

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Elettrica

Scuola di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale

Indirizzo in Ingegneria Elettrotecnica

Ciclo XX

***ANALISI DELLE SCARICHE PARZIALI PER LA
DIAGNOSTICA DELLE MACCHINE ELETTRICHE***

Direttore della Scuola: Prof. Paolo Bariani

Supervisore: Prof. Giancarlo Pesavento

Dottorando: Claudio Ceretta

31 gennaio 2008

SOMMARIO:

Il presente lavoro ha avuto come scopo principale lo studio delle scariche parziali come mezzo diagnostico per le macchine elettriche. In particolare si sono studiate le tecniche di misura delle scariche parziali in modalità a banda ultra larga (UWB). Le tecniche a banda ultra larga permettono di ottenere informazioni non solo in relazione alla carica equivalente degli impulsi di corrente ma anche sulla loro forma. La forma d'onda degli impulsi può essere utilizzata sia per discriminare il tipo di scarica parziale sia per localizzare gli impulsi all'interno del sistema isolante. In particolare le tecniche a banda ultra larga sono state studiate per essere applicate, come mezzo diagnostico, ai trasformatori in resina. Sono state fatte molte osservazioni sul metodo a banda ultra larga con lo scopo di adattarlo alle misure su componenti industriali di media tensione ed in particolare sono stati analizzate le strumentazioni, i circuiti di misura e gli algoritmi di analisi. Il metodo tempo frequenza è stato migliorato nelle tecniche di interpretazione con l'introduzione di un nuovo parametro ottenuto dallo studio delle funzioni analitiche. I circuiti di misura sono stati caratterizzati, ottenendo un limite tipico per circuiti di media tensione. Sono stati studiati i sistemi di misura ed è stato sviluppato un sistema di tipo 'open source' che ha permesso di esaminare in dettaglio alcuni problemi di ordine pratico come l'influenza del rumore e le tecniche di gestione della memoria.

Sono state studiate le tecniche costruttive dei trasformatori di media tensione in resina ed i principali difetti costruttivi anche in considerazione di specifici studi fatti da un costruttore.

Sono state approfondite anche le problematiche di ordine metrologico relative alle misure su trasformatori effettuate secondo le specifiche della norma IEC 60270 studiando gli errori di integrazione che si possono avere nei casi reali.

Il lavoro ha richiesto una mole notevole di attività sperimentale a supporto delle considerazioni teoriche sviluppate.

SUMMARY:

The main aim of the present work has been the investigation of the characteristics of partial discharge current pulses as a diagnostic tool for electrical machines: in particular the possibilities offered by the Ultra Wide Band (UWB) partial discharge (PD) current acquisition technique have been thoroughly examined and implemented. This method allows to obtain information not only from the charge associated to the current pulse itself but also from the pulse waveform and therefore it can be used to discriminate among different types of PD sources and to provide hints for their localisation inside the insulation system.

UWB techniques have been applied to the investigation of partial discharges within the windings of cast resin transformers even if observations on other types of MV equipment were carried out as well.

A complete measuring system has been built around a fast digitizer thus obtaining an 'open source' product which allows the analysis of several practical problems likely to influence the results, such as noise level and memory management techniques.

Several analysis algorithms were implemented and examined; the Time-Frequency analysis method has been chosen as a preferential tool as it proved to be effective in the process of discrimination between different clusters of PD pulses. A further improvement has been obtained with the introduction of a new parameter derived from the properties of analytic functions.

The geometrical properties of measuring circuits and the related stray parameters have been investigated to obtain the bandwidth limits of typical MV testing layouts.

MV cast resin transformers design techniques were studied and the various types of possible defects were discussed taking advantage also from the data provided by the manufacturer.

Within the frame of the work several aspects dealing with partial discharge metrology and integration error in relation to measurements carried out on MV cast resin transformers were also discussed.

An extensive experimental study has been performed to validate the above mentioned theoretical considerations.

Indice:

1	<i>Le misure diagnostiche</i>	9
1.1	<i>Introduzione alla diagnostica</i>	9
1.2	<i>Le definizioni principali</i>	11
1.3	<i>Lo scopo della diagnostica, generalità</i>	12
1.4	<i>Degrado delle apparecchiature elettriche, generalità</i>	14
1.5	<i>Le principali tecniche diagnostiche</i>	16
2	<i>Introduzione alla misura delle scariche parziali</i>	17
2.1	<i>Introduzione alle scariche parziali</i>	17
2.2	<i>Tipologie di scariche parziali</i>	19
2.2.1	Scariche parziali interne	19
2.2.2	Scariche parziali esterne.....	28
2.2.3	Scariche parziali superficiali	30
2.2.4	Considerazioni sulle scariche parziali	32
2.3	<i>Metodi non elettrici per il rilievo e la localizzazione delle scariche parziali</i>	34
2.3.1	Rilevo delle scariche parziali con metodi acustici	34
2.3.2	Rilevo delle scariche parziali con metodi ottici.....	36
2.4	<i>Principi per il rilievo delle scariche parziali con metodi elettrici</i>	37
2.4.1	Rilevo degli impulsi di corrente mediante l'impedenza di accoppiamento.	38
2.4.2	Tecniche di amplificazione dei segnali di misura.....	40
3	<i>La normativa IEC 60270</i>	43
3.1	<i>La misura delle scariche parziali secondo la normativa IEC 60270</i>	43
3.1.1	Contenuto e campo di applicazione della normativa	43
3.2	<i>Principali grandezze definite dalla normativa</i>	44
3.2.1	Definizioni generali.....	44
3.2.2	Grandezze relative agli impulsi delle scariche parziali.....	44
3.2.3	Tensioni di prova applicate, relative alle grandezze degli impulsi di scariche parziali	47
3.2.4	Caratteristiche del sistema di misura	48
3.2.5	Circuiti di prova	50
3.2.6	Strumenti di misura	53
3.2.7	Sistemi di misura a banda larga.....	54

3.2.8	Sistemi di misura a banda stretta.....	57
3.3	<i>Limiti nella misura delle scariche parziali condotte secondo la normativa.....</i>	<i>59</i>
3.4	<i>Trasformatori.....</i>	<i>60</i>
3.4.1	Procedura di prova standard.....	61
3.4.2	Procedura di prova speciale	62
4	<i>Misura delle scariche parziali a fini diagnostici.....</i>	<i>63</i>
4.1	<i>Introduzione</i>	<i>63</i>
4.2	<i>Misura delle scariche parziali con tecniche a banda ultra larga (Ultra Wide Band).....</i>	<i>65</i>
4.2.1	Ulteriori vantaggi del metodo con banda ultra larga	66
4.3	<i>Misuratori a banda ultra larga</i>	<i>68</i>
4.3.1	Struttura di un misuratore di scariche parziali a banda ultra larga	69
4.3.2	Circuito di prova	75
4.4	<i>Circuiti di misura per misure di scariche parziali a banda ultra larga.....</i>	<i>76</i>
4.5	<i>Correlazione tra le misure di corrente ottenute in modalità a banda ultra larga e la carica associata agli impulsi.....</i>	<i>77</i>
4.5.1	Integrazione diretta	77
4.5.2	Pseudointegrazione numerica.....	78
4.6	<i>Limiti nei circuiti di misura a banda ultra larga e limiti nella strumentazione</i>	<i>83</i>
4.6.1	Misura della influenza dei circuiti di misura nella forma d'onda della corrente delle scariche parziali.....	84
5	<i>I trasformatori.....</i>	<i>92</i>
5.1	<i>Principi costruttivi dei trasformatori incapsulati in resina epossidica</i>	<i>92</i>
5.1.1	Introduzione.....	92
5.1.2	Principi costruttivi dei trasformatori in resina.....	97
5.1.3	I più comuni difetti riscontrabili nei trasformatori isolati in resina epossidica.....	102
5.2	<i>Analisi delle principali cause di malfunzionamento dei trasformatori isolati in resina epossidica.....</i>	<i>104</i>
5.2.1	Fessurazioni	104
5.2.2	Distacchi	106
5.2.3	Occlusioni gassose, vacuoli	107
5.2.4	Occlusioni di materiali estranei.....	108
5.2.5	Vacuoli per ritiro della resina.....	108

6	<i>La misura delle scariche parziali nei trasformatori.....</i>	113
6.1	<i>Limiti nella misura delle scariche parziali nei trasformatori secondo le normative IEC60270 – IEC60076 -11.....</i>	113
6.2	<i>Comportamento in frequenza delle bobine di media tensione.....</i>	114
6.3	<i>Prove.....</i>	116
6.3.1	<i>Prove con lo strumento James Biddle modello 66-2J.....</i>	117
6.3.2	<i>Prove con lo strumento Haefely modello 561.....</i>	123
7	<i>Criteri di valutazione delle scariche parziali basati sull’analisi delle distribuzioni.....</i>	127
7.1	<i>Introduzione.....</i>	127
7.2	<i>Gli indici nella valutazione dei pattern.....</i>	130
7.2.1	<i>Indici di base.....</i>	131
7.2.2	<i>Indici derivati.....</i>	134
7.2.3	<i>Operatori statistici.....</i>	136
7.2.4	<i>Analisi statistica delle distribuzioni.....</i>	140
7.3	<i>La valutazione dei pattern su base sperimentale.....</i>	142
7.3.1	<i>I provini.....</i>	145
8	<i>Limiti nella analisi delle distribuzioni.....</i>	162
8.1	<i>Limiti nella valutazione delle distribuzioni delle scariche parziali mediante l’utilizzo dei pattern.....</i>	162
8.2	<i>Il metodo Tempo-Frequenza.....</i>	166
8.2.1	<i>Introduzione.....</i>	166
8.2.2	<i>Influenza di più segnali nella registrazione.....</i>	172
8.2.3	<i>Influenza del rumore nel segnale.....</i>	174
8.2.4	<i>Influenza del rumore nei diagrammi Tempo-Frequenza.....</i>	176
8.2.5	<i>Validazione sperimentale della influenza del rumore nelle analisi Tempo-Frequenza.....</i>	179
8.2.6	<i>Conclusioni.....</i>	182
8.2.7	<i>Miglioramento della capacità di risoluzione della tecnica Tempo-Frequenza mediante l’utilizzo delle funzioni analitiche.....</i>	184
8.2.8	<i>I segnali analitici.....</i>	185
8.2.9	<i>Diagrammi Tempo-Frequenza con segnali analitici.....</i>	186

9	<i>Prove sui trasformatori con il metodo a banda ultra larga.</i>	190
9.1	<i>Prove condotte su trasformatore da 800 kVA</i>	190
9.1.1	<i>Rilievo con connessione del triangolo non rimossa</i>	191
9.1.2	<i>Rilievo con connessione del triangolo rimossa</i>	195
9.2	<i>Prove condotte su trasformatore da 400 kVA</i>	209
10	<i>Metodi alternativi ed ulteriori applicazioni della strumentazione a banda ultra larga</i>	215
10.1	<i>Applicazioni della risoluzione: prove nei cavi</i>	215
10.2	<i>Identificazione della ubicazione delle scariche parziali nelle bobine dei trasformatori mediante l'analisi della polarità degli impulsi</i>	217
10.3	<i>Analisi a mappatura di fdt</i>	219
10.3.1	<i>Prove</i>	222
10.4	<i>Sviluppi del metodo</i>	226
10.5	<i>Conclusioni</i>	227
11	<i>Appendice: Distribuzione di Weibull</i>	228
11.1	<i>Introduzione</i>	228
11.2	<i>Teoria</i>	228
12	<i>Bibliografia</i>	235

1 Le misure diagnostiche

1.1 Introduzione alla diagnostica

Nel mondo industrializzato l'energia elettrica, che è disponibile capillarmente, rappresenta un bene di primaria importanza dal quale difficilmente si può prescindere.

L'importanza della energia elettrica nella vita di tutti i giorni passa alla ribalta non nel quotidiano ma qualora questo bene, per qualche ragione venga a mancare.

In questa situazione sistemi industriali e civili subiscono dei malfunzionamenti ed il disagio diviene evidente per la popolazione ed evidentissimo per i sistemi industriali nei quali i disagi o addirittura i danni per alcune utenze assumono valori economicamente molto rilevanti.

La continuità e la qualità del servizio assume dunque una importanza essenziale sia per gli utenti sia per i distributori del servizio per i quali, date le leggi vigenti in materia di "*power quality*", ogni disservizio si traduce in un esborso di in termine di penali.

Sebbene la forte spinta imposta dalla necessaria qualità del servizio spinga ad un generale miglioramento degli impianti, la liberalizzazione del servizio imposta già dal decennio scorso impone alle aziende un contenimento dei costi al fine di raggiungere una maggiore competitività nel mercato.

In questa ottica diviene importante sapere stimare la vita utile e/o lo stato di degrado di ogni apparecchiatura critica all'interno dell'impianto al fine di poterne pianificare la sostituzione in modo adeguato.

La sostituzione "*Just in time*" (oculata/tempestiva) delle apparecchiature comporta una minimizzazione dei disservizi e delle relative penali da pagare e la ottimizzazione nell'utilizzo del bene evitando sostituzioni preventive che in una economia basata sulla concorrenza si tradurrebbero direttamente come un esborso non necessario e dunque uno spreco.

La stima del degrado di un apparecchiatura non è cosa semplice in quanto non costituisce di per se stessa una misura deterministica ma è un insieme di processi di misura e di valutazione interattivi nei quali conta molto l'esperienza pregressa e la conoscenza della tipologia costruttiva della singola apparecchiatura in prova.

La determinazione della natura o della sede di un malfunzionamento in una apparecchiatura sulla base della valutazione di alcuni sintomi correlati alla disfunzione prende il nome di diagnostica mentre la verifica dell'andamento di uno o più fenomeni nel tempo prende il nome di monitoraggio.

I due processi, monitoraggio e diagnostica, sono processi distinti. Nel primo la valutazione del fenomeno che si ritiene correlato al malfunzionamento è fatta in modo continuo oppure ad intervalli regolari mentre nel secondo caso la singola azione sulla apparecchiatura dovrebbe fornire informazioni sufficienti a prendere delle decisioni.

Nella pratica il confine tra diagnostica e monitoraggio non è netto in quanto non è infrequente che svariate misure diagnostiche vengano eseguite ad intervalli di

tempo regolari e monitoraggi eseguiti in periodi molto brevi siano sufficienti a fornire informazioni utili sullo stato di degrado della apparecchiatura.

Ciò che va evidenziato è che monitoraggio e diagnostica, sebbene basati su misure di varia natura, non sono misure nel senso stretto del termine.

Il misurando infatti varia nel tempo e le misure o le serie di misure eseguite non forniscono semplicemente dei valori indipendenti dall'oggetto in prova ma l'output è una informazione, un parere o meglio una stima o una previsione.

I termini utilizzati evidenziano che il processo non è univoco, ma è funzione della apparecchiatura in esame, della esperienza pregressa su tale tipologia di oggetto, del livello di conoscenza dei dettagli costruttivi dello stesso ecc.

In pratica misure diagnostiche diverse potrebbero fornire risultati antitetici, magari perché condotte considerando sintomi diversi, o perché condotte con apparecchiature diverse o semplicemente perché le esperienze pregresse non sono sufficienti a fornire una informazione adeguata.

Se si considerano le pubblicazioni scientifiche in materia di diagnostica edite negli ultimi anni si osserva un fiorire di tecniche diagnostiche, ottimizzate per l'una o l'altra apparecchiatura elettrica, che si basano su principi fisici diversi oppure su valutazioni diverse del medesimo fenomeno.

A queste pubblicazioni spesso si associano produzioni di strumentazione di varia natura e con vari interessi di natura commerciale.

Spesso all'utenza risulta poco evidente che la diagnostica sulle macchine elettriche è un settore ancora in via di sviluppo i cui prodotti non sempre risultano affidabili e per i quali l'attività di ricerca è ancora aperta.

In ogni caso, allo stato attuale non esiste una tecnica diagnostica che con certezza risulta in assoluto migliore delle altre: esistono allo stato attuale tecniche per le quali si ha maggiore esperienza e per le quali si è investito maggiormente

Esistono poi, all'interno delle stesse tecniche, molteplici varianti sul tema che molto spesso risultano essere ottimizzate per talune tipologie di apparecchiature e di conseguenza possono essere poco adatte ad altre.

In pratica, si è osservato che le tecniche maggiormente pubblicate e discusse coincidono o derivano solitamente da tecniche di misura già affermate nel passato oppure da tecniche sviluppate in funzione di una implementazione in strumentazione commerciale che rispetto ad altre consentono di poter operare con strumentazione pratica ed affidabile.

In questo lavoro si è analizzata la misura delle scariche parziali condotta con sistemi a larga banda, finalizzata alla diagnostica sui trasformatori elettrici incapsulati in resina.

1.2 Le definizioni principali

Spesso nel corso delle misure diagnostiche si utilizzano termini come malfunzionamento, guasto, degradazione dei materiali. In questa breve sezione si forniranno le principali definizioni per i termini tipicamente utilizzati nel corso delle misure diagnostiche.

Il **malfunzionamento** di un sistema è una anomalia ossia un difetto di funzionamento che può o meno ridurre le prestazioni dello stesso ma che in ogni caso non inibisce l'uso a cui l'oggetto è preposto.

Il **guasto** di un sistema è una condizione o uno stato particolare derivato dalla deviazione di una o più proprietà del sistema tale da impedire il normale funzionamento della apparecchiatura. Il guasto può essere catastrofico, improvviso, o latente.

La **degradazione** di un sistema è una deviazione di una o più proprietà del sistema che in nessun caso preclude o limita il normale utilizzo delle apparecchiature ai fini per i quali questa è stata progettata. Nel caso di apparecchiature di alta tensione la degradazione può ridurre o limitare la capacità della apparecchiatura di sostenere le condizioni limite di prova imposte dalla classe di isolamento del sistema.

Il **componente guasto** è la parte del sistema che è stata interessata dal guasto e che per tale ragione non risulta, allo stato in cui si trova, utilizzabile all'interno del sistema e deve pertanto essere riparato, sostituito oppure escluso dal sistema (By – pass).

La **rivelazione o identificazione** del malfunzionamento/degrado è il processo attraverso il quale si determina la natura del malfunzionamento/degrado. La rivelazione non necessariamente è fatta con mezzi diagnostici in quanto il guasto potrebbe essere casuale o evidente (Rumori, Calo di prestazioni ecc.).

La **localizzazione** del malfunzionamento/degrado è l'azione di identificazione del particolare sottosistema che è luogo oppure causa del malfunzionamento /degrado.

La **quantificazione** del malfunzionamento/degrado è determinazione della pericolosità del fenomeno all'interno della apparecchiatura in esame.

La **stima** della vita utile della apparecchiatura è il risultato di un processo diagnostico basato su una serie di valutazioni in merito a malfunzionamenti/degradi delle parti costituenti la apparecchiatura.

1.3 Lo scopo della diagnostica, generalità

Data una apparecchiatura elettrica lo scopo principale della diagnostica può essere brevemente condensato nei seguenti punti:

- 1) Identificazione dei malfunzionamenti del sistema
- 2) Prevenzione dei guasti distruttivi
- 3) Riduzione dei costi per fuori servizio
- 4) Possibilità di programmazione degli interventi di manutenzione e sostituzione delle apparecchiature.

Data una apparecchiatura elettrica, al fine di individuare la tecnica diagnostica che con maggiore probabilità possa essere utilizzata proficuamente debbono essere rispettate le seguenti condizioni.

- 1) Individuazione delle principali cause di malfunzionamento / degrado e delle principali cause di guasto
- 2) Analisi dei dettagli di progetto e dei processi costruttivi della apparecchiatura al fine di determinare i componenti maggiormente sensibili.
- 3) Analisi statistica dei guasti e delle cause di guasto in relazione alla installazione ed al particolare impiego. Analisi statistica delle condizioni di carico, delle temperature medie, della frequenza delle sollecitazioni elettromeccaniche ecc.
- 4) Individuazione degli effetti fisici collaterali alla presenza del malfunzionamento/degrado e della relazione intercorrente tra questi e la intensità del fenomeno.
- 5) Individuazione di metodi di rilievo dei fenomeni correlati alla presenza dei malfunzionamenti/degradi, valutazione della affidabilità della misura e della incertezza derivante dall'influenza di sorgenti di segnale esterne all'oggetto in prova che potrebbero falsare completamente la misura.
- 6) Individuazione della possibilità di poter effettuare misure multiple magari basate su principi fisici differenti al fine di ridurre l'incertezza legata alla singola prova.
- 7) Valutazione, per ogni singolo metodo proposto dei criteri decisionali ossia la valutazione del criterio o dei criteri attraverso i quali si andranno ad attribuire i vari malfunzionamenti a partire dai risultati delle misure e della affidabilità di questi.

- 8) Valutazione della possibilità di estrapolazione a partire da grandezze osservabili e misurabili di quantità non direttamente rilevabili ma correlate alla natura ed alla intensità del malfunzionamento.
- 9) Scelta o valutazione di algoritmi decisionali, ossia determinazione di strumenti opportuni a ridurre, per quanto possibile, il fattore umano nella stima dello stato di degrado della apparecchiatura.
- 10) Analisi statistica a posteriori della affidabilità dei criteri adottati, nella relazione tra stima di vita e guasti registrati.

Una volta stabilito quanto sopra può essere deciso il tipo di misure diagnostiche da utilizzare, a seconda delle esigenze.

Si può scegliere di utilizzare la diagnostica on line ossia il monitoraggio costante di alcune grandezze durante il funzionamento dell'oggetto in prova oppure off line misurando le caratteristiche ad intervalli di tempo prestabiliti e mettendo fuori servizio l'apparecchiatura.

Anche in questo caso non esiste una soluzione univoca e la scelta è dipendente oltre che da fattori legati alle esigenze di diagnostica anche da esigenze economiche.

Nel caso sia scelta una diagnostica on line, infatti si devono considerare i costi delle apparecchiature che deve rimanere in funzione collegata all'oggetto in prova per un lungo tempo.

Nel caso invece di diagnostica off line è necessario interrompere il servizio delle macchine e, nel caso non esistano macchine di riserva o sia programmato un fermo macchina per altro motivo, si debbono considerare i costi prodotti dal disservizio.

Come ultima osservazione nel caso di particolari misure diagnostiche che richiedano procedure invasive (componenti del sistema di misura all'interno del sistema stesso) l'installazione di tali sensori deve essere prevista sin dal momento dell'ordine della apparecchiatura.

1.4 Degradazione delle apparecchiature elettriche, generalità

Statisticamente una apparecchiatura elettrica presenta una probabilità di guasto che è funzione della vita pregressa della apparecchiatura stessa, molto maggiore all'inizio ed alla fine della vita utile.

