.

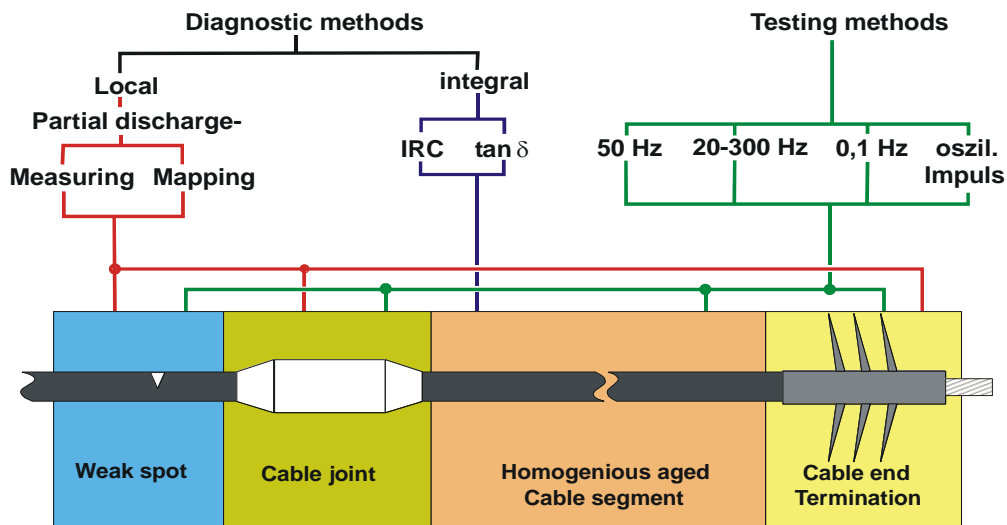


Figure 23: Diagnostic and testing methods in power distribution cables
 [Source: F. Schreiter, W. Schufft, TU Chemnitz, Germany]

All these methods focus on the detection of insulation failures that may be caused by internal defects in the insulating system like cavities or gaps, by poor workmanship in the installation of the cable, joints or terminations, or by low dielectric strength due to aging. A combination of these methods and a detailed mapping of the condition of the whole power system network is the best way to evaluate the overall condition and prevent from future failures.

8.2 *Tanδ Measurements*

The $\tan\delta$ or Tan Delta, also called loss angle or dissipation factor testing, is a diagnostic method for testing cables and assess the quality of the cable insulation. The $\tan\delta$ measurement can be applied for the determination of the loss factor of the insulation material that increases during the ageing process of the cable.

The Dielectric losses (Tan Delta) can be calculated according to:

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega RC} \tag{7}$$

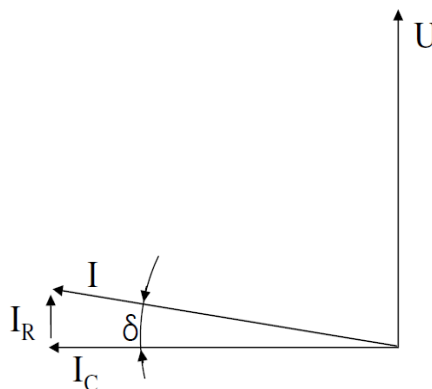


Figure 24: Dielectric losses and $\tan\delta$ visualized with vectors

In a perfect cable, the angle would be nearly zero. An increasing angle indicates an increase in the resistive current through the insulation and it means contamination in the insulation. As the angle increases, the cable seems to become worse and that factor actually determines the condition of the cable.

If there are no defects in the insulation of the cable, like water or electrical trees, the cable approaches the properties of a perfect capacitor. In XLPE cables Tan Delta measurements are detecting the presence of water trees, but in paper insulation cables it measures the moisture because of thermal and chemical processes.

As seen in the cable in figure 25, the existence of water trees inside the insulation under the application of electric field leads to the breakdown of the cable.

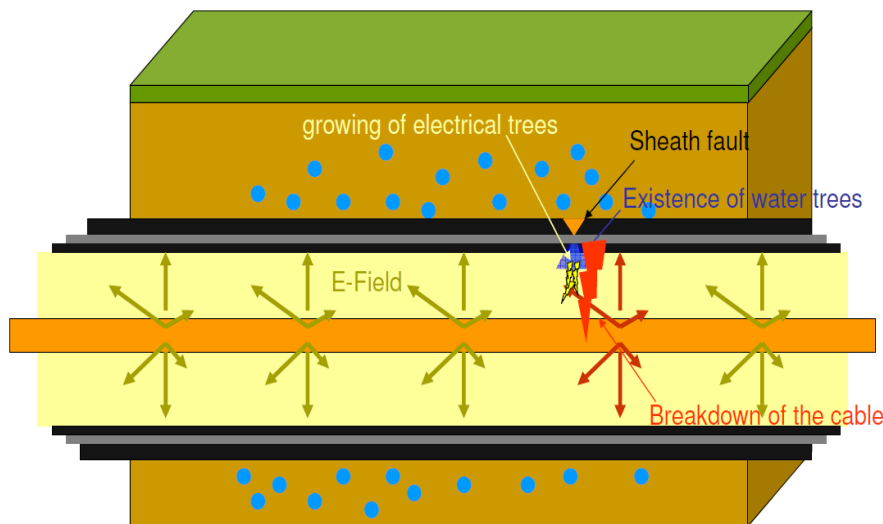


Figure 25: From water trees and electrical trees to breakdown of the cable [Source: SebaKMT tanδ presentation]

An increase in the amount of water trees in the cable, will result in an increase of the tanδ factor because, as seen from the equation and the figure 26, as the $R_{\text{isolation}}$ is decreasing, tanδ is increasing [20].

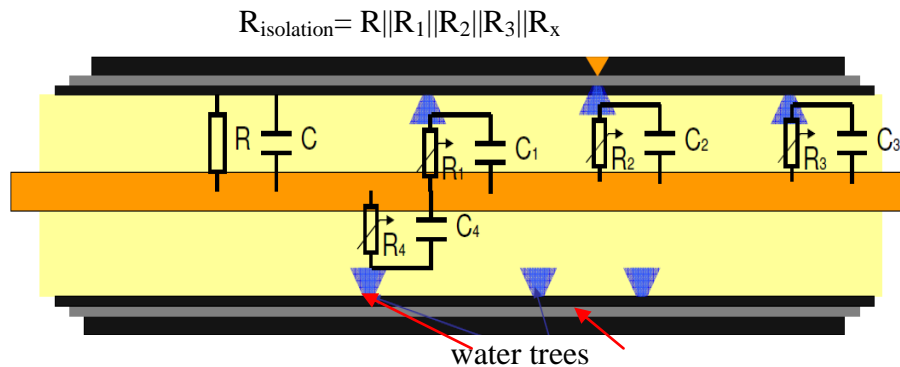


Figure 26: Water trees and equivalent resistance inside the cable [Source: SebaKMT tanδ presentation]

8.3 IRC method

The isothermic relaxation current method or IRC provides a global assessment of the aging condition of XLPE cables. The aging is basically due to the existence of water trees inside the insulation that gradually lead to the formation of electrical trees. Integral aging influences the dielectric response which can be determined by analysis of the characteristic range of the polarization spectrum. A special software categorizes the IRC plots according to a database based on measurements of aged cables in four aging classes, which are perfect, mid life, old and critical [18].

8.4 Partial discharge activity detection

Although partial discharges seem a very complex process it is not a salient one but it can be revealed with many different ways and it can be detected by its effects and results. The evolution of the phenomenon is accompanied by ultraviolet radiation emission, ultrasonic sound, heat from particle impact in the boundaries and chemical reactions. Moreover, the charge displacement in the void or gap causes current leakage and at the same time, electromagnetic waves propagate away in all directions. These high frequency pulses pass from the joints and from the inner to the outer surface of the material system and finally down to the ground. The methods that can be implemented and are useful for partial discharge activity verification should detect some of these effects.

8.4.1 On load and off load partial discharge testing methods

The partial discharge diagnostic tests and methods can be separated in two categories, on load test methods and off load test methods. On load partial discharge is the most cost effective diagnostic test for detecting an early warning of degradation. In contrast off load testing is recommended to be used as part of the commissioning tests for testing newly-installed cables or as a tool for more extensively monitoring of the condition of an aged cable after disconnection. So, the off load is recommended as a second step for cables that had already been categorized as critical from the on load tests [13]. The on load methods do not need outage of the system and any further modifications, so they are regarded to be better for a first check for partial discharge activity in large amounts of cabling.

Commercially, the on load are also called online methods and the off load offline methods. In this document, both ways of writing explain the same testing method.

Both methods have advantages and disadvantages that are briefly noted in the table 1.

Table 1: On load and off load method

	Advantages	Drawbacks
On load PD testing	No need to isolate the circuit	No automatic interpretation of results. Further waveform's analysis needed
	Mostly circuit loaded when tested*	
	Economical & non-invasive	
Off load PD testing	Better sensitivity	Circuit not loaded during testing
	Localisation of fault	Outage required

*although sometimes it is needed to measure without load, depending on the load profile. For example CERN's pulsed network.

The flowchart in figure 27, summarises the steps that should be followed in the quality assurance tests in power distribution cables. It represents a simple method of evaluating the insulating condition of the cables by the use of both methods that were mentioned above. The selected cables should firstly be checked on load for a first evaluation of the existence of possible partial discharge activity inside the insulating material and the first results lead to three different actions. If the cable is in good condition no further action is needed, but if it is characterized as critical, depending on the severity of the discharges either it is checked on load again after few months or it is further investigated off load for localization of the fault. After the off load measurements the cable can be replaced in case it is found problematic.

Since diagnostic tests for partial discharges activity are non-destructive and can be the only way of assessing the quality of the insulation of power cable systems, they are crucial for the mapping of the condition of the entire network. The application of both on load and off load partial discharge measurement techniques in the cabling network, as described in the flowchart, in general reduces the overall level of risk on the power system and moreover targets replacement programs by identifying and locate high risk sections in cables.

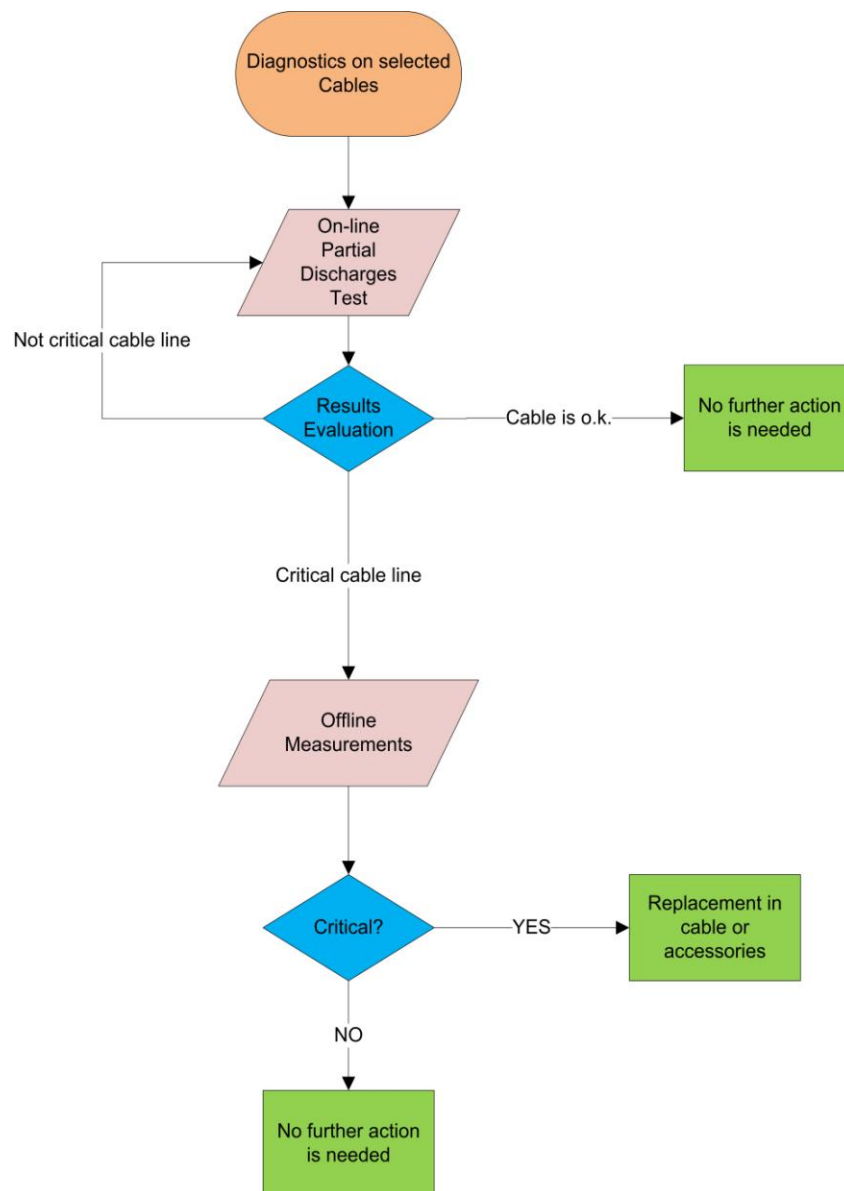


Figure 27: Flowchart of the steps that should be followed for cable diagnostics

8.4.2 Acoustic ultrasonic partial discharge detection method

It is well known that partial discharges emit ultrasounds. Once an electrical spark is generated and occurs within the insulation of a cable, a transformer, a switchgear or a generator the high frequency ultrasonic component should be isolated from background noises and detected. In addition, as the partial discharges are generated, the nature of ultrasound allows these potential warning signals to be detected early, before actual failure.

The basic electrical problems that can be detected using ultrasounds are corona discharge, tracking and arcing. The instruments that detect those sounds are often called “ultrasonic translators” and they accurately convert the ultrasounds sensed by the instrument into the audible range of 20 Hz and 20 kHz that humans can hear. This procedure is similar to the infrared translation of infrared images to the normal color pictures of the visible spectrum according to a color temperature matrix that is performed by infrared thermal cameras for

fault detection. Ultrasonic testing is often used for evaluation at voltages that exceed 1 kV, especially in enclosed switchgear where, the frequency of tracking greatly exceeds the frequency of serious faults, which can be identified using techniques such as infrared thermography [14].

The final evaluation of the existence of a partial discharge is performed by the comparison of the sound quality and the sound levels among similar equipment, so a possible problem of partial discharge activity will be revealed in contrast to a normal piece of equipment used for reference.

9. ON LOAD PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS WITH SEBAKMT'S LPD MONITOR

9.1 On load partial discharge measurements

The on load methods for measuring partial discharge activity are easier to be effectuated because they do not need outage of the system. If the on load measurements are carried out carefully and correctly and the results are trustful, they provide many benefits and especially cost effective and reliable solutions for the maintenance of the medium and high voltage network.

9.2 LPD Monitor by SebaKMT

9.2.1 Basic characteristics

The so called “on-line” equipment that was used for measuring the partial discharges in the CERN’s network was the Live Partial Discharge (LPD) Monitor produced by SebaKMT. The main benefits and characteristics of LPD monitor are:

- Portable diagnostic monitor for MV and HV plant.
- 16-Channel standard unit monitoring up to 16 cables.
- Automatic analysis and differentiation of PD pulses from electrical noise.
- Measures, analyses and logs “cable” PD or low frequency partial discharge activity, “local” PD or high frequency partial discharge activity and “noise” events.
- Remote access connection via LAN/Modem.
- No need to calibrate the system.

The LPD monitor is a partial discharge monitoring system for temporary or permanent monitoring of medium voltage or high voltage installations up to 66 kV nominal voltage.

Due to its low weight and the fact that it can measure 16 input channels, it is the ideal system for an initial check for critical partial discharges activity inside cables, joints or terminations [15].



Figure 28: LPD Monitor by SebaKMT

9.2.2 LPD monitor's sensors

The LPD monitor supports two types of partial discharge sensors, the high frequency current transformer (HFCT) inductive sensor, that measures discharges in the cable (figure 29) and the transient earth voltage (TEV) capacitive sensor, that measures local discharges in switchgears or cable terminations (figure 30).

The inductive sensors are the split-core type and can easily be attached around the screen or isolated core of the cable and measure pulses in a frequency range between 200 kHz and 4 MHz. The partial discharge activity is measured in picoCoulombs (pC).

The capacitive sensors are magnetically attached to switchgears and the signals collected have a bandwidth between 4 MHz and 100 MHz which are in the range of radiofrequencies. These sensors measure in decibels (dB) [3].

The two types of sensors can be seen in the figures 29 and 30.

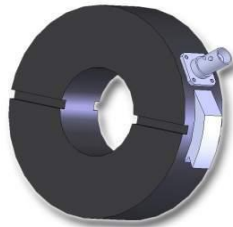


Figure 29: HFCT sensor



Figure 30: TEV sensor

As seen in figure 31 in the structural diagram, the LPD monitor basically consists of an oscilloscope and a PC. The sampling rate of the oscilloscope is 100MS/s and the frequency of the partial discharge signals that are collected from the monitor is over 200 MHz. The results are displayed on the 12'' monitor and are also stored in the hard disc of the PC. Later the data can be transferred either by USB or Ethernet connection and be further processed.

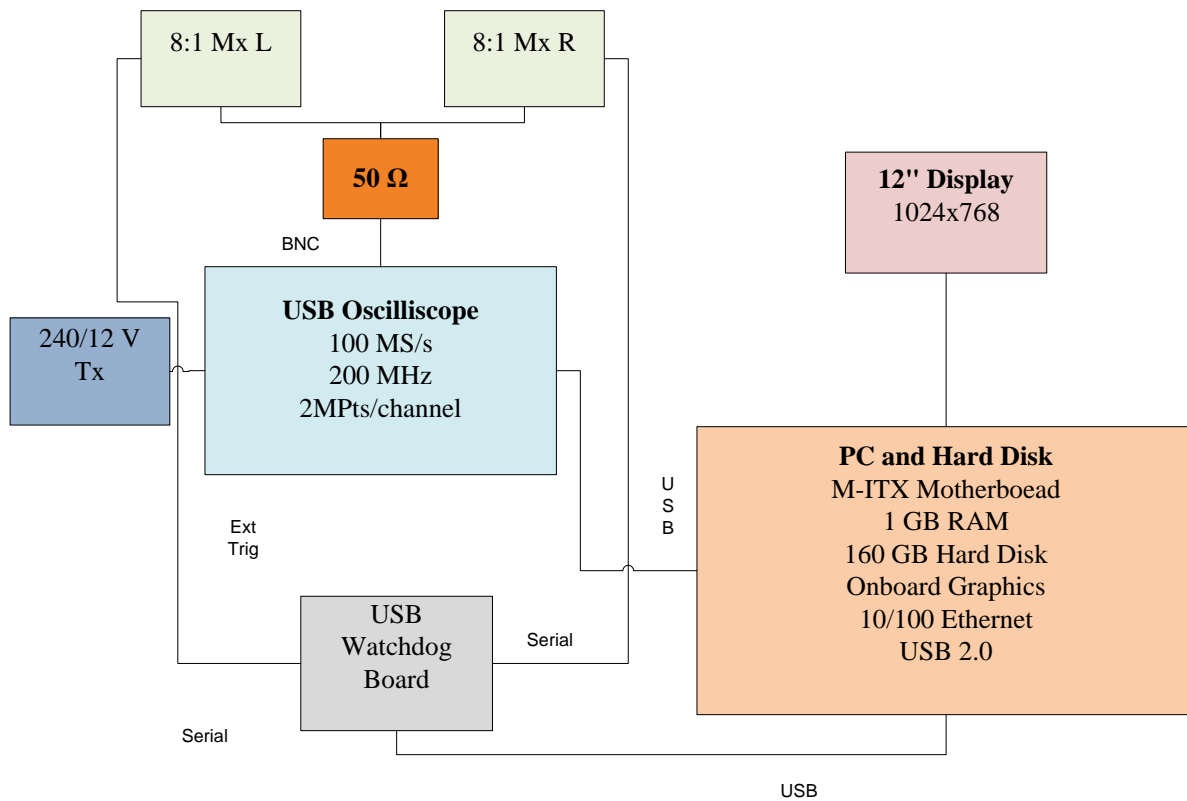


Figure 31: Structural diagram of the LPD monitor

The circuit with the cable, the screen and the two types of sensors, the inductive and the capacitive is presented in figure 32. As explained before the inductive HFCT, detects partial discharge currents in core/sheath while the capacitive TEV sensor detects electromagnetic radiation from local partial discharge sites and it can be connected magnetically on the outer surface of the switchgear or inside the cubicle.

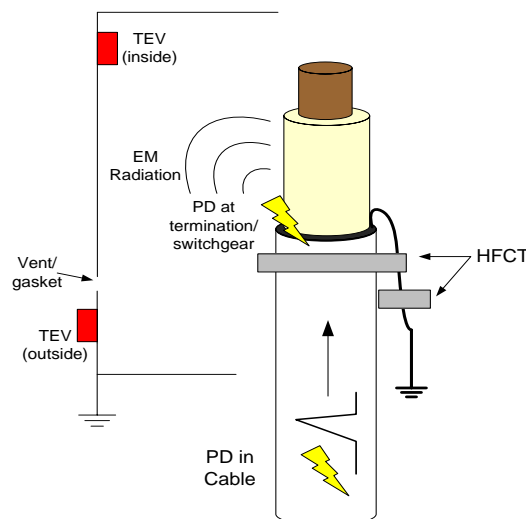


Figure 32: Electromagnetic signals that are detected by the TEV sensor [Source: SebaKMT LPD monitor presentation]

9.3 Method used for measuring

The pulses generated from partial discharges activity will travel along the cable from the cavity to the termination, one on the conductor and the other on the earth screen. Since the two pulses have an equal but opposite polarity, the measurements can be performed either on the cable or on the screen but the signals should not cancel each other [16]. The possible ways of connecting the HFCT sensors around the cables according to SebaKMT's recommendations are presented in the figure 33.

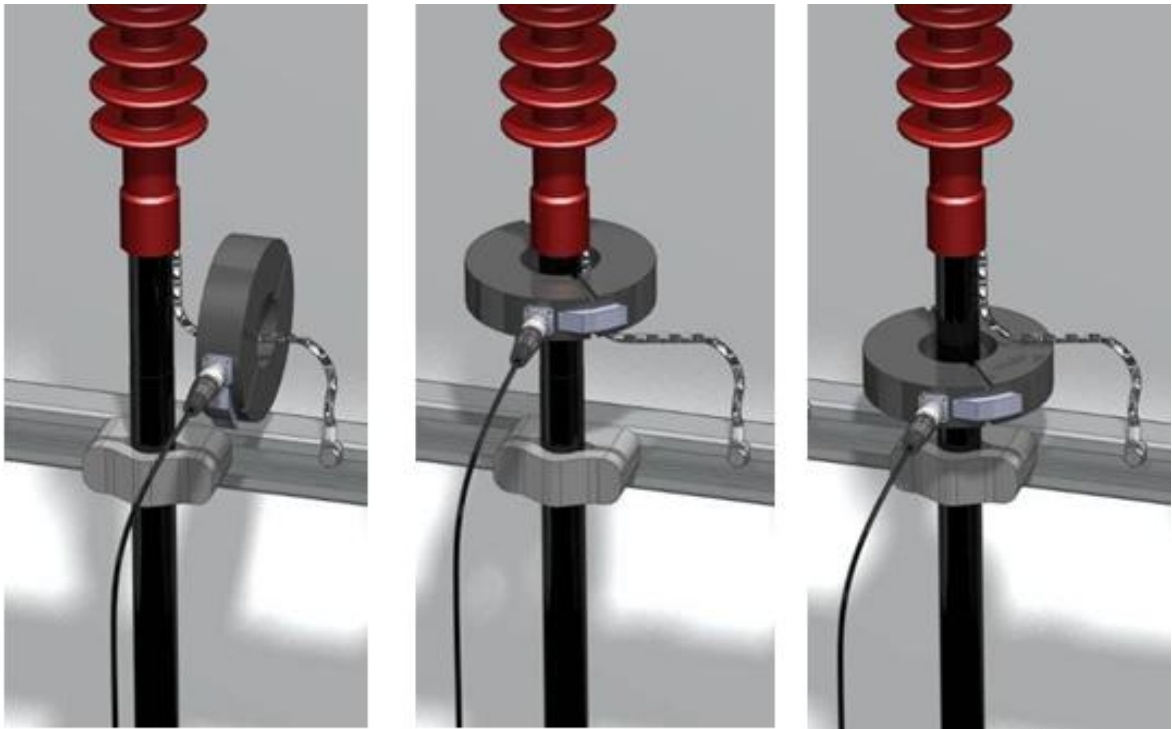


Figure 33: Options of connecting the HFCT sensors around the cables [Source: SebaKMT LPD monitor presentation]

Amongst the possible and recommended methods of SebaKMT for installing the sensors in the cables, the method that was used is the first one, that is the connection of the HFCT sensor directly on the earth screen cable. This method was used at CERN's 18 kV cables, because the size of the coil sensors was specific and smaller than the cable's diameter and the screen link. Moreover, it was noted from SebaKMT that the magnetic core of the sensor saturates when the current is higher than 300 A. In the cables that were measured the current is higher than that value, so the sensor should be put around the screen cable. The TEV sensor was attached to the metal part of the cubicle as also shown in figure 34.



Figure 34: Method that were used for the TEV sensor installation

9.4 Data capture method

The LPD monitor has sixteen channels that work one after another and collect pulses from up to sixteen cables. The threshold level for number of pulses per cycle is put automatically according to the on-board software and is very useful because it separates the noise from the real partial discharge pulses. This separation is crucial for the measurements of real partial discharge activity and not of the high harmonic currents that are regarded as noise and disturb the measurements.

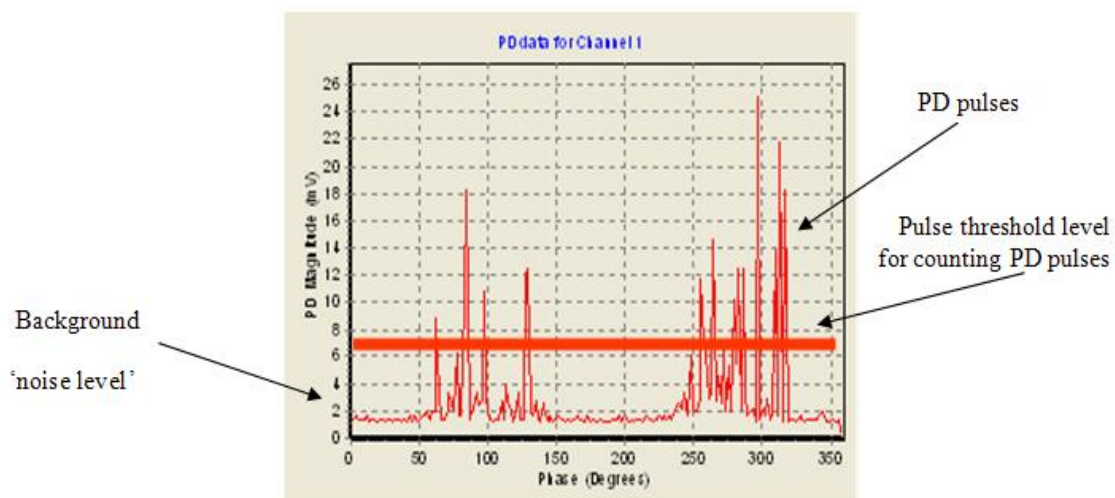


Figure 35: Plot of partial discharge activity, threshold and noise level

The LPD monitor automatically evaluates and cancels the background noise by setting the threshold level in a position where only peaks can be measured. Sometimes when the threshold level is put very high it cancels all the collected signals and the partial discharge activity is calculated as zero.

SebaKMT is using a software for evaluating the results according to an algorithm that categorises the signals obtained, in three categories. From the waveforms analysis the pulsed signals are separated into cable partial discharge activity and local equipment partial discharge activity and all the other signals are regarded as noise. The implementation of the event recognizer algorithms starts with recording the complete waveform of a single power cycle at full sampling rate of at least 100 MSamples/sec. All these waveforms are explained in the next figures.

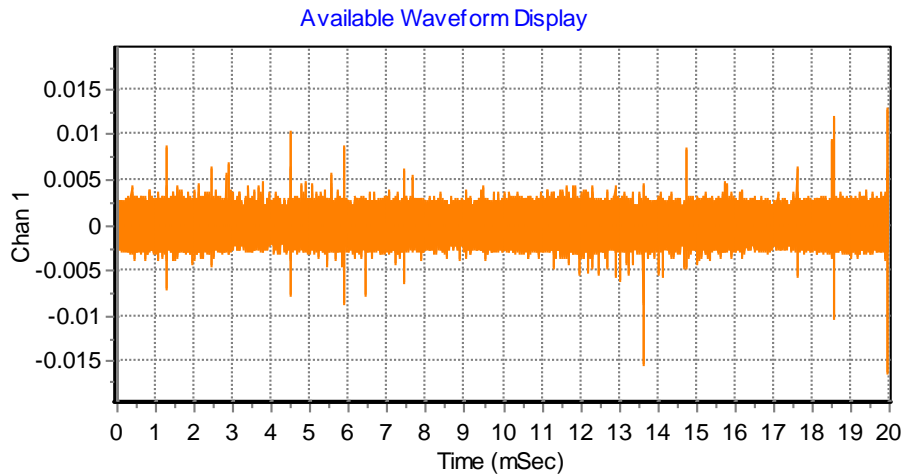


Figure 36: One power frequency cycle of raw data from HFCT sensor

The waveforms are isolated and each one is categorised according to its form into low frequency partial discharge activity, or as commercially is called cable partial discharge, high frequency partial discharge activity, or local partial discharge and noise.