Nella fase iniziale della vita di una apparecchiatura possono infatti rilevarsi difetti dovuti alla progettazione oppure alla esecuzione della apparecchiatura stessa mentre nella fase finale della vita la probabilità di guasto diviene elevata a causa del degrado stesso della apparecchiatura.

Nella parte centrale della vita della apparecchiatura la probabilità di guasto della apparecchiatura è legata generalmente a fenomeni casuali come ad esempio l'occorrenza di avvenimenti anomali quali sollecitazioni di sovraccarico oppure di cortocircuito.

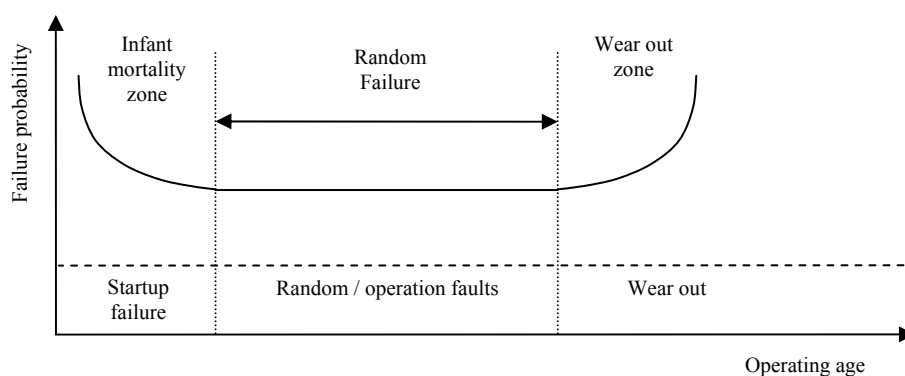


Figura 1-1: Probabilità di guasto di una apparecchiatura elettrica in funzione del tempo in servizio. (Curva a vasca da bagno)

Ovviamente per ogni tipologia di apparecchiatura esiste una diversa curva in funzione delle caratteristiche peculiari della macchina ed il livello di sfruttamento della stessa.

Nella pratica, la demarcazione tra parte centrale della vita utile della macchina e la zona di inizio della parte della vita in cui la degradazione dei materiali aumenta la probabilità di guasto non è ben demarcata ed è profondamente variabile.

In generale la parte più critica di una apparecchiatura elettrica è l'isolamento. L'isolamento, infatti, in assenza di malfunzionamenti latenti, degrada in funzione della temperatura con legge pressappoco esponenziale riducendo progressivamente le proprie proprietà elettriche e meccaniche. Come risultato si ottiene che la apparecchiatura diviene progressivamente più debole meccanicamente e maggiormente sensibile alle sollecitazioni di natura elettrica aumentando dunque la probabilità di cedimento in funzione di eventuali sollecitazioni anomale.[13]

L'individuazione del grado di carico o del fattore di utilizzo di una apparecchiatura è un buon indice di previsione qualora nella apparecchiatura non vi siano zone di riscaldamento anomale dovute ad altri fattori oppure non vi siano in corso fenomeni degradanti di altra natura.

In tal caso, dato un monitoraggio di tipo continuo ed una esperienza pregressa in funzione della apparecchiatura ed a vari modelli è possibile stimare la vita residua della apparecchiatura anche in presenza di eventi anomali dei quali si può tenere conto.

Per portare un esempio concreto questo tipo di monitoraggio continuo avviene nei trasformatori in olio oppure a secco di grande potenza attraverso apparecchiature dedicate che acquisiscono di continuo le temperature delle parti critiche degli oggetti e che in conformità a modelli standardizzati nelle normative internazionali stabiliscono la durata residua della apparecchiatura.

RTE	Thermal class	Previous designation
< 90	70	
>90-105	90	Y
>105-120	105	A
>120-130	120	E
>130-155	130	B
>155-180	155	F
>180-200	180	H
>200-220	200	
>220-250	220	
>250	250	

NOTE This table gives the thermal class designations corresponding to different temperature intervals of the RTE for an EIM . The capital letters in the 3rd row refer to the class designations in the earlier edition of IEC 60085 (1984). The designation "Y" applies also to RTE values below 90.

Tabella 1: Classificazione termica dei materiali destinati all'isolamento delle apparecchiature elettriche.¹

In ogni caso, come anticipato, la temperatura è una causa di degrado degli isolamenti ma non è il solo fattore.

Esistono cause legate alle sollecitazioni di tipo meccanico e di tipo elettrico. Tali sollecitazioni, a differenza della sollecitazione termica, sono più difficili da rilevare e possono portare al degrado della apparecchiatura molto più velocemente di quanto possibile con la sola presenza della sollecitazione termica.

Nel caso sia possibile, la presenza di un degrado dovuto alle sollecitazioni di questa natura dovrebbe essere periodicamente verificato attraverso opportune ispezioni periodiche.

Per quanto riguarda le misure di natura diagnostica, queste dovrebbero essere svolte da circa la metà della vita utile della apparecchiatura in poi con frequenza variabile in funzione del risultato delle misure precedenti.

¹ RTE = indice relativo di resistenza alla sollecitazione termica

1.5 Le principali tecniche diagnostiche

Per quanto riguarda il panorama della diagnostica esistono molte tecniche diversificate sia per la tipologia di malfunzionamento che si intende rilevare sia per quanto riguarda la particolare apparecchiatura da esaminare.

In merito alla valutazione dello stato di degrado delle parti isolanti delle apparecchiature si può ricorrere alle seguenti tecniche:

1. Fattore di perdita o $\text{tg}\delta$

La misura del fattore di perdita è una misura finalizzata alla stima del contenuto di acqua all'interno di un dielettrico igroscopico ma sovente viene utilizzata anche per dielettrici di altra natura.

La misura del fattore di perdita è viene spesso richiesta nei trasformatori, nei cavi ad isolamento carta olio e nelle macchine rotanti.

2. Indice di polarizzazione/depolarizzazione

Anche questa misura è volta alla stima del contenuto di acqua all'interno di isolamenti in carta olio. In base al contenuto di acqua di tali isolamenti varia la resistività e la costante dielettrica dei materiali e conseguentemente la costante di tempo di polarizzazione del dielettrico.

3. Misura delle scariche parziali

La misura delle scariche parziali, a differenza delle precedenti tecniche diagnostiche è volta alla identificazione, all'interno del dielettrico di intensità di campo elettrico tali da superare la rigidità dielettrica del materiale e portare conseguentemente a scariche localizzate.

Per quanto riguarda i difetti o i malfunzionamenti di tipo meccanico si può ricorrere a

4. Misura delle vibrazioni

La misura delle vibrazioni è una misura meccanica che si utilizza sovente per le macchine rotanti e serve alla identificazione di guasti meccanici ai cuscinetti, deformazione organi rotanti o sbilanciamento delle masse in rotazione oppure rottura di una o pi sbarre rotoriche..

5. Misura della risposta in frequenza (FRA o SFRA)

La misura della risposta in frequenza è una misura diagnostica utilizzata soprattutto nel campo dei trasformatori. Tale misura è di tipo comparativo e serve a verificare che, nel corso del tempo, non si siano formate, nella macchina, deformazioni permanenti degli avvolgimenti.

2 Introduzione alla misura delle scariche parziali

2.1 Introduzione alle scariche parziali

Vengono definite scariche parziali tutti quei fenomeni di scarica che non cortocircuitano completamente i terminali a cui è applicata la tensione ma interessano solo parzialmente il dielettrico interposto tra questi. In pratica le scariche parziali altro non sono che fenomeni dovuti al parziale cedimento dell'isolamento dovuto ad un eccessivo gradiente di potenziale elettrico.

Normativa di riferimento per le scariche parziali è la CEI EN 60270 che definisce le scariche parziali: *Scarica elettrica localizzata che attraversa solo parzialmente l'isolamento tra conduttori e che può essere o non adiacente a un conduttore.* [3]

A tale definizione la normativa fa seguire opportune precisazioni al fine di inquadrare il fenomeno precisando che le scariche parziali sono generalmente una conseguenza di concentrazioni locali di sollecitazioni elettriche nell'isolamento o sulla superficie dell'isolamento. *In genere, tali scariche compaiono come impulsi di durata sensibilmente inferiore a 1 μ s.(...). "L'effetto corona" è una forma di scarica parziale che si verifica in gas intorno a conduttori lontani da isolamento solido o liquido.(...) Le scariche parziali sono spesso accompagnate dall'emissione di suono, luce, calore e da reazioni chimiche.*

Le scariche parziali sono dovute ad anomalie localizzate del campo elettrico. In tali anomalie il valore del campo elettrico è tale da superare il limite di rigidità dielettrica dell'isolamento interposto portando ad una scarica localizzata. Generalmente a causa delle disuniformità nella distribuzione spaziale del campo elettrico e dei possibili difetti dei dielettrici, i valori di potenziale richiesti alla geometria elettrodica per innescare il fenomeno di scarica parziale sono molto inferiori al valore richiesto per avere una scarica completa del dielettrico.

Il fenomeno delle scariche parziali in ogni caso provoca delle scariche elettriche localizzate le quali mettono in gioco una determinata quantità di energia funzione dell'intensità della carica e della capacità della porzione del dielettrico interessato. Tale energia, rilasciata in geometrie dell'ordine di qualche millimetro, in tempi dell'ordine dei nanosecondi, mette in gioco, elevate densità di potenza che innalzano la temperatura del punto di scarica interessato. Tale innalzamento di temperatura provoca variazioni chimiche e fisiche delle strutture circostanti che possono subire mutamenti temporanei o permanenti.

In tale contesto è necessaria una classificazione dei comuni materiali isolanti in due categorie le quali possano tener conto delle conseguenze temporanee e permanenti di un arco elettrico. In base al comportamento chimico e fisico dei comuni materiali costituenti gli isolamenti delle apparecchiature elettriche si dividono i materiali in "Autoripristinanti" e "Non autoripristinanti".[9][66]

I materiali autoripristinanti sono materiali i quali, per loro natura, in seguito ad un arco elettrico modificano temporaneamente le proprie caratteristiche fisiche e

chimiche ma una volta terminata la scarica, le ripristinano completamente ritornando allo stato chimico e fisico precedente la scarica.

I materiali non autoripristinanti, invece, a seguito di una scarica elettrica subiscono trasformazioni chimiche e fisiche permanenti che generalmente ne inficiano le proprietà dielettriche.

Risulta evidente che, mentre per i materiali autoripristinanti il fenomeno delle scariche parziali può essere considerato innocuo, per i materiali non autoripristinanti esso costituisce un degrado dell'isolamento con conseguente irreversibile perdita di proprietà isolante del complessivo sistema isolante.

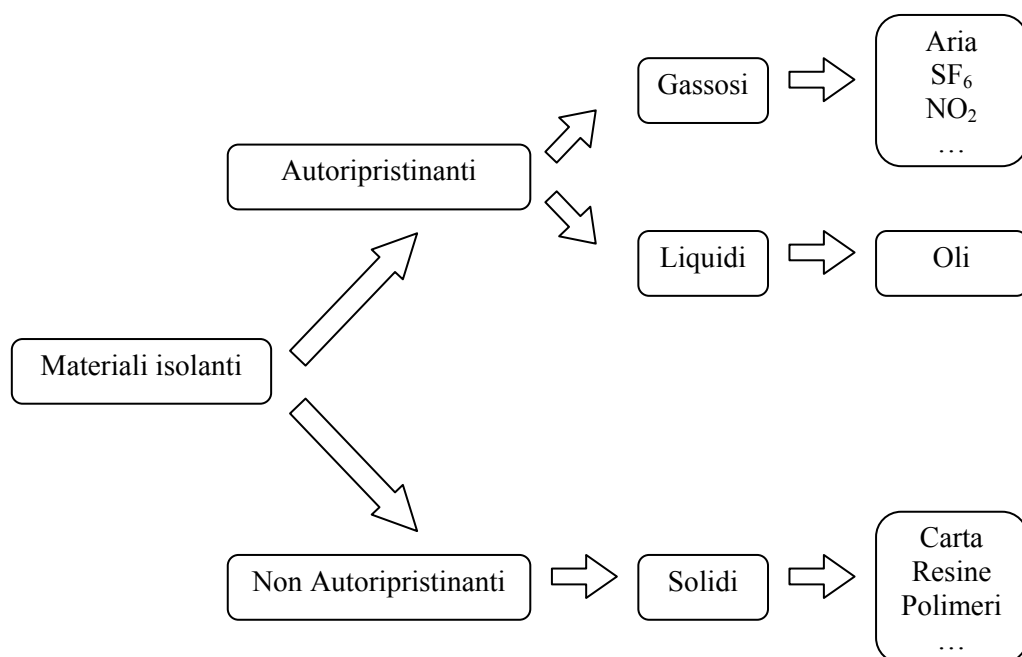


Figura 2-1: Tipologie di materiali isolanti

In molti casi pratici l'isolamento dielettrico è composto da una parte appartenente all'oggetto in senso stretto (dielettrico interno) e da una parte propria dell'ambiente in cui l'oggetto risulta collocato (dielettrico esterno).

Un caso pratico è il caso di oggetti collocati in ambienti liquidi oppure gassosi dove il dielettrico dell'ambiente costituisce una parte fondamentale dell'isolamento.

Per tali configurazioni, l'isolamento proprio dell'oggetto deve essere coordinato con l'ambiente circostante onde evitare che il cedimento del dielettrico esterno provochi il collasso dell'intero sistema.

Essendo tipicamente il dielettrico ambientale di tipo autoripristinante mentre quello proprio all'oggetto di tipo non autoripristinante, si avrà che scariche parziali nell'uno oppure nell'altro mezzo non avranno la stessa capacità degradante. Si suddividono quindi le scariche parziali in due sottofamiglie, una legata alle scariche parziali interne e l'altra legata alle scariche parziali esterne all'oggetto in esame.

Si avranno dunque le seguenti categorie di scariche parziali:

- A) Scariche all'interno del dielettrico: Scariche interne, “*Electrical Trees*”
- B) Scariche all'esterno del dielettrico: Scariche superficiali, Scariche di tipo “*Corona*”

2.2 Tipologie di scariche parziali

Le tipologie di scariche parziali possono essere suddivise in base al mezzo interessato dallo sviluppo del fenomeno. Si avranno pertanto scariche interne, esterne e superficiali al dielettrico.

2.2.1 Scariche parziali interne

Le scariche parziali che si definiscono interne sono causate da difetti del materiale isolante solido dovuti alla presenza all'interno del dielettrico principale di altri materiali di natura estranea tipicamente associati al processo di lavorazione dei dielettrici. [8][83][84]

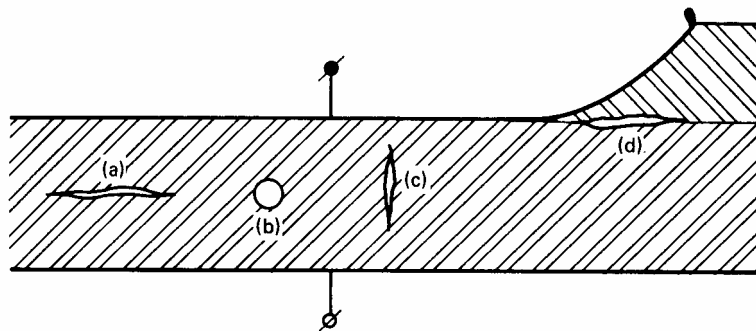


Figura 2-2: Difetti interni ad un dielettrico solido

In particolare, se si considerano i dielettrici solidi, grande rilevanza deve essere data alle occlusioni di materiali a costante dielettrica inferiore a quella del dielettrico principale. Risulta, da semplici calcoli, che per tali inclusioni il campo elettrico è generalmente superiore a quello del dielettrico circostante mentre per la natura del materiale costituente l'occlusione la rigidità dielettrica è minore.

Da quanto esposto consegue che il limite di rigidità possa essere superato nella cavità quando nel dielettrico circostante il campo risulti ancora di entità modesta e pertanto la scarica rimane limitata alla regione occupata dall'occlusione.

Per una stima del valore di campo elettrico all'interno di una cavità si riporta un caso esemplificativo.

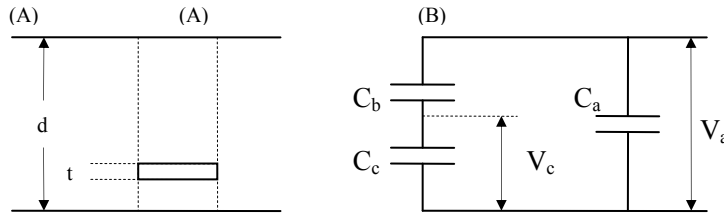


Figura 2-3: Esempio di scarica all'interno di una cavità, circuito equivalente.

Si consideri la Figura 2-3 (A), che rappresenta una occlusione gassosa di spessore t all'interno di un dielettrico di spessore d in una configurazione elettrodica semplificata che assume una distribuzione piana del campo elettrico. Nella Figura 2-3 (B), viene rappresentato il circuito equivalente dove C_c rappresenta la capacità della occlusione, C_b la capacità del dielettrico avente la stessa area A dell'occlusione ma altezza $d-t$. C_a rappresenta la capacità della restante parte del dielettrico.[6]

Nell'ipotesi semplificativa che $t \ll d$ si ottiene che il campo elettrico all'interno della cavità possa essere rappresentato con la seguente espressione:

$$\vec{E}_c = \epsilon_r \vec{E}_a \tag{Eq. 2-1}$$

Dove E_a rappresenta il campo nel dielettrico circostante la cavità ed ϵ_r la permittività relativa del materiale esterno all'occlusione. Le capacità C_b e C_c sono riportate nelle equazioni 2-2 e 2-3.

$$C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d - t} \tag{Eq. 2-2}$$

$$C_c = \frac{\epsilon_0 A}{t} \tag{Eq. 2-3}$$

la tensione sulla cavità risulta essere:

$$V_c = \frac{C_b}{C_c + C_b} V_a = \frac{V_a}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{t} - 1 \right)} \tag{Eq. 2-4}$$

Considerando che, all'interno della cavità il campo critico oltre il quale avviene la scarica sia E_{cb} la tensione a cui si avrà la scarica è:

$$V_{ai} = \vec{E}_{cb} t \left\{ 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{t} - 1 \right) \right\} \tag{Eq. 2-5}$$

Se si considera la cavità sferica e la permittività della cavità molto inferiore alla permittività del dielettrico circostante ($\epsilon_r \gg \epsilon_{rc}$) si ottiene:

$$\vec{E}_c = \frac{3\epsilon_r \vec{E}}{\epsilon_{rc} + 2\epsilon_r} \cong \frac{3\vec{E}}{2} \quad \text{Eq. 2-6}$$

dove con E si indica il campo elettrico del materiale circostante la cavità. La Figura 2-4 fornisce un esempio di quanto esposto. In figura è indicata con V_a la tensione di alimentazione del dielettrico, con V_c la tensione della cavità e con V^+ la tensione alla quale avviene la scarica all'interno della cavità. Alimentando l'oggetto con una tensione sinusoidale si ottiene una tensione proporzionale all'interno della cavità fintanto che, tale tensione, non raggiunge il valore di scarica V^+ . Per tale valore di tensione il dielettrico contenuto nella cavità, non essendo più in grado di mantenere l'isolamento, scarica e la tensione al suo interno si riduce praticamente a zero. A tal punto il processo può terminare o proseguire a seconda dei prodotti chimici sviluppatasi durante la scarica. Se infatti i prodotti chimici sviluppati a seguito della scarica presentano residui carboniosi o comunque conduttivi, la superficie della cavità diviene conduttrice costituendo così un cortocircuito che estingue definitivamente la scariche parziali nella occlusione.

Se invece i prodotti della scarica sono di natura isolante o in quantità modesta, la situazione si riporta allo stato originale e nella cavità la tensione ricomincia a crescere in funzione della derivata prima della tensione di alimentazione. In questo secondo caso la scarica può ripetersi più volte per ciclo a seconda del rapporto esistente tra tensione del vacuolo e tensione di scarica dello stesso.

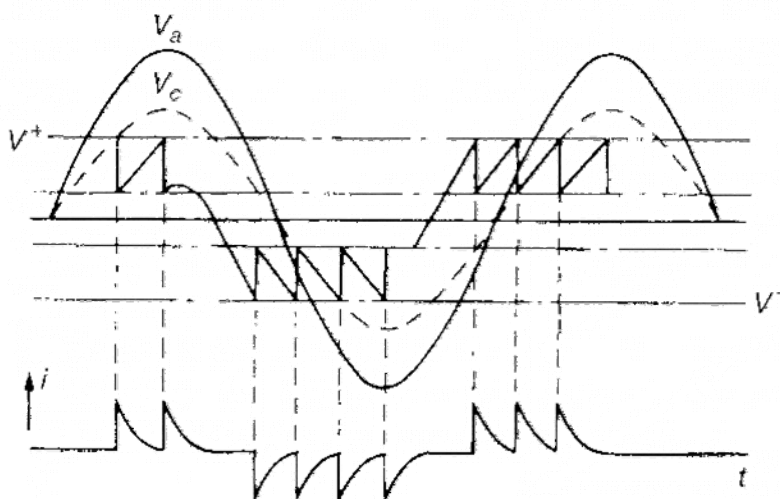


Figura 2-4: Sequenza di scarica in una cavità all'interno di un dielettrico solido

Nel processo di scarica, le estremità del vacuolo si possono considerare come un anodo ed un catodo attraverso i quali vi è uno spostamento di carica. È possibile che l'energia sviluppata da tale spostamento, unita ad un inevitabile innalzamento termico e conseguente modifica delle condizioni ambientali possa essere sufficiente a

rompere i legami chimici alle pareti del vacuolo. Oltre a questo, il “bombardamento elettronico” del catodo da parte di ioni positivi e dell’anodo da parte di elettroni rende disponibili dei reagenti che possono combinarsi con le molecole costituenti il dielettrico principale. In particolare si è riscontrato che un fenomeno di scarica in aria produce composti ozono (O_3) ed ossidi di azoto (NO_2), entrambi chimicamente molto reattivi.

Alla modifica chimica del dielettrico si devono sommare fenomeni di erosione meccanica che tendono ad aumentare il volume della cavità rendendo la scarica sempre più energetica. Tali fenomeni di erosione si classificano con il nome di “*Electrical Trees*”.[10] [7]



Figura 2-5: Esempio di “*electrical trees*” in cavi isolati in polietilene

In particolare per le occlusioni gassose nei dielettrici solidi esistono studi che quantificano la tensione di scarica in funzione del gas e degli agenti ambientali.

È risultato dagli studi del prof. Mason [1][22][25] che una scarica in un vacuolo immerso in un isolante solido avviene circa alla stessa tensione di una scarica tra elettrodi metallici aventi analoga distanza di isolamento.

Dalle conclusioni di tale studio si può stabilire quale sia la tensione di scarica di un vacuolo conoscendone le condizioni ambientali iniziali ed utilizzando le curve di Paschen. [2] [23]

Ad esempio si consideri un vacuolo avente dimensioni di 0,1 mm immerso in polietilene avente permittività relativa $\epsilon = 2,2$. e si supponga che la pressione del gas nel vacuolo sia 1 atm. Dalle curve di Paschen risulta che la rigidità dielettrica è 6,8 kV/mm. In base all’equazione 2-1 si ricava che, per avere tali condizioni nel vacuolo, il campo nel dielettrico circostante dovrebbe essere:

$$\vec{E}_a = \frac{\vec{E}_c}{\epsilon_r} \cong \frac{6,8}{2,2} \approx 3kV / mm \quad \text{Eq. 2-7}$$

Il valore ricavato è largamente inferiore agli usuali campi di lavoro del polietilene che sono compresi nell’intervallo 3,5-7 kV / mm e dunque in presenza di vacuolo all’interno dell’isolamento è sostanzialmente certa la formazione di scariche parziali.

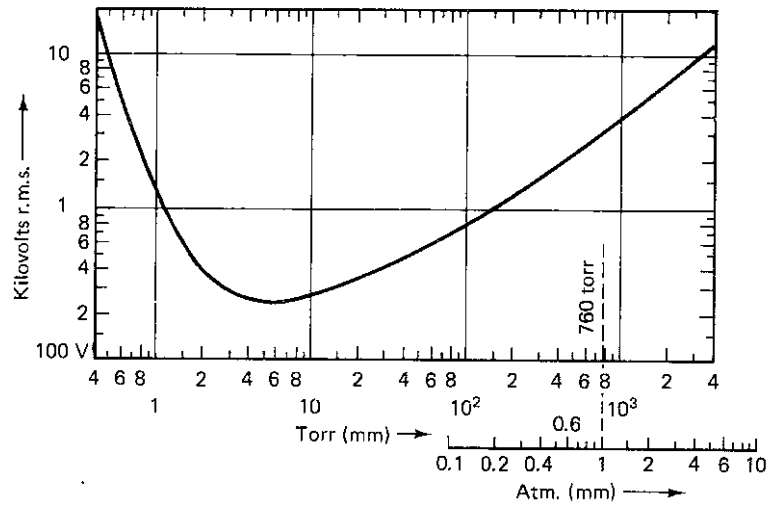


Figura 2-6: Curva di Paschen relativa all'aria a 20 °C, è riportata la tensione di scarica in funzione della distanza tra gli elettrodi nelle condizioni di pressione di 1 Atmosfera

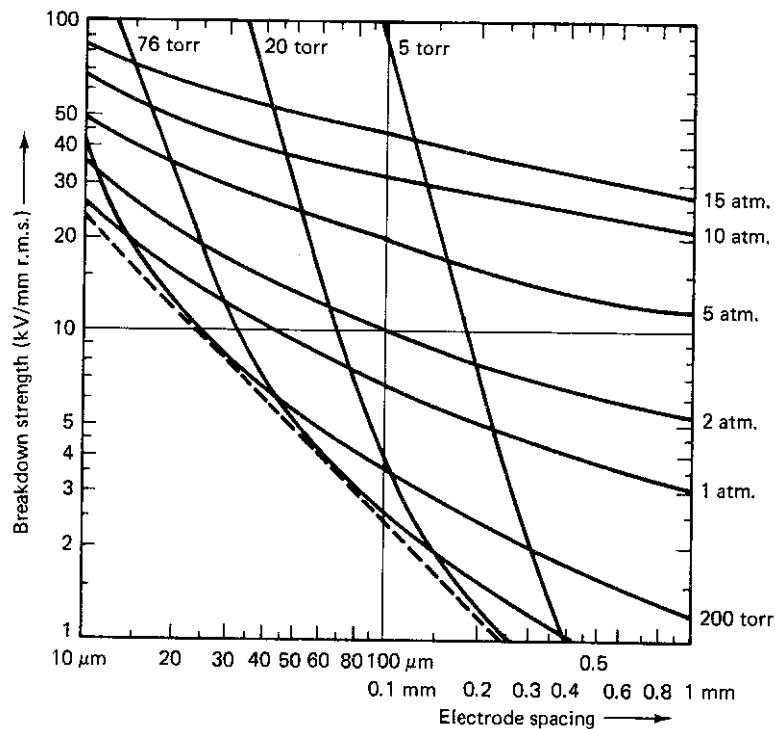


Figura 2-7: Tensione di scarica in aria in funzione della distanza tra gli elettrodi e della pressione atmosferica. (Curve derivate dalla funzione di Paschen).

Per ragioni di ordine pratico è importante che la tenuta dielettrica del sistema isolante sia garantita per un periodo di tempo equivalente almeno alla vita utile dell'apparecchiatura. In pratica tale periodo dipende dalle applicazioni e dal particolare tipo di oggetto considerato ma, mediamente, si può considerare un valore indicativo di circa una o due decine di anni.

Al fine esemplificativo si riporta uno studio empirico, condotto sull'isolamento dei cavi, che rappresenta il deterioramento delle proprietà dielettriche dell'isolamento in funzione del tempo data una sollecitazione di natura elettrica. La relazione di invecchiamento è:

$$tE_b^n = k \quad \text{Eq. 2-8}$$

dove:

- t rappresenta il tempo
- E_b rappresenta la sollecitazione applicata
- n rappresenta un esponente funzione del tipo di dielettrico considerato, dell'ambiente di installazione e del processo produttivo impiegato per la fabbricazione.

Sperimentalmente si è osservato che le proprietà di un dielettrico decadono esponenzialmente nel tempo in funzione della sollecitazione applicata.

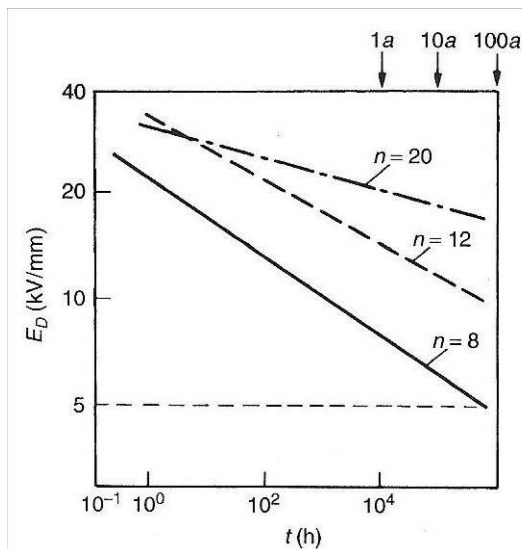


Figura 2-8: Durata di vita (t) in relazione alla sollecitazione applicata (E_D) per un cavo in polietilene prodotto da diversi costruttori (diverso coefficiente n)

Risulta pertanto evidente come il fenomeno delle scariche parziali all'interno di un dielettrico produca effetti degradanti che possono portare in tempi rapidi ad una degenerazione dell'isolante.

Sempre a titolo esemplificativo si vuole ora dare un esempio di calcolo dell'energia messa in gioco da un processo di scarica parziale.

Riprendendo la figura 2-3, si ha che la capacità equivalente "vista" da un vuoto all'interno di un isolamento è data da:

$$C = C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \quad \text{Eq. 2-9}$$

mentre la carica messa in gioco in seguito ad una scarica parziale è

$$q_c = \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) \delta V_c$$

Eq. 2-10

ossia la carica messa in gioco dipende oltre che dalla capacità equivalente del vacuolo anche dalla tensione nell'istante immediatamente precedente alla scarica.

Nell'ipotesi che $C_a \gg C_b$, caso quasi sempre verificato, l'equazione 2-9 può essere ulteriormente semplificata:

$$q_c = (C_b + C_c) \delta V_c$$

Eq. 2-11

come si vedrà la carica q_c non può essere misurata direttamente mentre si può misurare solo la variazione di tensione ai capi dell'oggetto completo.

Tale tensione può essere messa in relazione alla tensione nel vacuolo dalla relazione:

$$\delta V_a = \left(\frac{C_b}{C_a + C_b} \right) \delta V_c$$

Eq. 2-12

la carica q_a che appare ai capi dell'oggetto in prova può essere scritta come:

$$q_a = \left(C_a + \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} \right) \delta V_a \approx (C_a + C_b) \delta V_a$$

Eq. 2-13

sostituendo δV_a si ottiene:

$$q_a \approx (C_a + C_b) \delta V_a = (C_a + C_b) \left(\frac{C_b}{C_a + C_b} \right) \delta V_c = C_b \delta V_c$$

Eq. 2-14

dove q_a è chiamata carica apparente o intensità di scarica.

Se si indica con $\pm u$ la tensione della cavità prima della scarica e con $\pm v$ la tensione della cavità dopo la scarica, la tensione di scarica può essere indicata come:

$$\delta V_c = u - v$$

Eq. 2-15

il trasferimento di energia w è dato dalla differenza di energia prima e dopo la scarica:

$$w = \frac{1}{2}C_c u^2 - \frac{1}{2}C_c v^2 = \frac{1}{2}C_c(u+v)(u-v) = \frac{1}{2}C_c(u+v)\delta V_c$$

Eq. 2-16

se la tensione residua dopo la scarica può essere trascurata, ne segue:

$$w = \frac{1}{2}C_c u \delta V_c$$

Eq. 2-17

ricordando che u può essere ricavato dalla tensione di alimentazione tramite

$$V_c = \frac{C_b}{C_b + C_c} V_{i(picco)}$$

Eq. 2-18

Si ottiene:

$$w = \frac{1}{2}C_c \delta V_c \frac{C_b}{C_b + C_c} V_{i(picco)}$$

Eq. 2-19

$$w \approx \frac{1}{2}C_b \delta V_c V_{i(picco)}$$

Eq. 2-20

ora, dalla formula precedente si conosce che la carica apparente può essere rappresentata come il prodotto tra la capacità complementare al vacuolo e la variazione di tensione ai capi di questo.

$$w \approx \frac{1}{2}q_a V_{i(picco)}$$

Eq. 2-21

$$w \approx \frac{1}{\sqrt{2}}q_a V_{i(rms)} \approx 0,71q_a V_{i(rms)}$$

Eq. 2-22

L'equazione 2-22 fornisce un'idea dell'energia sviluppata da una scarica parziale. Per esempio, se si rilevasse una scarica parziale avente intensità 10 pC con una tensione di innesco di 7,1 kV, questa sprigionerebbe una energia pari a 50 nJ. Tale energia potrebbe sembrare irrisoria ma, se si considera che il tempo di evoluzione di un fenomeno di scarica parziale può essere dell'ordine della decina di nanosecondi, si ha che la potenza della scarica è circa di 5W limitata su un volume di qualche mm² ed i riscaldamenti conseguenti possono essere tali da danneggiare permanentemente l'isolamento circostante al vacuolo.

Se, oltre a considerare i vucooli che sono solitamente sede dell'attività di scarica, si considerano pure le zone attigue, queste, per quanto detto sono soggette ad un sovrariscaldamento rispetto alle altre zone del dielettrico e le temperature che possono essere raggiunte possono facilmente essere superiori alle temperature di progetto ed addirittura alle temperature della classe isolante del sistema.

In queste condizioni oltre che ad un invecchiamento per degrado elettrico si aggiunge anche un degrado legato all'invecchiamento accelerato (in forma esponenziale) dovuto alla eccessiva sollecitazione termica.

Deve essere notato che, come per quanto esposto riguardo agli "Electrical Trees", il fenomeno delle scariche parziali interne è un fenomeno degradante che, nel tempo, se non si estingue in seguito al deposito di residui carboniosi nelle cavità, aumenta le dimensioni dei vucooli e dunque le energie messe in gioco.

Nella pratica si osserva infatti che, nel tempo, l'andamento dell'intensità delle scariche parziali è di tipo monotono crescente.

Si conclude che le scariche parziali di origine interna sono particolarmente nocive per i dielettrici delle macchine elettriche in quanto oltre ad invecchiare e degradare il dielettrico nelle parti più critiche (ovvero più sollecitate dal campo), generalmente innescano una retroazione positiva che nel tempo porta ad una sempre maggiore sollecitazione degradante.

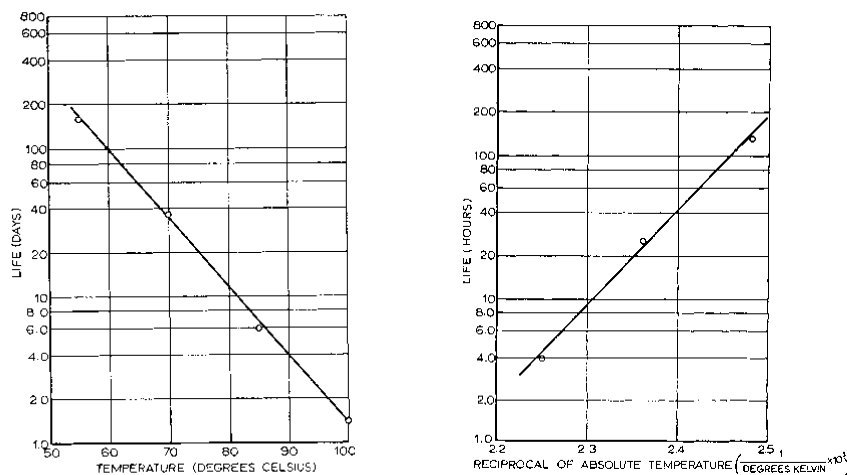


Figura 2-9: Esempi durata di vita di materiali isolanti ad una determinata sollecitazione elettrica, in funzione della temperatura.

2.2.2 Scariche parziali esterne

Con il termine scariche parziali esterne si intendono tutti quei fenomeni di superamento della rigidità dielettrica dell'isolante esterno al componente in prova. A tale categoria di scariche fanno parte pure le scariche superficiali, le quali saranno trattate separatamente.

Le scariche parziali esterne che ricoprono la maggior importanza sono le scariche di tipo "Corona". Queste sono scariche parziali in aria, o nel mezzo isolante gassoso, che si manifestano per il superamento della rigidità dielettrica dell'aria in corrispondenza ad elettrodi appuntiti siano essi in tensione oppure a potenziale di terra, in funzione del campo elettrico locale e delle distanze da elettrodi a diversa tensione.

I fenomeni Corona possono essere molto pericolosi per apparecchiature con tensione superiore a 100 kV in quanto, se non controllati, possono mettere a disposizione carica libera che, accelerata dal campo elettrico principale, può innescare la scarica completa dell'apparecchiatura.

La tensione di innesco dei fenomeni corona può essere determinata in via semplificata partendo dalle curve di Paschen, tenendo conto però che vi è una forte influenza del raggio di arrotondamento degli elettrodi. [8]

Raggio di arrotondamento	Inizio del fenomeno Corona (V r.m.s.)
10 μm	circa 450 V
50 μm	circa 1,0 kV
100 μm	circa 1,4 kV
500 μm	circa 3,5 kV
1 mm	circa 5,5 kV
5 mm	circa 15 kV

Tabella 2: Raggio di arrotondamento degli elettrodi in funzione dell'innesco del Corona.

Le scariche parziali esterne tipicamente non risultano essere pericolose per l'isolamento delle apparecchiature elettriche in quanto, come noto, coinvolgono l'isolamento gassoso che è autoripristinante.

Per quanto riguarda invece la tollerabilità delle stesse si deve considerare di volta in volta l'intensità e l'ubicazione delle apparecchiature che ne sono origine.

Le scariche parziali in aria infatti sono sovente origine di disturbo sonoro ed elettromagnetico nonché di inquinamento da ozono e prodotti di combinazione chimica che sono funzione del livello di inquinamento della particolare atmosfera.

In dettaglio va ricordato che con il nome di effetto Corona si distinguono tutte le scariche parziali che si sviluppano in aria. Nel dettaglio le scariche in aria possono essere divise nei seguenti tre tipi anche in base alla carica messa in gioco dal fenomeno disruptivo.

1. Scariche di tipo Townsend che mettono in gioco cariche dell'ordine dei pochi pC.
2. Scariche di tipo Streamer che tipicamente hanno intensità compresa tra 10 e 100 pC
3. Scariche di tipo Leader che presentano intensità che in molti casi risultano essere superiori a 1000 pC.

2.2.3 Scariche parziali superficiali

Le scariche parziali superficiali sono un particolare insieme di scariche parziali che coinvolgono la superficie di separazione tra mezzi dielettrici. Tale categoria di scariche parziali è abbastanza frequente in quanto, nelle pratiche applicazioni, il confine tra mezzi isolanti di natura diversa costituisce solitamente una zona critica per il controllo dei campi elettrici.

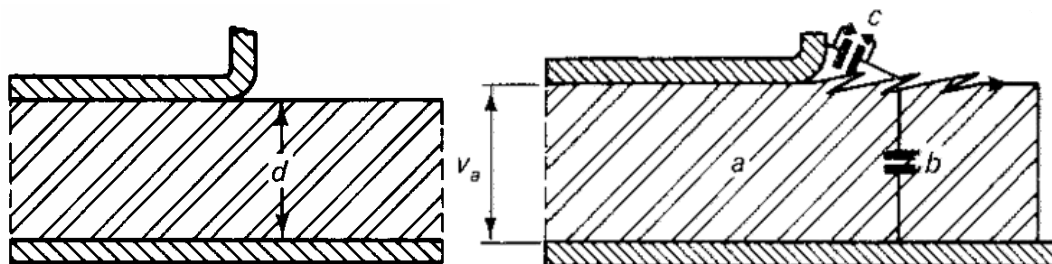


Figura 2-10: Schematizzazione di un fenomeno di scarica superficiale

Le scariche parziali superficiali sono originate dalle componenti del campo elettrico parallele alle superfici isolanti, come ad esempio avviene negli isolatori, nelle testate dei cavi, negli avvolgimenti di media tensione dei trasformatori in resina oppure in zone ove un dielettrico di diversa natura sia in contatto con il dielettrico principale.

In particolare le scariche parziali superficiali sono pericolose in quanto in seguito alla loro formazione possono “tracciare” il materiale attraverso il deposito residui conduttivi oppure modificare superficialmente le caratteristiche del dielettrico, riducendo quindi di conseguenza le distanze isolanti tra i terminali.

I fenomeni di scarica superficiale possono essere incrementati a causa di particolari installazioni delle apparecchiature, specialmente in ambienti umidi o inquinati, dove un fenomeno di scarica superficiale limitato può estendersi per mezzo della modifica chimica delle polveri superficiali o attraverso il contributo dei percorsi conduttivi forniti dall’umidità delle superfici.

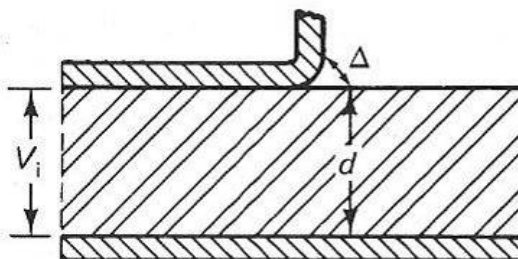


Figura 2-11: Scarica di un tratto di aria di spessore Δ posto in serie ad un isolante solido di spessore d .

Il limite di tensione di innesco dei fenomeni di scarica superficiale, data la loro complessità, può essere calcolato solo in pochi casi. A titolo di esempio si consideri una configurazione dielettrica di tipo piano – piano come quella riportata in

figura 2 - 11. Una distanza (indicata dalla capacità “C”) viene cortocircuitata da una scarica. Se la disomogeneità del campo può essere trascurata si ottiene che:

$$V_i = \Delta E_i + d \frac{E_i}{\varepsilon} \quad \text{Eq. 2-23}$$

dove E_i rappresenta la rigidità dielettrica della distanza Δ . Se si introduce la tensione di scarica U_i del tratto di aria Δ segue che:

$$V_i = U_i + \frac{d}{\varepsilon \Delta} U_i = U_i \left(1 + \frac{d}{\varepsilon \Delta} \right) \quad \text{Eq. 2-24}$$

comparando la formula con la curva di Paschen, si osserva che data una tensione per una determinata condizione ambientale, esiste una distanza Δ per la quale si ha la minima tensione di scarica (minimo indicato con la curva tratteggiata).

Spessore dell'isolamento diviso per ε	Inizio della scarica ai terminali (V r.m.s.)
$d/\varepsilon \sim 0$	circa 250 V
$d/\varepsilon = 0,05 \text{ mm}$	circa 1,0 kV
$d/\varepsilon = 0,10 \text{ mm}$	circa 1,4 kV
$d/\varepsilon = 0,20 \text{ mm}$	circa 2,0 kV
$d/\varepsilon = 0,50 \text{ mm}$	circa 3,5 kV
$d/\varepsilon = 1,00 \text{ mm}$	circa 5,5 kV

Tabella 3: Tensione di inizio della scarica superficiale in funzione del dielettrico e dello spessore di isolamento nell'ipotesi di campo piano.

Qualora gli elettrodi avessero dei terminali appuntiti i valori sopra esposti potrebbero essere inferiori del 20-50%. Confrontando i valori di tensione ai quali può manifestarsi una scarica interna ed i valori di tensione ai quali può manifestarsi una scarica superficiale, si nota, come accade spesso nelle pratiche applicazioni, che le scariche di tipo superficiale necessitano mediamente di tensioni di innesco inferiori per cui si manifestano prima delle scariche interne.

Come già esposto, la tensione di innesco è la tensione alla quale il fenomeno ha origine.

Si noti che la presenza di scariche superficiali non implica che la maggior componente del campo elettrico sia quella tangenziale alle superficie.

Infatti una volta che la ionizzazione sia stata innescata da valori di campo sufficientemente elevati (tangenziali oppure normali) è sufficiente una modesta componente del campo elettrico tangenziale alla superficie per propagare la scarica.

Discende quindi che le scariche superficiali necessitano di un “innesco” ma la loro propagazione, una volta avviato il fenomeno è “indipendente” dal campo ortogonale e dipende quasi esclusivamente dal campo parallelo alle superfici.

Oltre che in aria le scariche di tipo superficiale possono manifestarsi pure in altri dielettrici di diversa natura come liquidi isolanti (Oli) oppure gas (Esafioruro).