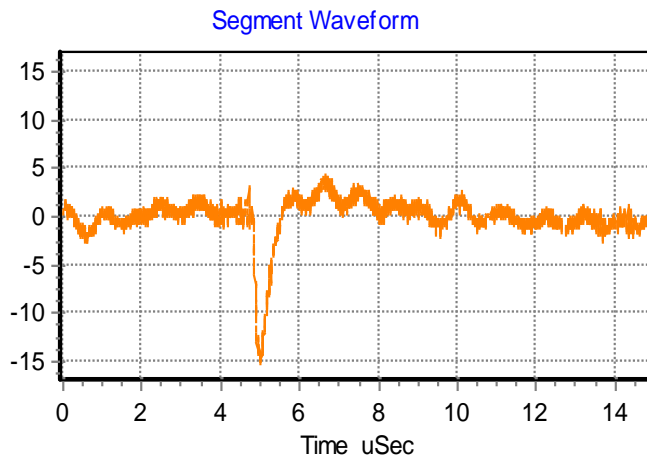


Figure 37: Waveform of cable partial discharge pulse, 16mV, 1160pC

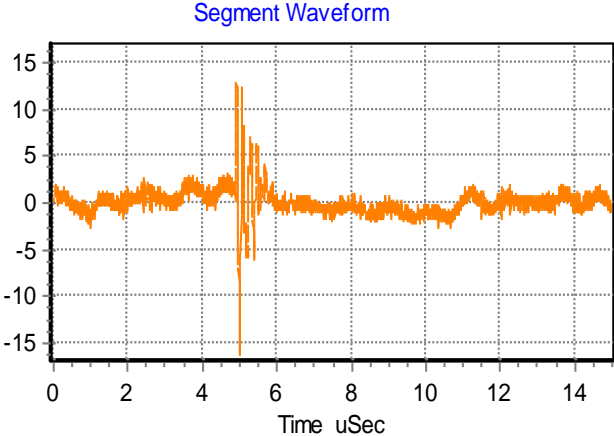


Figure 38: Waveform of local partial discharge pulse or partial discharge in the switchgear: 15mV, 24dB

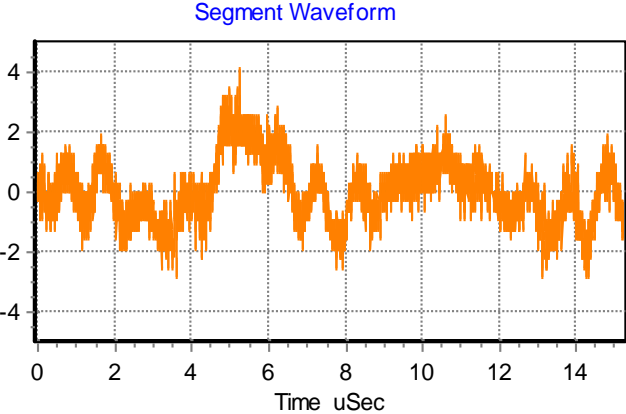


Figure 39: Waveform of noise pulse, difficulty in partial discharge categorization, 6mV

The results of the event categorisation and of the partial discharge magnitude are seen in the plots Phase of Power Cycle-PD Magnitude of the figures 40, 41 and 42. These plots can be obtained by using the LPD monitor software and they are separated according to the nature and the type of partial discharge activity.

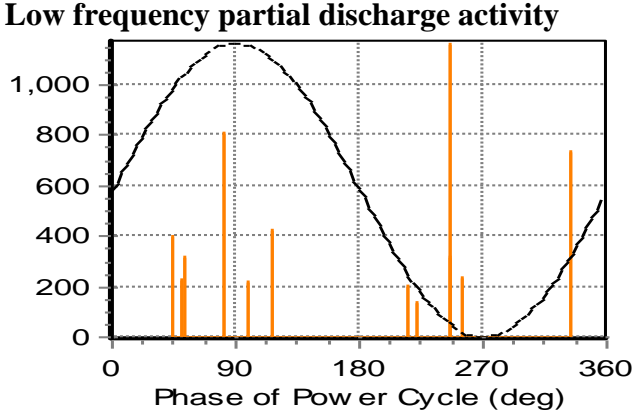


Figure 40: Plot of the cable partial discharge activity in a power cycle

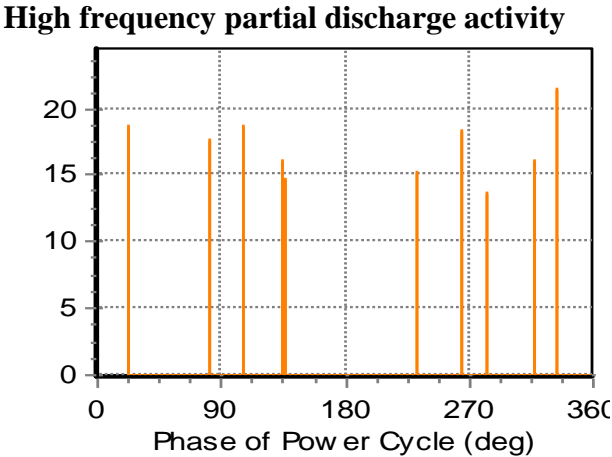


Figure 41: Plot of the local equipment partial discharge activity in a power cycle

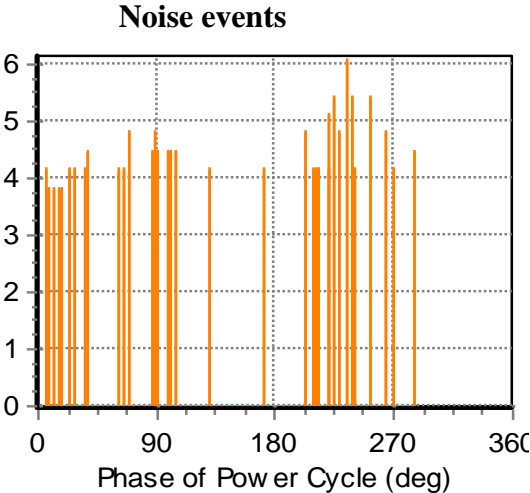


Figure 42: Plot of the noise events that occur in a power cycle

The measured amplitudes in one power cycle are, for the cable partial discharge the magnitude of partial discharge in pC and for the local partial discharge activity the magnitude in dB. The noise events are measured in mV and no more information is available.

The software after the separation of each event is also computing some other parameters in the waveforms, like the rise time, the pulse width and the fall time.

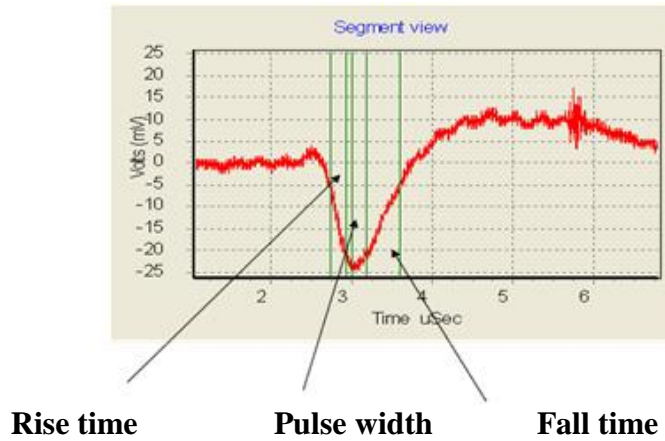


Figure 43: Event and pulse analysis for low frequency partial discharge

The partial discharge value (pC), can be computed by the area under the partial discharge pulse or by using the equation:

$$Q_{app} = \frac{1}{Z_{TR}} \int V_{out} dt \quad (8)$$

where Z_{TR} is the transfer impedance and V_{out} is the output voltage of the HFCT sensor.

On the other hand, high frequency partial discharges value is expressed in dB. The system resolution is not sufficient in measuring the surface of the area under the pulse, so it measures only the magnitude of peaks.

9.5 Color code

The LPD monitor software is using the following color code according to the severity of the partial discharges activity in the cables and is evaluating the results according to low, medium, intensive and critical partial discharge activity. All the results that the LPD monitor is measuring are presented in the main screen according to the color code of table 2.

Table 2: Color Code

	low PD activity
	medium PD activity
	intensive PD activity
	critical PD activity

A more detailed analysis of the color code for the medium voltage cables, cable joints and terminations and switchgears respectively with the values in pC and in dB is presented in the tables 3, 4 and 5:

Table 3: Color code for partial discharge activity critical levels in medium voltage cables

0 pC- 250 pC	Discharge within acceptable limits
250 pC- 350 pC	Some concern, monitoring recommended
350 pC- 500 pC	Some concern, regular monitoring recommended
>500 pC	Major concern, repair or replace

Table 4: Color code for partial discharge activity critical levels in medium voltage cable joints and terminations

0 pC- 500 pC	Discharge within acceptable limits
500 pC- 1000 pC	Some concern, monitoring recommended
1000 pC- 2500 pC	Some concern, regular monitoring recommended
>2500 pC	Major concern, repair or replace

Table 5: Color code for partial discharge activity critical levels in medium voltage switchgear

dB Level	mV Level	Condition and Action
< 0 dB	< 1 mV	Discharge within acceptable limits
0 dB-15 dB	1 mV-6 mV	Some concern, monitoring recommended
15 dB- 30 dB	6 mV-32 mV	Some concern, regular monitoring recommended
>30 dB	>32 mV	Major concern, repair or replace

It should be noted that the partial discharges activity’s criteria are not accurate but empirical because they are based on data collected from partial discharge testing industry in the last years and furthermore only a rough estimation can be possible because the criticality for each cable depends on the geometry, the type of partial discharge event, the location, the environmental conditions and the nominal voltage. This is the reason that these colours are only indications that can lead to a more explicit and further interpretation based on the software provided and the detailed waveforms analyses from the partial discharge activity of every channel [13].

According to the results gained from the on-line measurements and the flowchart in figure 34, the cases that are under real risk of high partial discharge activity, should be investigated off load for fault localisation and better data interpretation. In the following chapters the results processing with SebaKMT’s LPD monitor are analyzed and furthermore the off-line measurements in critical cables that were examined are also presented. The whole procedure for cable diagnostics and cable categorization for a cable line is implemented.

In the following figures 44, 45, 46, 47 and 48 some images from the LPD monitor and the measurements in the substations are presented.

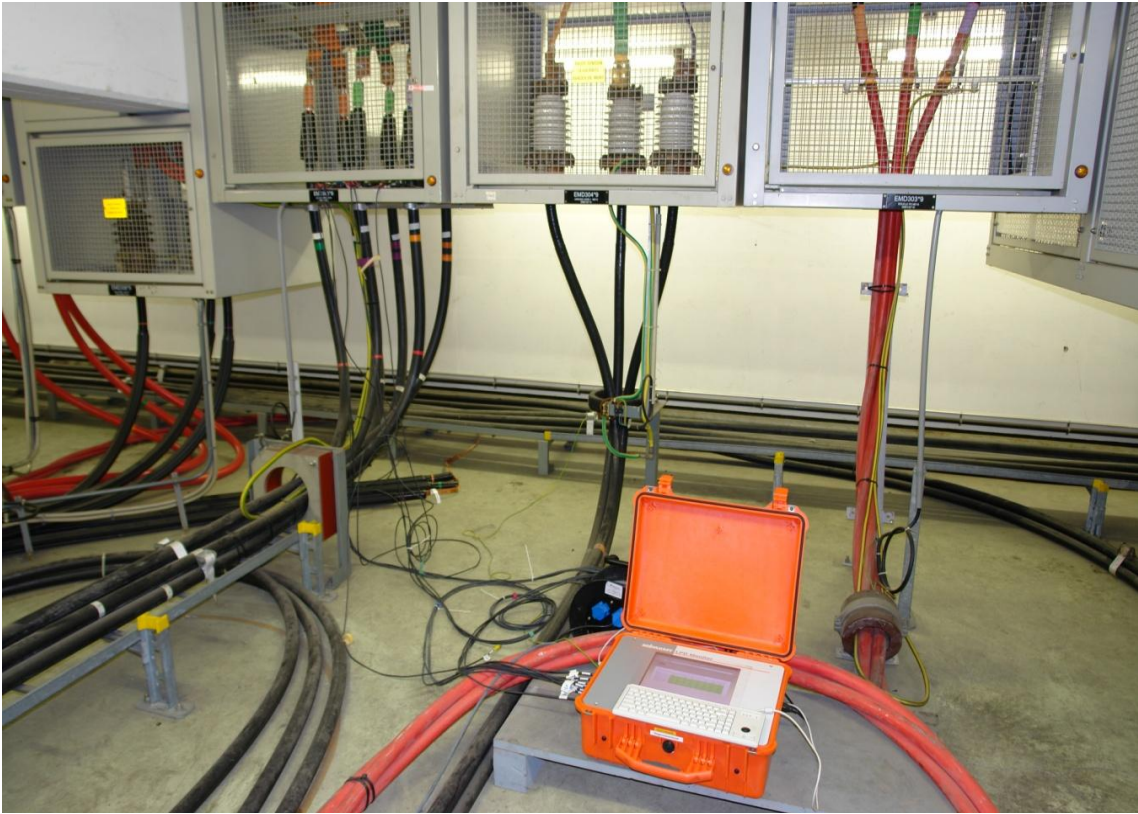


Figure 44: LPD monitor measuring partial discharge activity in substation ME9



Figure 45: The LPD monitor and the sixteen input sensor cables

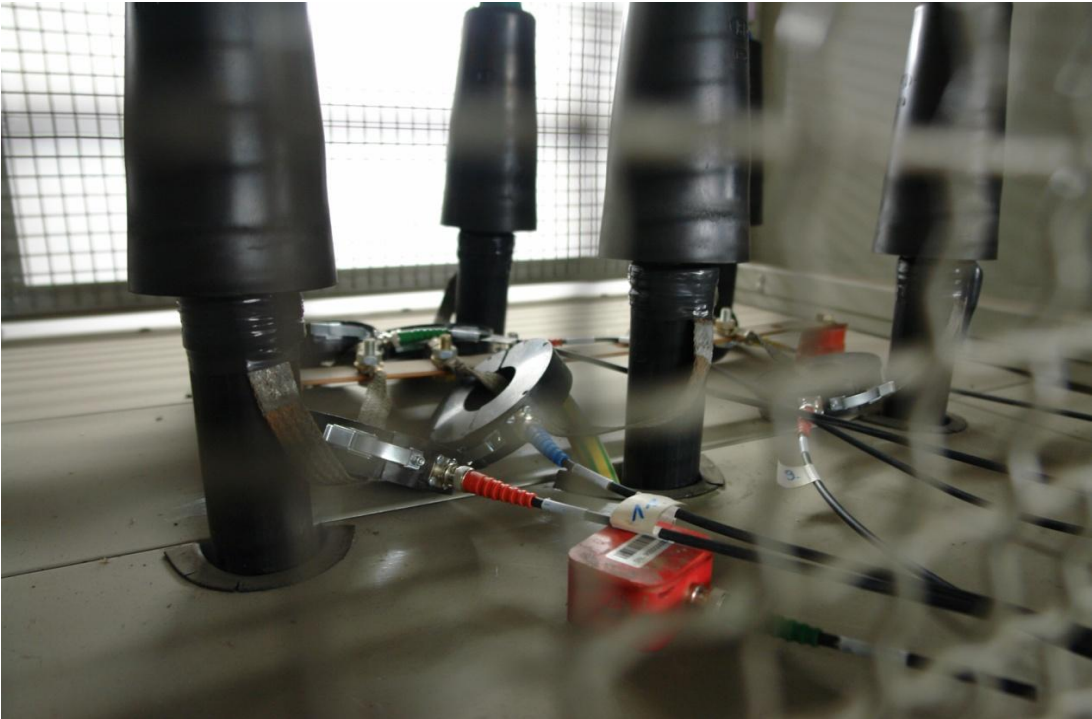


Figure 46: The HFCT sensors around the screen cables and the TEV sensors attached to the cubicle

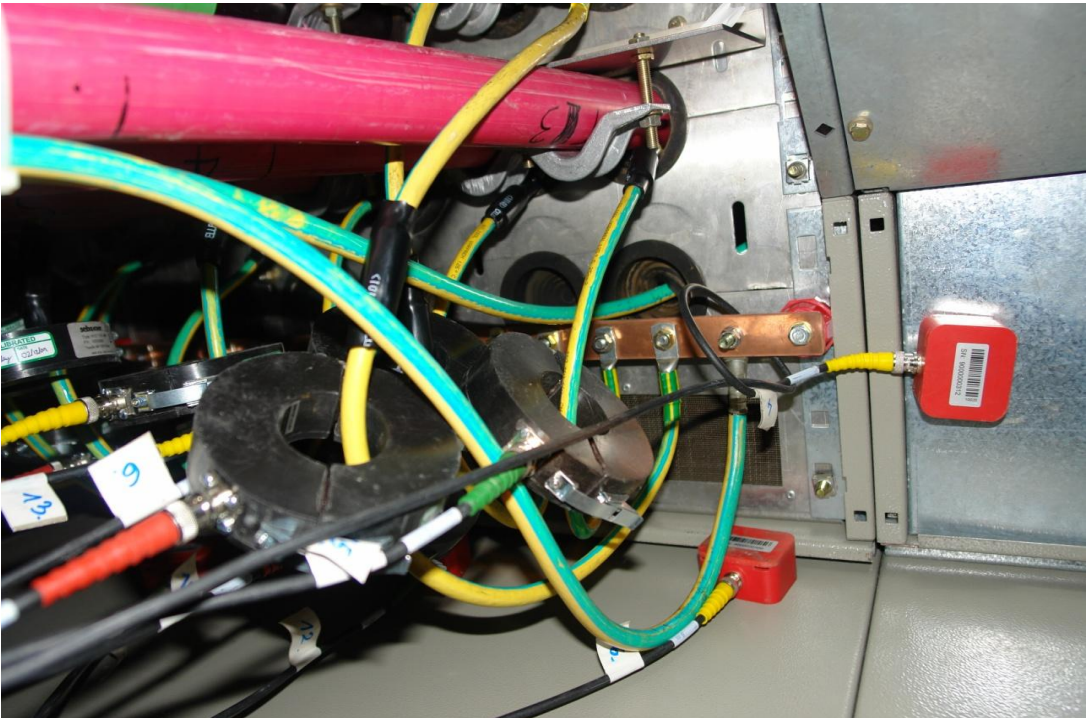


Figure 47: The HFCT sensors around the screen cables and the TEV sensors magnetically attached to the cubicle



Figure 48: LPD monitor measuring in BE9 substation

10. ON LOAD PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS RESULTS PROCESSING

10.1 Measured feeders and cables

The greater part of the measured cables are cable lines in BE and BE9 substations. Moreover, the MP6 cable, the BE-BA4 cable lines and the SPS pulsed loop cables were measured.

More explicitly, 150 cables were measured for partial discharge activity, where the cable screen was accessible with the methods analyzed in chapter 9 for the inductive sensors. Four feeders couldn't be tested because cables were not energized.

The templates in figure 49 indicate the two different types of cubicles that exist in BE and BE9 substations. The exact position of each cable is indicated by the number and the letter as seen below. The view of the cubicles is from the bottom side. This way of representation will help to the determination of the measured discharge activity in cables.

It was proposed by SebaKMT to measure each cable for partial discharge signs for more than 24 hours since it is known that partial discharge activity is affected from the temperature and the humidity and for acquiring better statistical sampling.

The period of the measurements of each cable was limited to 1/3 of the proposed, because the equipment was available only for a short period between 17.8.2010 and 2.9.2010. Although the recording period was not the desirable, the existence of partial discharges is still recognizable.

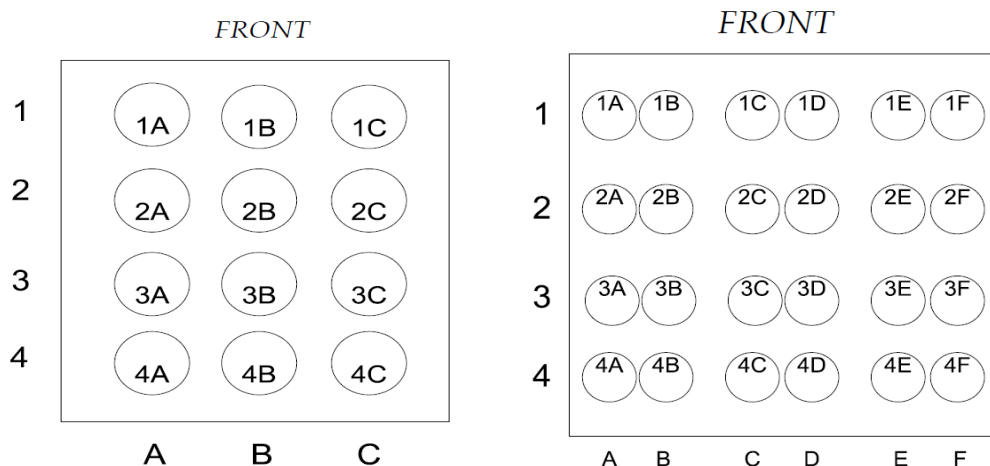


Figure 49: Templates of the two different cubicles as seen from the bottom

The plan of the measurements and the measured feeders is shown in table 6. The first column shows the feeder's name and the second is a description of the circuit. The other columns show the number of measurements per cubicle and according to the templates

10.2 On load partial discharge results

All the cables mentioned in the table 6 were measured. It should be noted that the procedure for processing the results was comparing the color code and trying to identify the most crucial cases. SebaKMT also contributed to the results evaluation because the special software that is editing and processing the collected waveforms is still in development mode and not offered to clients. Amongst the cables that were measured only the report and data results for BE-BA4 cable line will be presented as an example. The process for the measurements and the result evaluation of all the cables that was followed was the same as this representative example.

10.2.1 BE-BA4 cable line

Table 7: Cable line description

Cable type: single core
Conductor: Copper
Dimension: 3 x 1 x 400 mm ²
Insulation: XLPE
Rated voltage: 12/20 kV
Operating voltage: 18 kV
Cable line length: 1650 m
Age: about 7 years
Installation conditions: cable installed in the ground
Other remarks: 6 cable joints along the cable line

The way the measurements were effectuated in both sides of BE and BA4 cable line are shown in the figure 50.

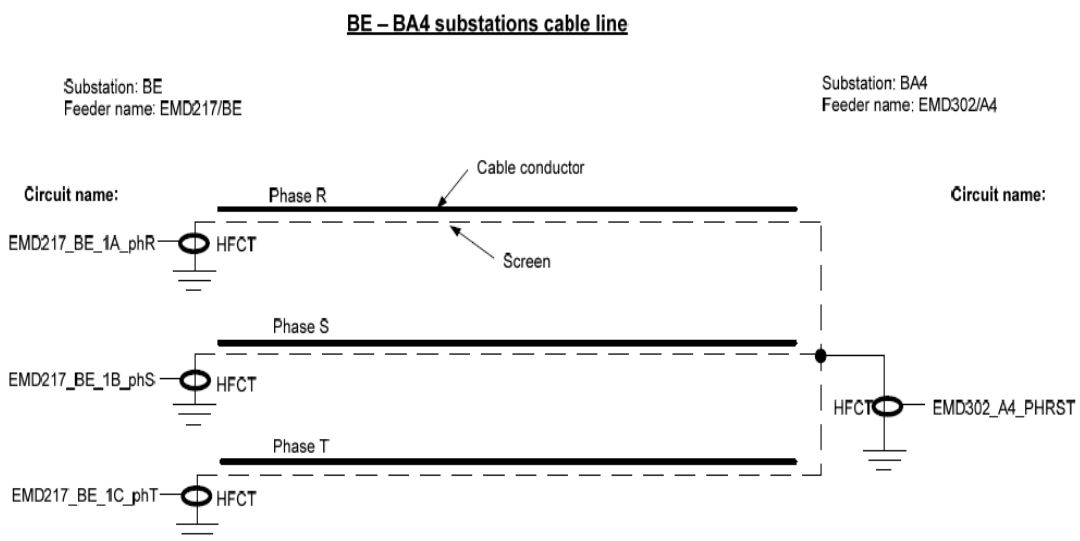


Figure 50: Positions of HFCT sensors

The topology of the BE-BA4 cable is shown in the single line diagram of figure 51. In this diagram all the cable lines that were measured during the partial discharge activity measurement campaign at CERN are presented.

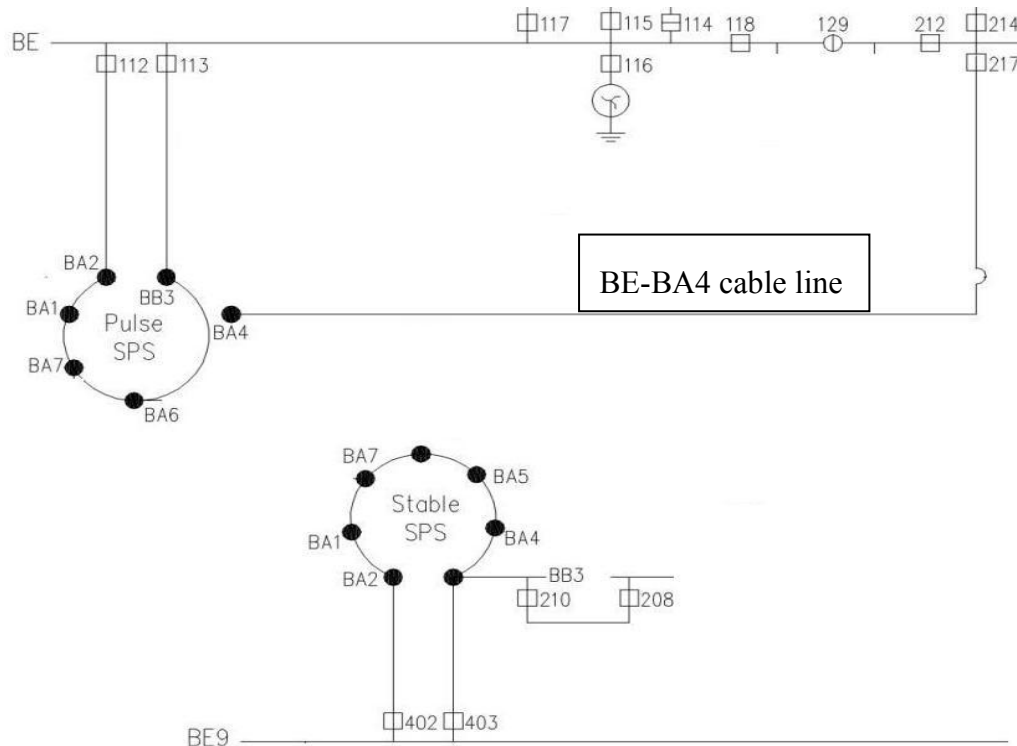


Figure 51: Pulsed and stable loops

In the figure 52, the BE and BA4 substations are plotted and furthermore the location of the three joint areas can be recognized in the 1650 m cable line.



Figure 52: Location of intervention between BE and BA4 substations [Source: D. Bozzini TS/EL-HT, 10 November 2008, CERN]

In that cable line there were some faults in the joints in the past. These faults are shown in the figure 53 with the red color.

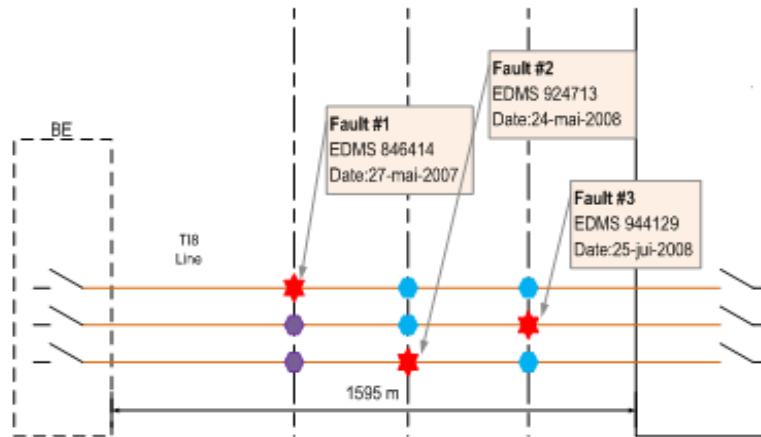


Figure 53: Diagram of the three phases and the faults in the joints

The results of the inspected joints by the external laboratory CELLPACK and by CERN are shown in figure 54. Three of the joints in the three phases of BE-BA4 cable line were damaged due to poor workmanship and bad assembly.