2.2.4 Considerazioni sulle scariche parziali

Come anticipato le scariche parziali si presentano in zone dove la intensità del campo elettrico raggiunge valori tali da superare la rigidità dielettrica del mezzo isolante. In Figura 2-12 è dato un esempio di alcune tipiche configurazioni elettrodiche che possono dare origine al fenomeno delle scariche parziali. [17]

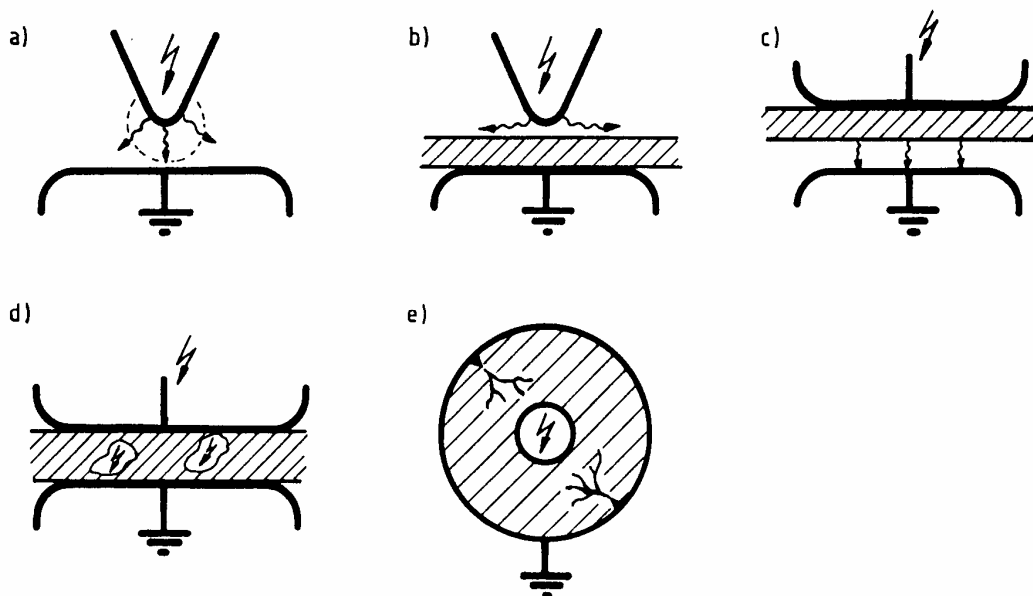


Figura 2-12: Schematizzazione di alcune possibili situazioni che possono dare origine a fenomeni di scarica parziale: a) corona, b) superficiale, c) scarica in materiali laminati, d) scarica in cavità o vucoili, e) scarica in cavo con dielettrico solido “treeing channels”

Nelle Figura 2-13, Figura 2-14, Figura 2-15, sono dati alcuni esempi della corrente associata alle scariche parziali in funzione dei tempi di evoluzione del fenomeno.

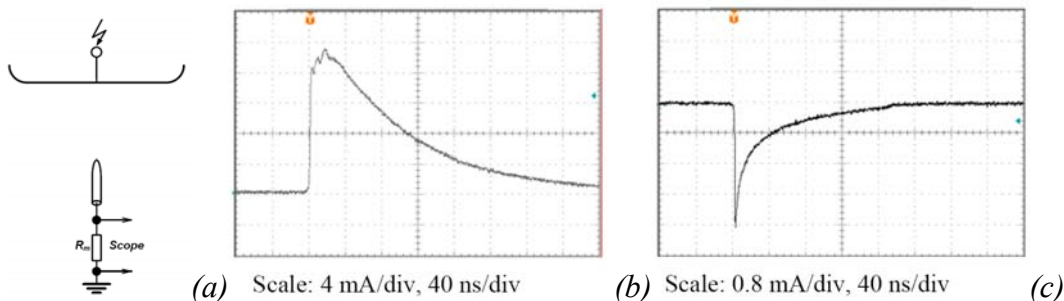


Figura 2-13: Oscillogrammi della corrente relativa ad una scarica in aria. (a) Circuito di prova, (b) Scarica positiva, (c) Scarica negativa.

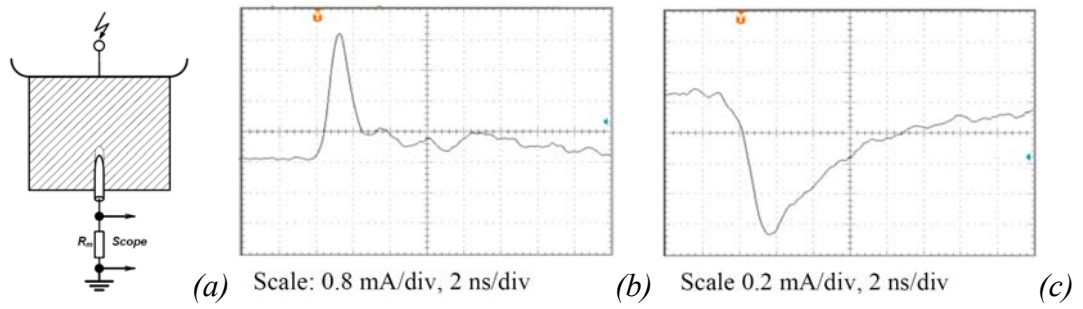


Figura 2-14: Oscillogrammi della corrente relativa ad una scarica interna ad un dielettrico solido. (a) Circuito di prova, (b) Scarica positiva, (b) Scarica negativa.

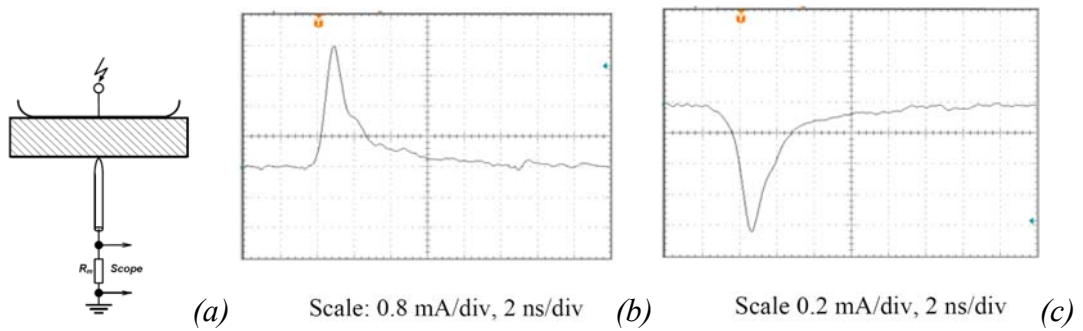


Figura 2-15: Oscillogrammi della corrente relativa ad una scarica superficiale. (a) Circuito di prova, (b) Scarica positiva, (b) Scarica negativa.

2.3 Metodi non elettrici per il rilievo e la localizzazione delle scariche parziali

Le scariche parziali producono, come conseguenza della scarica, numerosi fenomeni fisici secondari il cui rilievo può essere utilizzato per l'identificazione dei fenomeni impulsivi. [15]

I principali effetti causati dalle scariche parziali che possono essere rilevati sono:

- 1) Trasformazioni chimiche dei dielettrici
- 2) Modifica nelle pressioni dei gas (impulsi di pressione)
- 3) Riscaldamenti localizzati
- 4) Emissione di luce
- 5) Emissioni acustiche
- 6) Emissioni elettromagnetiche.

In funzione degli effetti menzionati sono state sviluppate negli anni delle tecniche non elettriche di rilievo delle scariche, tecniche utilizzate soprattutto in situazioni particolari nelle quali sia reso difficile l'utilizzo di sistemi elettrici.

Nella maggioranza dei casi le tecniche non elettriche di rilievo delle scariche parziali si sono dimostrate molto efficaci nella localizzazione delle scariche ma hanno dimostrato forti limiti nella determinazione della intensità delle stesse.

2.3.1 Rilevo delle scariche parziali con metodi acustici.

Le scariche parziali generano impulsi di pressione che in taluni casi ricadono nel campo di frequenze proprie dall'orecchio umano (20 Hz – 20 kHz) e dunque udibili.

Il rilievo acustico delle scariche parziali è possibile soltanto se le scariche sono in aria o se l'attenuazione dei mezzi interposti è contenuta, in questi casi, possono essere udite scariche parziali di intensità superiore a 50 pC in ambienti estremamente silenziosi e, superiori a 80-120 pC in ambienti normali.

In pratica il rilievo delle scariche parziali con metodi acustici viene eseguito con strumenti sensibili nello spettro degli ultrasuoni (30 – 50 kHz); i segnali rilevati da questa strumentazione possono essere convertiti in via elettronica in impulsi sonori nello spettro udibile ed eventualmente registrati con una sensibilità in aria che può raggiungere qualche pC. [99][112][140]

A seconda che si voglia rilevare la presenza delle scariche parziali in un oggetto oppure che si voglia determinarne l'ubicazione nello stesso, si impiegano microfoni di tipo a largo raggio oppure direzionali ottenendo usualmente delle risoluzioni spaziali di qualche centimetro. Rilievi maggiormente accurati possono essere ottenuti mediante l'impiego di strumentazione basata sul rilievo ottico degli impulsi.

I metodi acustici per il rilievo delle scariche parziali sono solitamente utilizzati come aiuto per la risoluzione dei problemi a seguito del rilievo delle scariche con metodi elettrici in quanto, sebbene la misura delle scariche parziali con metodi acustici possa essere fortemente influenzata dalla presenza di rumori, riflessioni ed attenuazioni vi è, rispetto ad i metodi elettrici, una naturale insensibilità del metodo ai disturbi lontani, in particolare provenienti dalla sorgente di alimentazione.

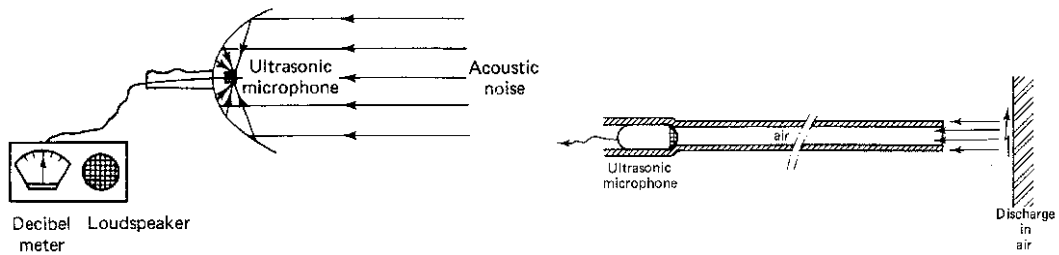


Figura 2-16: Esempio di rilievo ultrasonico delle scariche parziali, con microfono a largo raggio e direzionale.

Nel caso di isolamenti solidi di modesto spessore, come ad esempio i cavi, i sistemi acustici si rivelano molto efficaci al fine di determinare la posizione delle scariche parziali in quanto può essere ispezionato gran parte del dielettrico e le cavità, dato il modesto spessore dell'isolamento, risultano essere vicine alla superficie.

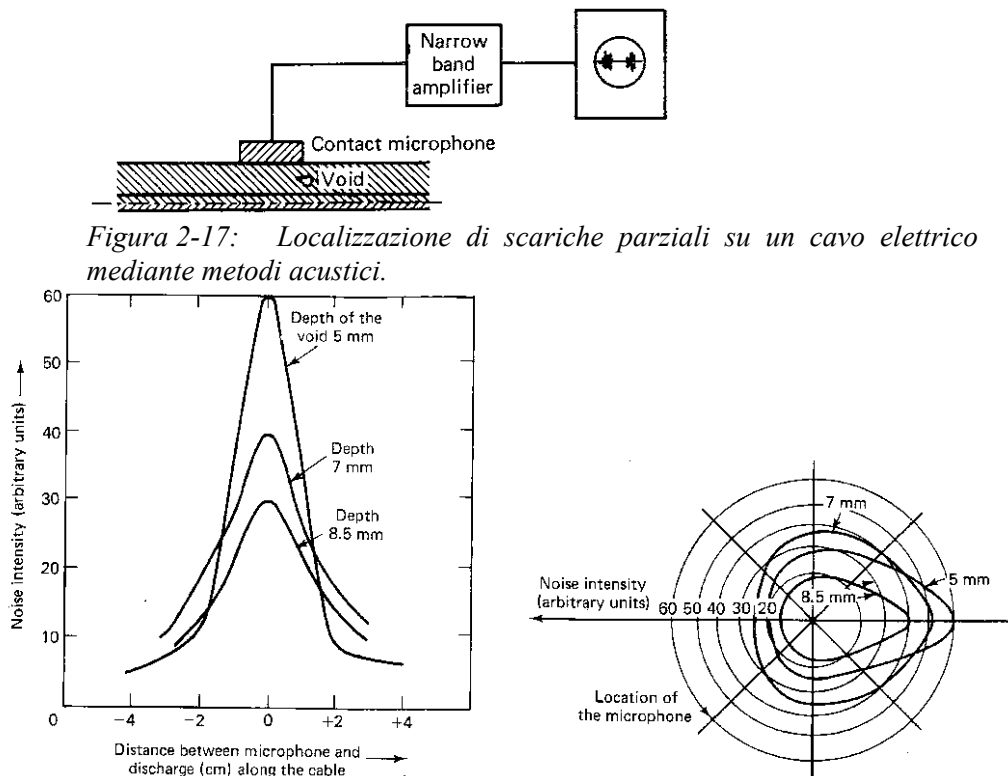


Figura 2-17: Localizzazione di scariche parziali su un cavo elettrico mediante metodi acustici.

Figura 2-18: Localizzazione di scariche parziali su un cavo elettrico mediante metodi acustici: andamento delle intensità in funzione dello spessore della cavità e lungo la circonferenza

Nella pratica i metodi acustici si sono rilevati essere molto efficaci nella localizzazione delle scariche parziali di medio - alta intensità e soprattutto, considerando altri metodi di localizzazione, molto sensibili alle scariche parziali superficiali e vicine alla superficie del dielettrico.

2.3.2 Rilevo delle scariche parziali con metodi ottici.

Le scariche parziali, superficiali od in aria, emettono una quantità di luce che può essere rilevata, in stanza buia, anche ad occhio nudo.[130]

Considerando la elevata sensibilità dell'occhio umano si è rilevato che dopo una ambientazione in stanza buia per circa un quarto d'ora ad occhio nudo sono rilevabili impulsi di scarica parziale di intensità dell'ordine dei $500 \div 1000$ pC.

Il limite di sensibilità dell'occhio umano è condizionato dalla brevissima durata degli impulsi luminosi e può essere superato mediante l'utilizzo di opportuni strumenti integratori come ad esempio le pellicole fotografiche ad alta sensibilità. Con tecniche di sovrapposizione dell'immagine si possono ottenere ottimi risultati arrivando a sensibilità dell'ordine di 1 pC e risoluzioni di qualche millimetro.

Il limite della misura ottica per integrazione risiede nella difficoltà di discriminare fenomeni frequenti nel tempo che, con metodi di misura integrativi, risultano sovrapposti.

Il limite, dovuto ai lunghi tempi di integrazione, può essere superato mediante l'utilizzo di opportuni strumenti detti fotomoltiplicatori, ossia strumenti in grado di rilevare intensità luminose molto esigue, soprattutto nel campo delle radiazioni ultraviolette.

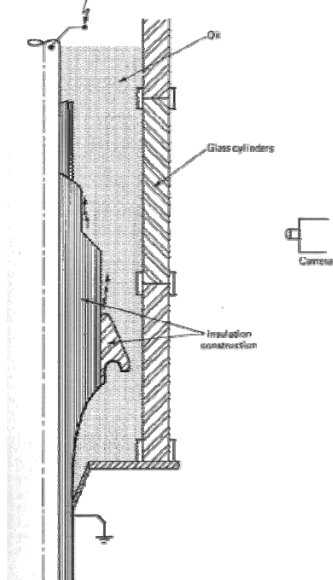


Figura 2-19: Localizzazione di scariche parziali su una testata di un cavo elettrico mediante metodi ottici: il rilievo è stato eseguito mediante l'ausilio di un cilindro di vetro per consentire il passaggio della luce.

Tramite l'utilizzo dei fotomoltiplicatori è possibile localizzare, con estrema precisione, scariche parziali di modestissima intensità fino ai limiti di sensibilità pari a 0,05 – 0,005 pC.

In conclusione i metodi di rilevamento delle scariche parziali basati su strumentazione ottica forniscono un ottimo ausilio in fase di prototipizzazione dei componenti ma essendo limitati al rilevamento di scariche parziali in aria sono difficilmente applicabili a situazioni reali nelle quali, oltre alla presenza di scariche in aria, si debbano rilevare scariche interne ai dielettrici.

2.4 Principi per il rilievo delle scariche parziali con metodi elettrici

Come visto in precedenza la presenza delle scariche parziali comporta la comparsa di impulsi di corrente ai terminali dell'oggetto in prova.

Il rilevamento di questi impulsi di corrente è strettamente correlato alla presenza delle scariche parziali e ne costituisce il principale metodo elettrico per la misura.

In generale la misura con metodi elettrici delle scariche parziali può essere condotta con circuiti di misura diversi in funzione degli oggetti in prova e della diversa disponibilità di apparecchiature ma in generale ciascun circuito di misura può essere ricondotto al circuito di Figura 2-20. [93]

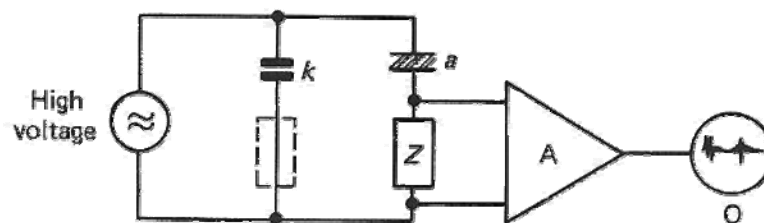


Figura 2-20: Schema di principio di un circuito per la misura delle scariche parziali. Sono rappresentati il) generatore di alta tensione, (a) l'oggetto in prova, (k) condensatore di accoppiamento, (Z) impedenza di misura, (A) Amplificatore o rivelatore, (O) schermo per la visualizzazione.

In generale, per effettuare la misura, sono necessarie le seguenti apparecchiature di prova:

- 1) Un generatore di tensione preferibilmente privo di scariche parziali.
- 2) Una impedenza di misura che, per la collocazione all'interno del circuito di misura, sarà attraversata da una corrente sinusoidale alla frequenza di prova alla quale saranno sovrapposti gli impulsi di corrente originati dall'oggetto in prova.
- 3) Una capacità di accoppiamento che presenti una modesta impedenza alle alte frequenze messe in gioco dagli impulsi di corrente. Il valore di tale capacità

dovrebbe essere solitamente dello stesso ordine di grandezza della capacità dell'oggetto in prova.

- 4) Un amplificatore o rilevatore di impulsi.
- 5) Una unità di osservazione o di misura.

Come può essere facilmente intuito dalla figura, l'impedenza di misura (Z) può essere posta in serie all'oggetto in prova oppure posta in serie al condensatore di accoppiamento (k). Anche se, dal punto di vista elettrico, i due metodi sono del tutto equivalenti, soprattutto assumendo come infinita l'impedenza del generatore di tensione alle frequenze messe in gioco dagli impulsi di corrente, nella pratica la connessione della impedenza di misura (Z) è estremamente importante.

Se infatti, per esempio, si considerano le componenti alla frequenza base si osserva che nel caso di impedenza connessa direttamente all'oggetto in prova, questa risulta essere direttamente interessata dalla corrente dell'oggetto mentre nel caso sia connessa al condensatore di accoppiamento l'impedenza è attraversata dalla corrente relativa al condensatore, nota in funzione della tensione di alimentazione.

Si deve considerare, inoltre, che nel caso di installazione dell'impedenza di misura in serie all'oggetto in prova, un cedimento dello stesso causerebbe la comparsa ai capi dell'impedenza di tutta la tensione di prova con i relativi rischi per la strumentazione e per la sicurezza degli utenti.

Sovente dunque si utilizzano, al posto dei "circuiti diretti" aventi l'impedenza di misura in serie all'oggetto in prova, i cosiddetti "circuiti indiretti" aventi l'impedenza di misura in serie alla capacità di accoppiamento.

2.4.1 Rilievo degli impulsi di corrente mediante l'impedenza di accoppiamento.

L'impedenza di accoppiamento tipicamente ha in parallelo una capacità parassita oppure una opportuna induttanza posta per convogliare a terra le componenti a frequenza industriale. In ciascuno dei due casi, si ottengono rispettivamente dei circuiti smorzati RC oppure oscillanti RLC.

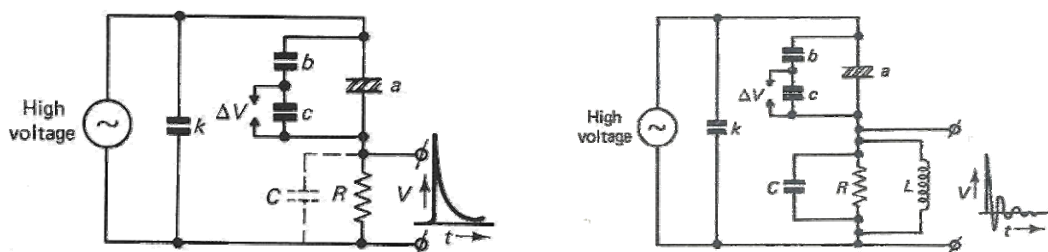


Figura 2-21: Schema di principio di un circuito per la misura delle scariche parziali. Sono posti in evidenza i parametri parassiti in parallelo alla impedenza di misura.

Nel caso di circuiti smorzati del tipo RC gli impulsi appaiono di tipo unidirezionale e possono essere calcolati come:

$$V = \frac{q}{a + C\left(a + \frac{a}{k}\right)} e^{\left(\frac{-t}{Rm}\right)}$$

Eq. 2-25

dove q rappresenta l'intensità di carica associata all'impulso pari a:

$$q = b\Delta V$$

Eq. 2-26

ed m è:

$$m = \frac{ak}{a + k} + C$$

Eq. 2-27

Nel caso di circuiti oscillanti del tipo RLC gli impulsi appaiono oscillanti con la stessa tensione di cresta che si otterrebbe da circuito smorzato RC:

$$V = \frac{q}{a + C\left(a + \frac{a}{k}\right)} e^{\left(\frac{-t}{2Rm}\right)} \cos(\omega t)$$

Eq. 2-28

dove l'oscillazione ω è:

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}\right)}$$

Eq. 2-29

ed m ha la stessa espressione della formula relativa al caso smorzato.

In conclusione, dalle espressioni riportate può essere dedotto che:

- 1) Il picco dell'impulso prodotto risulta essere proporzionale alla carica q in ingresso e dunque i metodi basati su questi circuiti sono adatti alla misura della intensità delle scariche parziali;
- 2) Il valore della resistenza di misura R non influenza il picco della tensione ma solamente la costante di tempo Rm . Ne segue che, in funzione della resistenza di misura scelta si avranno risposte del sistema più o meno lunghe. Siccome gli amplificatori reagiscono diversamente a impulsi di diversa durata, si ha che cambiando la resistenza R si ottengono, in uscita, valori diversi. Per tale ragione gli strumenti dispongono di diversi valori di impedenze di misura utilizzabili in funzione della capacità dell'oggetto in prova e della capacità di accoppiamento.

- 3) Il valore della capacità di accoppiamento k è determinante alla sensibilità del sistema in quanto il fattore $\frac{C}{k}$ che si trova al denominatore delle espressioni determina l'ampiezza della risposta. Valori di capacità di accoppiamento k piccoli determinano basse sensibilità del sistema di misura costringendo a scegliere elevati valori del guadagno di amplificazione nel sistema di misura.

2.4.2 Tecniche di amplificazione dei segnali di misura.

I circuiti di rilevamento delle scariche parziali generano treni di impulsi con frequenza di 100 – 120 Hz a seconda che la frequenza di alimentazione sia 50 oppure 60 Hz. [10][16][17][27]

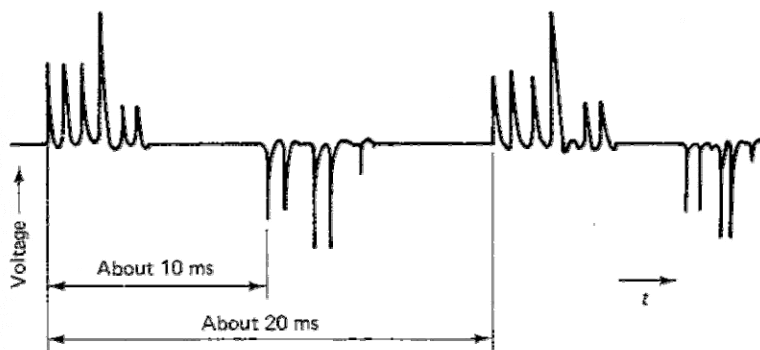


Figura 2-22: Esempio di forma degli impulsi rilevati in un oggetto in prova alla frequenza di 50 Hz.

Nelle classiche applicazioni, non era richiesto di mantenere l'informazione sulla forma d'onda dell'impulso relativo alla scarica parziale ma solo l'informazione relativa alla intensità della carica associata all'impulso ed eventualmente alla relazione della stessa rispetto alla fase della tensione di alimentazione.

Gli impulsi unipolari prodotti dalla impedenza di accoppiamento di tipo RC presentano uno spettro di frequenze costante sino alla frequenza di taglio (f_1):

$$f_1 = \frac{1}{2\pi Rm}$$

Eq. 2-30

Ovviamente le frequenze industriali sono escluse da un opportuno filtro ed il guadagno dell'amplificatore, se a banda stretta, sarà compreso tra tali frequenze e la frequenza di taglio (f_1).

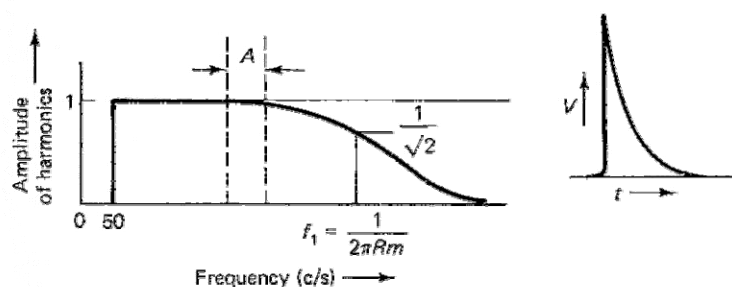


Figura 2-23: Esempio di spettro di un impulso smorzato di tipo RC. Si noti che le frequenze industriali non sono state considerate tenendo conto di un opportuno filtro.

Con l'opportuna scelta del campo di frequenze di lavoro dell'amplificatore e della propria larghezza di banda, a seguito della differente dinamica dei sistemi, si otterrà che la risposta dell'amplificatore non sarà funzione della forma d'onda del segnale in ingresso ma sarà sempre la medesima nella forma (risposta impulsiva del sistema), proporzionale nell'ampiezza dell'impulso in ingresso².

Valori pratici di ampiezza di banda sono compresi tra 10 e 150 kHz.[8]

Nel caso di impulsi oscillanti lo spettro dei segnali è del tipo riportato in figura. Lo spettro dell'amplificatore da utilizzare in questi casi dovrebbe essere uguale o maggiore di quello del segnale. Nella pratica si utilizzano amplificatori con banda abbastanza maggiore di quella del segnale, ad esempio 250 kHz.

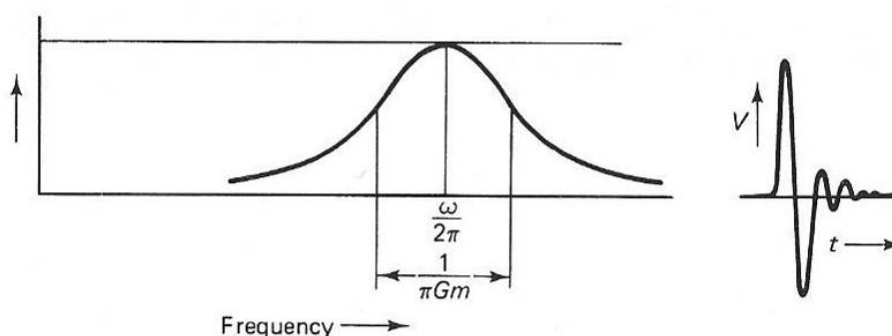


Figura 2-24: Esempio di spettro di un impulso oscillante di tipo RLC.

² Si tratta di un processo di PSEUDOINTEGRAZIONE. Un sistema a banda limitata viene eccitato da un segnale impulsivo ossia da un segnale che rispetto al sistema ha un contenuto armonico notevolmente superiore. La limitazione nella dinamica del sistema è tale da impedire allo stesso di replicare la dinamica dell'impulso e la reazione del sistema è la sua evoluzione libera detta anche risposta impulsiva del sistema. Si noti che qualsivoglia segnale impulsivo posto all'ingresso del sistema, qualora abbia un contenuto armonico sufficientemente elevato, provoca la medesima risposta. Ciò che cambia tra due diversi impulsi è la ampiezza della risposta che è proporzionale all'integrale dell'impulso.

Un esempio pratico è la campana. La campana ha una propria banda passante generalmente limitata. Qualora percossa da una martellata la campana emette sempre lo stesso suono, eccezion fatta per la ampiezza che è funzione dell'integrale della forza nel tempo. Più forte si percuote la campana maggiore sarà l'intensità del suono ma non il tono emesso.

Qualora la campana non sia più percossa con un impulso ma colpita o spinta da una forza che presenta una evoluzione temporale simile a quella della campana si esce dalle ipotesi di partenza ed il tono della campana cambia sino a che, per impulsi sufficientemente lenti che rientrano nella evoluzione della campana, questa segue l'evoluzione della forzante replicandone l'andamento.

La scelta di utilizzare amplificatori con banda passante ridotta da un lato fa perdere ogni informazione riguardo alla forma dell'impulso in ingresso del sistema ma, d'altro canto, consente di realizzare amplificatori multistadio con elevatissimi valori di guadagno nella banda di frequenza utile. Conseguentemente si ottiene che la risposta ad un impulso in ingresso allo strumento risulta essere molto robusta e conseguentemente la influenza dei rumori e dei disturbi risulta essere ridotta.

I sistemi descritti prendono il nome di sistemi a banda limitata basati sul principio della pseudointegrazione.

3 La normativa IEC 60270

3.1 La misura delle scariche parziali secondo la normativa IEC 60270

Attualmente la misura delle scariche parziali in ambito industriale è regolata in generale dalla normativa IEC 60270 e dalle relative norme di prodotto che, per i particolari oggetti, definiscono i limiti di intensità ed i criteri prova.

La normativa IEC 60270 descrive i principi ed i criteri generali per la misura delle scariche parziali e si pone come obiettivo l'armonizzazione delle varie normative di prodotto che prevedano la misura delle scariche parziali.

Nei casi in cui, per determinate tipologie di oggetti, le relative norme di prodotto non siano disponibili, le prescrizioni generali fornite dalla normativa possono essere utilizzate come base generale per l'accordo tra le parti.

3.1.1 Contenuto e campo di applicazione della normativa

La normativa IEC 60270 fornisce i criteri generali per la misura delle scariche parziali che si verificano nelle apparecchiature, nei componenti e nei sistemi industriali previsti per alimentazione continua o alternata sino ad una frequenza massima di 400 Hz.

In particolare sono fornite indicazioni in merito ai termini lessicali da utilizzare, alle grandezze da misurare, ai principali circuiti di prova impiegabili, ai metodi di misura, alle strumentazioni impiegabili, alle procedure di calibrazione, alle procedure di prova da seguire; vengono inoltre dati alcuni suggerimenti per la discriminazione delle scariche parziali rispetto alle interferenze esterne.

Oltre a questo, per la natura generale della specifica, vengono analizzati pure i metodi di misura delle scariche parziali di tipo non elettrico finalizzati alla localizzazione dei fenomeni impulsivi.

La normativa IEC 60270 è una normativa finalizzata alla definizione della misura delle scariche parziali in maniera riproducibile ma esula dagli obiettivi della stessa l'impiego per fini diagnostici.

3.2 Principali grandezze definite dalla normativa

Come detto la normativa definisce delle grandezze di riferimento per la misura delle scariche parziali. Scopo del presente capitolo è l'analisi delle definizioni fornite dalla normativa focalizzata alle misure di scariche parziali.

3.2.1 Definizioni generali

Scarica parziale (PD)

Con il termine di scarica parziale (PD) si definisce una scarica elettrica localizzata che attraversa solo parzialmente l'isolamento tra conduttori e che può essere o non adiacente a un conduttore. La scarica parziale è dunque il fenomeno fisico ossia la scarica elettrica localizzata in un punto del sistema isolante dove il gradiente di potenziale elettrico risulta superiore alla rigidità dielettrica del mezzo isolante.

Sovente, le scariche parziali, sono localizzate in regioni del sistema isolante difficilmente accessibili e conseguentemente la misura diretta della carica delle stesse risulta impossibile.

Impulso di scarica parziale (impulso PD)

L'impulso di scarica parziale è l'impulso (impulso PD) di corrente che si verifica all'interno dell'oggetto in prova in conseguenza ad una scarica parziale.

Gli impulsi di scarica parziale possono essere rilevati dalla strumentazione come impulsi di corrente oppure di tensione, originati introducendo nel sistema un opportuno circuito di misura ed una impedenza di misura.

3.2.2 Grandezze relative agli impulsi delle scariche parziali

Carica apparente q

Si definisce come carica apparente q di un impulso di scarica parziale quella carica che, iniettata in brevissimo tempo tra i terminali dell'oggetto in prova, nel circuito di prova specificato, darebbe luogo alla stessa lettura sullo strumento di misura dell'impulso di corrente di scarica parziale stesso. La carica apparente, generalmente espressa in picocoulomb (pC), è quindi definita per confronto con una carica campione iniettata ai capi del circuito di prova definita di calibrazione.

La carica apparente non è dunque la carica messa in gioco dalla scarica parziale bensì la carica che sarebbe necessario applicare ai terminali dell'oggetto in prova per avere nello strumento di misura la medesima indicazione. Con questa

definizione la normativa fornisce due indicazioni fondamentali. La prima riguarda l'impossibilità della misura diretta della carica della scarica parziale, la seconda il fatto che la misura sia relativa ossia sia necessario un processo confronto con una carica nota detta di calibrazione.

La normativa prescrive come raccomandazione ai comitati tecnici di prodotto di utilizzare la carica apparente come grandezza da misurare ovunque possibile.

Tasso di ripetizione degli impulsi n

Il tasso di ripetizione degli impulsi n è definito come rapporto tra il numero totale di impulsi di scariche parziali registrato in un intervallo di tempo e la durata di tale intervallo.

La normativa, considerando la ripetitività degli impulsi di scarica parziale introduce con tale definizione un criterio di misura ossia il fatto che gli impulsi non debbano essere pesati solo per la carica apparente messa in gioco ma pure per la loro numerosità nell'intervallo di tempo.

Frequenza di ripetizione degli impulsi N

La frequenza di ripetizione degli impulsi è il numero di impulsi di scariche parziali al secondo, nel caso di impulsi equidistanti. Nella pratica gli impulsi di scarica parziale quasi mai sono temporalmente equidistanti dunque tale definizione può essere applicata solo in fase di taratura o verifica.

Angolo di fase Φ_i e istante t_i in cui si verifica un impulso di scarica parziale

La relazione tra l'istante di misura di un impulso rispetto all'angolo di fase (espresso in gradi (°)) della tensione alternata di alimentazione³ è dato esprimendo l'angolo di fase secondo una determinata convenzione:

$$\Phi_i = 360(t_i / T) \qquad \text{Eq. 3-1}$$

dove t_i è il tempo misurato tra l'istante del passaggio per lo zero del fronte montante della tensione di prova, precedente alla scarica, e l'impulso di scarica parziale. T è il periodo della tensione di prova.

Questa definizione premette le basi per la costruzione dei diagrammi di distribuzione degli impulsi di scarica parziale detti anche "Pattern" o diagrammi fi-q-n.

Corrente media di scarica I

Si definisce corrente media di scarica I la grandezza derivata e somma dei valori assoluti delle ampiezze delle singole cariche apparenti q_i , durante un certo intervallo di tempo di riferimento T_{ref} , divisa per questo intervallo di tempo:

³ Si considera la tensione sinusoidale o quasi in modo da poter confondere la relazione di fase della tensione con quella della armonica fondamentale.

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|)$$

Eq. 3-2

Questa corrente espressa in coulomb al secondo oppure in ampere rappresenta quindi la corrente continua il cui integrale nel tempo sarebbe equivalente alla carica associata alle scariche parziali.

Potenza di scarica P

Si definisce potenza di scarica P una grandezza derivata, pari alla potenza media degli impulsi inviati ai terminali dell'oggetto in prova, dovuta alle ampiezze q_i della carica apparente, durante un certo intervallo di tempo di riferimento T_{ref} :

$$P = \frac{1}{T_{ref}} (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i)$$

Eq. 3-3

Con $u_1, u_2 \dots u_i$ si indicano i valori istantanei della tensione di prova negli istanti t_i in cui si verificano le ampiezze individuali di carica apparente q_i . La potenza di scarica è generalmente espressa in watt (W) e deve essere calcolata considerando il segno dei valori individuali.

Valore quadratico D

Grandezza derivata, generalmente espressa in $(\text{coulomb})^2$ al secondo (C^2/s), pari alla somma dei quadrati delle ampiezze individuali delle cariche apparenti q_i , durante un certo intervallo di tempo di riferimento T_{ref} , divisa per questo intervallo di tempo:

$$D = \frac{1}{T_{ref}} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2)$$

Eq. 3-4

Ampiezza della massima scarica parziale ripetitiva

Massima ampiezza registrata da un sistema di misura la cui risposta ai treni di impulsi è conforme alle specifiche previste dalla normativa.

Ampiezza della scarica parziale specificata

Massima ampiezza di una grandezza relativa agli **impulsi di scariche parziali**, ammessa in un oggetto in prova, a una tensione specificata, seguendo una procedura di condizionamento e di prova specificata. Per le prove in tensione alternata, l'ampiezza specificata della **carica apparente q**, è l'**ampiezza della maggiore scarica parziale ripetitiva**.

Rumore di fondo

Con il termine rumore di fondo si intendono tutti i segnali rilevati dalla strumentazione non derivanti dall'oggetto in prova. Il rumore di fondo può essere costituito da rumore di tipo bianco all'interno del sistema di misura, da trasmissioni radio, da altri segnali continui od impulsivi anche derivati dalla rete di alimentazione.

3.2.3 Tensioni di prova applicate, relative alle grandezze degli impulsi di scariche parziali

Tensione di innesco delle scariche parziali U_i

Tensione applicata alla quale si osservano per la prima volta nell'oggetto in prova ***scariche parziali*** ripetitive, quando la tensione applicata all'oggetto è aumentata gradualmente da un valore inferiore al quale non si osservano ***scariche parziali***. In pratica, la tensione di innesco U_i è la minima tensione applicata alla quale l'ampiezza di una grandezza dell'***impulso di scarica parziale*** diviene uguale o maggiore di uno specificato basso valore.

Tensione di estinzione di scariche parziali U_e

Tensione applicata alla quale ***scariche parziali*** ripetitive cessano di verificarsi nell'oggetto in prova, quando la tensione applicata all'oggetto è ridotta gradualmente da un valore superiore al quale si osservano ***scariche parziali***. In pratica, la tensione di estinzione U_e è la minima tensione applicata alla quale l'ampiezza di una grandezza scelta dell'***impulso di scarica parziale*** diviene uguale o minore di uno specificato basso valore.

Tensione di prova di scariche parziali

Tensione specificata, applicata durante una specificata procedura di prova di ***scarica parziale***, durante la quale l'oggetto in prova non dovrebbe presentare scariche parziali superiori a un'***ampiezza specificata di scariche parziali***.

3.2.4 Caratteristiche del sistema di misura

Impedenza di trasferimento $Z(f)$

È definita come il rapporto tra l'ampiezza della tensione di uscita e l'ampiezza di una corrente di ingresso costante, in funzione della frequenza f , quando la corrente di ingresso è sinusoidale.

Frequenza limite inferiore f_1 e frequenza limite superiore f_2

Sono le frequenze alle quali l'*impedenza di trasferimento $Z(f)$* scende di 6 dB rispetto al valore di cresta all'interno della banda passante.

Frequenza centrale f_m e ampiezza di banda Δf

Per tutti i tipi di sistemi di misura la frequenza centrale è definita dalla Eq. 3-5 e l'*ampiezza di banda* è definita dalla Eq. 3-6:

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Eq. 3-5

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

Eq. 3-6

Errore di sovrapposizione

È definito come l'errore causato dalla sovrapposizione delle risposte transitorie impulsive di uscita, quando l'intervallo temporale tra gli impulsi di corrente in entrata è inferiore alla durata di un singolo impulso di risposta di uscita. Gli errori di sovrapposizione possono essere in aggiunta o in sottrazione a seconda del tasso di ripetizione degli impulsi in ingresso. In pratica, nei circuiti possono verificarsi entrambi i tipi di errore a causa della natura casuale del tasso di ripetizione degli impulsi. Tuttavia, poiché le misure si basano sull'ampiezza della maggiore scarica parziale ripetitiva, in genere sono misurati solo gli errori di sovrapposizione in aggiunta.

Tempo di risoluzione degli impulsi T_r

Minimo intervallo di tempo tra due impulsi consecutivi in ingresso, di durata molto breve, con forma, polarità e ampiezza di carica identiche, per i quali il valore di cresta della risposta risultante non varia di oltre il 10% rispetto a quello relativo a un singolo impulso.

Il tempo di risoluzione degli impulsi è in genere inversamente proporzionale all'ampiezza di banda Δf del sistema di misura. Esso costituisce un'indicazione della capacità del sistema di misura di risolvere eventi di scariche parziali successivi.

Errore di integrazione

Errore nella misura della carica apparente che si verifica quando il limite di frequenza superiore dello spettro di ampiezza dell'impulso di corrente di scarica parziale è inferiore alla frequenza superiore di taglio di un sistema di misura a banda larga; oppure alla frequenza centrale di un sistema di misura a banda stretta.

3.2.5 Circuiti di prova

La maggior parte dei circuiti di prova per la misura delle scariche parziali in conformità alla normativa IEC 60270 può essere derivata da uno dei seguenti circuiti.

Ogni circuito è dotato di:

- 1 Un oggetto in prova indicato con C_a
- 2 Un condensatore di accoppiamento a bassa induttanza ed esente da scariche parziali indicato con C_k .
- 3 Un sistema di misura dotato di propria impedenza di ingresso indicato con CD.
- 4 Una sorgente di tensione avente un livello sufficientemente basso di scariche parziali in funzione della misura che si intende effettuare indicato con U_{\sim} .
- 5 Una serie di connessioni di alta e bassa tensione esenti da scariche parziali alla tensione di prova indicate con CC
- 6 Una impedenza di filtro in grado di ridurre l'influenza del rumore di fondo e dei disturbi indicata con Z.
- 7 Misuratore di scariche parziali indicato con MI

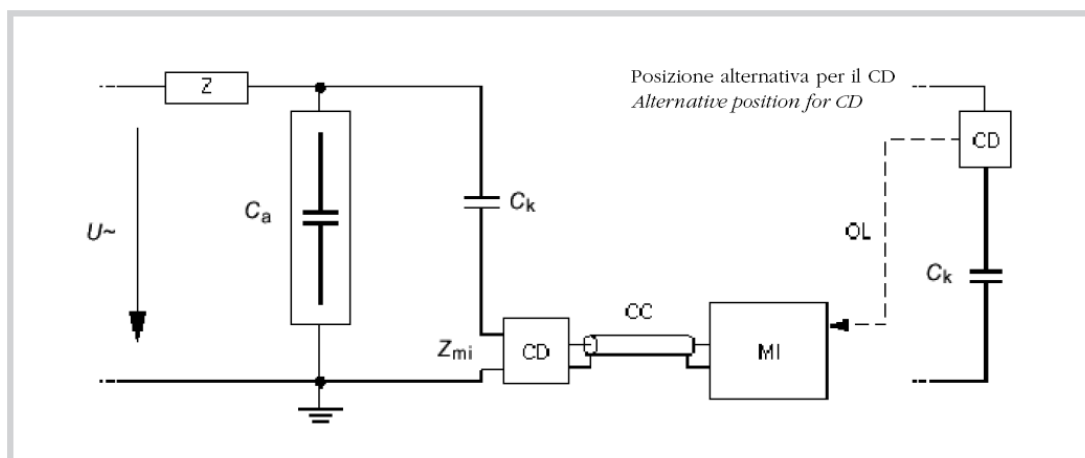


Figura 3-1: Circuito di misura delle scariche parziali classico. L'impedenza di accoppiamento è posta in serie al condensatore di accoppiamento. Si noti che l'impedenza è attraversata oltre che dalla corrente alla frequenza di prova anche dagli impulsi di corrente causati dalle scariche parziali.