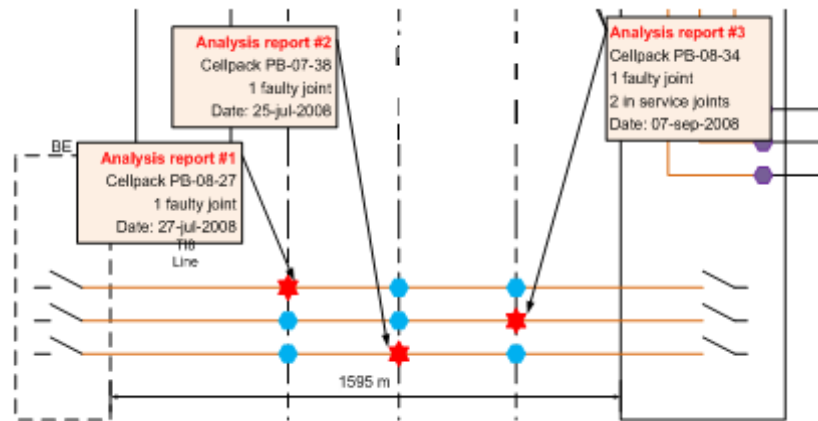


Figure 54: Diagram of the three phases, the faults in the joints and the report analysis

Because of poor workmanship every joint was replaced by two. That means that the three joints per phase were replaced by six.

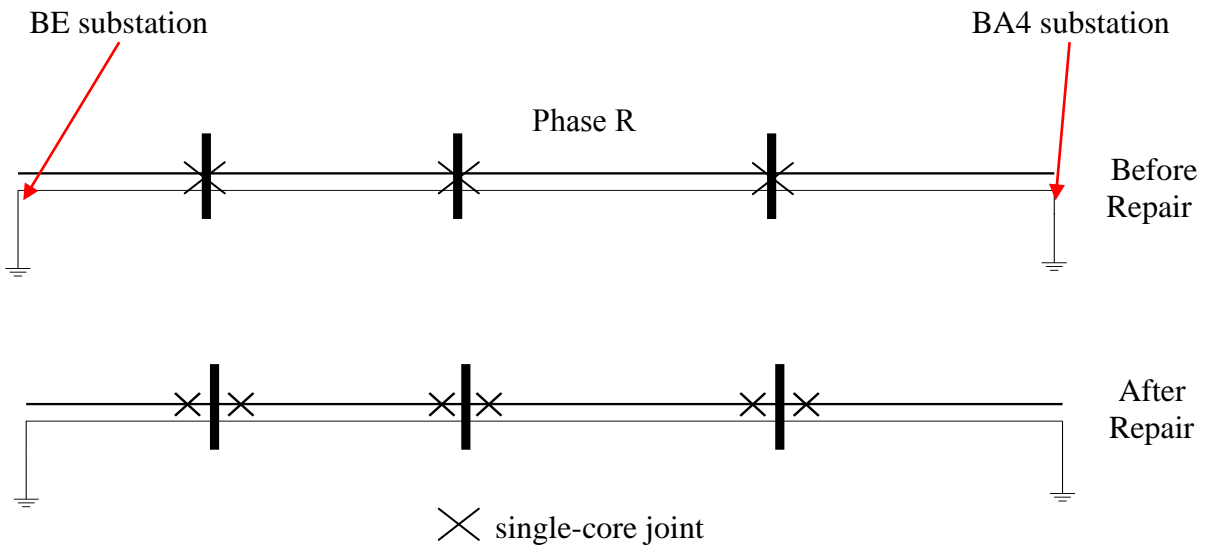


Figure 55: Joints in one phase of BE-BA4 substations cable line

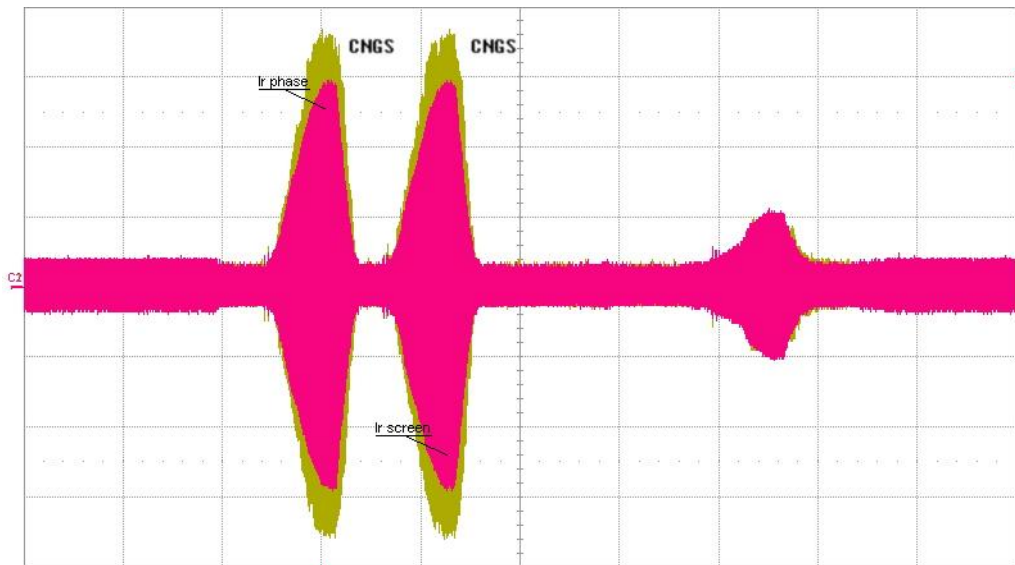
10.2.2 Current measurements and harmonic analysis in BE-BA4 cable line

For the understanding of the characteristics of the pulsed load cable line, current measurements and harmonic analysis were performed. The BE-BA4 cable line harmonic analysis is crucial for the consolidation plans because its screen current seems to be extremely high. Current measurements were effectuated in this cable line.

The characteristics of the BE-BA4 cable line and the measurements that were performed for estimating the RMS value and also for the processing of the current harmonics, are shown in table 8.

Table 8: Measurement characteristics of EMD217/BE

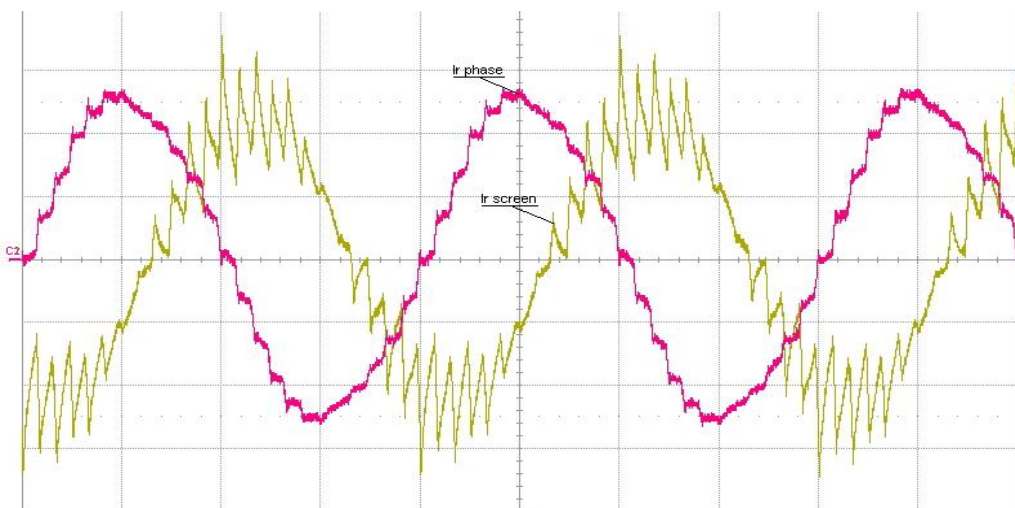
	EMD217/BE
Sampling rate	200 kHz
Cable length	1650 m
Cable characteristics	3*1*400 Cu mm2 12/20 KV
Circuit	Ti8 (BE-BA4)
Ipeak_phase	1300 A
Ipeak_screen	350 A
Super Cycle	2*CNGS
Date of measurements	01.10.2010



Time: 5 s/div; Amplitude: 300 V/div; Sampling rate: 20 kS/s

Figure 56: Phase and screen currents of the EMD 217/BE during SPS super cycle that contains two CNGS pulses

The measurements of the current for the harmonic analysis, were performed while there were only 2*CNGS pulses in the highest of the first CNGS pulse. In the figure 57 captured by the oscilloscope the phase current and the screen current can be observed. The sampling rate is 200 kHz. The Matlab-Simulink tool is used for the harmonic analysis in the phase and screen currents for one period.



Time: 5 ms/div; Amplitude for the phase current: 100 V/div; Amplitude for the screen current: 500 V/div; Sampling rate: 200 kS/s

Figure 57: The phase and screen current waveforms of EMD217/BE in the oscilloscope

In figure 58 two periods are plotted and the harmonic analysis up to 2500 Hz is simulated. The THD(%) level is 7.15%.

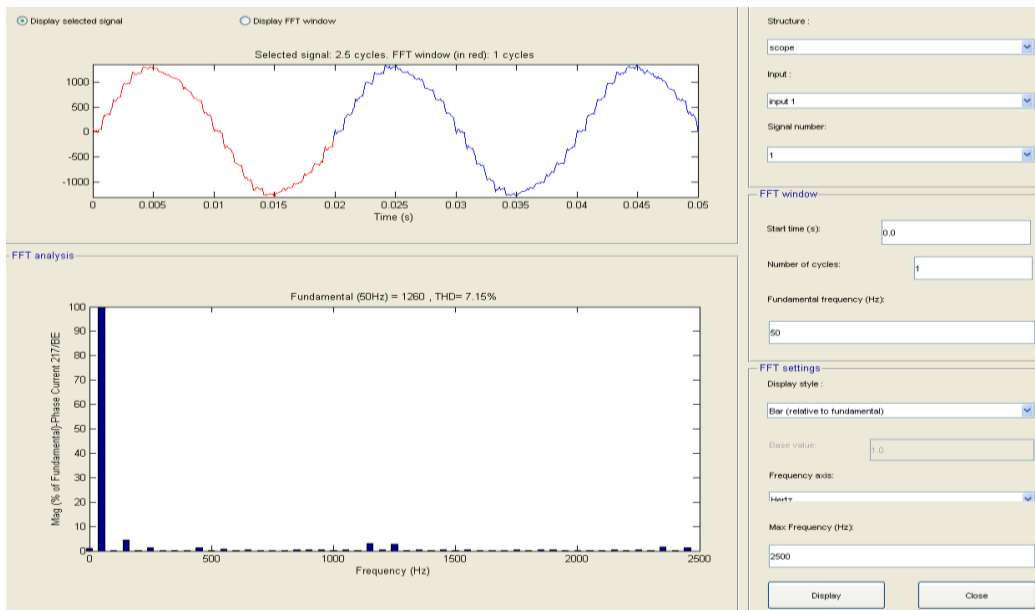


Figure 58: The waveform and the FFT analysis in the phase current of EMD217/BE

For a better evaluation of the results the representation of the maximum frequency is set to 2500 Hz and the Y axis scale was modified accordingly. The number of harmonics and their amplitude are better illustrated.

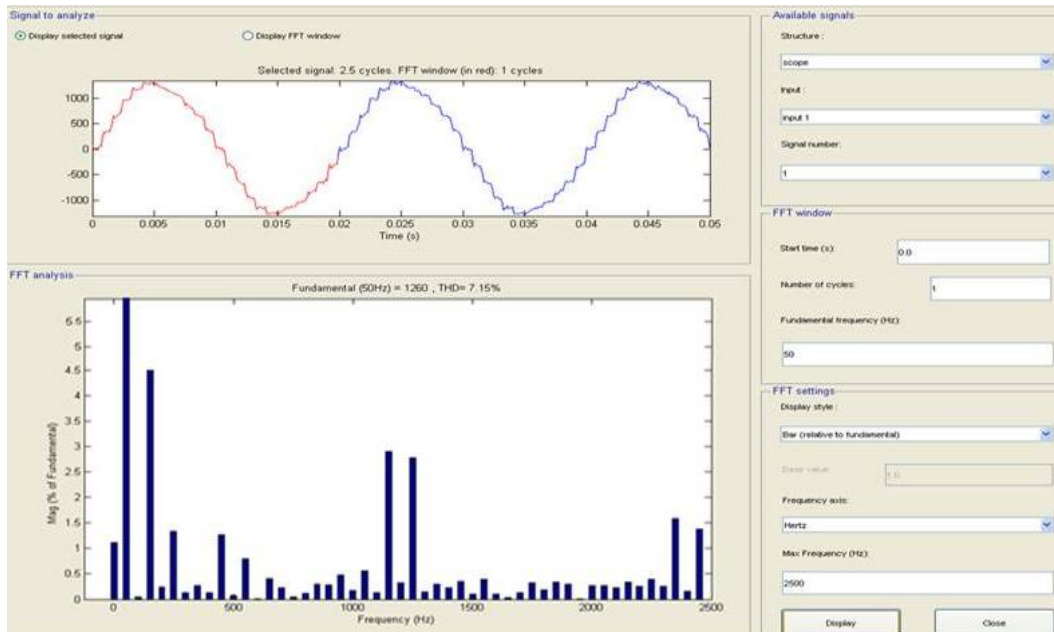


Figure 59: The waveform and the FFT analysis in the phase current of EMD217/BE in a different scale

The results of the harmonic analysis are presented in table 9 that shows the harmonic order, the frequency and the percentage of THD.

Table 9: Harmonic analysis of the phase current of the feeder EMD217/BE

Harmonic	freq (Hz)	THD(%)	Harmonic	freq (Hz)	THD(%)
1	50	100%	14	700	0.23%
2	100	0.05%	15	750	0.05%
3	150	4.50%	16	800	0.12%
4	200	0.25%	17	850	0.30%
5	250	1.35%	18	900	0.29%
6	300	0.13%	19	950	0.47%
7	350	0.27%	20	1000	0.17%
8	400	0.13%	21	1050	0.57%
9	450	1.27%	22	1100	0.14%
10	500	0.07%	23	1150	2.91%
11	550	0.80%	24	1200	0.33%
12	600	0.01%	25	1250	2.78%
13	650	0.40%	DC		1.11%

By observing the results presented in table 9, it can be concluded that only the third harmonic at 150 Hz has THD= 4.5% and that the other harmonic components are low. The same harmonic analysis with Simulink was performed in the screen current to evaluate its value also for one cycle. In figure 60 the peak of screen current of 350 A is observed, a value that indicates the need for more explicit investigation.

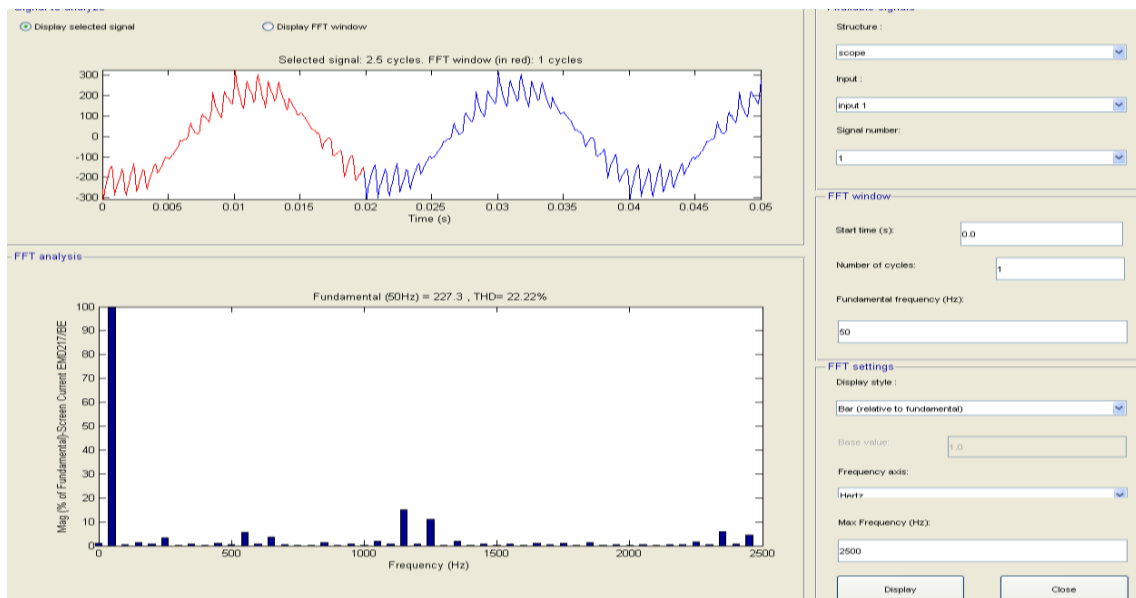


Figure 60: FFT analysis and harmonic spectrum of one cycle in the screen current in the cubicle EMD 217/BE

For an optimal presentation of the results, maximum frequency is set to 2500 Hz and the Y axis scale was modified accordingly.

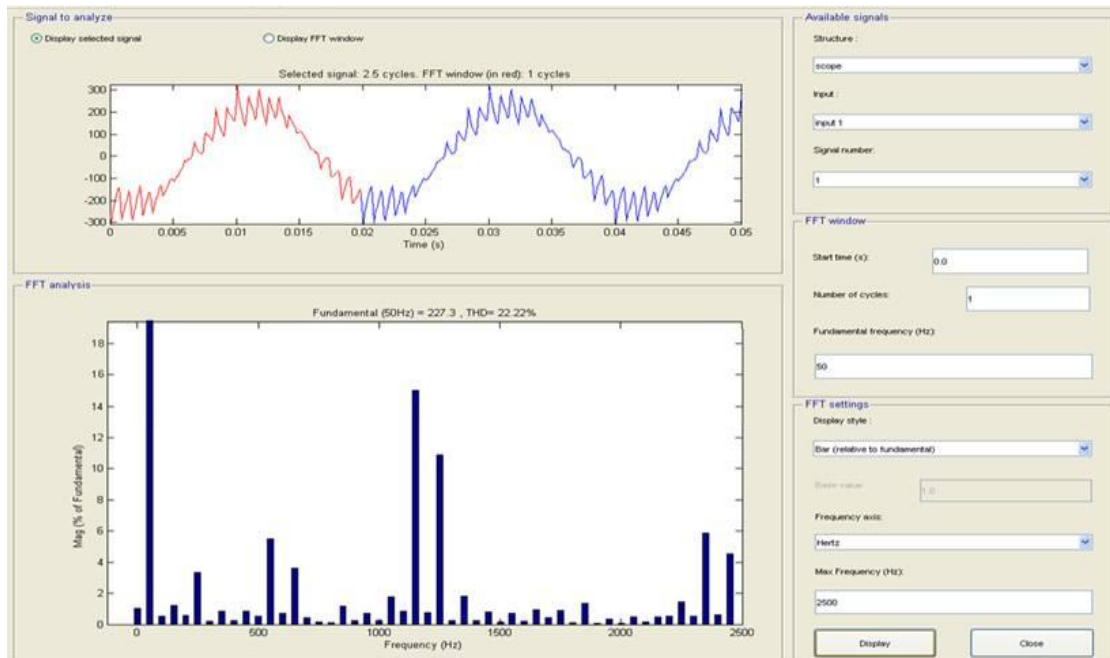


Figure 61: FFT analysis and harmonic spectrum of one cycle in the screen current in the cubicle EMD 217/BE in a different scale

The results of the harmonic analysis in the screen current are presented in table 10 that shows the harmonic order, the frequency and the percentage of THD.

Table 10: Harmonic analysis of the screen current of the feeder EMD217/BE

Harmonic	freq (Hz)	THD(%)	Harmonic	freq (Hz)	THD(%)
1	50	100%	14	700	0.42%
2	100	0.53%	15	750	0.15%
3	150	1.24%	16	800	0.11%
4	200	0.59%	17	850	1.19%
5	250	3.36%	18	900	0.23%
6	300	0.20%	19	950	0.73%
7	350	0.84%	20	1000	0.23%
8	400	0.26%	21	1050	1.79%
9	450	0.87%	22	1100	0.84%
10	500	0.51%	23	1150	14.95%
11	550	5.52%	24	1200	0.76%
12	600	0.72%	25	1250	10.89%
13	650	3.64%	DC		1.03%

As can be concluded from this table, high 23rd and 25th harmonic components are present in the screen current.

The results of the harmonic analysis in the currents of BE-BA4 cable line will be used later to explain the results and the conclusions for diagnostics in high and medium voltage cables.

10.2.3 LPD monitor color code results

Some of the screenshots gained from the LPD monitor are presented in the following figures. The BE-BA4 cable line partial discharges were measured from both sides, in the BE substation in the feeder EMD217/BE and in BA4 in the feeder EMD302/A4. In the figures, the characteristics of the channel, the period of measuring and the plots of partial discharge activity are shown. Furthermore, there are summary tables of local partial discharge activity and of cable partial discharge activity according to the discharge activity and the representative color code. These summary tables offer a quick idea of the insulating condition of the measured cables and of the severity of partial discharges. The figures and the waveforms of the partial discharge activity peak values are presented as an Annex in the end of this document.

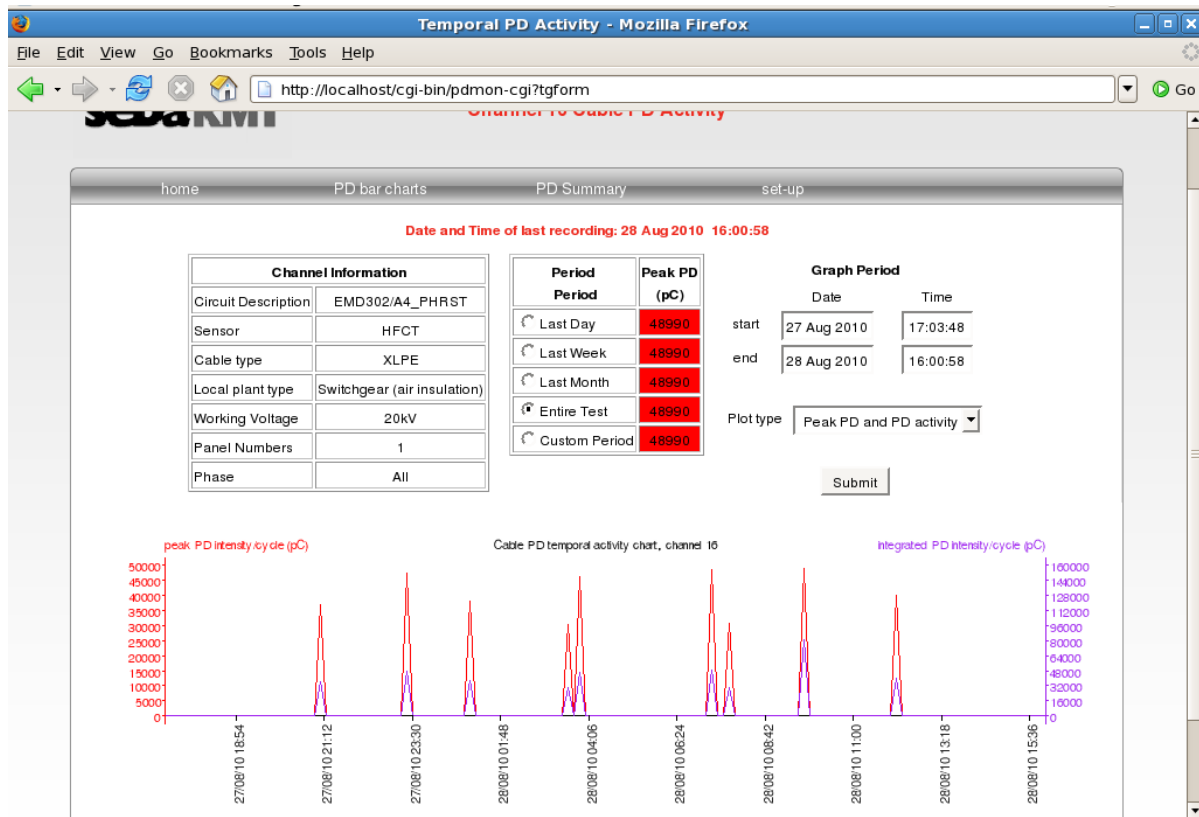


Figure 62: Peak partial discharge and partial discharge activity of EMD302/A4_RST phases

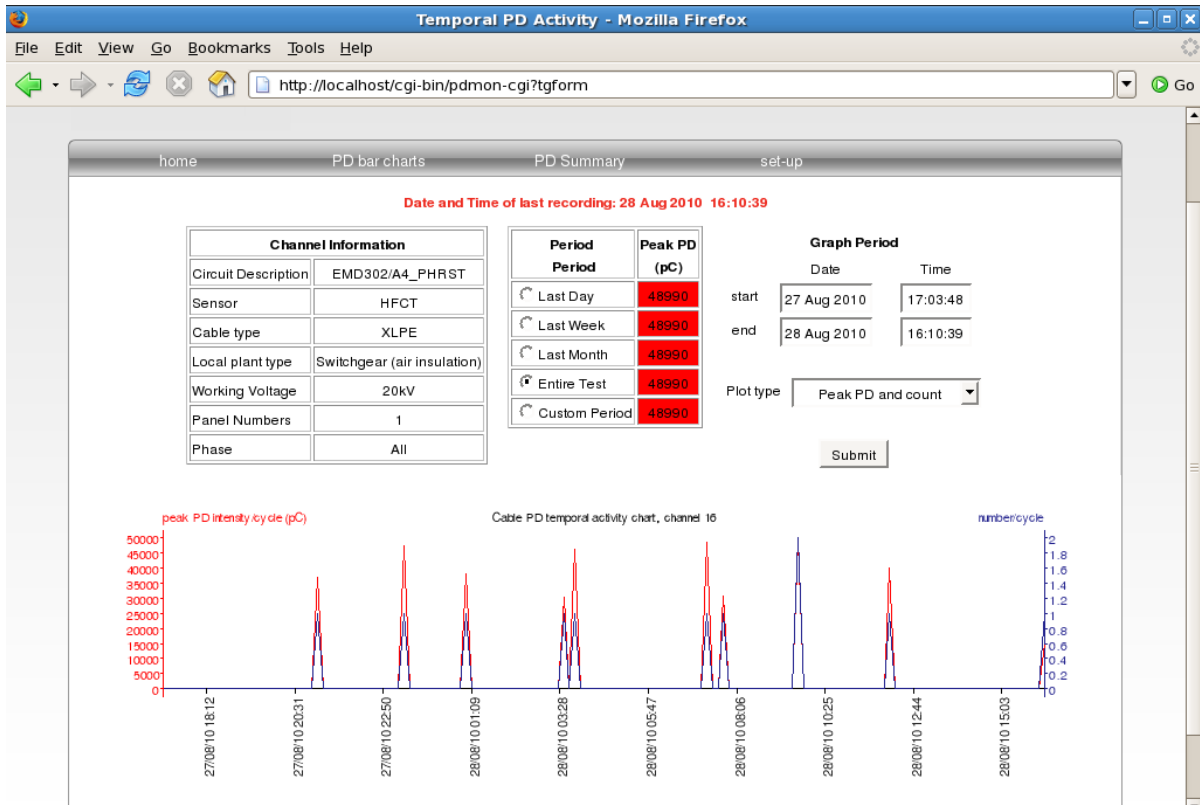


Figure 63: Peak partial discharge of EMD302/A4_RST phases

The summary tables of local equipment partial discharge activity and of cable partial discharge activity according to the color code are presented in figures 64 and 65.

The results show intensive partial discharge activity in the three phases of EMD302/A4 feeder, since they were measured together.