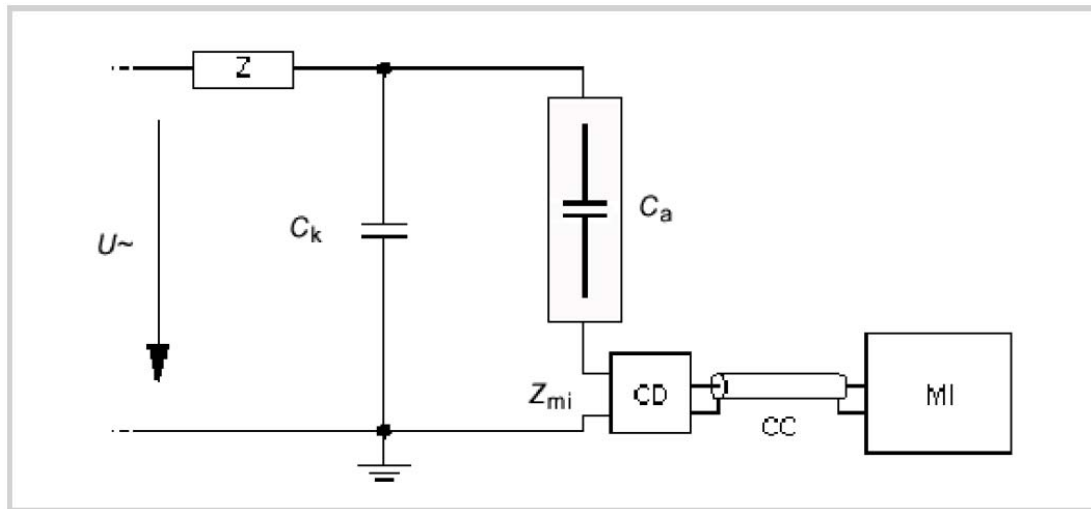


Figura 3-2: Impedenza di misura in serie con l'oggetto in prova. Tale circuito è poco utilizzato anche se formalmente identico al circuito di Figura 3-1, in quanto il cedimento dell'oggetto in prova comporta la comparsa della tensione di alimentazione ai capi della impedenza di misura con conseguenti rischi per la sicurezza degli operatori e delle apparecchiature impiegate.

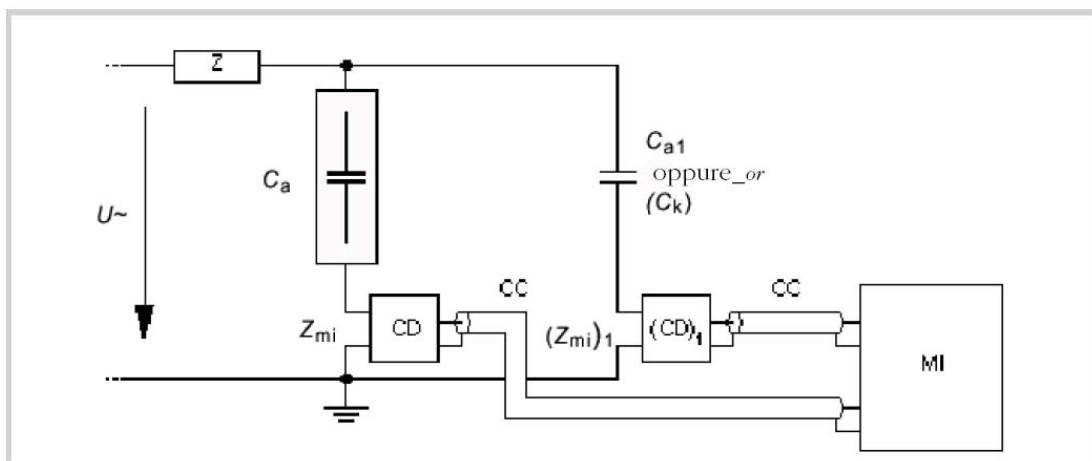


Figura 3-3: Circuito per la discriminazione della polarità degli impulsi. Tale circuito adotta due impedenze di misura connesse ad un unico misuratore che dal confronto dei segnali è in grado di stabilire la polarità della corrente apparente. Il circuito, inoltre, consente di ridurre fortemente l'influenza dovuta a rumori e disturbi di origine esterna al circuito di misura.

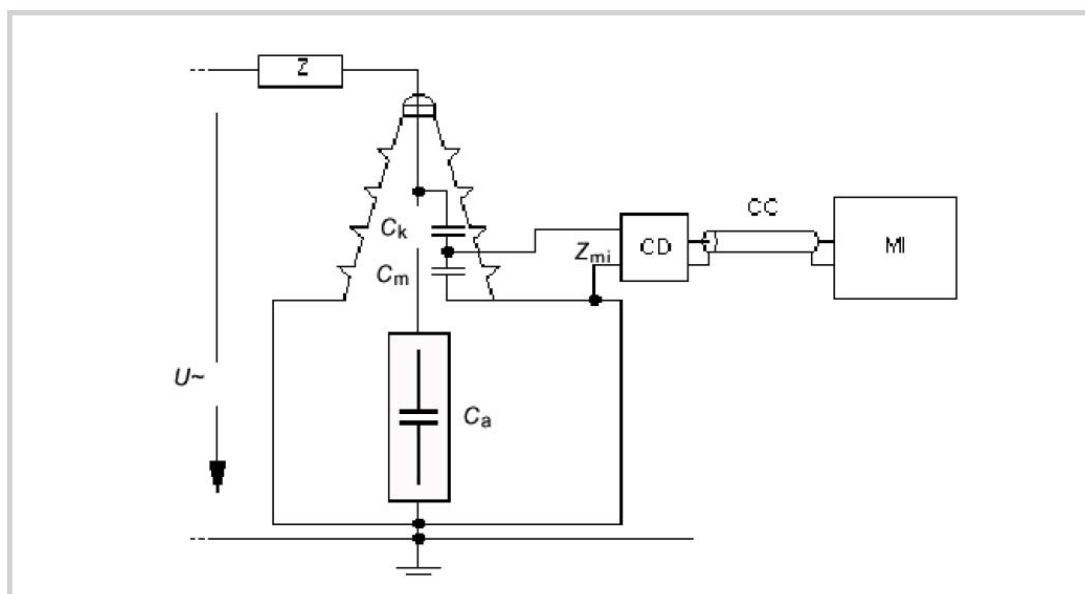


Figura 3-4: Circuito di prova per misura alla presa passante. Tale circuito si utilizza in trasformatori dotati di passante capacitivo qualora non si disponga di una capacità di accoppiamento adeguata o la tensione in gioco sia particolarmente elevata. Si noti che per tali accoppiamenti la capacità C_k assume valori estremamente piccoli, dell'ordine delle centinaia di picofarad.

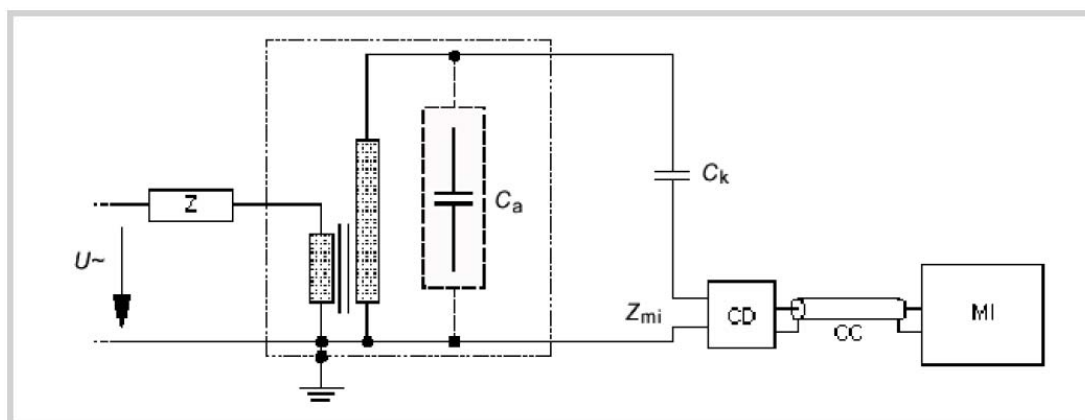


Figura 3-5: Circuito di misura per oggetti auto-eccitati come ad esempio i trasformatori. La sorgente di alimentazione in alta tensione è costituita dall'oggetto stesso.

3.2.6 Strumenti di misura

Secondo quanto previsto dalla normativa IEC60270 le misure di scariche parziali debbono essere svolte utilizzando come riferimento **la carica apparente** come grandezza da misurare ovunque possibile.

In ogni caso per ogni misura debbono essere registrate anche le caratteristiche principali del sistema di misura utilizzato per garantire una maggiore riproducibilità tra vari sistemi.

La normativa prevede debba essere considerato come sistema di misura non solo il misuratore di scariche parziali ma anche il dispositivo di accoppiamento e le altre parti del circuito che assieme con il misuratore concorrono a definire i parametri del circuito di misura.

Particolarmente importante nel circuito di misura è il dispositivo di accoppiamento che è progettato per raggiungere la massima sensibilità in funzione di un opportuno circuito di prova e che può essere pertanto modificabile o sostituibile in funzione delle varie esigenze lasciando inalterato il misuratore.

Il circuito di accoppiamento può essere costituito da una rete passiva oppure attiva a quattro terminali per convertire i segnali di corrente in ingresso in segnali di tensione in uscita con una funzione di trasferimento tra ingresso ed uscita scelta opportunamente al fine di impedire che le frequenze di alimentazione e le proprie armoniche possano raggiungere lo strumento di misura.

Un misuratore di scariche parziali conforme alla normativa IEC 60270, genera un impulso di tensione la cui cresta è funzione della carica dell'impulso in ingresso a condizione che la larghezza di banda che l'ampiezza dello spettro in frequenza degli impulsi sia costante almeno entro la larghezza di banda Δf del sistema di misura (Figura 3-6). Essendo la forma, la durata ed il valore di cresta dell'impulso di uscita determinati dalla funzione di trasferimento della impedenza $Z(f)$ i segnali di uscita risultano completamente diversi di segnali in ingresso.

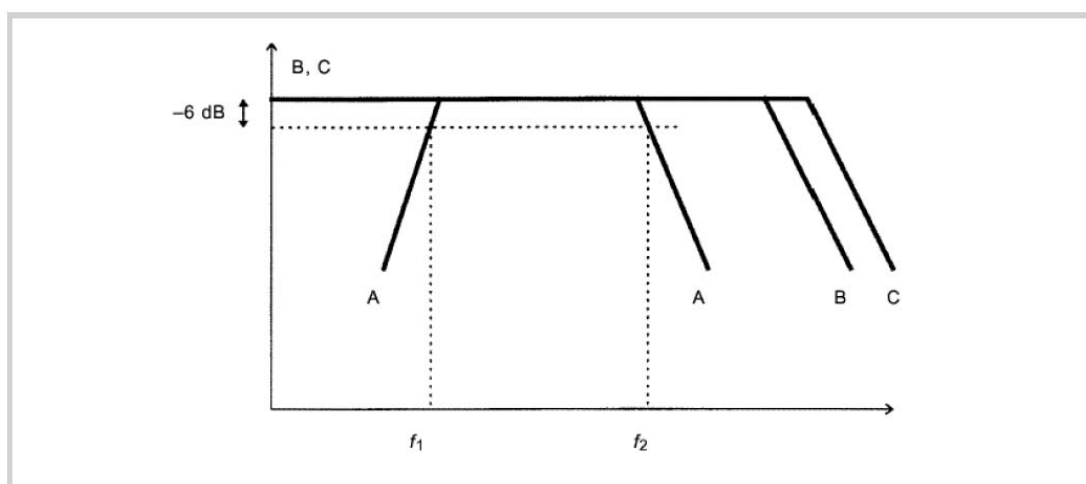


Figura 3-6: (A) Banda passante del sistema di misura, (B) Spettro in frequenza dell'ampiezza dell'impulso di scarica parziale, (C) Spettro in frequenza dell'ampiezza dell'impulso di taratura, (f1) Frequenza limite inferiore, (f2) Frequenza limite superiore

Al misuratore di scariche parziali deve essere applicato un opportuno registratore o indicatore in grado di fornire una informazione in merito alla **ampiezza della maggiore scarica parziale ripetitiva** basato sul principio del rilievo della tensione di cresta o equivalente. La indicazione del dispositivo ad un treno di impulsi deve essere tale da rispettare le prescrizioni riportate in Figura 3-7.

N (1/s):	1	2	5	10	50	≥ 100
R_{\min} (%):	35	55	76	85	94	95
R_{\max} (%):	45	65	86	95	104	105

Figura 3-7: Risposta convenzionale di un misuratore di scariche parziali conforme alla normativa IEC 60270 ad un treno di impulsi. Si noti come varia il peso del singolo impulsi in funzione della frequenza di ripetizione N .

3.2.7 Sistemi di misura a banda larga

I sistemi di misura a banda larga, assieme alla relativa impedenza di accoppiamento, sono caratterizzati da una impedenza di misura $Z(f)$ con valori fissi delle frequenze limite inferiore e superiore f_1 ed f_2 ed una adeguata attenuazione del segnale a frequenze inferiori a f_1 e superiori a f_2 . Valori comuni⁴, raccomandati dalla normativa per tali frequenze sono:

$$30\text{kHz} \leq f_1 \leq 100\text{kHz} \quad \text{Eq. 3-7}$$

$$f_2 \leq 500\text{kHz} \quad \text{Eq. 3-8}$$

$$100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz} \quad \text{Eq. 3-9}$$

La risposta della strumentazione a banda larga ad un impulso di corrente non oscillante dovuto ad una scarica parziale è in genere una oscillazione molto smorzata. Dalla risposta della strumentazione a banda larga possono essere determinati **il valore della carica apparente q e la polarità dell'impulso di corrente**.

Il tempo di risoluzione dell'impulso è tipicamente compreso tra 5 μs e 20 μs .

I segnali prodotti dalla strumentazione a banda larga, generalmente disponibili, possono essere visualizzati o registrati.

In particolare è possibile trovare accoppiato alla strumentazione un oscilloscopio, generalmente analogico, che permette di visualizzare i segnali in funzione della tensione nella modalità XY.

Attraverso la visualizzazione dei segnali è possibile effettuare delle considerazioni in merito agli impulsi visualizzati come ad esempio stabilire se il tempo di risoluzione dello strumento è tale da evitare errori di sovrapposizione.

I sistemi di misura a banda larga possono essere associati ad un integratore di tipo attivo. Tale strumentazione, di natura elettronica consente di integrare il segnale

⁴ Nella scelta delle frequenze limite per la strumentazione deve sempre essere verificata l'ipotesi di partenza ossia che in tale campo lo spettro armonico dell'impulso di corrente abbia ampiezza costante.

per mezzo di una rete avente una propria costante di tempo dovuta agli elementi resistivi e capacitivi costituenti la rete stessa.

Il segnale ottenuto dalla rete è un segnale in tensione che aumenta con la somma istantanea della carica e pertanto il segnale ottenuto in uscita è proporzionale alla carica totale qualora la costante di tempo dell'integratore sia molto più elevata della durata dell'impulso di scarica parziale.

Costanti di tempo tipiche degli integratori attivi sono dell'ordine di circa $1\mu\text{s}$ ed il tempo di risoluzione tra impulsi successivi è generalmente inferiore ai $10\mu\text{s}$.

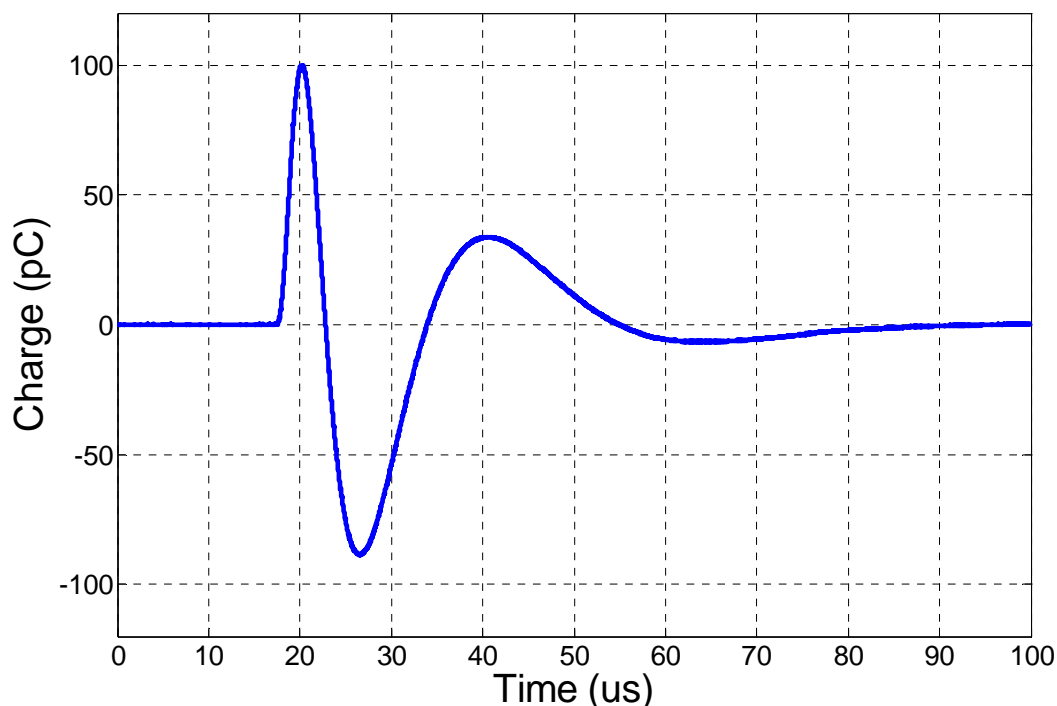


Figura 3-8: Tipica risposta impulsiva di uno strumento a banda larga conforme alla normativa IEC 60270. (Instrumentation JAMES G. BIDDLE cat. 665702 ser. 088102)

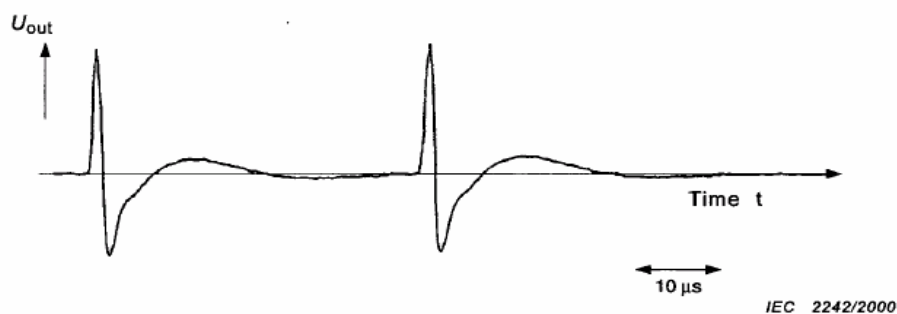
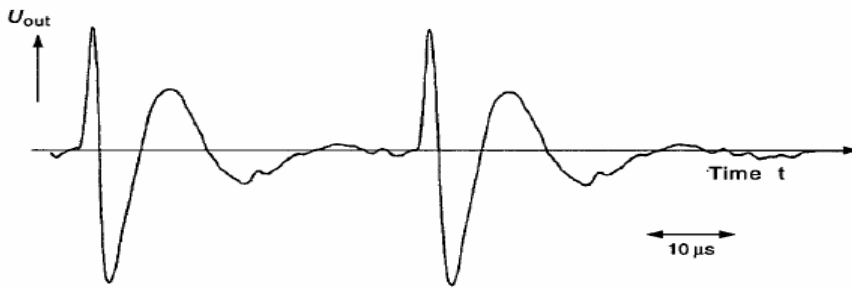


Figura 3-9: Esempio di una coppia di risposte impulsive di un sistema con $f_1=45\text{ kHz}$ ed $f_2=440\text{ kHz}$ ad una coppia d'impulsi ideali (spettro uniforme nella banda di misura)



IEC 2243/2000

Figura 3-10: Esempio di una coppia di risposte di un sistema con $f_1=45$ kHz ed $f_2=440$ kHz ad una coppia d'impulsi a spettro non uniforme nella banda di misura

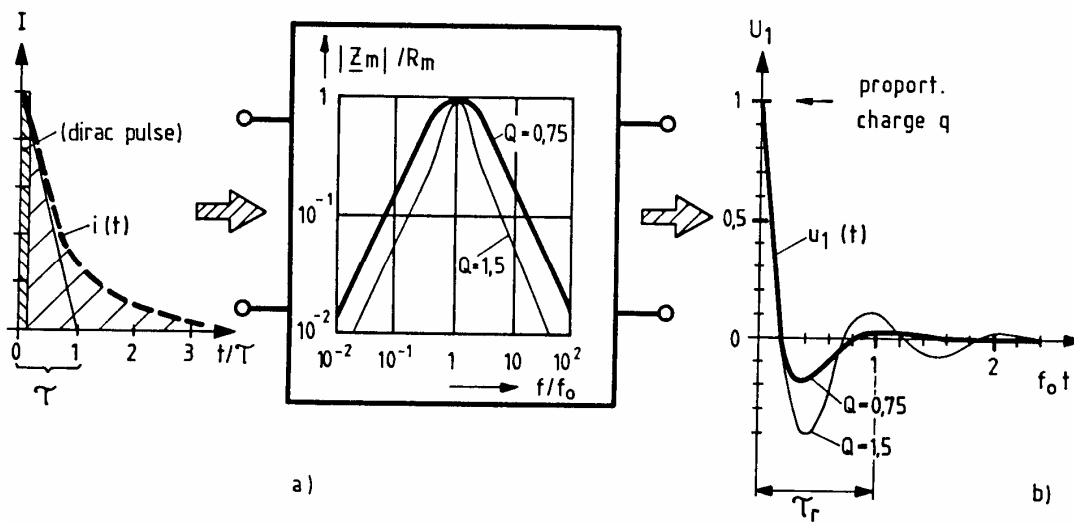


Figura 3-11: Esempio di risposta impulsiva si un sistema a banda larga. Si noti la perdita di informazione in merito all'impulso ma la possibilità di ottenere informazione in merito alla polarità..

3.2.8 Sistemi di misura a banda stretta

I sistemi di misura delle scariche parziali a banda stretta sono caratterizzati da un'ampiezza di banda Δf e da una frequenza centrale f_m che possono essere variate su un'ampia gamma di frequenza, nella quale l'ampiezza, dello spettro in frequenza degli impulsi di corrente di scariche parziali è approssimativamente costante.

I valori raccomandati dalla normativa per Δf e f_m sono:

$$9\text{kHz} \leq \Delta f \leq 30\text{kHz} \quad \text{Eq. 3-10}$$

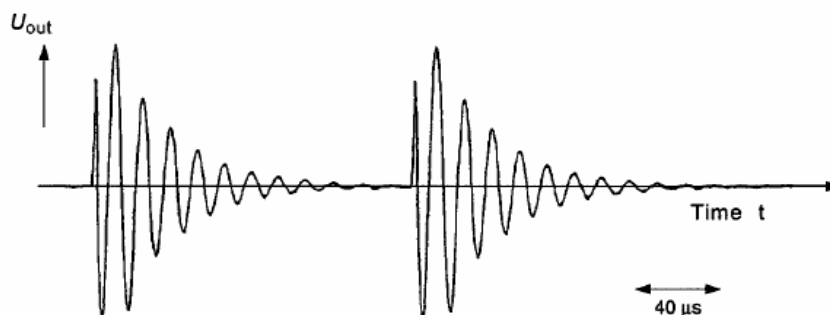
$$50\text{kHz} \leq f_m \leq 1\text{MHz} \quad \text{Eq. 3-11}$$

Inoltre, il valore dell'impedenza di trasferimento $Z(f)$ a frequenze di $f_m \pm \Delta f$ deve essere di almeno 20 dB al di sotto del valore alla frequenza centrale della banda passante

La risposta della strumentazione a banda stretta ad un impulso di corrente dovuto a una scarica parziale è un'oscillazione transitoria i cui involucri dei valori di cresta, positivi e negativi, sono proporzionali alla carica apparente, indipendentemente dalla polarità di tale carica. Il tempo di risoluzione dell'impulso Tr è grande e tipicamente superiore a 80 μs .

Nel corso della misura con strumentazione a banda stretta dovrebbero essere evitate frequenze centrali superiori ad 1 MHz. Tali frequenze possono essere accettate solo qualora le letture per tali valori più elevati non differiscono da quelle che sarebbero rilevate per i valori raccomandati di f_m .

Se, come avviene in generale, la strumentazione è utilizzata assieme ad un dispositivo di accoppiamento a risonanza, f_m deve essere sintonizzata e fissata alla frequenza di risonanza del dispositivo di accoppiamento e del circuito di prova, in modo da fornire un *coefficiente di conversione costante per il circuito*.



IEC 2244/2000

Figura 3-12: Esempio di una coppia di risposte impulsive di un sistema con $f_m=75\text{ kHz}$ e $\Delta f=10\text{ kHz}$ ad una coppia d'impulsi ideali

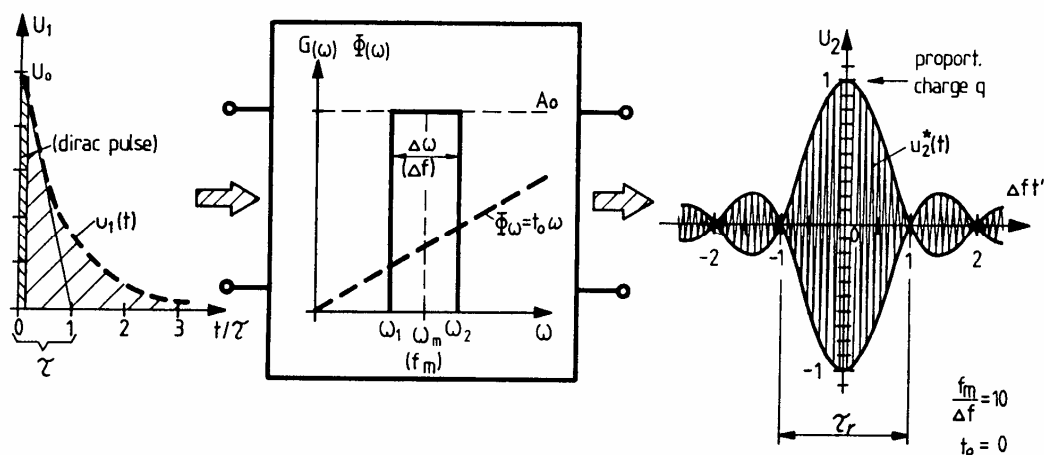


Figura 3-13: Esempio di risposta impulsiva in un sistema a banda stretta. Si noti la totale perdita di informazione in merito all'impulso.

3.3 Limiti nella misura delle scariche parziali condotte secondo la normativa

La misura di scariche parziali secondo normativa IEC 60270 presenta dei limiti insiti nella misura stessa.

La misura con fini metrologici, infatti si pone come obiettivo primario, dato un oggetto e la procedura di prova, l'identificazione ampiezza della maggiore scarica parziale ripetitiva, ossia della intensità di carica apparente della singola scarica che si verifichi con massima intensità periodicamente all'interno di un periodo della tensione di alimentazione.

Tale convenzione, corretta dal punto di vista metrologico, non presenta, a livello fisico nessuna correlazione con i fenomeni e degradanti all'interno dei materiali in quanto non esiste a questo livello, alcuna correlazione con la numerosità delle scariche parziali.

Per capire il limite della normativa attuale in merito al fenomeno si riporterà un breve esempio. Si consideri un oggetto inglobato per il quale sia stato fissato un limite di intensità di carica apparente pari a 10 pC.

Nel corso della prova, per due oggetti simili vengono rilevate due situazioni, nel primo oggetto si manifestano 100 scariche per ciclo di intensità pari a 8 pC, nel secondo oggetto due scariche per ciclo di intensità pari a 12 pC.

Secondo la normativa, sebbene la corrente media di scarica messa in gioco dal primo oggetto risulti essere enormemente inferiore alla corrente media di scarica del secondo oggetto il primo dovrà essere scartato mentre il secondo accettato.

Da quanto sopra si conclude che la attuale normativa non si prefigge obiettivi diagnostici che debbono essere ricercati mediante ulteriori analisi e metodi di prova.

3.4 Trasformatori

Per quanto riguarda i trasformatori a secco la misura delle scariche parziali deve essere condotta in accordo alle normative di prodotto IEC 60076-3 ed IEC 60076-11. La misura deve essere svolta come prova di routine ogni qualvolta la classe di isolamento dell'avvolgimento risulti superiore od uguale a 3,6 kV.

Il circuito di misura base per la misura delle scariche parziali è riportato in Figura 3-14 per i trasformatori di tipo monofase, in Figura 3-15 per trasformatori di tipo trifase.

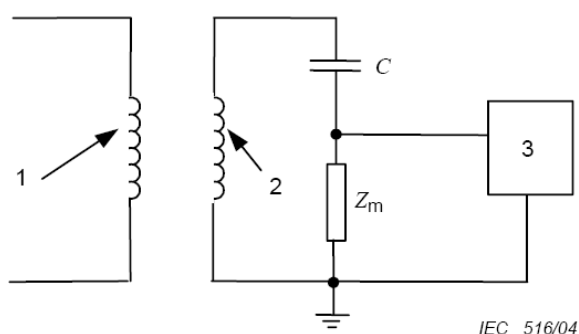


Figura 3-14: Schema di prova per la misura delle scariche parziali per trasformatori di tipo monofase. (1) Avvolgimento di bassa tensione, (2) Avvolgimento di alta tensione, (3) Misuratore di scariche parziali.

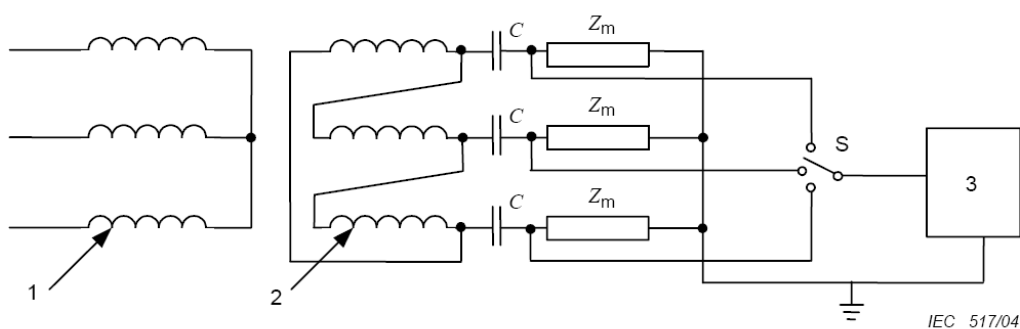


Figura 3-15: Schema di prova per la misura delle scariche parziali per trasformatori di tipo trifase. (1) Avvolgimento di bassa tensione, (2) Avvolgimento di alta tensione, (3) Misuratore di scariche parziali, (3) Commutatore.

La misura delle scariche parziali deve essere effettuata dopo che siano state completate con esito positivo tutte le prove dielettriche previste dalle normative di prodotto.

Il trasformatore deve essere alimentato dal lato di bassa tensione con una tensione la cui forma d'onda sia la più vicina possibile alla sinusoidale e la cui frequenza risulti essere opportunamente aumentata rispetto alla frequenza nominale per tener conto della corrente magnetizzazione del pacco magnetico nel corso della misura.

Nel caso di trasformatori trifasi la procedura di prova può essere differenziata a seconda che il trasformatore sia destinato o meno a reti di media tensione a neutro isolato. Nel primo caso, prova standard, la sollecitazione dei punti in tensione verso il potenziale di terra rimane pressappoco pari al valore nominale di progetto, nel secondo caso la prova viene eseguita con uno schema che porta il potenziale degli avvolgimenti verso terra al potenziale concatenato.

3.4.1 Procedura di prova standard

Tale procedura è la procedura standard che deve essere eseguita salvo diverso accordo tra fornitore e committente. In tale procedura il circuito di prova deve essere necessariamente di tipo trifase come in Figura 3-15 al fine di poter controllare i potenziali degli avvolgimenti rispetto al potenziale di terra.

Il ciclo di applicazione della tensione deve prevedere un periodo di pre-stress almeno pari a 30 secondi con un valore di tensione pari a 1,8 volte la tensione nominale ed un ciclo di misura a 1,3 volte la tensione nominale di durata pari a circa 3 minuti.

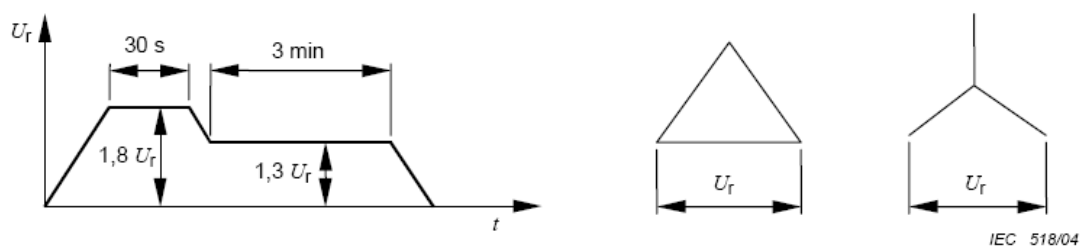


Figura 3-16: Andamento della tensione di prova nel corso della misura delle scariche parziali nei trasformatori a secco in accordo alla normativa IEC60076-11. (Procedura standard)

3.4.2 Procedura di prova speciale

La procedura elencata deve essere specificata dall'acquirente al momento dell'ordine della macchina qualora il sistema nel quale il trasformatore verrà inserito preveda un funzionamento con una fase a terra. Essendo il potenziale dell'avvolgimento in prova vincolato rispetto al potenziale di terra, il circuito di prova da adottarsi può essere trifase oppure monofase in accordo rispettivamente con gli schemi di Figura 3-14 e Figura 3-15.

Il ciclo di applicazione della tensione deve prevedere un periodo di pre-stress almeno pari a 30 secondi con un valore di tensione pari a 1,3 volte la tensione nominale ed un ciclo di misura alla tensione nominale di durata pari a circa 3 minuti.

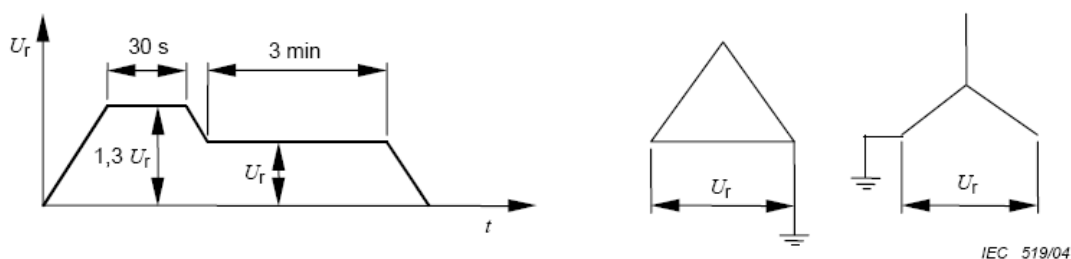


Figura 3-17: Andamento della tensione di prova nel corso della misura delle scariche parziali nei trasformatori a secco in accordo alla normativa IEC60076-11. (Procedura speciale)

4 Misura delle scariche parziali a fini diagnostici

4.1 Introduzione

Le misure di scariche parziali eseguite con strumentazione conforme alla normativa IEC 60270 sono misure orientate alla quantificazione metrologica della carica apparente ai capi dell'oggetto in prova e non si prefiggono come fine principale né la discriminazione né la localizzazione delle scariche parziali all'interno dell'oggetto in prova.

Il risultato della prova è un valore numerico che di volta in volta deve essere confrontato con un valore di riferimento al fine di stabilire se l'oggetto considerato presenti o meno un livello di carica apparente sufficientemente basso da soddisfare i requisiti di accettabilità per l'oggetto in esame secondo quanto previsto dalla norma di prodotto o dall'accordo tra le parti..

Nella maggioranza dei casi i limiti richiesti rappresentano un valore contrattuale ad esempio tra fornitore ed acquirente e la misura che offre garanzie metrologiche fornisce il criterio di valutazione accettato a livello normativo.

Lo scopo delle misure di questo tipo non è dunque quello di discriminare le differenti sorgenti di fenomeni impulsivi all'interno dell'oggetto ma di fornire solamente una indicazione affidabile ed il più possibile riproducibile con minima incertezza. [51][52][53][62]

Detto questo, attraverso misure condotte con questi criteri può essere fornita una valutazione della bontà del sistema isolante solo qualora le scariche parziali rilevate siano di valore trascurabile, mentre, dal punto di vista diagnostico nulla si può dire quando sia rilevato un livello di scariche parziali non trascurabili.

In questo caso, infatti, non potendo la misura riconoscere né la tipologia né l'ubicazione dei fenomeni all'interno dell'oggetto in prova, risulta impossibile stabilire se questi siano o meno ubicati all'interno dell'isolamento non autoripristinante e se quindi la loro presenza possa o meno pregiudicare la vita utile della apparecchiatura in prova.

In conclusione, le misure di scariche parziali in banda larga, svolte a fini metrologici potrebbero, qualora l'intensità delle scariche superi il livello contrattuale portare a rifiutare oggetti le cui sorgenti di scarica siano ubicate in parti dell'isolamento autoripristinante e dunque innocue per la vita della apparecchiatura stessa.

Le misure di scariche parziali a fini diagnostici, invece, si pongono come obiettivo, dato un oggetto noto, di valutare la tipologia di fenomeno impulsivo in corso e di fornire, sempre data la conoscenza dell'oggetto, indicazioni in merito alla ubicazione delle scariche all'interno dello stesso. Le misure di tipo diagnostico si rivelano utili per valutare il rischio connesso ad un determinato livello di scariche parziali determinato magari con una misura eseguita secondo i criteri della Normativa.

In base alla analisi diagnostica si può dunque stabilire se un fenomeno degradante sia di tipo interno od esterno alla apparecchiatura in prova e dunque se tale fenomeno pregiudicherà o meno la vita stessa della macchina.

In conclusione, quando si considera la misura delle scariche parziali a fini diagnostici l'obiettivo da raggiungere non è necessariamente il valore dell'intensità delle scariche rilevate ma la tipologia delle stesse in relazione all'oggetto in esame al fine di poter dare una valutazione dello stato dell'isolamento dello stesso. La misura delle scariche parziali a fini diagnostici è un processo valutativo che si può scomporre in tre fasi operative ben distinte, una legata alla misura vera e propria, una legata al riconoscimento dei fenomeni in corso ed eventualmente alla loro ubicazione ed una terza legata alla interpretazione dei risultati ottenuti.

Come in tutte le altre tecniche diagnostiche, essendo il risultato della misura una stima dello stato di degrado della apparecchiatura, risultano determinanti fattori difficilmente quantificabili come la conoscenza approfondita dell'oggetto in prova e l'esperienza, naturale o derivata da una base di dati associata alle esperienze precedenti.

Per quest'ultimo aspetto, di grande aiuto è stato, negli ultimi tempi, l'introduzione, per alcune tipologie di misure e su alcune tipologie di macchine, di basi di dati comuni associate ai fenomeni che si verificano con maggior frequenza con i relativi criteri ed algoritmi di valutazione.

4.2 Misura delle scariche parziali con tecniche a banda ultra larga (Ultra Wide Band)

Una scarica parziale è un impulso di corrente originato da un fenomeno di scarica incompleta.

Soprattutto negli anni settanta furono svolti vari studi in merito ai meccanismi di scarica nei dielettrici destinati alle applicazioni in ambito elettrotecnico. Tali studi portarono alla luce i meccanismi fisici alla base dei principali fenomeni di scarica identificando come questi meccanismi interagissero con l'avanzamento nello spazio dei canali ionizzati e come potesse variare l'assorbimento di energia dal sistema elettrico per alimentare tali processi.

I meccanismi di scarica identificati, variabili in funzione della tipologia di dielettrico considerato e della particolare polarità della tensione applicata, comportano assorbimenti di energia dal sistema elettrico che risultano essere diversi in funzione della particolare tipologia di scarica e della particolare tipologia di dielettrico interessato.

Nella fase iniziale della scarica si possono dunque osservare diversi andamenti della corrente assorbita nel tempo ossia diverse forme d'onda nella corrente.

Da quanto premesso, nell'ultimo decennio è nata l'idea di rilevare non solo la intensità della carica associata ai fenomeni di scarica parziale ma pure la evoluzione temporale della corrente.

A questo scopo, essendo i misuratori convenzionali basati sul principio della pseudointegrazione, si dovettero sviluppare delle nuove strumentazioni in grado di acquisire anche la forma d'onda della corrente. Tali strumentazioni dette a banda ultra larga per essere distinte dalle strumentazioni a banda larga basate sul principio della pseudointegrazione, dispongono di una banda sufficiente alla acquisizione della forma d'onda dell'impulso della corrente relativa alla scarica parziale con minima distorsione.

Generalmente i dispositivi di acquisizione delle scariche parziali in modalità a banda ultra larga sono costituiti da un campionatore (Registratore / scheda di acquisizione/ oscilloscopio) dotato di una parte elettronica in grado di ottimizzare la registrazione e di fare anche un primo trattamento dei segnali acquisiti.

4.2.1 Ulteriori vantaggi del metodo con banda ultra larga

Oltre a consentire la acquisizione della forma d'onda dell'impulso di corrente, la strumentazione a larga banda presenta rispetto alla strumentazione tradizionale, ulteriori vantaggi quali:

1) Riduzione dell'errore di sovrapposizione

L'errore di sovrapposizione è ridotto in quanto la risposta della strumentazione all'impulso è la rappresentazione dell'impulso stesso.

2) Riduzione del tempo di risoluzione tra gli impulsi

In principio il tempo di risoluzione dei sistemi a banda ultra larga è molto inferiore a quello ottenibile con i sistemi a banda larga in quanto per discriminare due fenomeni impulsivi è sufficiente l'esaurimento anche parziale del primo fenomeno rispetto al successivo.

Tipicamente tale tempo è dell'ordine delle centinaia di nanosecondi.

Nel caso si utilizzino acquisizioni del segnale con tecniche a segmentazione di memoria, esiste un secondo fattore temporale, legato al tempo minimo di riarmo del trigger tra un frame di acquisizione ed il successivo. Il tempo di riarmo del trigger è solitamente dipendente dalla lunghezza della finestra di acquisizione e può essere dell'ordine di qualche microsecondo.

Maggiori dettagli sono riportati in Figura 4-1.

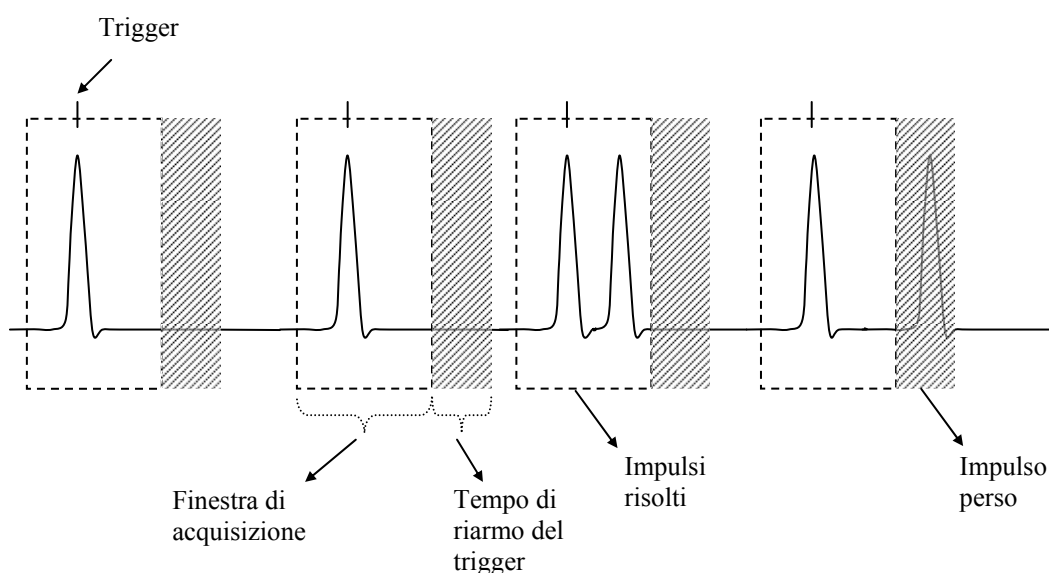


Figura 4-1: Schematizzazione di una acquisizione in modalità a banda ultra larga con tecnica di frammentazione della memoria. Si noti che data una finestra di acquisizione ed un tempo di riarmo del trigger non è sempre possibile l'acquisizione di tutti gli impulsi presenti nel segnale.

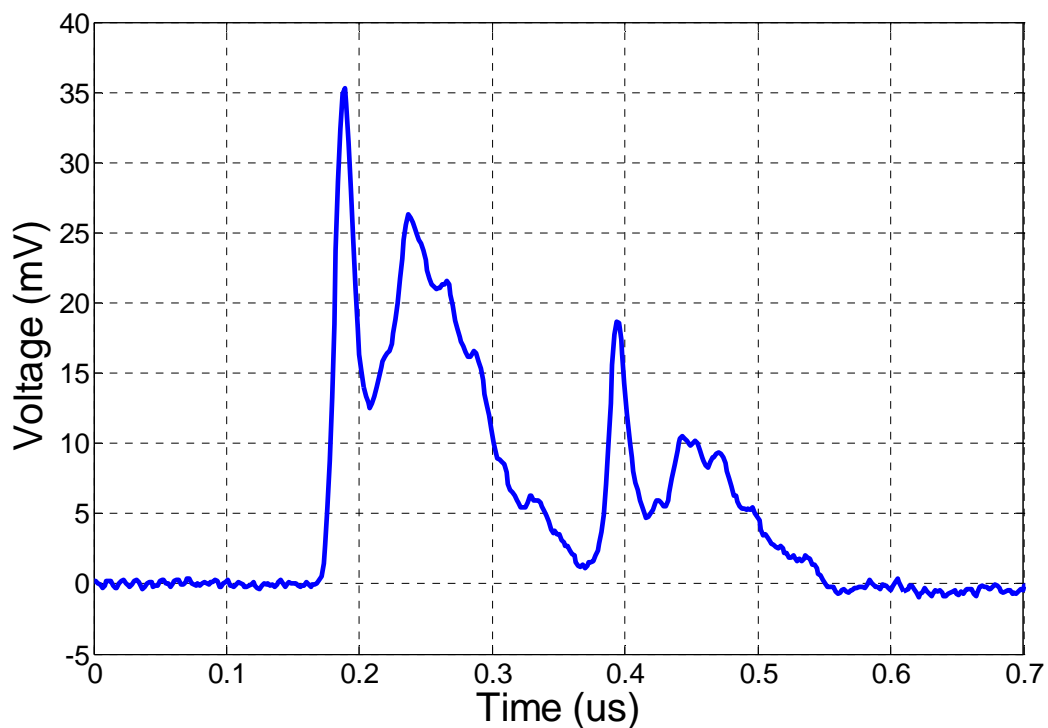


Figura 4-2: Risoluzione di un impulso doppio da parte di un sistema di acquisizione a banda ultra larga.