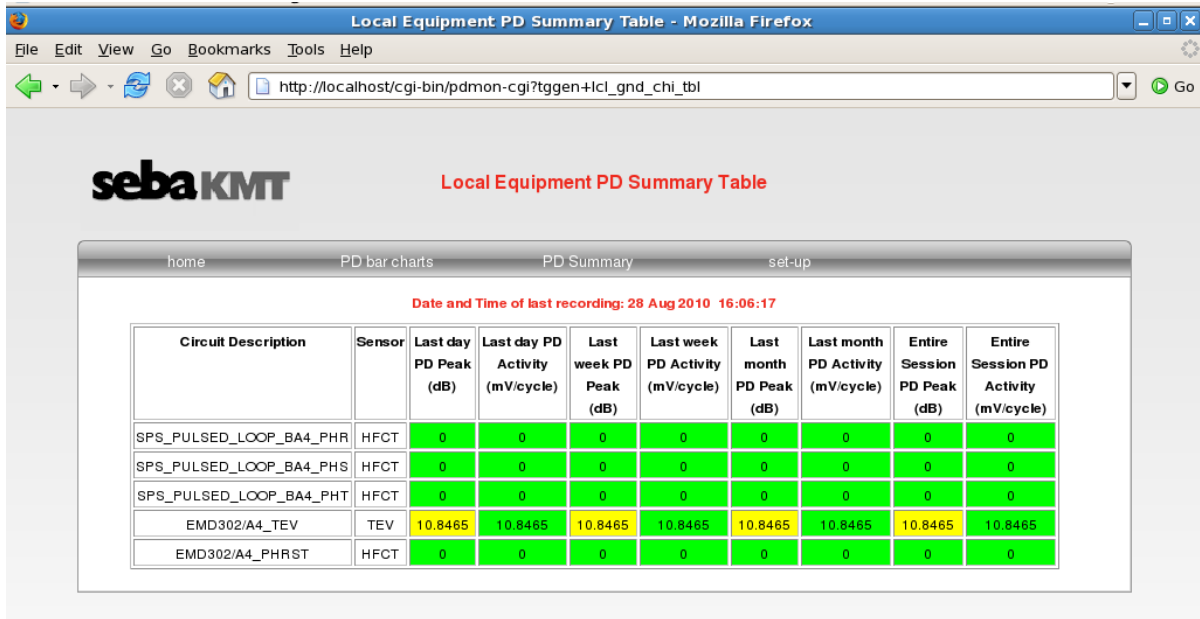


Figure 64: Local equipment partial discharge activity summary table

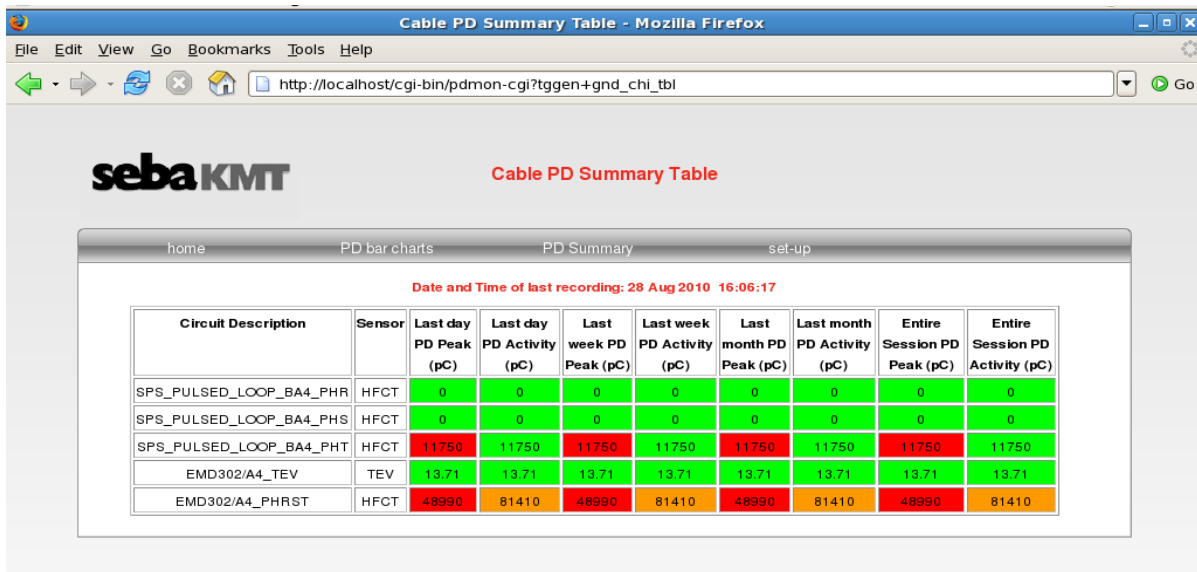


Figure 65: Cable partial discharge activity summary table

The same partial discharges measurements were effectuated in BE substation in the other side of the cable line in the cubicle EMD217/BE. The results and the tables from the LPD monitor can be also observed in the next figures.

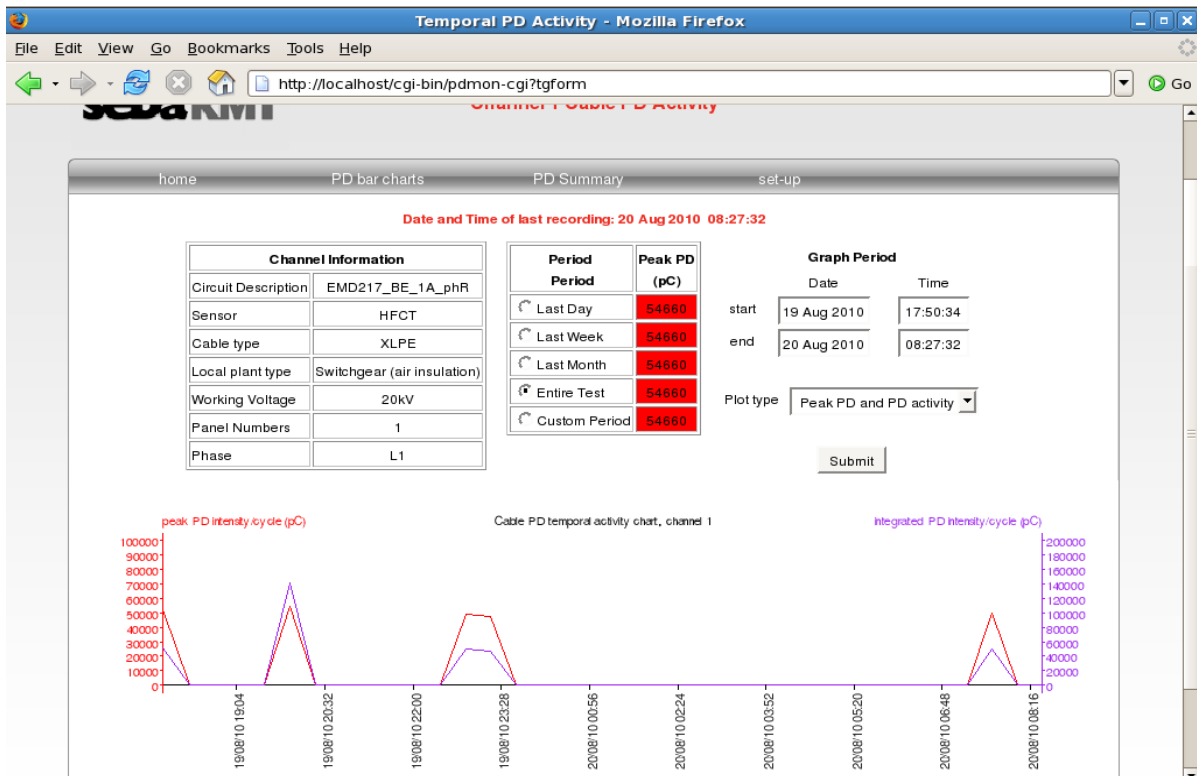


Figure 66: Peak partial discharge and partial discharge activity of EMD217/BE_1A phase R

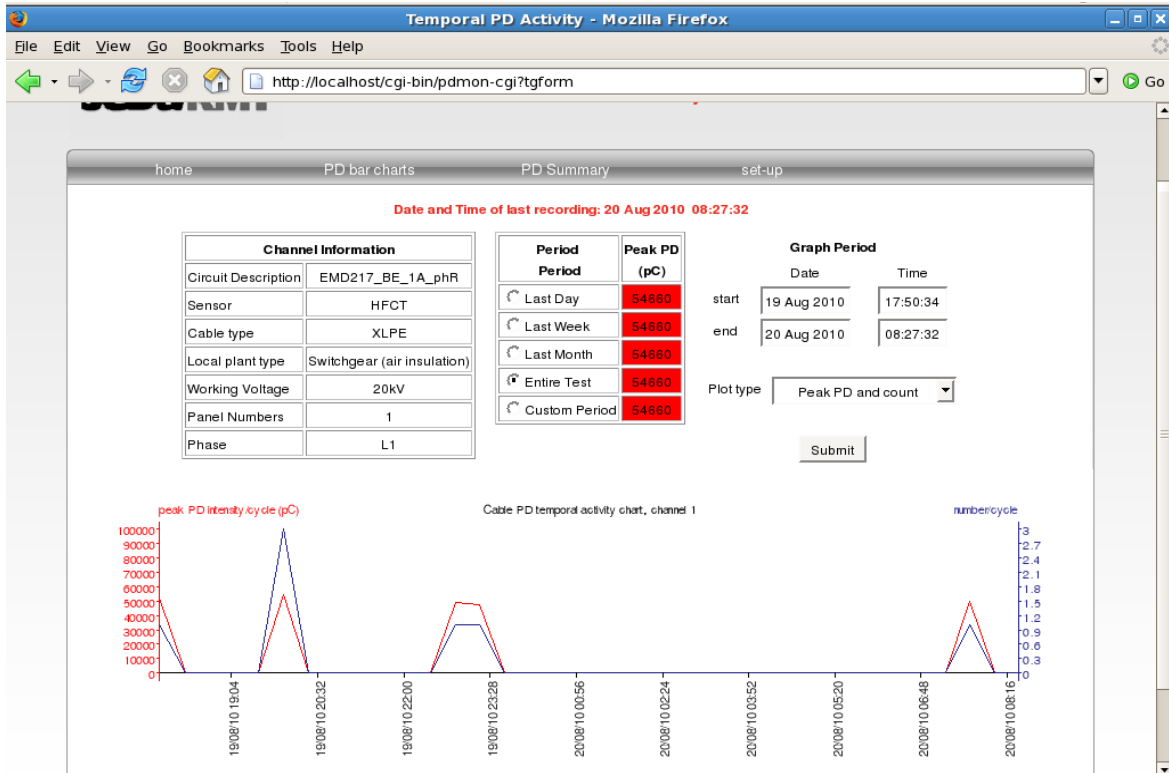


Figure 67: Peak partial discharge of EMD217/BE_1A phase R

The summary tables of local equipment partial discharge activity and of cable partial discharge activity according to the color code are presented for the feeder EMD217/BE are presented in the figures 68 and 69. The results show critical partial discharge activity in the phase R of EMD217/BE feeder and intensive partial discharge activity in the phase S of the same feeder.

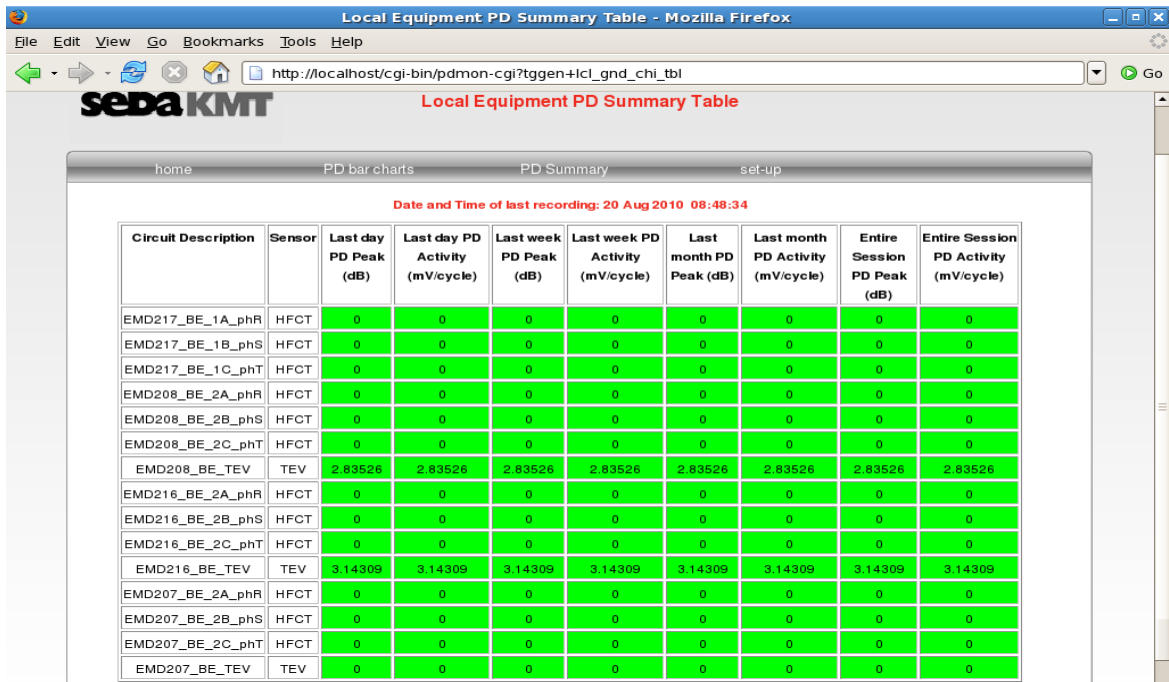


Figure 68: Local equipment partial discharge activity summary table

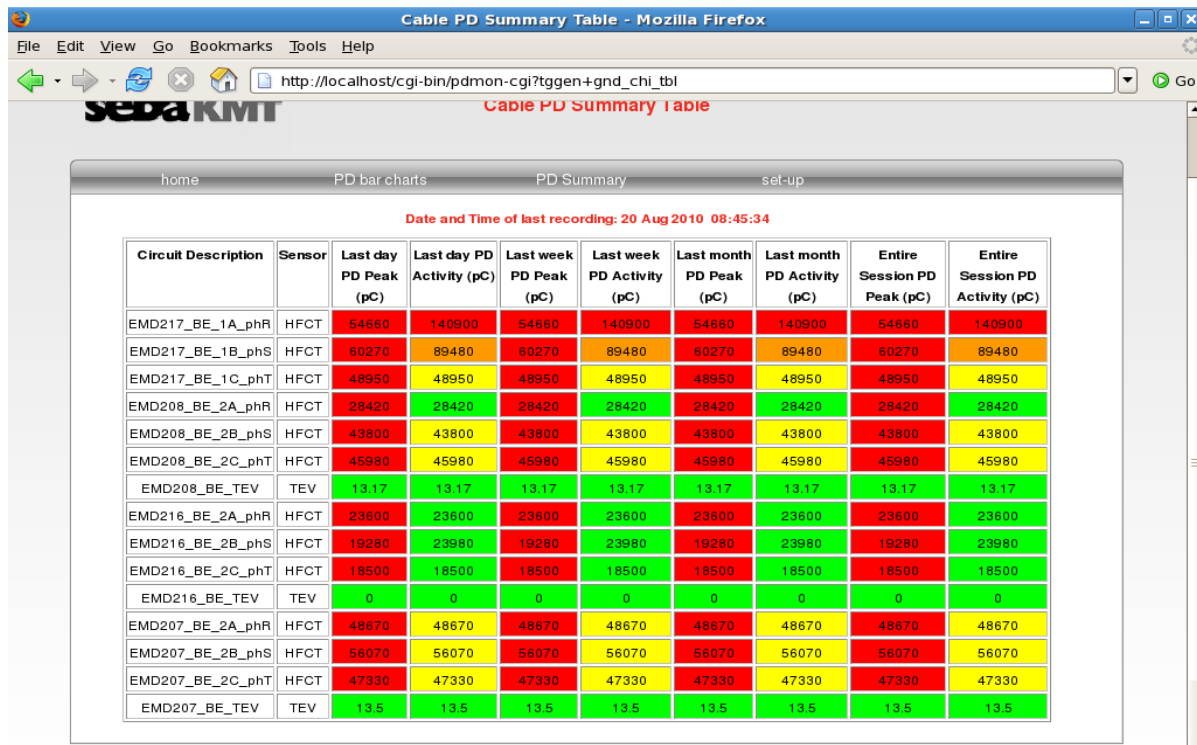


Figure 69: Cable partial discharge activity summary table

It can be concluded that the analysis of partial discharge activity according to the color code is not accurate and the colours are just indications of the cable’s condition. For a better evaluation of the results, a further analysis is needed. But the results about the entire session partial discharge activity and the values in pC could be used to receive the right decision about the severity of the discharges.

10.2.4 LPD monitor waveforms results by SebaKMT

The waveforms analysis is performed by dedicated software of SebaKMT and the plots are shown in the next figures. The waveforms are evaluated according to the algorithm that categorises the signals into cable partial discharge activity, local equipment partial discharge activity and noise. The details of the exact procedure for separation according to the waveforms, has been explained in the previous chapter 9.

EMD302 A4 PHRST 31.08.10 09:42

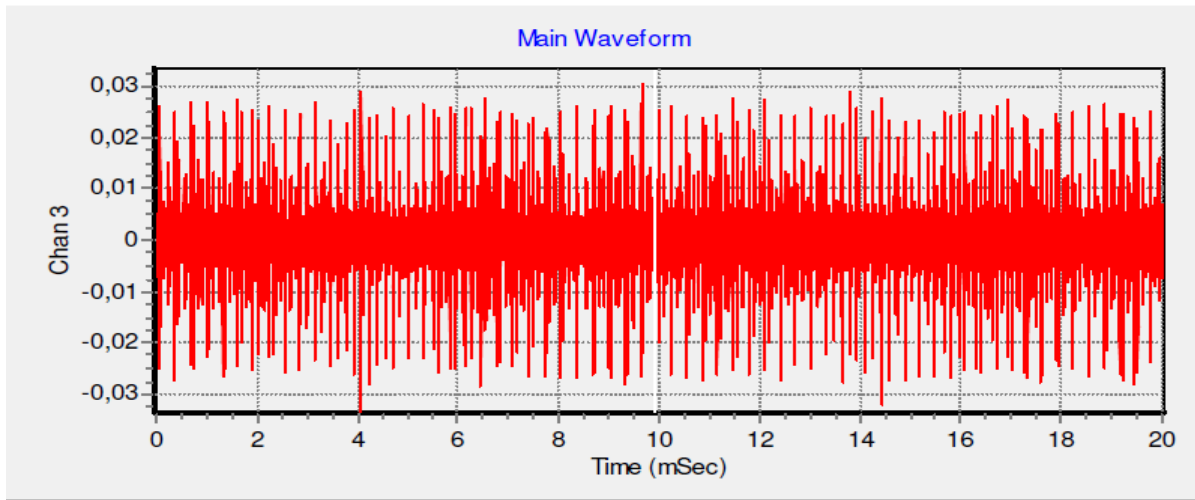


Figure 70: Partial discharge activity during a 50Hz power cycle (20ms)

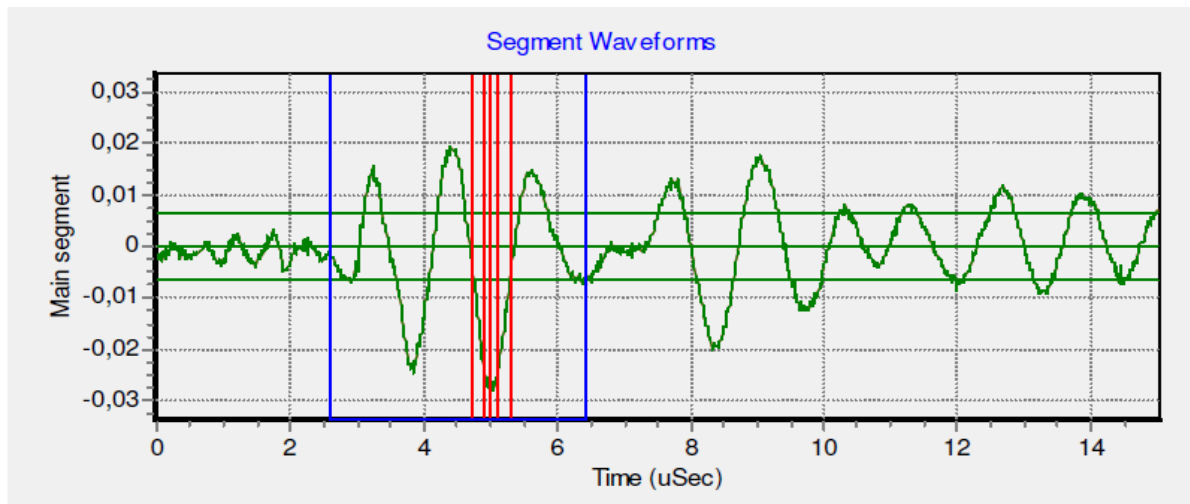


Figure 71: Form of one partial discharge pulse (14µs)

The output of the software is the following:

```

Description of PD pulse
Waveform length Time/sample Segment Number W/F Int Length
15.01 uSec 10.00 nSec 5 of 30 1501
Peak Value Cable pC size Local dB value Integer size Integer pos
-28.65 mV - -28653 500
Channel Time Index Phase in Cycle Pos in Parent Parent Size
3 4 116.29 Deg 645570 2000000
Risetime Falltime Pulse Wid (Sec) Pulse Wid Int Pulse Area
326.07 nSec 214.30 nSec 560.00 nSec 56 -10.92 nVSec
Event Width Freq of max ampl FFT length Freq (1st Mom) Event Integral
3.88 uSec 771.21 kHz 389 838.03 kHz -0.87 nVSec
Overall PD Type = Noise
    
```

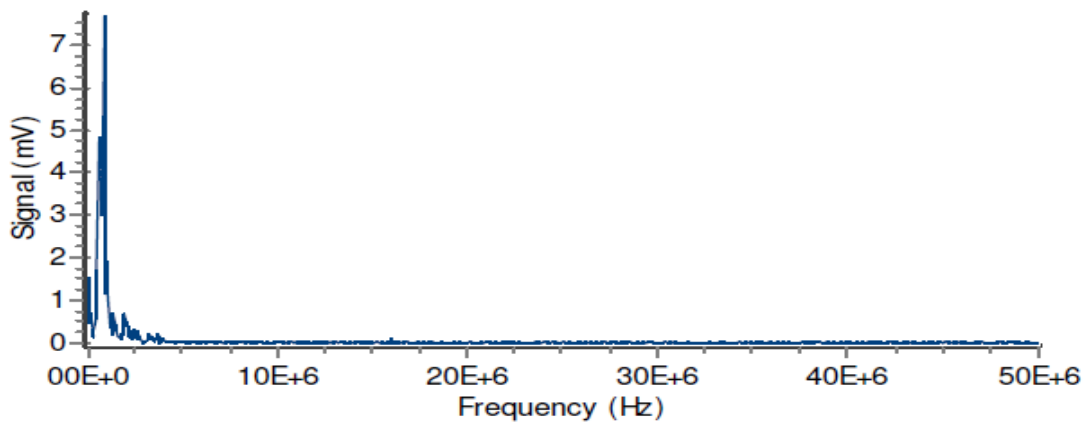


Figure 72: FFT plot of Signal (mV) – Frequency (Hz)

The result of the software and the posterior comparison with the standard waveforms categorises the signal from the sensors as noise.

EMD 217 BE 1A pH_R

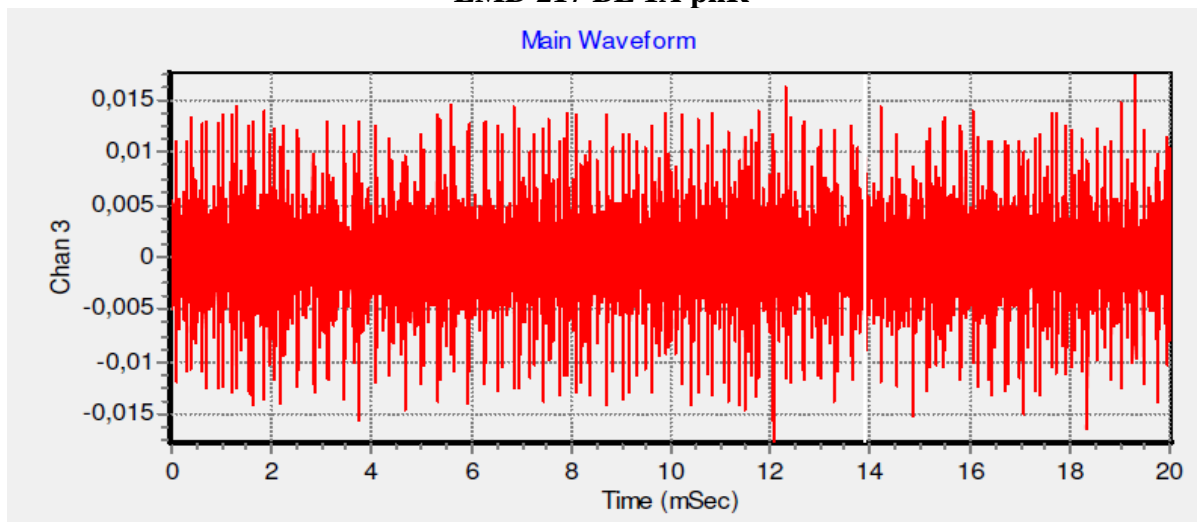


Figure 73: Partial discharge activity during a 50Hz power cycle (20ms)

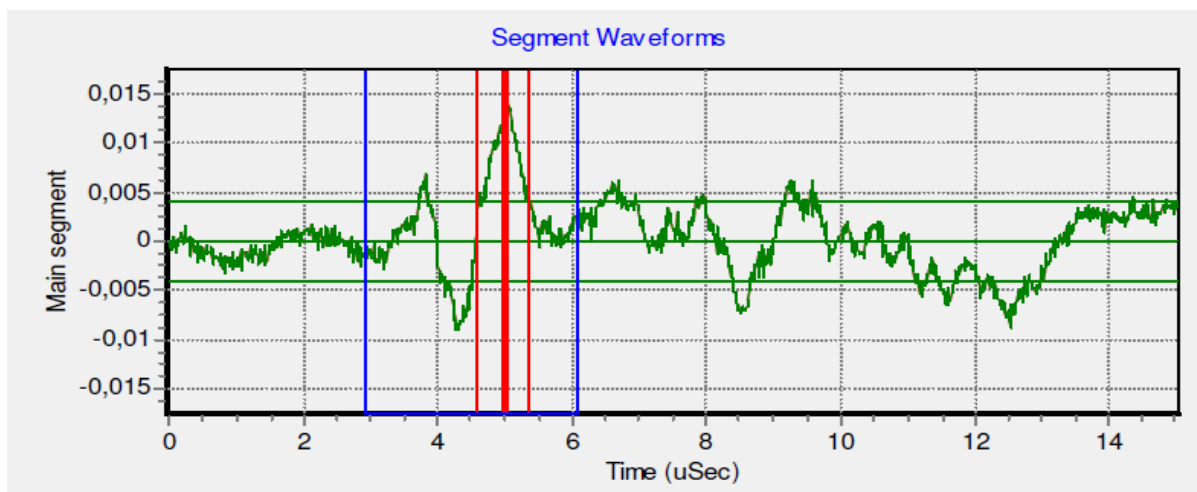


Figure 74: Form of one partial discharge pulse (14µs)

The output of the software is the following:

```

Description of PD pulse
Waveform length Time/sample Segment Number W/F Int Length
15.01 uSec 10.00 nSec 2 of 30 1501
Peak Value Cable pC size Local dB value Integer size Integer pos
17.47 mV 1.57 nC - 17474 500
Channel Time Index Phase in Cycle Pos in Parent Parent Size
3 14 347.80 Deg 1931698 2000000
Risetime Falltime Pulse Wid (Sec) Pulse Wid Int Pulse Area
385.25 nSec 150.31 nSec 600.00 nSec 60 6.60 nVSec
Event Width Freq of max ampl FFT length Freq (1st Mom) Event Integral
1.78 uSec 558.66 kHz 179 1.90 MHz 6.98 nVSec
Overall PD Type = Cable PD
    
```

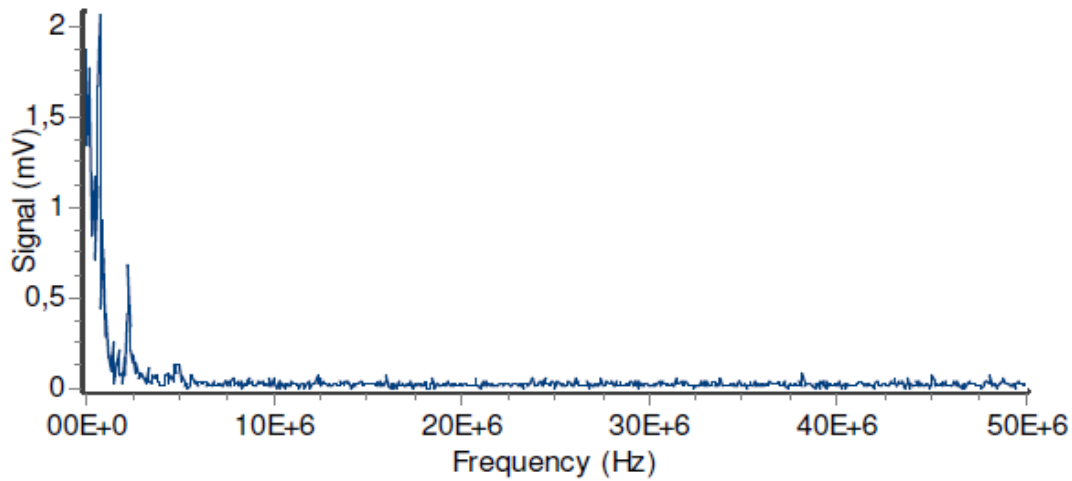


Figure 75: FFT plot of Signal (mV) – Frequency (Hz)

The result of the software and after comparison with the standard waveforms categorises the signal from the sensors as cable partial discharge activity. The first cable of the phase R of the feeder EMD217/BE shows signs of critical partial discharges.

The same analysis of the waveforms was performed to all the measured cables of the BE-BA4 power line and the results are also presented in the end of this document as an Annex.

From the figures above and the color code, it can be considered that EMD217/BE phase 1A shows signs of critical partial discharge activity during the second measurement without load and that the EMD217/BE Phase 1B shows signs of increased partial discharge activity.

Measurements from the BA4 substation and especially EMD302/A4 RST phases are also showing critical partial discharge activity. The cable is characterized as critical and according to the flowchart in figure 27 and the method that is applied to the CERN’s power distribution network for partial discharge diagnostics, offline measurements should be performed for a better characterization and for the localization of possible partial discharges.

The summary results of the measurements with the LPD monitor according to the color code are summarised in the table 11. The cubicles that are marked with black color could not be measured.

Table 11: Results of PD activity according to the color code, Part 1

Feeder name	Description	Number of measurements per cubicle	General Results
BE			
EMD112/BE	BOUCLE PULSEE BA2	3	
EMD113/BE	BOUCLE PULSEE BB3	6	
EMD116/BE	BPN EHT1	3	
EMD117/BE	BEQ3	1	
EMD120/BE	SMB1/BA1	3	
EMD121/BE	SMB7/BA1	3	
EMD122/BE	SMB2/BA2	3	
EMD123/BE	SMB12/BA2	3	
EMD124/BE	SMB3/BA3	3	
EMD125/BE	SMB11/BA3	3	
EMD126/BE	SQF/BA3	3	
EMD127/BE	SQD/BA4	3	
EMD203/BE	SMB5/BA5	3	
EMD204/BE	SMB9/BA5	3	
EMD205/BE	SM6/BA6	3	
EMD206/BE	SMB8/BA6	3	
EMD207/BE	SMB4/BA4	3	
EMD208/BE	SMB10/BA4	3	
EMD209/BE	SMB13/BA2	3	
EMD210/BE	SMB14/BA2	3	
EMD214/BE	SVC2	1	
EMD216/BE	BPN EHT2	3	
EMD217/BE	TI8	3	
EMD220/BE	RF BA3	6	
EMD221/BE	BOUCLE ZN BA80	9	
EMD222/BE	BOUCLE ZN BA81	9	

Table 11: Results of PD activity according to the color code, Part 2

EMD223/BE	MP2 S/ST68	3	
EMD314/BE	LIAISON BE-BE9	12	
EMD316/BE	BPN EHT3	3	
EMD317/BE	SVC1	9	
BE9			
EMD202/E9	BPN EHT7	1	
EMD203/E9	FILTRE BEF4	1	
EMD401/E9	LIAISON BE-BE9	12	
EMD402/E9	vers BA2	1	
EMD403/E9	vers BB3	1	
EMD405/E9	vers BA82	1	
EMD407/E9	EMT407/E9	3	
EMD404/E9	vers BA80	1	
EMD408/E9	vers ME9	1	
EMD409/E9	vers SE0	1	
EMD410/E9	vers Bat.867	1	
EMD411/E9	EMT411/BE	1	
EMD412/E9	vers SEM12 (MP7)	1	
EMD413/E9	vers ME9 (MP6)	6	
ME9			
EMD305*9	vers BE9 (MP6)	6	
BA82			
EMD215/A82	EMT215/A82		
BA4			
EMD302/A4	vers BE		
Pulsed loop	Vers BB3 and BA6		
		151	

Although table 11 gives a brief idea of the existence of partial discharges further evaluation is needed. When partial discharge activity is detected it is crucial to diagnose the severity in order to have a more detailed view of the danger that evolves. The color code is not sufficient so a further analysis was performed by SebaKMT experts starting from the acquired raw data. The summary of the results and the classification of each cable according to the waveforms analysis that is more accurate are presented in table 12.

Table 12: Results' summary

Good cables without signs of PD activity	Influence of heavy noise, no classification is possible**	Possible PD- All cables show signs of partial discharges.
EMD124/BE	EMD112/BE	EMD116/BE_2A_phR
EMD126/BE	EMD113/BE	EMD116/BE_2B_phS
EMD401/E9	EMD120/BE	EMD216/BE_2B_phS
EMD405/BE9	EMD121/BE	EMD216/BE_2C_phT
EMD407/BE9	EMD122/BE	EMD305*9_1A_phS
EMD409/BE9	EMD123/BE	EMD305*9_1B_phT
EMD413/E9	EMD202/E9	
EMD116/BE_2C_phT	EMD203/BE	
EMD125/BE_2B_phS	EMD205/BE	EMD217/BE_1A
EMD125/BE_2C_phT	EMD207_BE	EMD302/A4_RST
EMD206/BE_2B_phS	EMD214/BE	
EMD206/BE_2C_phT	EMD215/A82	
EMD314/BE_1D_phS	EMD220_BE	
EMD314/BE_1E_phT	EMD221/BE	
EMD314/BE_1F_phT	EMD222/BE	
EMD314/BE_2A_phR	EMD223_BE	
EMD314/BE_2B_phR	EMD316_BE	
EMD314/BE_2C_phS	EMD402/E9	
EMD314/BE_2D_phS	EMD410/BE9	
EMD314/BE_2E_phT	EMD411/BE9	
EMD314/BE_3A_phR	EMD412/BE9	
EMD314/BE_3C_phS	SPS_PULSED_LOOP_BA4	
EMD314/BE_3E_phT	EMD125/BE_2A_phR	
EMD314/BE_4D_phS	EMD127/BE_2A_phR	
EMD314/BE_4F_phT	EMD204/BE_2A_phR	
EMD404/BE9_3B_phS	EMD204/BE_2B_phS	
EMD404/BE9_3C_phT	EMD206/BE_2A_phR	
EMD404/BE9_3A_phR	EMD217_BE_1C_phT	
	EMD305*9_1C_phR	
	EMD305*9_2A_phS	
	EMD305*9_2B_phT	
	EMD305*9_2C_phR	
	EMD404/BE9_3D_phR	
	EMD404/BE9_3E_phS	
	EMD404/BE9_3F_phT	
	EMD208/BE	
	EMD203/BE9	
	EMD403/BE9	
	EMD117/BE	

**The SPS SMB's cables and SPS pulsed loop cables were affected by high frequency screen currents.

EMD217 and EMD302 feeders belong to BE-BA4 cable line.

According to the flowchart and the common procedure for predictive maintenance, the cables which were characterized as critical and show signs of partial discharges should be measured off load in order to localize weak points and gain additional information about the status of the insulation.

It should be underlined that many of the measurements with pulsed load were disturbed and not evaluable by the system in on load conditions. Based on the table 12, attention is drawn on the fact that most measurements were influenced by heavy noise and no classification was applicable because of the high frequency harmonics in the screen current. This is explained by the fact that the network that was measured was pulsing and the existence of high harmonics affected the signals collected through the sensors. This is why the harmonic analysis of the BE-BA4 cable line was urgent. Furthermore, the high screen current that affects the partial discharge measurements is also presented in chapter 10.2.2 and justifies the existence of heavy noise.

The LPD monitor is equipment that is currently evolving and is not designed to work under such special circumstances like CERN's pulsed network during operation. SebaKMT experts suggested either to measure energized but under no load conditions or to install filters to minimize the impulsive carrier frequency below 200 kHz. With such filters, the risk of missing part of the real partial discharge activity exists, so only the first solution can be applied to CERN's pulsed network and the measurements with LPD monitor can be performed only during technical stops.

Although this restriction leads to measure the pulsed network during technical stops the stable network can be measured and evaluated normally.

11. OFF LOAD PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS

11.1 OWTS system for off load measurements

Off load testing is generally used as a diagnostic technique for the commissioning tests of newly-installed cables. Moreover, in old cables it is used after disconnection of the system for a more detailed analysis of partial discharges existence and for the localization of possible faults or problems. As already explained, the combination of online and offline tests and the effectuation of offline in the most critical cables is the better method for prevention and predictive maintenance.

The proposed method for the offline partial discharge measurements in XLPE cables and the localization of the defects is the use of damped AC voltages. Specifically, by temporarily energizing the cable system with damped alternating voltage (DAC), information is given about the condition of the cable and its insulation.

The system that is used for the generation of damped AC voltages with duration of a few tens of cycles of AC voltage at frequencies between 50Hz and 500Hz is the OWTS (Oscillating Wave Test System). The circuit is charged with continuously increasing high voltage with a low current between the range of 10 mA to 30mA. Then it is discharged via an electronic high voltage solid state switch and an inductive coil. The system's function is based on a resonance circuit between the cable capacitance and the inductor and the procedure is characterized as non-destructive due to the small duration of the appliance of the AC voltage. The schematic diagram of the OWTS is shown in the figures 76 and 77. The unit consists of a high voltage generator, a coil, a divider, a switch, a partial discharge coupling capacitor and device and the partial discharge detector. The OWTS system is remotely controlled by a laptop. The test object which is the power cable, must be disconnected from the network and be earthed in its both terminations.

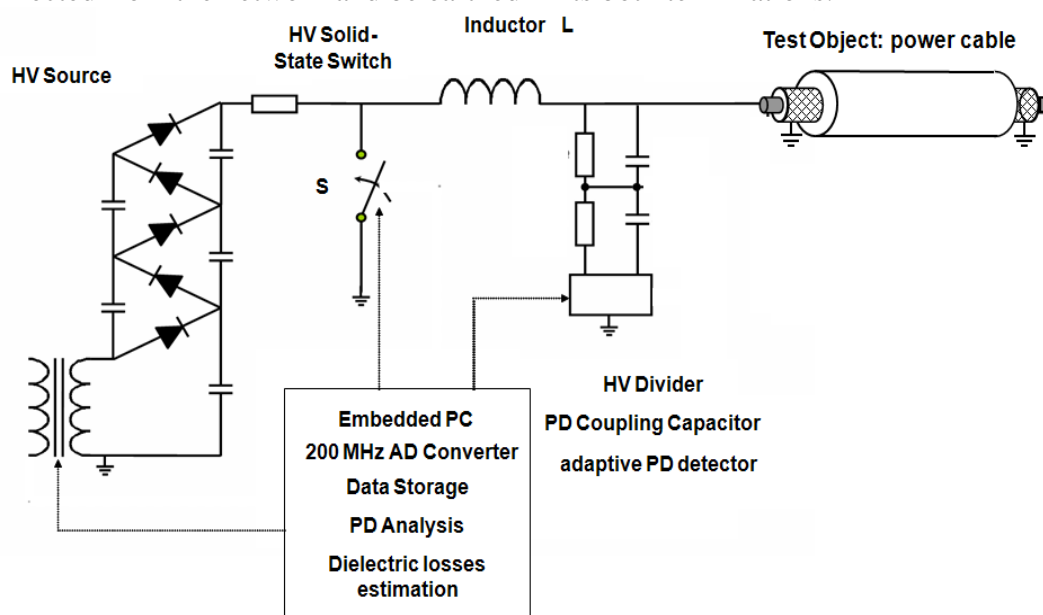


Figure 76: Schematic diagram of the OWTS system [Source: SebaKMT OWTS presentation]

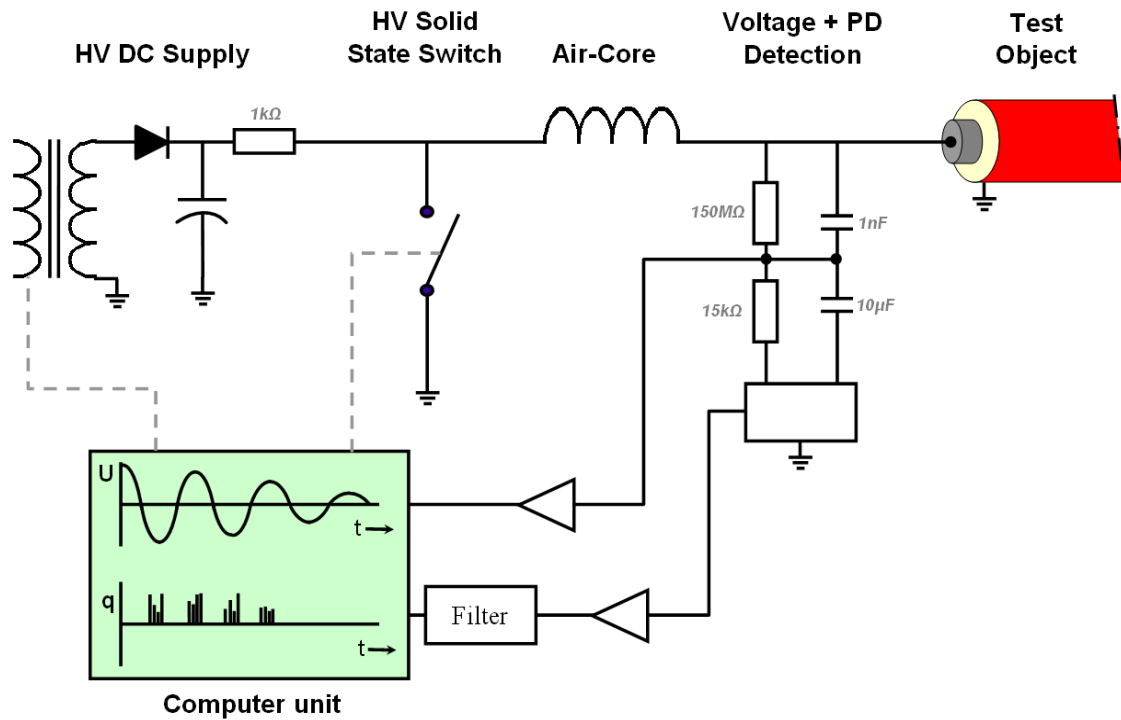


Figure 77: Schematic diagram of damped AC voltage generation and partial discharge diagnosis of power cables [Source: SebaKMT OWTS presentation]

More specifically, the high voltage solid state switch is used to establish a series resonance circuit between the air inductor and the high voltage power cable capacitance. The inductor unit consists of three in series connected air coils with a total inductance of 7.1 H. The inductor is air core type because the damping of the voltage waves should depend, as much as possible on the test object losses. The high voltage divider consists of two resistances of 150 MΩ and 15 kΩ and the partial discharge detection system of a coupling device of a 1 nF and a 10 μF capacitors [22].

The under test cable is charged within a few seconds by constantly increasing voltage up to the desired value. The period of the charging can be found by the equation:

$$t_{charge} = V_{max} \frac{C_{cable}}{I_{load}} \tag{9}$$

Then the high voltage solid state switch closes and consequently a resonance network has been created between the cable capacitance and the inductor of the OTWS system. As a result a slowly decaying AC voltage can be obtained. During the discharge, activity is measured since the decaying voltage amplitude corresponds to the dielectric losses and the data is stored in the computer for further analysis [18]. The frequency of the DAC voltage is depending on the cable capacitance and can be calculated according to the equation:

$$f_{DAC} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_{cable}}} \tag{10}$$

The simplified circuit that results after the switch closes is the coil in series with a resistance and a capacitor (figure 78) and the decreasing oscillating voltage wave that is applied to the under test sampling cable, after the moment that the switch is closing, is shown in figure 79.

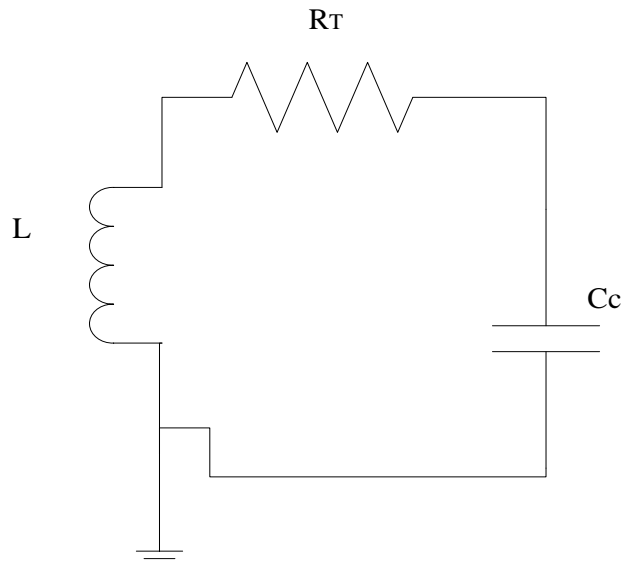


Figure 78: Resulting circuit after switch closes

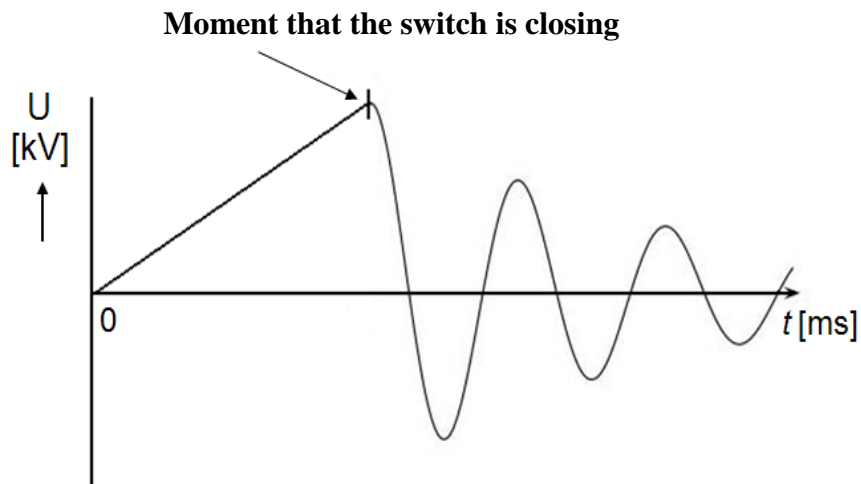


Figure 79: Resulting oscillating voltage of the OWTS

The OWTS equipment that was used for offline partial discharges measurements is produced by SebaKMT and gives information about the exact position of the defections, since it has also incorporated a time domain reflectometry system (TDR). The results give an analysis of the position of the joints proportionally to the cable length and of the existence of partial discharges along the cable. Obviously it is more possible to detect high partial discharge activity in the joints. The plots that are generated from the system afterwards, are actually the partial discharge mapping of the condition of the measured cable.

11.2 Time domain reflectometry

Time domain reflectometry or TDR is a measurement technique used to determine the characteristics of electrical lines by observing reflected waveforms. The TDR is the method that is used for the localization of the faults by timing the pulse arrivals at the cable terminations or joints and calculating the distance.

The classic model for a transmission line is shown in figure 80. The quantities R, L, G and C in that circuit, are defined per unit length. According to the filter theory the characteristic impedance of a repetitive circuit that consists of elements in series and in parallel is given by the equation:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \tag{11}$$

where Z is the series resistance per part and Y is the parallel input per part.

So, $Z = R + j\omega L$ (Ω/m) and $Y = G + j\omega C$ (Ω^{-1}/m)

Finally,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \tag{12}$$

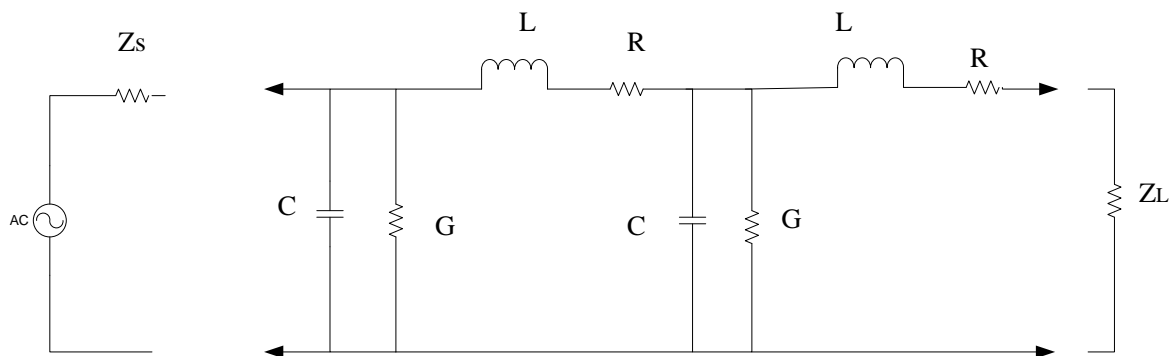


Figure 80: Transmission line circuit

A voltage generated in E_s will require some time to travel down the line. In general, the velocity of propagation for a transmission line is given by the equation:

$$v_p = \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{13}$$

where v_c is the speed of light and ϵ_r is the dielectric constant.

The ratio ρ is called the voltage reflection coefficient and is related to the transmission line impedance by the equation:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (14)$$

The voltage pulse of partial discharge activity will travel in two directions. The original pulse travels directly towards the near end and the other in the opposite direction at the velocity of propagation of the line. At the open cable end the pulse reflects and the first reflection of the original pulse travels in the direction of the measuring set [23]. If a defect exists in the line, part of the incident wave is reflected and that reflected voltage wave will appear on the oscilloscope. This reflected wave is added to the incident wave although they differ in time and that is the reason why the fault can be localized in the total length of the cable. The equation that gives that distance is:

$$D = v_\rho \cdot \frac{T}{2} \quad (15)$$

where v_ρ is the velocity of propagation and T is the transit time from monitoring point to the mismatch and back again, as measured on the oscilloscope. The noise of the measured signals is removed by using band pass or wavelet filtering.

According to this procedure and equations the OWTS system calculates the exact location of the faults in the under test cable and gives a graphical overview of the exact location of the partial discharges.

The flowchart of the procedure for the OWTS measurement is shown in figure 81. That procedure was followed during the offline partial discharge measurements campaign that took place on the 16th and 17th of December 2010 at CERN for the measurement of BE-BA4 cable line that was characterized as critical after the process of online measurements.

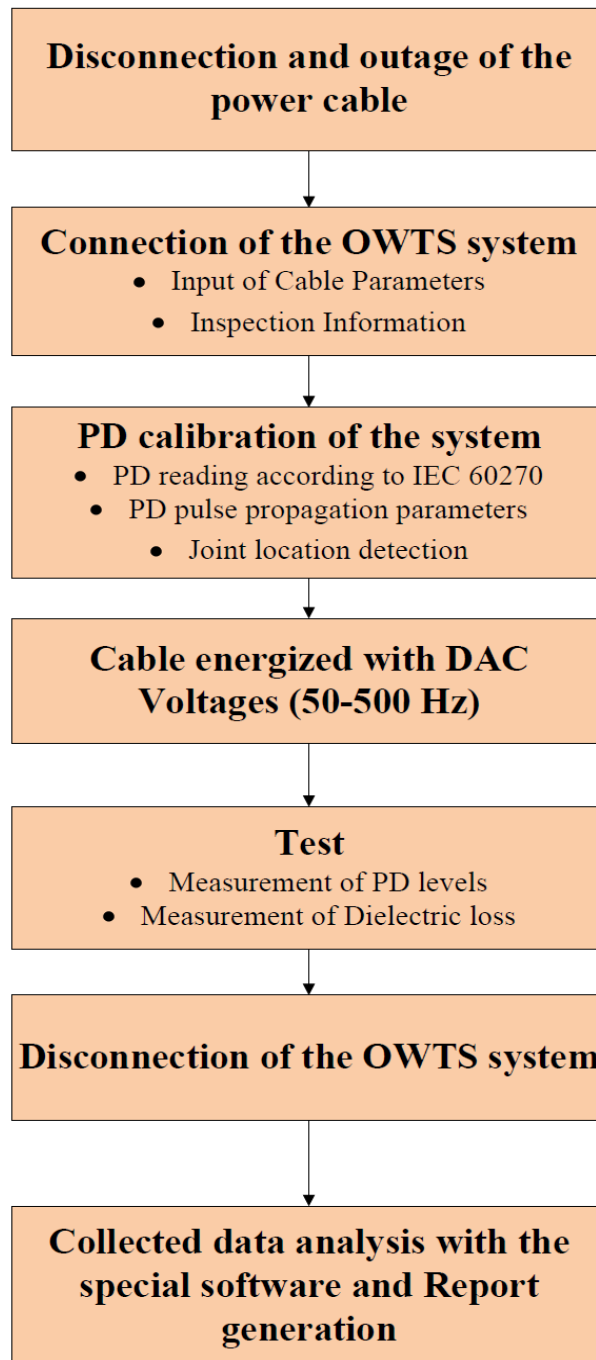


Figure 81: Procedure for the OWTS test

11.3 OWTS measurements in BE-BA4 cable line

11.3.1 Test Object characteristics

The OWTS system while measuring the BE-BA4 cable line in the BE substation is shown in figure 82.



Figure 82: OWTS system while measuring in BE substation the EMD217/BE feeder

The details of the BE-BA4 cable that was measured on the 16.12.2010 for partial discharge activity are shown in the table 13.

Table 13: BE-BA4 cable line

Cable	BE-BA4
	EMD 217/BE
BE	air insulated
BA4	air insulated
Date	2005
Length	1650 m
Phase to ground voltage	11.60 kV (RMS)
Date of measurements	16.12.2010 10:54 am

11.3.2 Calibration

The calibration according to IEC60270 is the second step for the OWTS after the definition of the test object and the input of the characteristics of the measured cable as shown in table 13.

For the calibration of the OWTS system, the values of the partial discharge reading and of the partial discharge pulse propagation velocity should be adjusted and fixed. In that procedure, the location of the joints and also the length of the measured cable can be identified and specified. In XLPE cables, the partial discharge calibration values are from 100 pC to 5000 pC. An example of the plots that are generated after the calibration of the system is shown in the figures 83 and 84 and the same procedure is repeated for all the necessary calibration values.

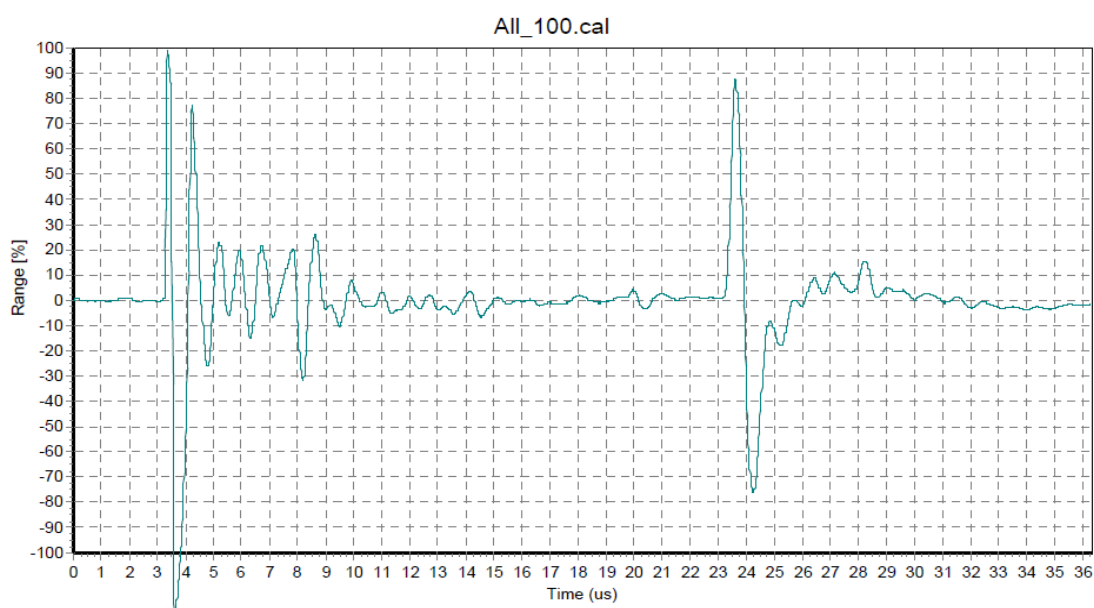


Figure 83: Automatic signal calibration with OWTS system

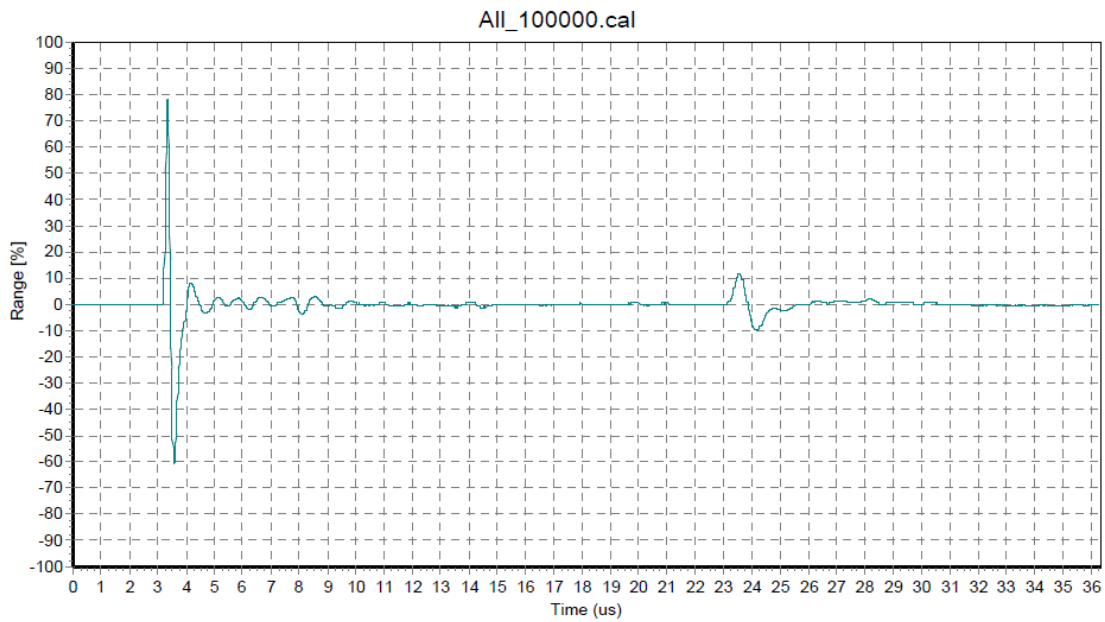


Figure 84: Automatic signal calibration with OWTS system

From the calibration process and the generated plots the reflected pulses observation can give and estimation of the location of the joints.

The position of the three joints as estimated from the OWTS system for the three phases is summarised in the next table. The length of the cable was found around 1650 m.

Table 14: Position of the joints in the cable length as estimated from the OWTS system

Distance	Location
0 m	Termination
	Cablepart 429 m
429 m	Joint
	Cablepart 447 m
876 m	Joint
	Cablepart 478 m
1354 m	Joint
	Cablepart 296 m
1650 m	Termination

TDR method scans the file of pulses to detect discharge pulses and the software automatically selects the one with the largest amplitude. The TDR peak match algorithm is searching the signal for a reflection that matches the original pulse.

As seen in the next figures with the partial discharge pulses in the time domain, the original pulse and its reflection are colored red. The time values that correspond to the physical cable dimensions are colored green and the blue marker is put in the top of the pulse.



Figure 85: Phase L2(S) at 21 kV pulse with TDR method

As observed in this plot of the phase S after a 21 kV pulse, the absolute value of the amplitude of the original pulse is at 5231 pC and the location of the fault is found at 1373 m. To separate the noise signal a digital bandpass filter was used.



Figure 86: Phase L3(T) at 23 kV pulse with TDR method

In this example of phase T, after the application of a 23 kV pulse, the absolute value of the amplitude of the original pulse is at 2089 pC and the location of the fault is found at 746.4 m. To separate the noise signal a digital bandpass filter was again used.

11.3.3 Test Results 1

In the following table a more detailed analysis for the three phases of the ground noise, the partial discharge inception voltage (PDIV) and the partial discharge extinction voltage (PDEV) and also of the capacitance and of the dielectric losses is given. The PDIV is determined by a stepwise or continuous increase of the applied voltage. That voltage is usually influenced by the existing ground noise and by the system's sensitivity. The PDEV value is important to understand the risk factor because the partial discharge activity is often extinguished below the inception voltage.

Table 15: Measurements of PD values for each phase

	L1	L2	L3
Ground Noise (pC)	932	994	1012
PDIV (kV) RMS	13.9	11.6	15.1
PDEV (kV) RMS	14.1	11.8	14.3
PDmax (pC) (PDIV)	4248	2197	3967
PDlevel (pC) (PDIV)	1901	1325	1799
PDmax (pC) (Vo)	1130	2197	1171
PDlevel (pC) (Vo)	1032	1325	972
PDmax (pC) (1.3*Vo)	4248	12027	3967
PDlevel (pC) (1.3*Vo)	2140	4175	1799
PDmax (pC) (1.7*Vo)	11259	9129	6998
PDlevel (pC) (1.7*Vo)	7846	6591	4173
Capacitance (uF)	0.586	0.585	0.586
Frequency (Hz)	239.05	239.24	239.05
Diel. Losses	0.20%	0.20%	0.20%

It should be noted that the dielectric losses values are not accurate for XLPE cables when they are measured with the OWTS system and that other more precise methods like $\tan\delta$ can be used.

For the testing procedure and the measurements, the system is charged with the damped alternating voltage (DAC), an oscillating switching impulse voltage (OSI) of quite low damping and a frequency in the range of 20Hz up to 400Hz. In the following figures the DAC voltage and the partial discharge activity in a time scale of 32 ms are plotted. These plots are representative of the thirty tests that were effectuated in the three phases.

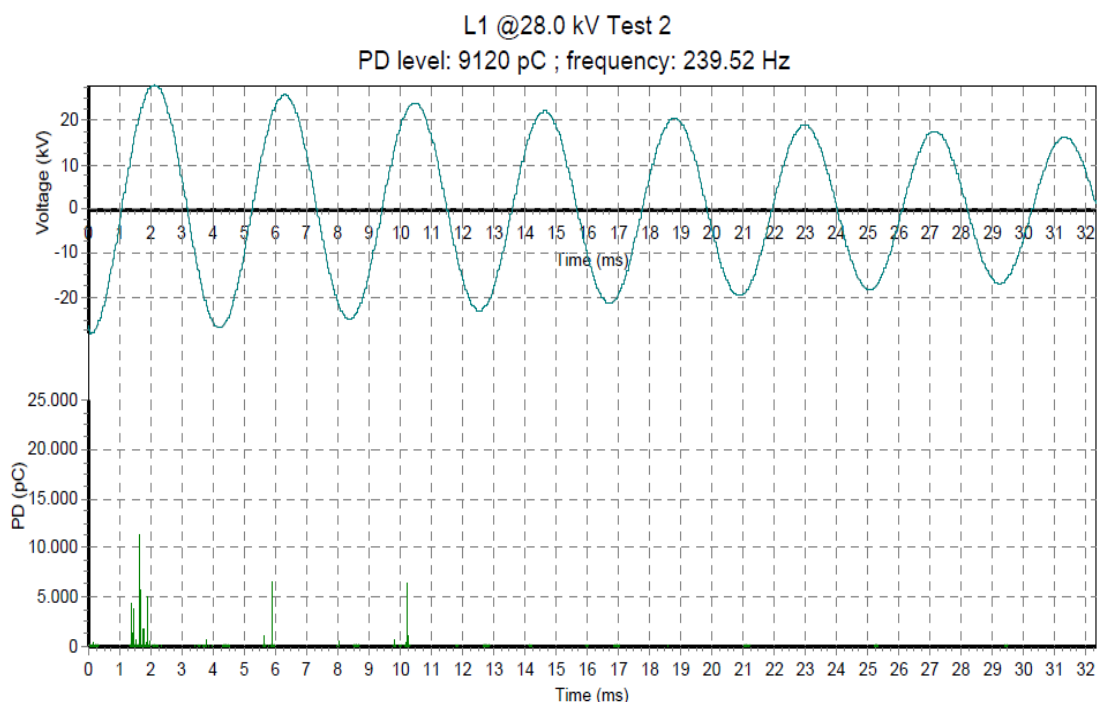


Figure 87: Full DAC voltage wave and the observed partial discharge pulses in the time scale for phase R at 28 kV

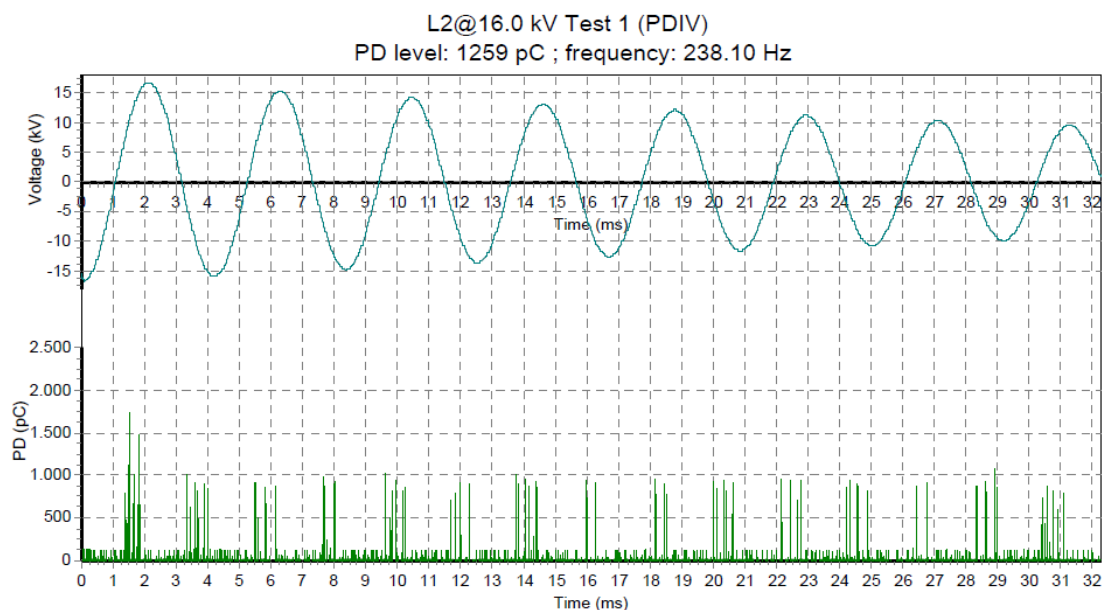


Figure 88: Full DAC voltage wave and the observed partial discharge pulses in the time scale for phase S at 16 kV

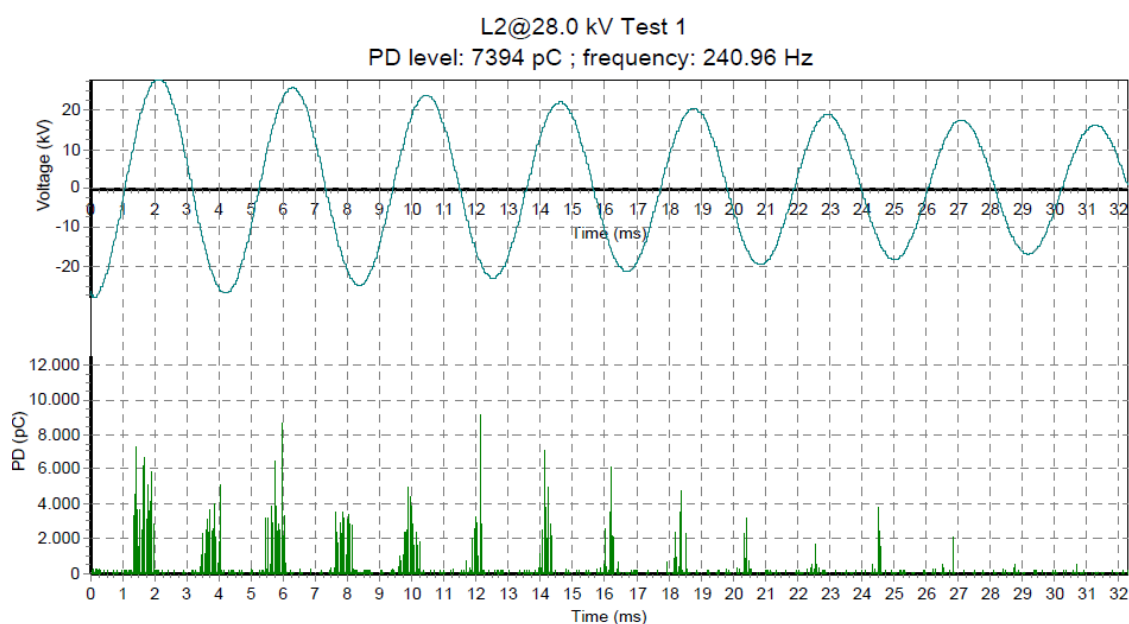


Figure 89: Full DAC voltage wave and the observed PD pulses in the time scale for phase S at 28 kV

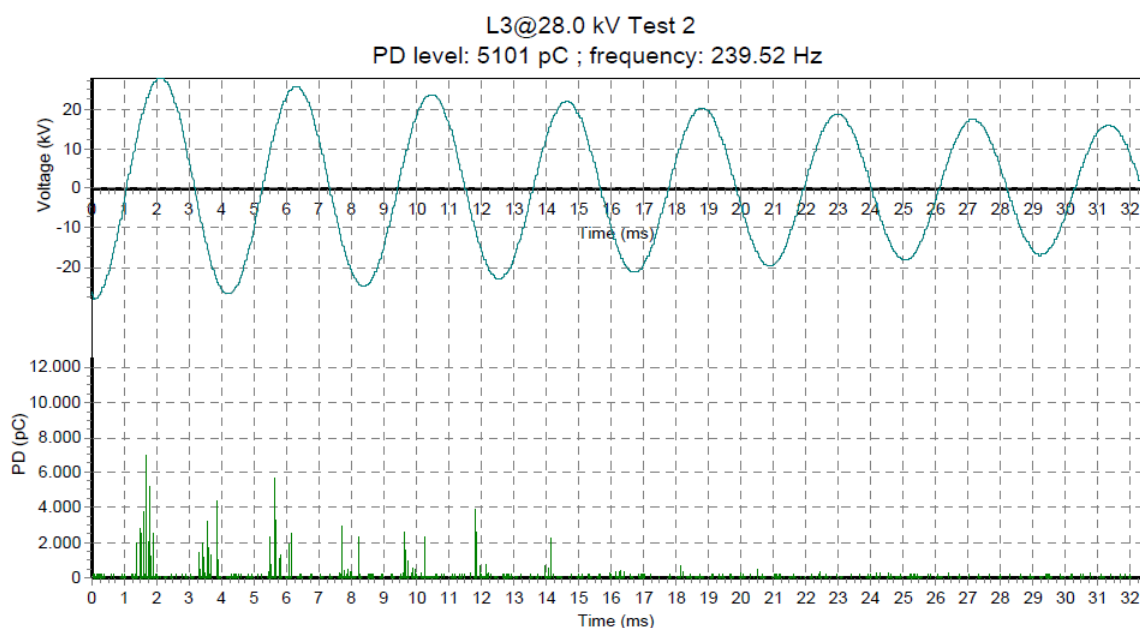


Figure 90: Full DAC voltage wave and the observed partial discharge pulses in the time scale for phase T at 28 kV

In figures 91, 92 and 93 the plot of location (m)-partial discharge activity (pC) is shown for $1.7 \cdot V_0$, $1.3 \cdot V_0$ and for V_0 that is the nominal voltage. It is a map of the location and of the amount of discharges. Specifically, the exact position of the defects or faults in the three joints for the three phases can be recognised with the different colours.

In the plot of figure 91, the second phase S in the third joint at 1354 m seems to have high partial discharge activity that increases up to 6000 pC. In the third phase T, partial

discharges seem to be present in all the joints and especially in the first and second at 429 m and 876 m respectively with visible partial discharge level up to 6500 pC, although the other phases do not have increased partial discharge activity. The phase R partial discharge activity is marked with red, the phase S with yellow and the phase T with blue color.

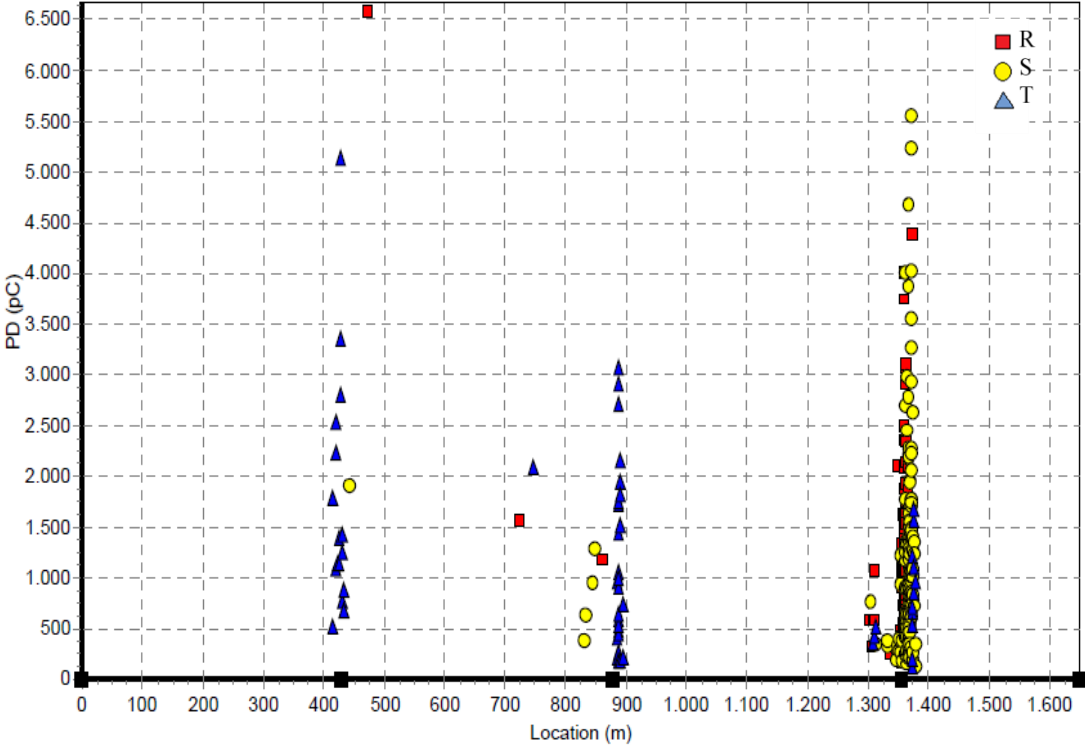


Figure 91: Partial discharge mapping for the three phases at 1.7*Vo and position of the faults

As the applied voltage is decreasing the amount of partial discharge activity also seems to decrease. In figure 92, for 1.3*Vo the partial discharge activity is localised only in the joint areas at 1354 m.

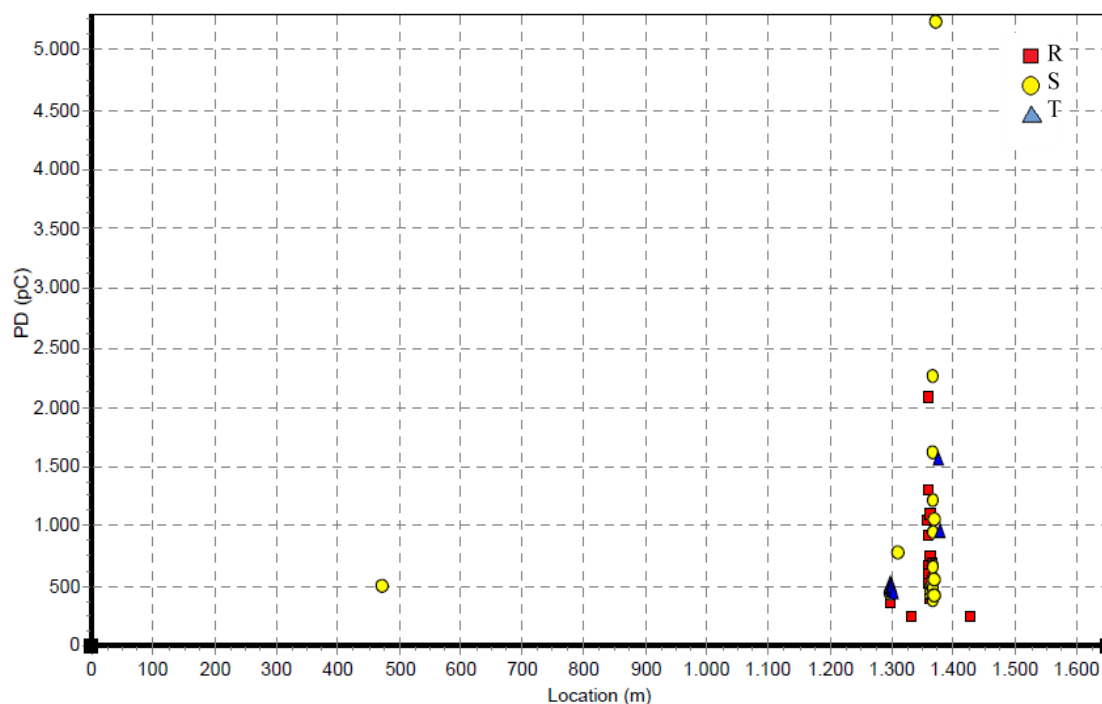


Figure 92: Partial discharge mapping for the three phases at $1.3 \cdot V_0$.

Finally, at the nominal voltage V_0 , the OWTS mapping that is plotted in figure 93 shows only, in the third joint areas at 1354 m concentrated partial discharge activity levels up to 600 pC. That means that the partial discharge levels that were shown in the figure 91 in the other joint areas are possibly reflections of the third joint.

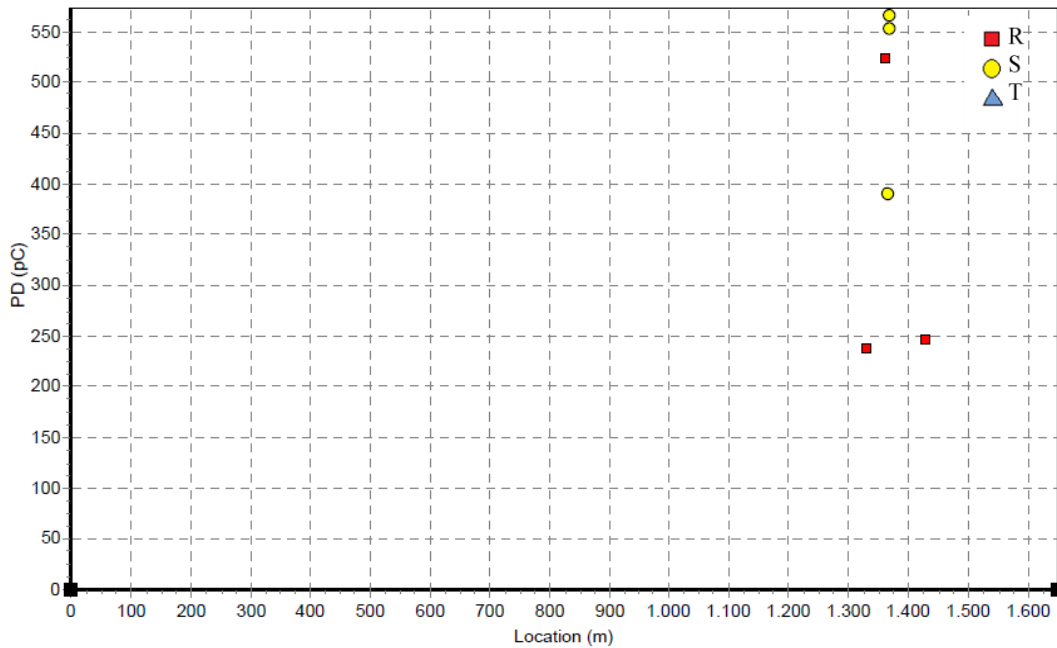


Figure 93: Partial discharge mapping for the three phases at nominal voltage or less

The cable line BE-BA4 is classified as line at high risk of failure because after the OWTS measurements partial discharge activity was found to integrate across the line. Partial discharge signs were detected on the cable in all the three joint areas. Especially the joints that exist at 1354 m, measured from BE substation should be urgently investigated.

SebaKMT recommends to preventively replace the joints before June 2011. The existence of additional faults in the length of the cable is also possible, but it cannot be evaluated until the replacement of the problematic high risk joints at 1354 m. Because there is the possibility that the other problematic areas are just reflections, so off load re-measurements are urgently required after the repair.

The BE-BA4 joints have been replaced. New off load measurements are planned during the next technical stop, so as to justify the replacement and confirm the overall status of the BE-BA4 cable line.

11.3.4 Test Results 2

The BE-BA4 cable line was re-measured as it was programmed on the 31st of March 2011. According to the predictive and the preventive maintenance partial discharges plan, this cable line should be measured again for the justification of possible existing problems after the replacement of the joints at 1354 m.

The same procedure is repeated, so after the calibration, the TDR method searches the file of pulses to detect discharge pulses and the software automatically selects the one with the largest amplitude. The TDR peak match algorithm is searching the signal for a reflection that matches the original pulse. Two examples are given in the figures 94 and 95.



Figure 94: Phase L3(T) at 25 kV pulse with TDR method

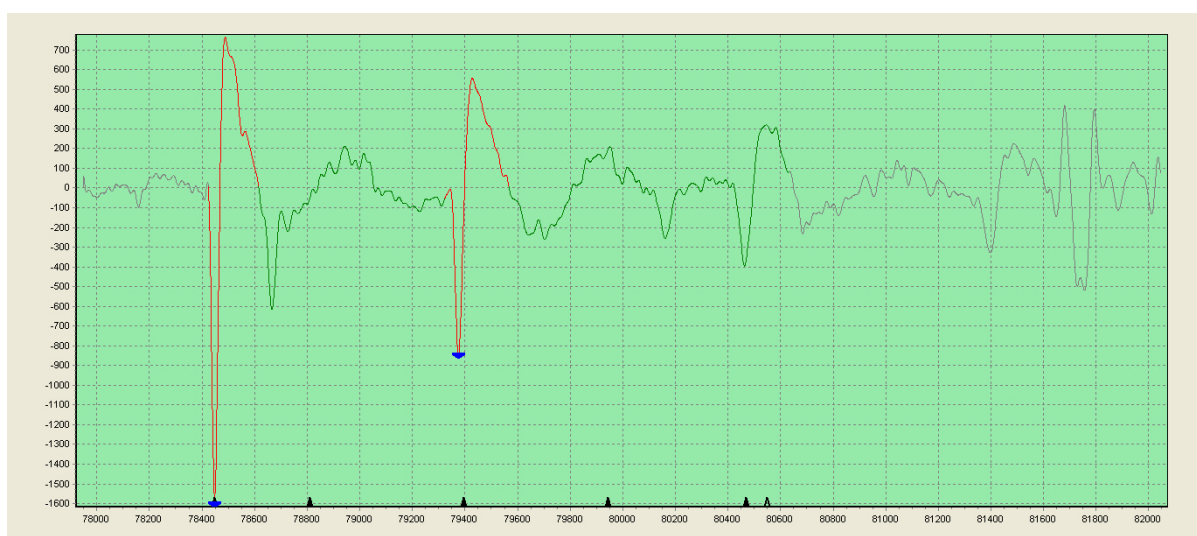


Figure 95: Phase L3(T) at 28 kV pulse with TDR method

The result values of the OWTS method are summarized in the table 16. The maximum values of partial discharge activity for the nominal voltage and for $1.7 \cdot V_0$ are presented.

Table 16: Measurements of PD values for each phase

	L1	L2	L3
Ground Noise (pC)	1152	1074	1013
PDIV (kV) RMS	-	-	-
PDEV (kV) RMS	-	-	-
PDmax (pC) (PDIV)	-	-	-
PDlevel (pC) (PDIV)	-	-	-
PDmax (pC) (V_0)	1097	2323	1040
PDlevel (pC) (V_0)	1086	1063	1026
PDmax (pC) ($1.7 \cdot V_0$)	1873	2143	14562
PDlevel (pC) ($1.7 \cdot V_0$)	1314	1440	9307
PDmax (pC) ($2 \cdot V_0$)	-	-	-
PDlevel (pC) ($2 \cdot V_0$)	-	-	-
Capacitance (uF)	0.588	0.581	0.584
Frequency (Hz)	238.10	239.52	238.81
Diel. Losses	0.20%	0.20%	0.20%

In the figure 96, the plot of location (m) and partial discharge activity (pC) is presented for $1.7 \cdot V_0$. It can be seen, that comparing to the figure 91 that is before the replacement of the problematic joints, after the replacement the partial discharges have disappeared. There are also some signs of partial discharge activity in the joint areas of phase T at 425 m and 890 m.

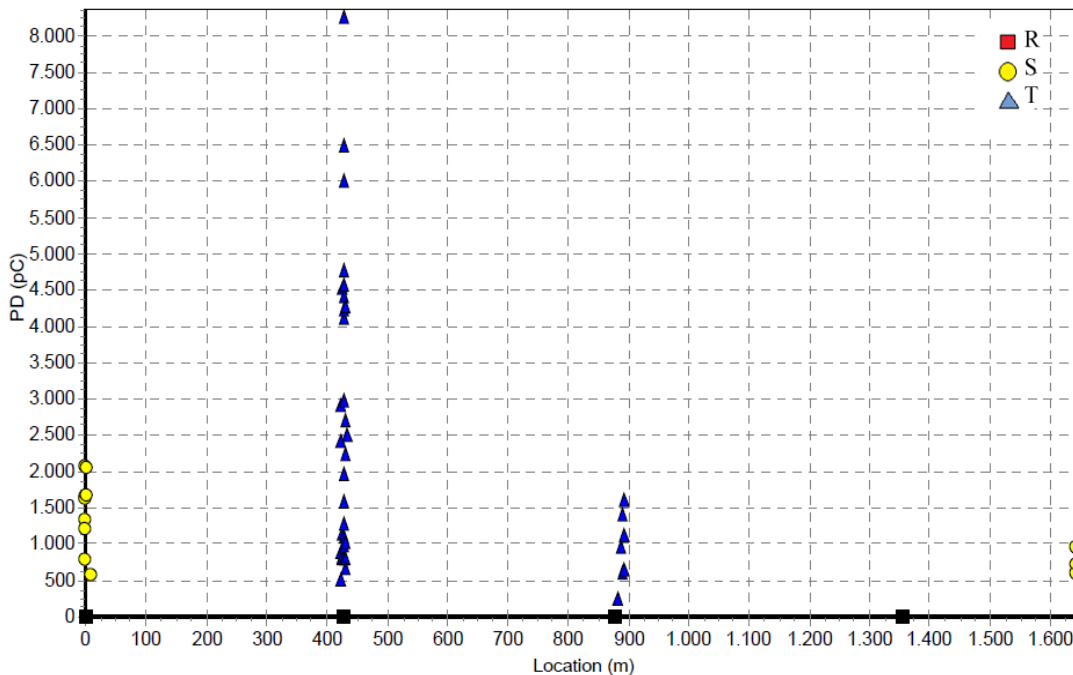


Figure 96: Partial discharge mapping for the three phases at $1.7 \cdot V_0$.

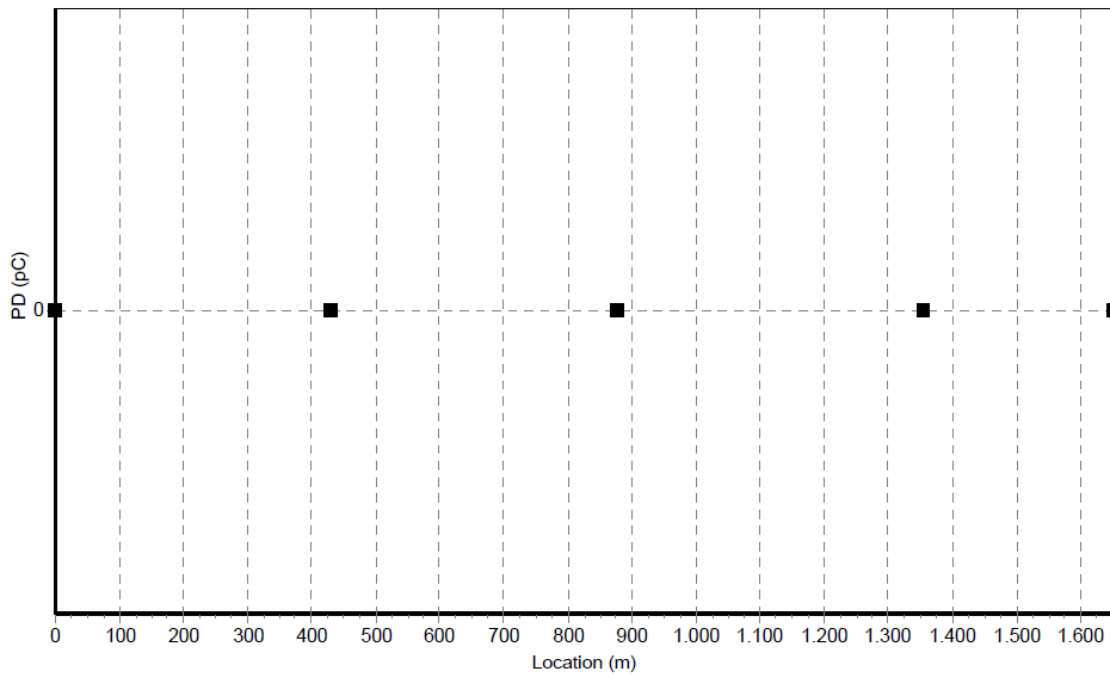


Figure 97: Partial discharge mapping for the three phases at nominal voltage or less

The recommendation from SebaKMT is to perform re-measurements after 2 or 3 years, so as to estimate the condition of the joints. Since the inception voltage is above the nominal there is no direct danger for the cable line.

CONCLUSIONS

Partial discharges are thought to be one of the major reasons for electrical insulation failure.

Predictive maintenance is required in order to assess the condition of the insulating system.

For partial discharge measurements in CERN's power distribution network, both on load and off load methods were used.

The most detailed measurements of partial discharges were performed in the BE-BA4 cable line. It was, firstly, characterized with on load measurements as line in high risk of failure because of critical partial discharge activity.

The off load measurements confirmed the existence of partial discharges in the three joint areas, especially in the third joint areas as seen for BE substation. For preventive maintenance reasons, all joints of that area were replaced.

The new off load measurements proved that in the third joint area, after the replacement there are no signs of partial discharge activity.

A general plan for diagnostics in CERN power cables has been defined (figure 27) after the success of the first measurements campaign for partial discharges activity in selected cables.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκαν μέθοδοι μη-καταστροφικού διαγνωστικού ελέγχου για ανίχνευση σφαλμάτων στη μέση και στην υψηλή τάση.

Στο πρώτο μέρος, στους υποσταθμούς υψηλής τάσης της Δ.Ε.Η. ανιχνεύτηκαν αρκετά θερμά σημεία που ανάλογα με τη θερμοκρασία τους τέθηκαν σε μια σειρά προτεραιοτήτων για διορθωτικές ενέργειες. Τα περισσότερα θερμά σημεία εντοπίστηκαν στις στατικές επαφές των αποζευκτών του δικτύου, λόγω χαλάρωσης των επαφών και επικαθίσεων.

Αυτός ακριβώς είναι και ο σκοπός των διαγνωστικών και προληπτικών ελέγχων, η ανίχνευση κάποιας ένδειξης για μελλοντικό σφάλμα και η επιδιόρθωση, πριν το σφάλμα συμβεί και διακοπεί η λειτουργία του δικτύου. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι επιτυγχάνεται ο ρόλος της προληπτικής συντήρησης, όταν μετά την ανίχνευση του πιθανού σημείου σφάλματος το αποτρέψουμε.

Ειδικά η υπέρυθρη θερμογραφία αποδείχτηκε πολύ χρήσιμη μέθοδος, από τη στιγμή που οι μετρήσεις γίνονταν ενώ το δίκτυο ήταν σε λειτουργία και εξ αποστάσεως, χωρίς να υπάρξει κάποια διακοπή ή και κίνδυνος για το προσωπικό. Η μόνη ένδειξη για την ύπαρξη σφάλματος στη θερμογραφία, είναι η θερμοκρασία, που αποτελεί άριστο δείκτη της κατάστασης του ηλεκτρικού εξοπλισμού.

Στο δεύτερο μέρος, στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας του CERN μελετήθηκαν τα καλώδια μέσης τάσης των 18 kV για ύπαρξη μερικών εκκενώσεων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνικές μέτρησης, αρχικά ο εξοπλισμός On-line LPD monitor ο οποίος ανιχνεύει μερικές εκκενώσεις ενώ το δίκτυο είναι σε λειτουργία και στη συνέχεια σε επιλεγμένα καλώδια, στα οποία ανιχνεύτηκαν μερικές εκκενώσεις ο εξοπλισμός OWTS για την εύρεση του ακριβούς σημείου ύπαρξης σφάλματος σε όλο το μήκος του καλωδίου.

Από τα 150 καλώδια που μετρήθηκαν, έμφαση δόθηκε στη γραμμή που συνδέει τους υποσταθμούς BE και BE9, η οποία κρίθηκε γραμμή μεγάλης επικινδυνότητας για αποτυχία. Στη γραμμή αυτή πραγματοποιήθηκαν και οι μετρήσεις χωρίς φορτίο με τον εξοπλισμό OWTS και εφαρμόστηκε η μέθοδος time domain reflectometry.

Παρατηρήθηκε, ότι οι περισσότερες μερικές εκκενώσεις εμφανίζονταν στις περιοχές όπου υπήρχαν σύνδεσμοι (joints) μεταξύ των καλωδίων. Οι προβληματικοί αυτοί σύνδεσμοι αντικαταστάθηκαν στα πλαίσια της προληπτικής συντήρησης και οι μετρήσεις χωρίς φορτίο επαναλήφθηκαν. Μετά τις νέες μετρήσεις, παρατηρήθηκε ότι οι μερικές εκκενώσεις σε όλο το μήκος του καλωδίου ελαχιστοποιήθηκαν.

Σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε κατά τη διαδικασία των μετρήσεων με το LPD monitor υπό φορτίο, είναι ότι η ύπαρξη υψηλών αρμονικών λόγω της ιδιαίτερης δομής του δικτύου του CERN (pulsed network) επηρέαζε τους αισθητήρες, οι οποίοι αντί για μερικές εκκενώσεις μετρούσαν υψηλό θόρυβο. Σαν λύση προτάθηκε η εγκατάσταση φίλτρων πριν τις μετρήσεις, ή οι μετρήσεις μερικών εκκενώσεων χωρίς φορτίο.

Συμπερασματικά, μετά τα αποτελέσματα των πρώτων μετρήσεων για μερικές εκκενώσεις στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης, ένα γενικότερο σχέδιο για προληπτικές μετρήσεις και διαγνωστικούς ελέγχους σχεδιάστηκε για όλο το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας του CERN.

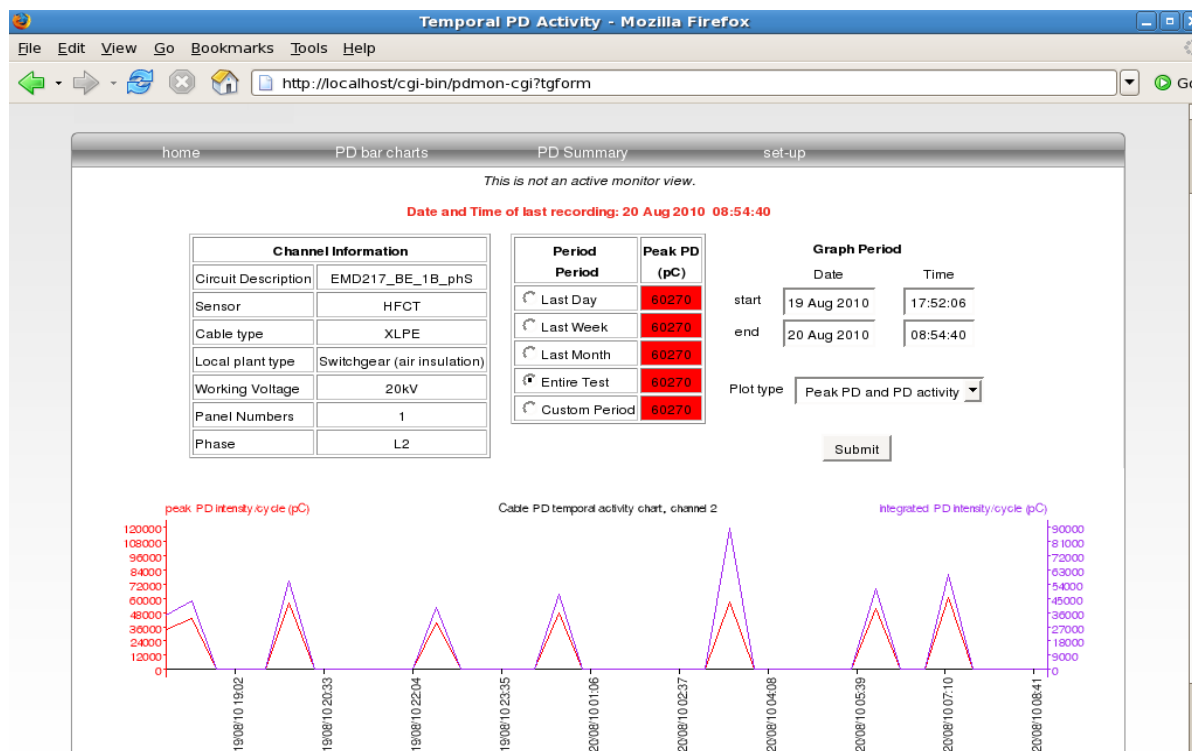
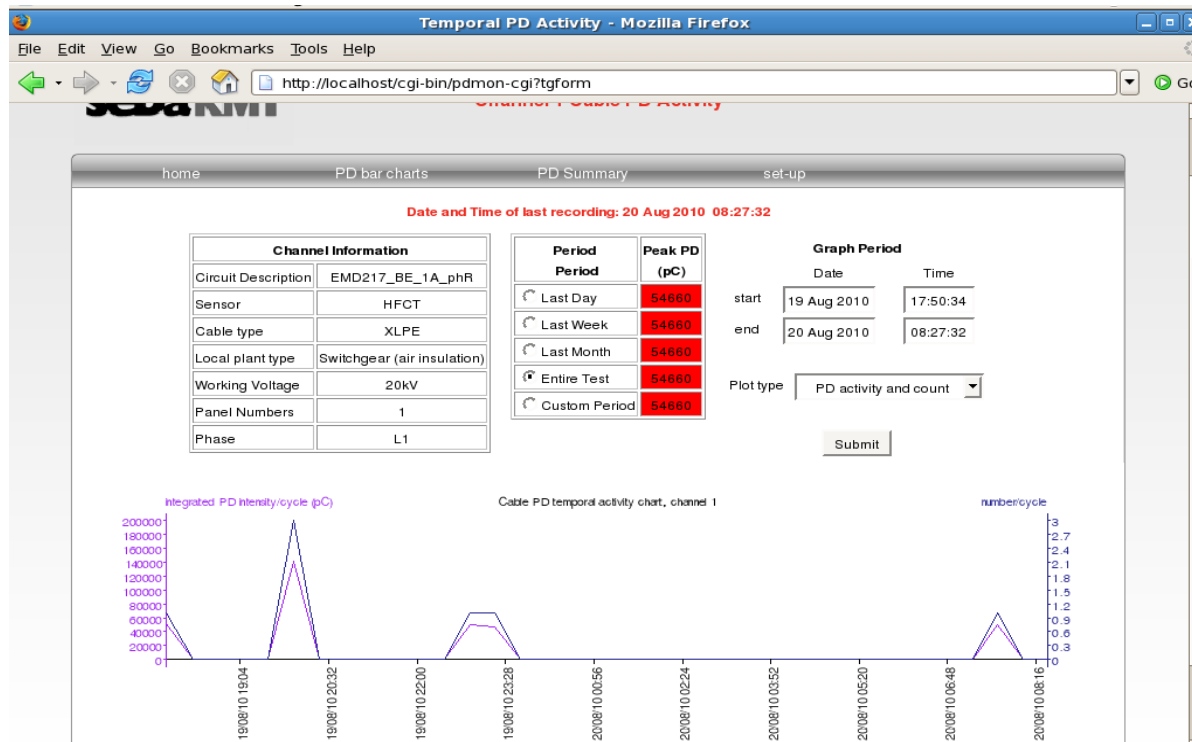
Επομένως, η σημασία των διαγνωστικών ελέγχων και της προληπτικής συντήρησης ηλεκτρολογικού εξοπλισμού πριν την εμφάνιση σφαλμάτων ή την καταστροφή, επιβεβαιώθηκε.

REFERENCES

- [1] Fundamentals of Partial Discharge in the Context of Field Cable Testing, Steven Boggs- John Densley
- [2] Complex behaviour of a simple partial-discharge model, H. Suzuki - K. Aihara - T. Okamoto
- [3] A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach, C Heitz
- [4] Dielectric phenomena in solids, Kwan Chi Kao
- [5] Partial Discharge Theory and Technologies Related to Medium Voltage Electrical Equipment, G.Paoletti, A.Golubev
- [6] Degradation of Solid Dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now, Peter Morshuis
- [7] J. P. Steiner, "Partial discharge. IV. Commercial PD testing," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 7, pp. 20, 1991.
- [8] S. A. Boggs, "Partial discharge. II. Detection sensitivity," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 6, pp. 35, 1990.
- [9] Technical developments and practical experience in large scale introduction of on-line PD diagnosis, P.A.A.F. Wouters, S. Mousavi Gargari, P. Wagenaars, I.J. Tigchelaar, B.H.M.M. Simons, P.C.J.M. van der Wielen, E.F. Steennis
- [10] Analysis of Water Trees in Power Cable Polymeric Insulation, M. Shuvalov, M. Mavrin, V. Ovsienko, A. Romanskin
- [11] A New Method to Predict the Electrical Tree Growth in Solid Insulation, A. El-Zein, M. Talaat and M. M. El Bahy
- [12] Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona, R.J. Van Brunt
- [13] On-line and Off-line Partial Discharge Testing of MV and HV cables, HVPD Ltd, Manchester UK
- [14] Partial Discharge Analysis, Ultrasonic Techniques to Evaluate Partial Discharge in Electrical Machinery
- [15] SebaKMT, LPD monitor Datasheet and Presentation
- [16] On-line PD Testing- Now a Field Reality, L. Renforth & M. Seltzer-Grant, R. Mackinlay
- [17] SebaKMT Diagnostic Report at CERN from BE to BA4, Retzlaff Barbara
- [18] Advanced Solution for On-site Diagnosis of Distribution Power Cables, Hein Putter, Frank Petzold, Hubert Schlapp, Edward Gulski, Paul P. Seitz, Ben Quak
- [19] Description of the CERN Electrical Network, EDMS No.559013
- [20] SebaKMT's user manual tan δ
- [21] IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems
- [22] Novel Method for On-site Testing and Diagnosis of Transmission Cables up to 250
- [23] Operating Manual OWTS Explorer Version 4, SebaKMT
- [24] Measurements of Partial Discharges and Power Losses in PET Films in High Voltage AC Fields. Konstantinos Theodosiou, Dimosthenis P. Agoris, Ioannis Gialas, Isidoros Vitellas
- [25] Description of the CERN Electrical Network, EDMS No 559013, G Gumer
- [26] Current Measurements in 18 kV, EDMS No. 1137511 v.1, E.Voulgari

ANNEX

The screenshots of the SebaKMT monitor for BE-BA4 cable line are:



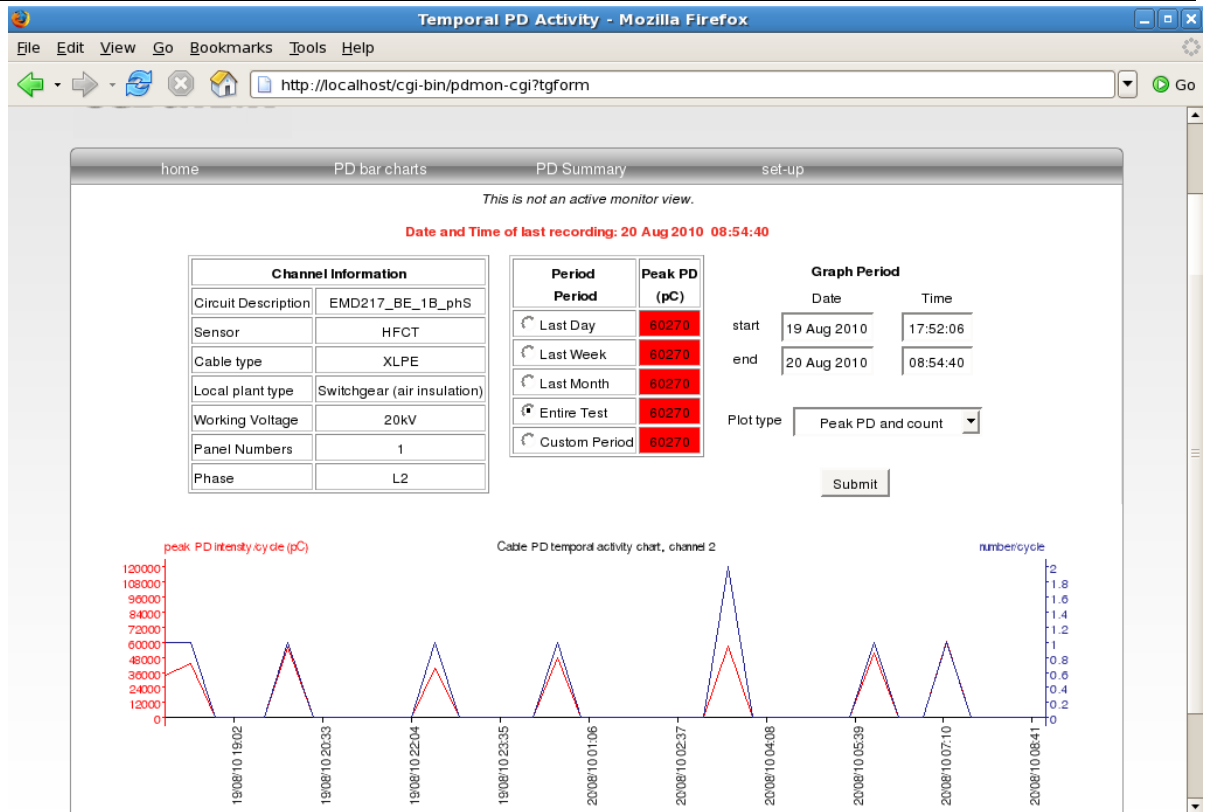


Figure 100: Peak partial discharge activity of EMD217/BE_1B phase S

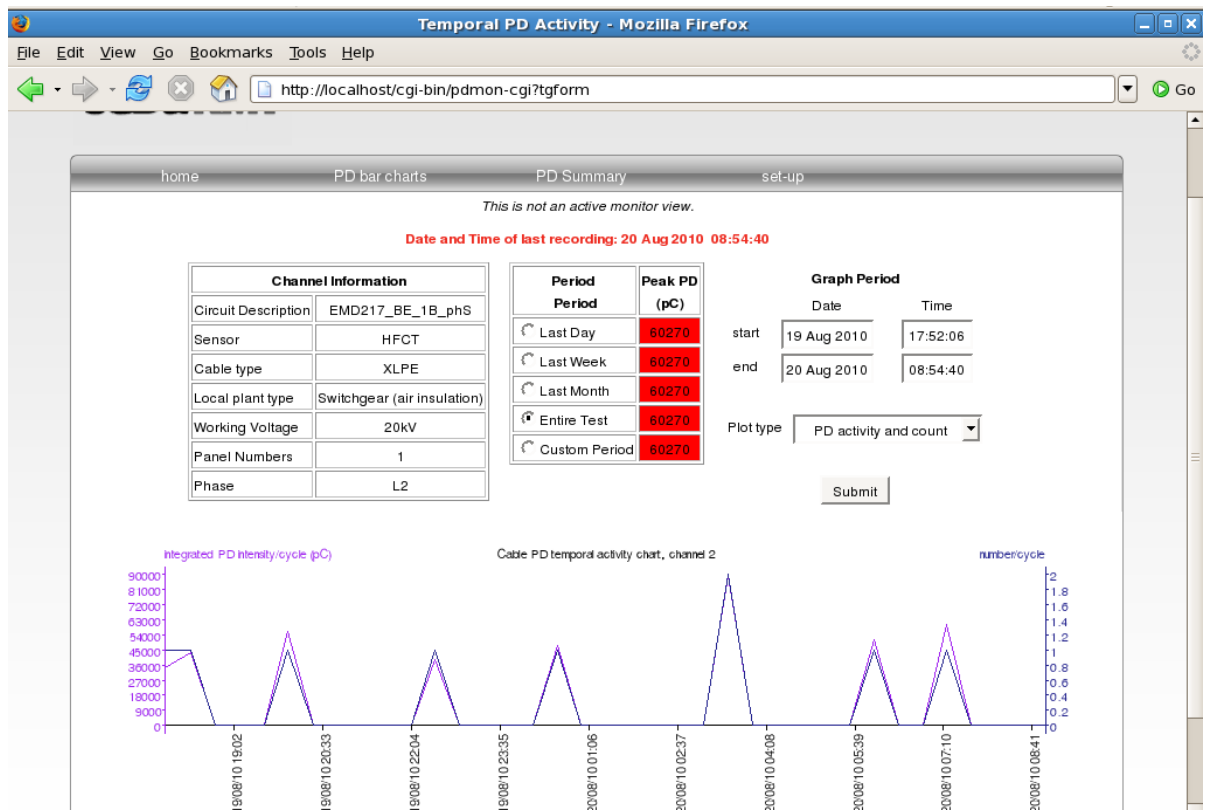


Figure 101: Partial discharge activity of EMD217/BE_1B phase S

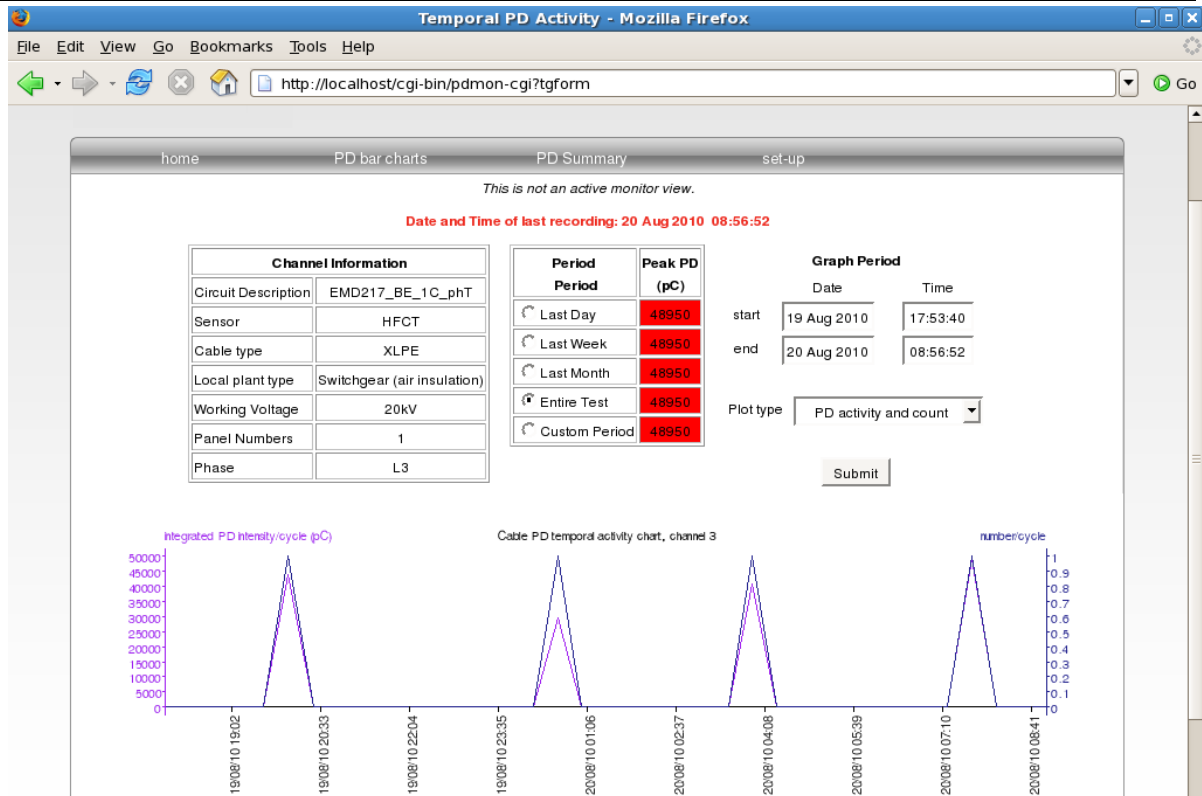


Figure 102: Partial discharge activity of EMD217/BE_1C phase T

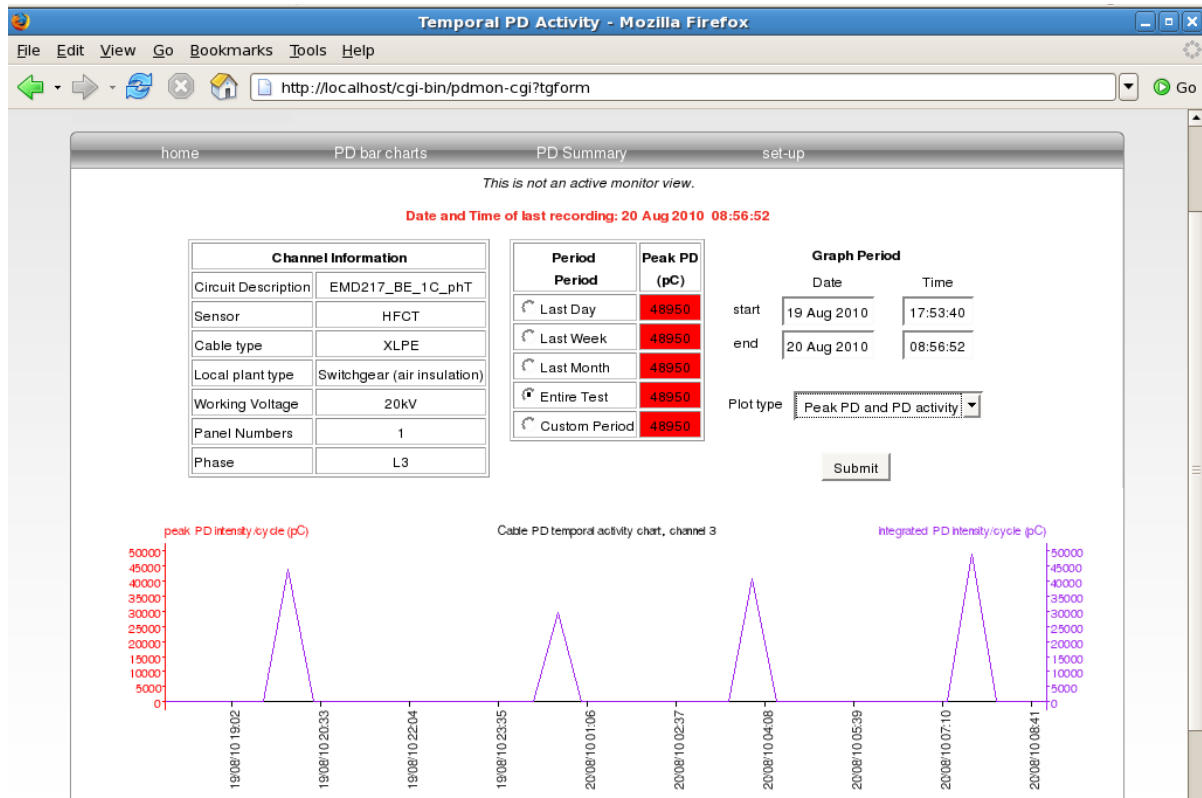


Figure 103: Peak partial discharge and partial discharge activity of EMD217/BE_1C phase T

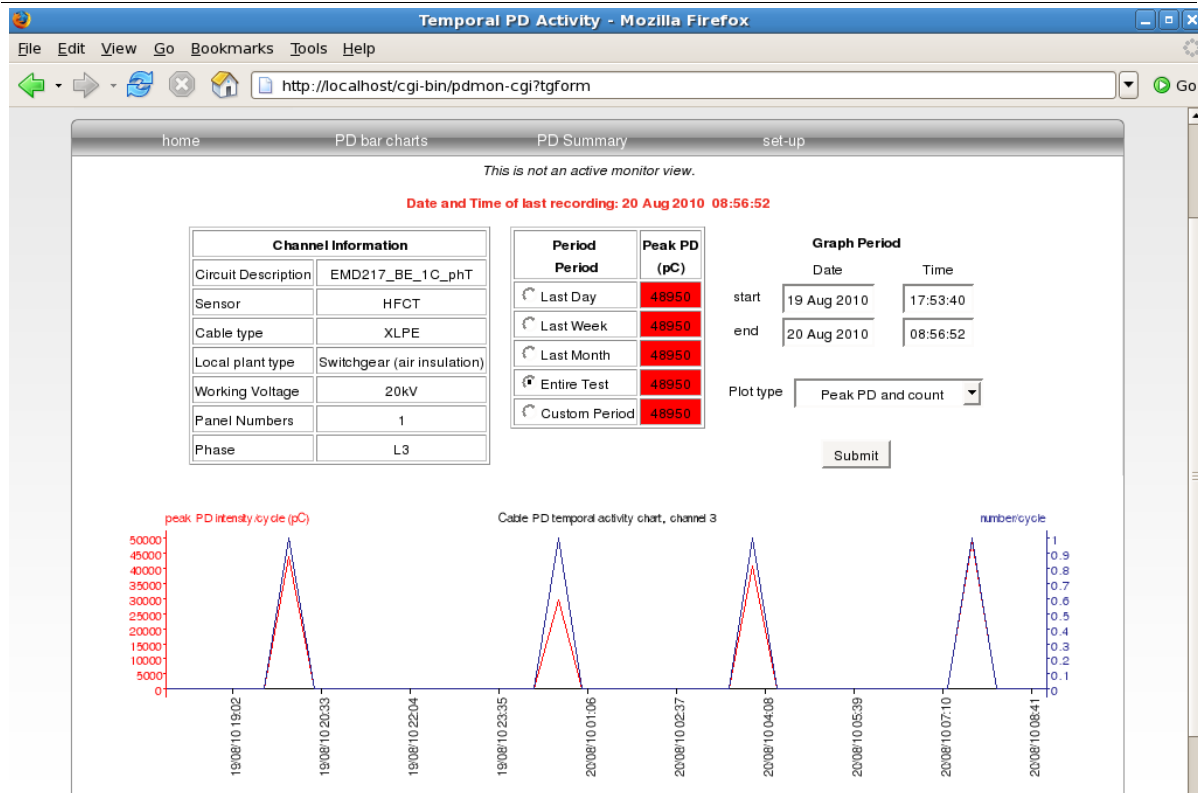


Figure 104: Peak partial discharge activity of EMD217/BE_1C phase T

Some of the waveforms of the software for partial discharge analysis for the cable line BE-BA4 are presented in the next figures.

EMD302 A4 PHRST 30.08.10 10:23

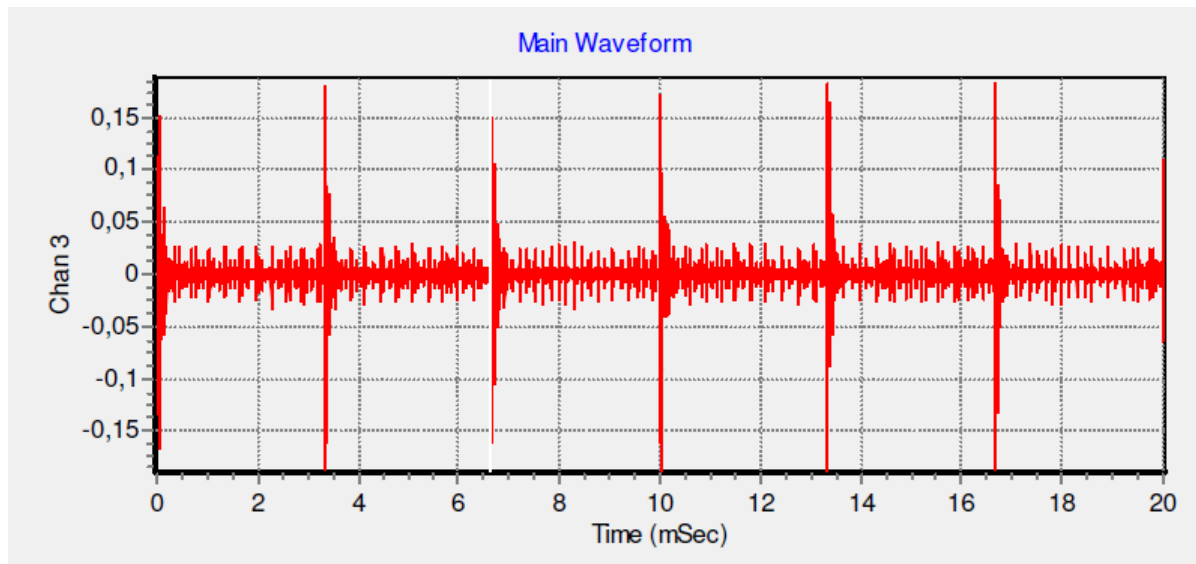


Figure 105: Partial discharge activity during a 50Hz power cycle (20ms)



Figure 106: Form of one partial discharge pulse (14 μ s)

The output of the software is the following:

```

Description of PD pulse
Waveform length Time/sample Segment Number W/F Int Length
15.01 uSec 10.00 nSec 26 of 30 1501
Peak Value Cable pC size Local dB value Integer size Integer pos
-33.48 mV - - 33482 500
Channel Time Index Phase in Cycle Pos in Parent Parent Size
3 5 40.72 Deg 225715 2000000
Risetime Falltime Pulse Wid (Sec) Pulse Wid Int Pulse Area
239.99 nSec 262.56 nSec 540.00 nSec 54 -11.85 nVSec
Event Width Freq of max ampl FFT length Freq (1st Mom) Event Integral
1.27 uSec 781.25 kHz 128 1.12 MHz -4.36 nVSec
Overall PD Type = Noise
    
```

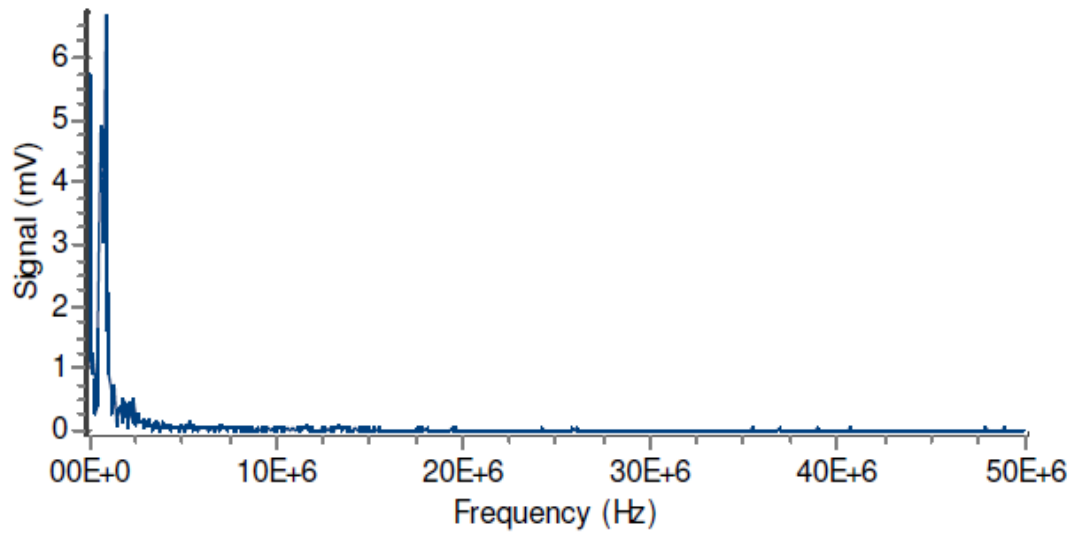


Figure 107: FFT plot of Signal (mV) – Frequency (Hz)

EMD302 A4 PHRST 28.08.10 16:10

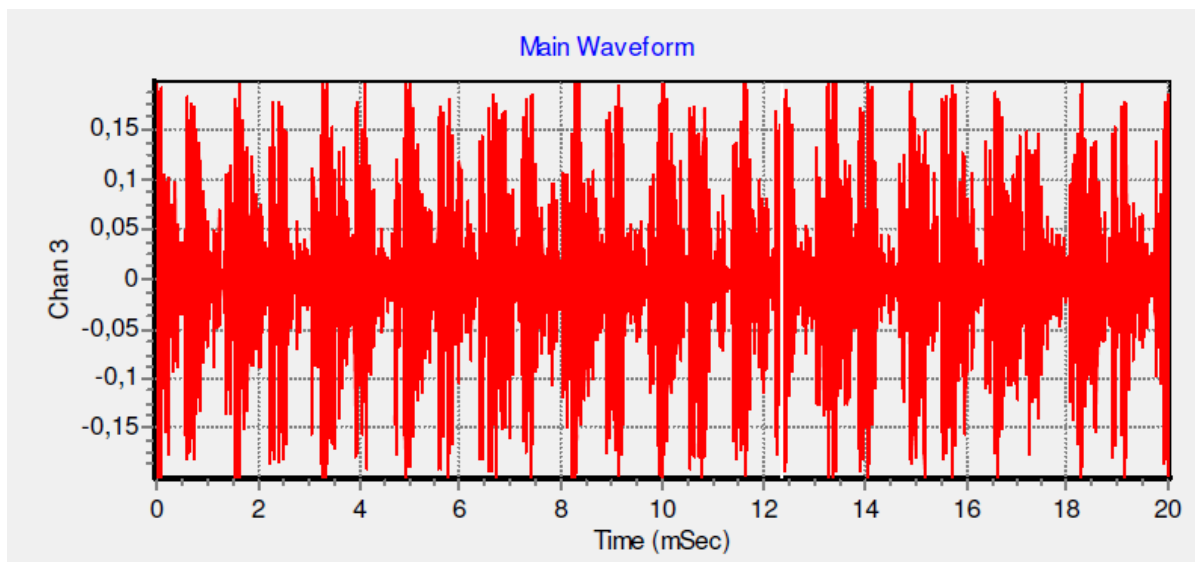


Figure 108: Partial discharge activity during a 50Hz power cycle (20ms)

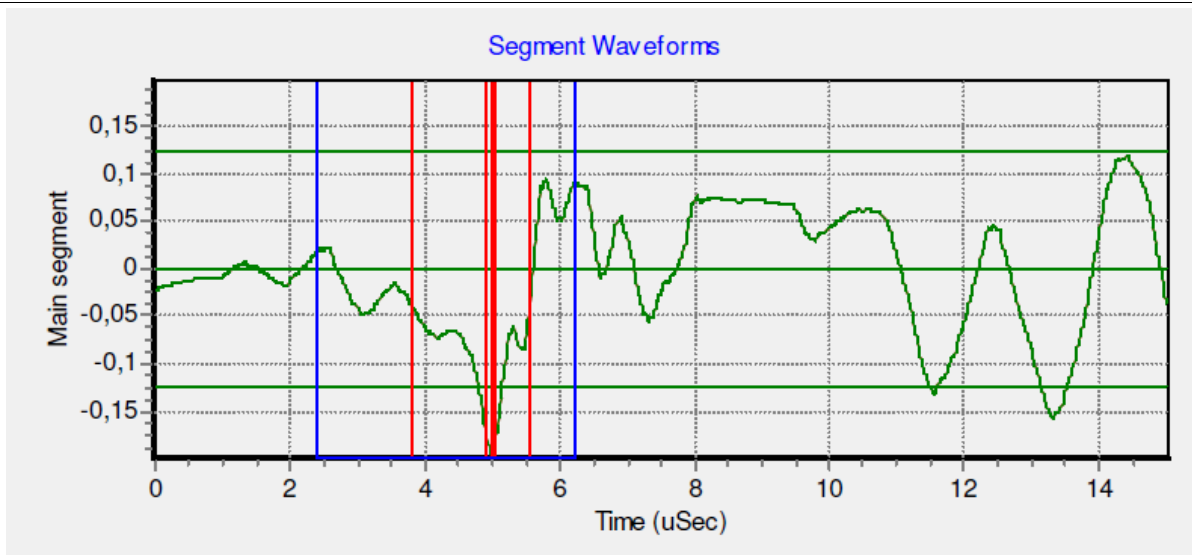


Figure 109: Form of one partial discharge pulse (14 μ s)

The output of the software is the following:

```

Description of PD pulse
Waveform length Time/sample Segment Number W/F Int Length
15.01 uSec 10.00 nSec 30 of 30 1501
Peak Value Cable pC size Local dB value Integer size Integer pos
-199.22 mV - -199217 500
Channel Time Index Phase in Cycle Pos in Parent Parent Size
3 6 222.89 Deg 1237755 2000000
Risetime Falltime Pulse Wid (Sec) Pulse Wid Int Pulse Area
741.11 nSec 392.50 nSec 1.77 uSec 177 -161.53 nVSec
Event Width Freq of max ampl FFT length Freq (1st Mom) Event Integral
3.86 uSec 258.40 kHz 387 857.37 kHz -144.08 nVSec
Overall PD Type = Noise
    
```

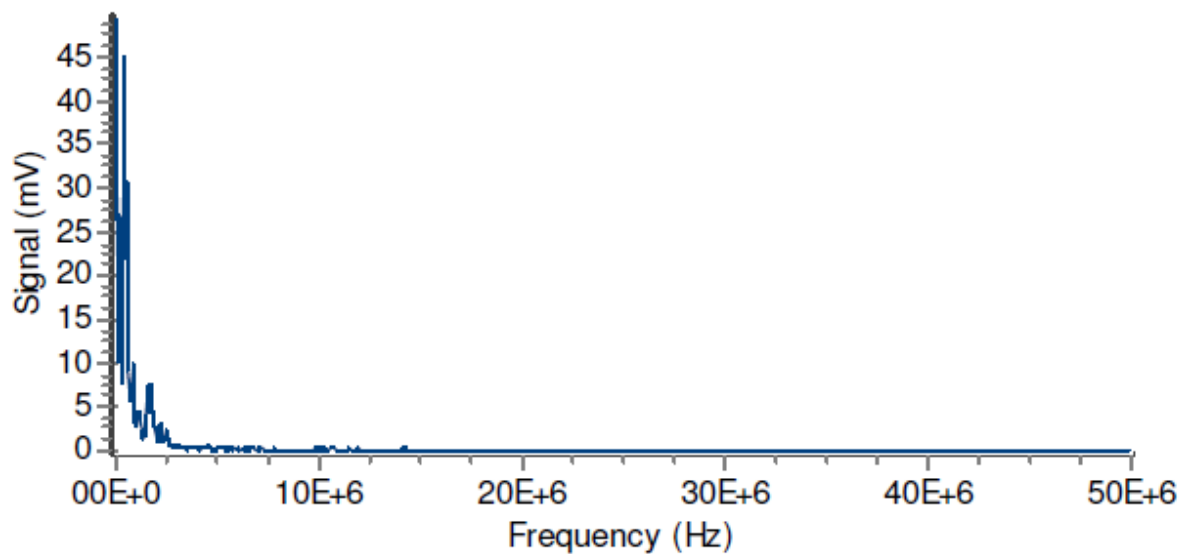



Figure 110: FFT plot of Signal (mV) – Frequency (Hz)

EMD 217 BE 1A phR 20.08.10 08:58

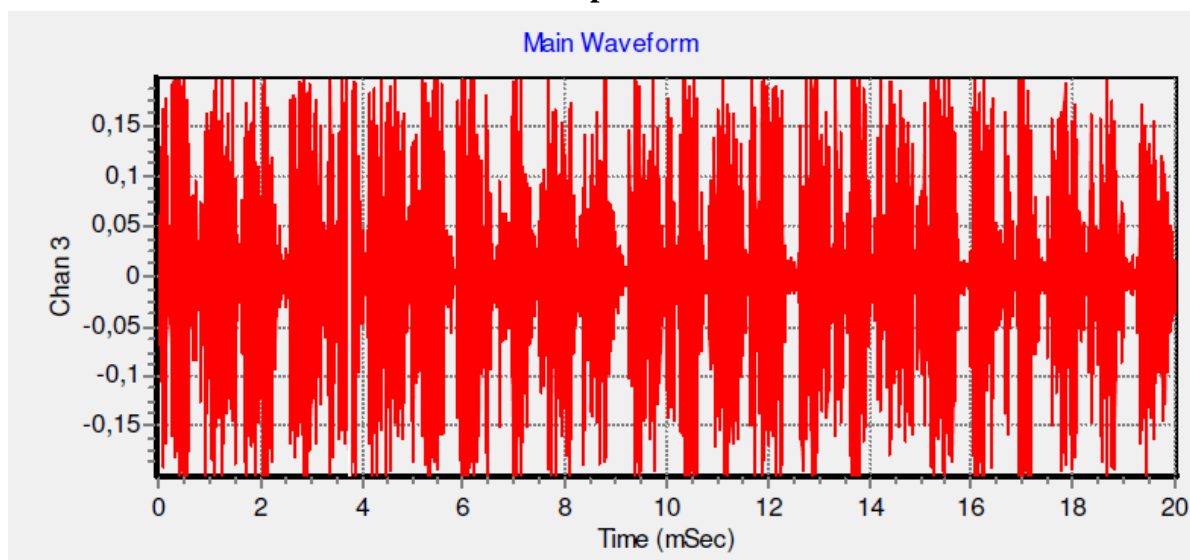


Figure 111: Partial discharge activity during a 50 Hz power cycle (20ms)

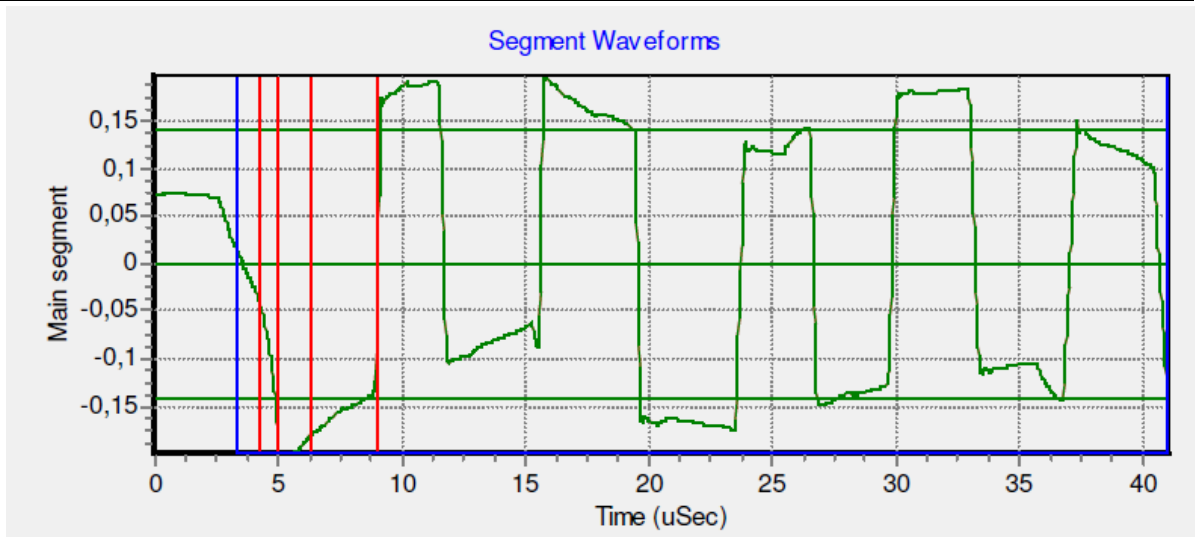


Figure 112: Form of one partial discharge pulse (14 μ s)

The output of the software is the following:

```

Description of PD pulse
Waveform length Time/sample Segment Number W/F Int Length
41.00 uSec 20.00 nSec 23 of 30 2050
Peak Value Cable pC size Local dB value Integer size Integer pos
-200.00 mV - -200000 250
Channel Time Index Phase in Cycle Pos in Parent Parent Size
3 13 67.46 Deg 374279 2000000
Risetime Falltime Pulse Wid (Sec) Pulse Wid Int Pulse Area
552.03 nSec 4.61 uSec 4.80 uSec 240 -745.66 nVSec
Event Width Freq of max ampl FFT length Freq (1st Mom) Event Integral
37.72 uSec 132.49 kHz 1887 300.11 kHz -157.65 nVSec
Overall PD Type = Noise
    
```

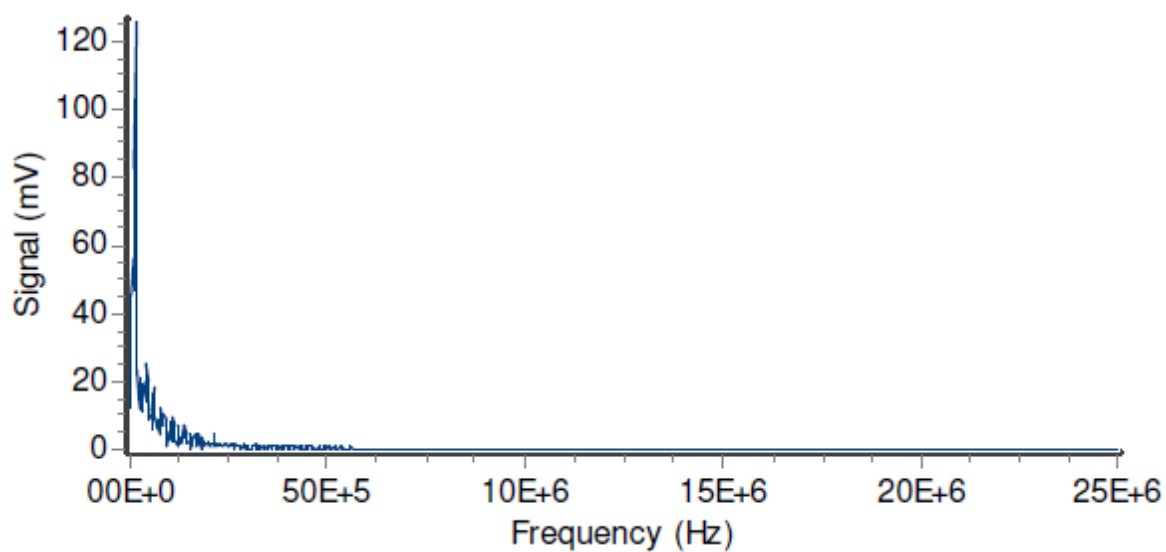


Figure 113: FFT plot of Signal (mV) – Frequency (Hz)

EMD 217 BE 1B phS

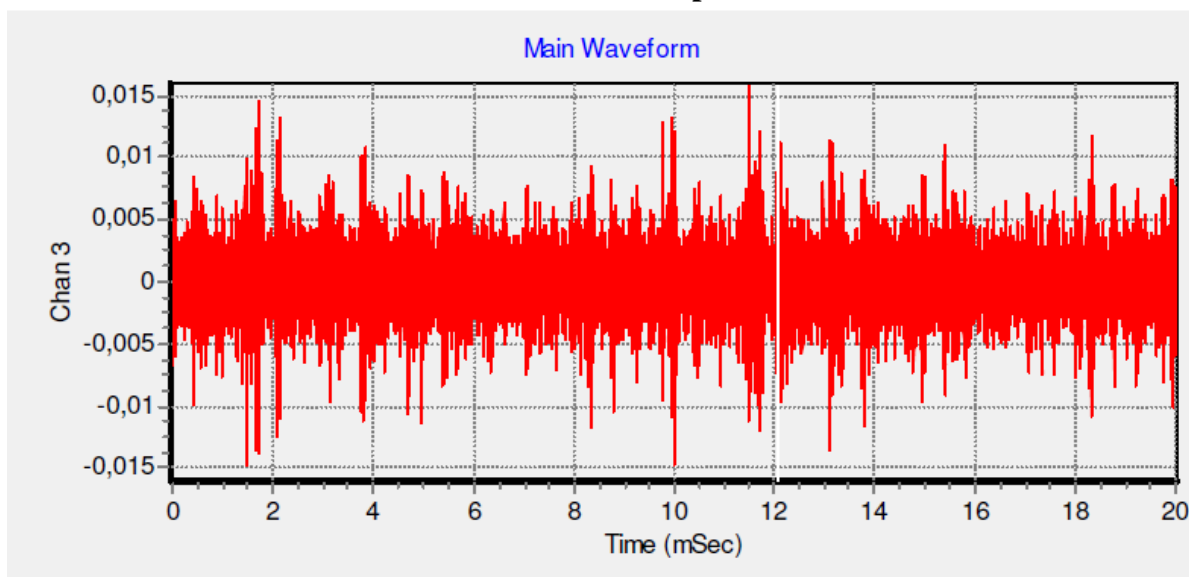


Figure 114: Partial discharge activity during a 50Hz power cycle (20ms)

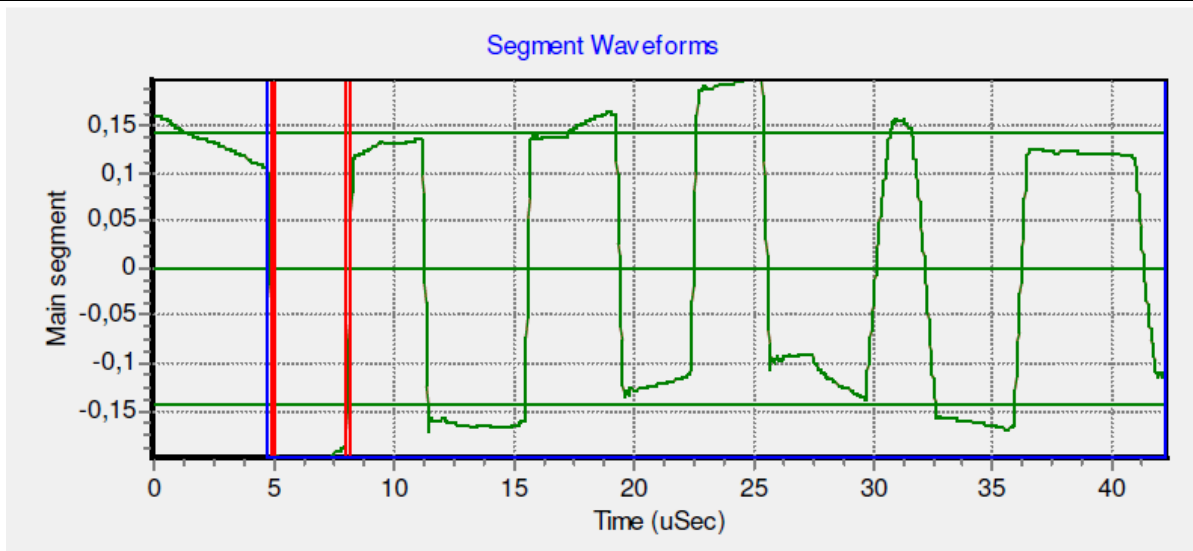


Figure 115: Form of one partial discharge pulse (14 μ s)

The output of the software is the following:

```

Description of PD pulse
Waveform length Time/sample Segment Number W/F Int Length
42.20 uSec 20.00 nSec 9 of 30 2110
Peak Value Cable pC size Local dB value Integer size Integer pos
-200.00 mV - -200000 250
Channel Time Index Phase in Cycle Pos in Parent Parent Size
3 15 23.19 Deg 128323 2000000
Risettime Falltime Pulse Wid (Sec) Pulse Wid Int Pulse Area
104.95 nSec 4.25 uSec 3.26 uSec 163 -628.20 nVSec
Event Width Freq of max ampl FFT length Freq (1st Mom) Event Integral
37.46 uSec 133.40 kHz 1874 297.51 kHz -482.80 nVSec
Overall PD Type = Noise
    
```

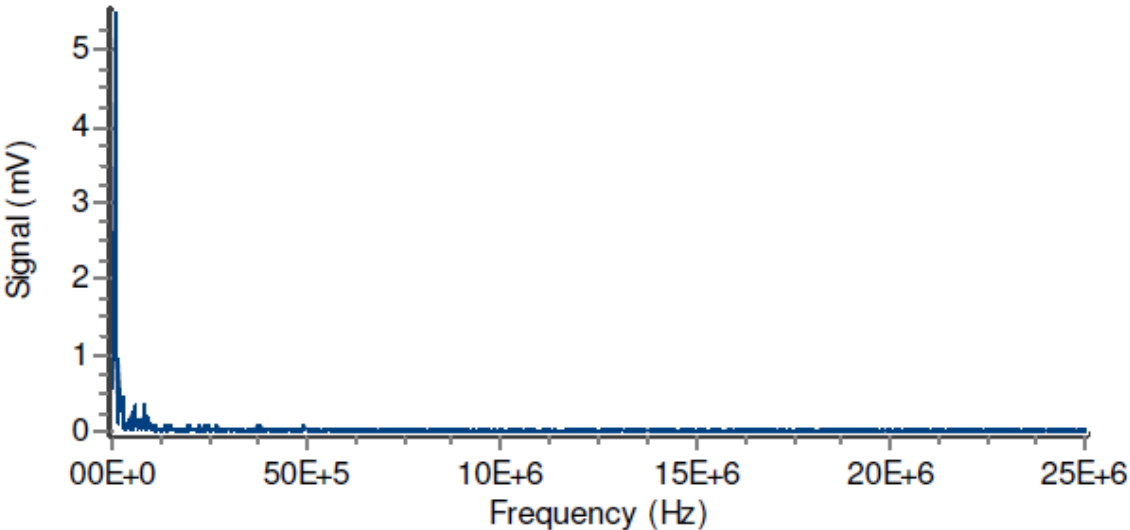


Figure 116: FFT plot of Signal (mV) – Frequency (Hz)