3) Riduzione dell'errore di integrazione

Essendo l'errore di integrazione dovuto alla incapacità del sistema di eseguire una corretta pseudointegrazione a causa della dinamica dell'impulso in ingresso, nel caso di sistemi a banda ultra larga dove l'integrazione, eventualmente, è fatta per via numerica dopo l'acquisizione, il problema non si pone.

4.3 Misuratori a banda ultra larga

I misuratori di scariche parziali a banda ultra larga sono strumenti in grado di acquisire e memorizzare le forme d'onda degli impulsi di corrente. Sono pertanto strumentazioni di natura digitale composte in generale da una unità di acquisizione, da una unità di memorizzazione e da una unità di analisi dei dati.

Ovviamente la strumentazione in commercio è strumentazione in fase di evoluzione e ci sono sul mercato diverse varianti.

In particolare l'utilizzo di processori veloci dedicati alla misura ed al trattamento dei segnali in maniera molto efficace (DSP⁵) rende l'uso di tali apparecchiature molto veloce e pratico in quanto tutti i tempi di calcolo vengono ottimizzati.

La strumentazione di natura commerciale è ottimizzata ma di norma chiusa e non lascia possibilità di libera ricerca né sulla parte hardware né su quella software.

In pratica la strumentazione commerciale implementa qualche strumento di analisi ma non lasciando esportare i dati non permette all'utente di analizzare i dati ottenuti. Al fine di superare questa limitazione è stato sviluppato un sistema di misura delle scariche parziali basato sulla acquisizione in larga banda dei segnali di corrente derivati dalle scariche parziali. Tale strumentazione, del tutto aperta sia dal punto di vista hardware che software, ha permesso di analizzare i dettagli della misura, ed i limiti non sempre evidenti nell'utilizzo di strumentazione industriale.

La strumentazione realizzata è stata caratterizzata da punto di vista metrologico e provata più volte sul campo. Dal confronto con la strumentazione di natura commerciale non si sono rilevate grosse differenze funzionali né nella parte software né nella parte hardware.

⁵ DSP. Acronimo di DIGITAL SIGNAL PROCESSOR. Il DSP è un particolare tipo di microprocessore ottimizzato per eseguire, in maniera estremamente efficiente, sequenze di istruzioni ricorrenti nel condizionamento di segnali digitalizzati.

4.3.1 Struttura di un misuratore di scariche parziali a banda ultra larga

Un misuratore di scariche parziali a banda ultra larga deve essere composto da almeno tre componenti:

1 Parte di accoppiamento / acquisizione del segnale

La parte di accoppiamento rappresenta il punto di prelievo del segnale dal circuito di misura. Spesso trascurata, tale parte è fondamentale alla buona riuscita della misura in quanto al suo interno devono essere separate le componenti del segnale a bassa frequenza, legate alla corrente di carica delle capacità, dalle componenti del segnale a frequenza elevata che portano l'informazione in merito alla corrente associata alle scariche parziali.

2 Parte di amplificazione del segnale

La parte di amplificazione del segnale rappresenta nei circuiti a banda ultra larga una parte fondamentale in quanto i segnali ad alta frequenza sono solitamente di intensità molto bassa e conseguentemente l'influenza di rumori e disturbi è elevata. L'amplificazione del segnale deve essere la maggiore possibile rispettando i vincoli di banda e di linearità.

3 Parte di registrazione del segnale

La parte di registrazione del segnale è la parte più importante del sistema di misura. In tale parte del sistema vengono infatti acquisiti i dati che devono poi essere processati dal software al fine di fornire informazioni utili alla analisi diagnostica delle scariche parziali.

La acquisizione del segnale, per permettere poi le operazioni di analisi avanzate richieste dal metodo di misura, deve essere svolta in maniera digitale.

Il segnale, ovvero la forma d'onda della corrente relativa alla scarica parziale deve essere digitalizzata ed accumulata in maniera opportuna in un vettore numerico tenendo conto del contenuto armonico del segnale originale e dunque di tutti requisiti legati al campionamento.

Tipicamente usuali valori di velocità di campionamento sono dell'ordine dei 50 – 100 MS/s e tenendo conto che la durata tipica di acquisizione nel corso delle misure è dell'ordine dei minuti ci si rende conto che tali strumenti necessitano di una enorme profondità di memoria oppure di una efficace gestione della stessa.

Un metodo efficace di gestione della memoria è la frammentazione della stessa per eventi tecnica detta segmentazione della memoria⁶ della quale si parlerà in dettaglio più avanti nel testo.

⁶ Negli oscilloscopi TEKTRONIX la segmentazione della memoria prende il nome di "FAST FRAME"

4.3.1.1 Parte di acquisizione del segnale.

La parte di acquisizione del segnale è la parte hardware che deve essere prevista per il rilievo fisico degli impulsi di corrente. Tale parte può variare fortemente a seconda della configurazione del circuito di accoppiamento che si intende utilizzare.

In ogni caso le caratteristiche generali di questa parte di strumentazione devono essere tali da bloccare le componenti del segnale presenti alle frequenze industriali di prova ed alle proprie armoniche.

Tali armoniche si presentano infatti sovrapposte al segnale di corrente con valori che, in intensità, possono superare di ordini di grandezza le correnti relative alle scariche parziali.

Giocando sul diverso contenuto armonico dei segnali legati alle frequenze industriali rispetto ai segnali legati agli impulsi di corrente è possibile operare una separazione che consente di fare esaminare alla strumentazione la sola parte impulsiva portatrice dell'informazione.

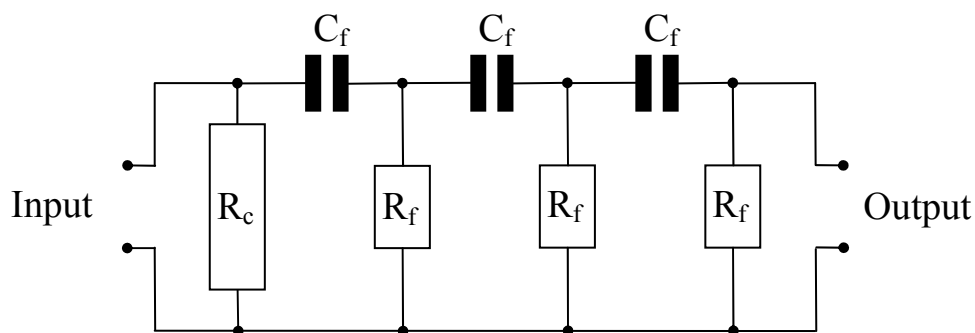


Figura 4-3: Filtro del terzo ordine utilizzato nel sistema di misura delle scariche parziali autocostruito.

R_c = Resistenza di accoppiamento o di misura del valore di 100 Ohm.

R_f = Resistenza di cella del valore di 10 kOhm.

C_f = Capacità di filtro del valore di 3,3 nF

Filter frequency response

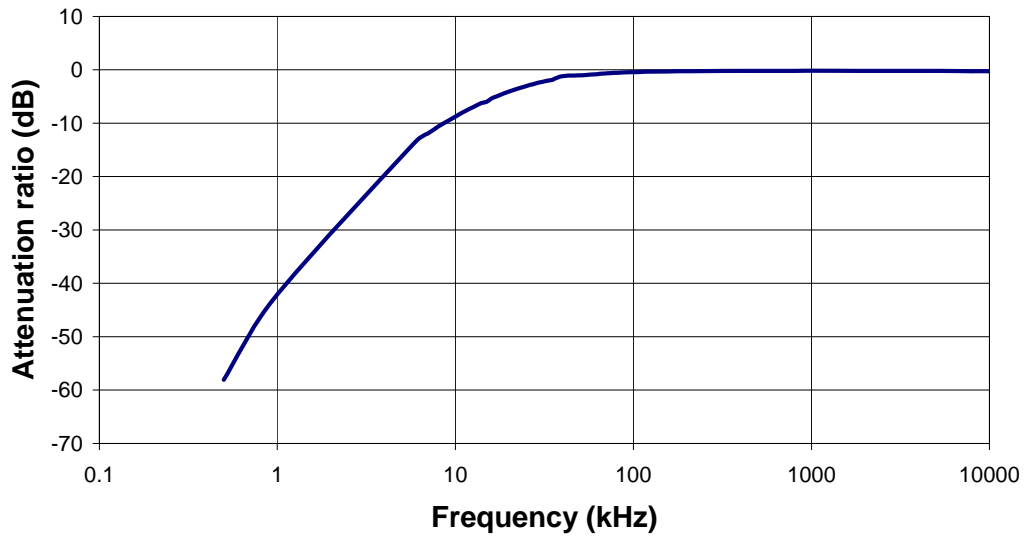


Figura 4-4: Risposta in frequenza del filtro utilizzato per il blocco delle frequenze industriali nel sistema di misura di scariche parziali autoconstruito.

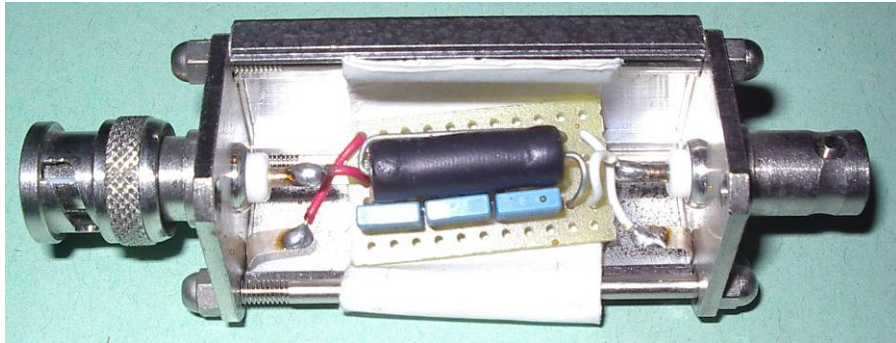


Figura 4-5: Impedenza di misura e filtro auto costruiti.

4.3.1.2 Parte di amplificazione del segnale.

Nelle misure a banda ultra larga la forma d'onda del segnale di corrente è una informazione essenziale. Come sarà esaminato in seguito il contenuto di rumore nel segnale riduce le prestazioni del sistema di misura e deve pertanto essere ridotto il più possibile. Al fine di aumentare il rapporto tra segnale e disturbo è utile amplificare il segnale il più possibile e sovente si interpongono nella catena di misura degli amplificatori i quali, garantendo le prestazioni in frequenza riescano ad aumentare il più possibile l'intensità del segnale.

Nel caso del sistema di misura auto costruito non avendo a disposizione amplificatori opportuni si è deciso di raddoppiare l'impedenza di misura e conseguentemente il valore del segnale in tensione. Avendo raddoppiato, rispetto al consueto, l'impedenza di misura, portandola da 50 Ohm a 100 Ohm è stato necessario adattare il cavo di connessione con la strumentazione di misura ed a tale scopo è stato inserito un inseguitore di tensione avente banda passante dichiarata pari a 100 MHz.

L'inseguitore di tensione adottato, fornendo la potenza per pilotare il cavo a 50 Ohm consente di chiudere l'uscita del filtro su una impedenza molto elevata e costante consentendo dunque di non alterare le prestazioni del filtro per effetto di carico.

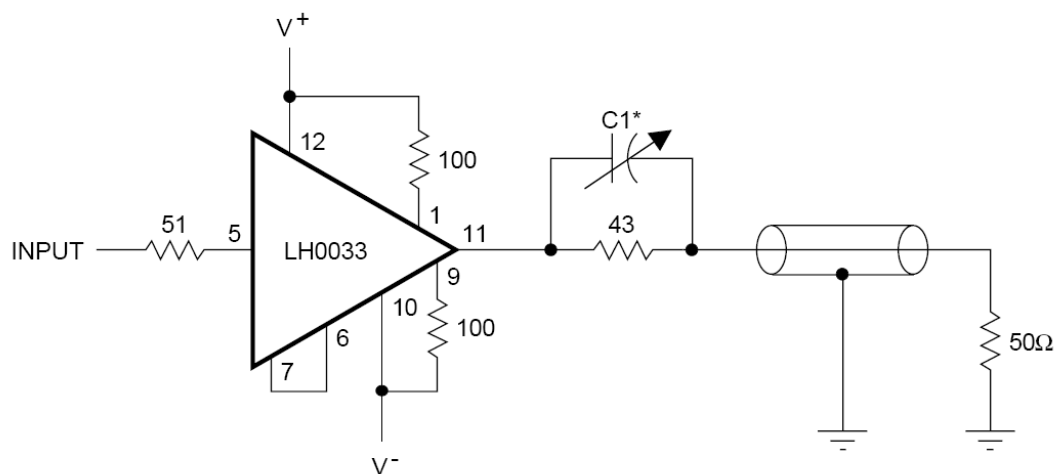


Figura 4-6: Schema di collegamento utilizzato per realizzare l'inseguitore di tensione.

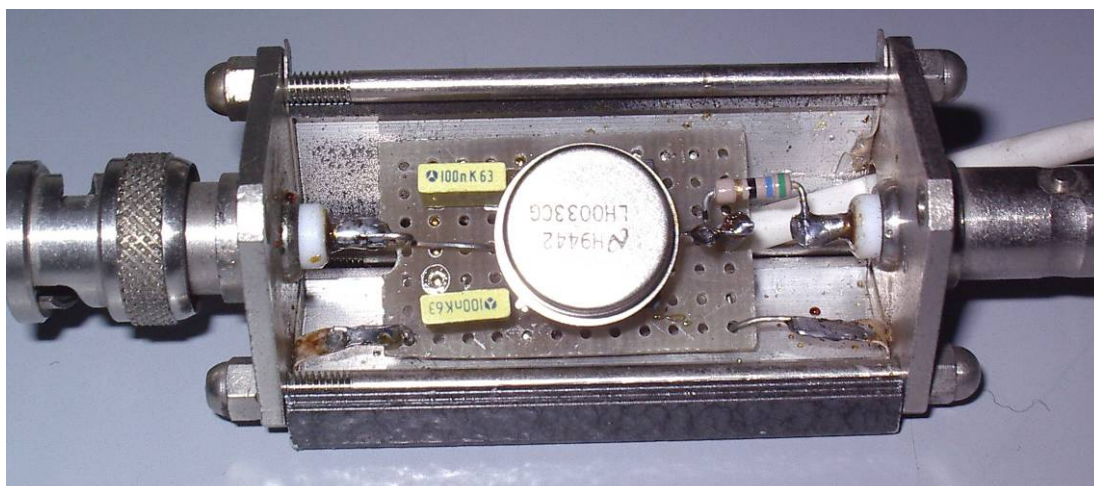


Figura 4-7: Amplificatore di tensione LH0033CG in configurazione buffer.

4.3.1.3 Parte di registrazione del segnale.

Per acquisire i segnali di tensione è stato utilizzato un oscilloscopio digitale a quattro canali del tipo TDS 5054 B i cui dati principali sono a seguito riportati:

Numero di matricola	B023773
Numero di canali	4
Banda passante analogica a -3 dB	500 MHz
Tempo di salita tipico (5mV/div)	800 Ps
Filtri analogici	150 – 20 MHz
Accoppiamenti in ingresso	AC+DC
Impedenza di ingresso	50 Ohm 1M Ohm
Sensibilità con ingresso ad 1 MOhm	1mV/div-10V/div
Sensibilità con ingresso a 50 Ohm	1mV/div-1V/div
Risoluzione verticale	8 Bit
Velocità di campionamento ad 1 canale	5 GS/s
Velocità di campionamento a 2 canali	2,5 GS/s
Velocità di campionamento a 4 canali	1,25 GS/s
Profondità di memoria ad 1 canale	16 Mpts
Profondità di memoria a 4 canali	8 Mpts

Principali modalità di acquisizione del segnale:

Sample	
Peak Detect	
Averaging	
Hi-Res	
FastFrame™	Acquisition

Il principale vantaggio dell'oscilloscopio utilizzato è, grazie alla notevole profondità di memoria, la possibilità di gestione di grandi moli di dati.

La memoria dell'oscilloscopio utilizzato, inoltre, consente la frammentazione ossia consente di campionare solo gli istanti significativi del treno di impulsi fermando la acquisizione in assenza di segnale utile.

Grazie a questa caratteristica è possibile campionare adeguatamente gli impulsi di tensione dovuti alle scariche parziali senza “Sprecare” memoria inutilmente tra un impulso ed il successivo.

Attraverso la tecnica della frammentazione della memoria, a livello pratico si è riusciti a condurre prove della durata di diversi minuti.



Figura 4-8: Oscilloscopio Tektronix TDS 5054B utilizzato nel sistema di misura auto costruito.

4.3.2 Circuito di prova

Mediante la strumentazione realizzata si è realizzato il circuito di misura riportato in Figura 4-9. Il circuito adottato è derivato dai circuiti di misura previsti dalla normativa IEC60270 – 60076-11 ed avendo realizzato tre canali può essere impiegato sia in modalità monofase che trifase.

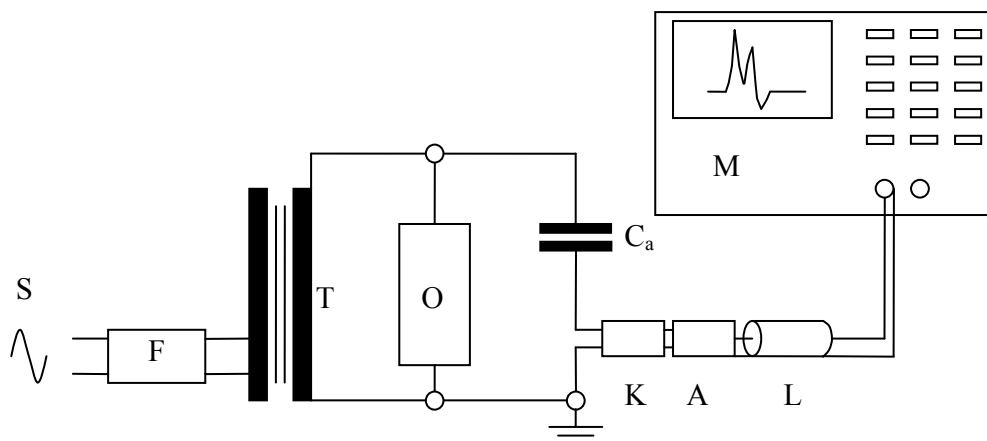


Figura 4-9: Organizzazione di un circuito di misura per le scariche parziali in modalità a banda ultra larga. *S* = Alimentazione sinusoidale; *F* = filtro contro i disturbi condotti dalla linea; *T* = trasformatore elevatore; *O* = oggetto in prova; *C_a* = condensatore di accoppiamento; *K* = impedenza di accoppiamento e filtro; *A* = amplificatore di alta frequenza; *L* = cavo coassiale per la trasmissione del segnale; *M* = dispositivo di acquisizione ed immagazzinamento dei dati.



Figura 4-10: I tre filtri/impedenze di misura ed inseguitori di tensione realizzati.

4.4 Circuiti di misura per misure di scariche parziali a banda ultra larga

In letteratura spesso si trovano numerosi suggerimenti per accoppiare strumentazione a banda ultra larga agli oggetti in prova.

Spesso si parla di accoppiamenti diretti o capacitivi con le parti in tensione mediante particolari accoppiatori ma nella pratica l'accoppiamento con oggetti in prova aventi notevoli dimensioni fisiche dovute alla potenza ed alla classe di isolamento è fatto quasi esclusivamente con circuiti di misura derivati dai circuiti previsti dalla normativa IEC 60270.

I circuiti proposti dalla normativa, a differenza dei circuiti ad accoppiamento diretto non sono generalmente variabili topologicamente (se non nelle dimensioni) in funzione degli oggetti in prova e presentano una capacità in parallelo all'oggetto in prova che garantisce una elevatissima sensibilità alla carica apparente. Va precisato che l'accoppiamento diretto in alcuni casi, come ad esempio i trasformatori a secco risulta addirittura impossibile.

Da prove effettuate su alcuni oggetti di modeste dimensioni è emerso che l'accoppiamento diretto a differenza dell'accoppiamento secondo IEC60270 risulta avere una sensibilità alle scariche parziali molto modesta tanto da rendere, in alcuni casi, quasi impossibile la discriminazione tra impulsi di scarica e disturbi.

Per la ricerca effettuata si è scelto di derivare i circuiti di accoppiamento dai circuiti proposti dalla normativa IEC60270.

4.5 Correlazione tra le misure di corrente ottenute in modalità a banda ultra larga e la carica associata agli impulsi

La misura delle scariche parziali in banda ultra larga dovrebbe porsi al mercato, oltre che per la capacità di risoluzione dei segnali di corrente anche per essere equivalente dal punto di vista metrologico con le misure tradizionali, in modo da consentire all'utenza la scelta, per scopi metrologici, dello strumento a banda ultra larga al posto dello strumento tradizionale.

D'altro canto, anche nel corso di una misura diagnostica, il riferimento, per quanto sommario con la quantità di carica apparente dovrebbe essere sempre possibile, al fine di stabilire la pericolosità del fenomeno in corso di osservazione.

4.5.1 Integrazione diretta

Partendo dagli impulsi di scarica parziale rilevati in banda ultra larga possono essere ottenute informazioni in merito alla carica associata agli impulsi acquisiti. Il processo di ricostruzione, non è però direttamente svolto dalla strumentazione come nel caso della pseudointegrazione e può essere svolto in vari modi.

Il modo più semplice per ottenere dall'impulso di corrente il valore della carica associata è l'integrazione numerica dello stesso. È stato dimostrato praticamente che sebbene in teoria questo sistema non presenti particolari difficoltà, all'atto pratico l'operazione di integrazione numerica presenta però dei problemi oggettivi dovuti alla presenza di rumore e offset presenti sul segnale originale.

Conseguentemente, l'informazione che si può ricavare attraverso l'integrazione diretta non sempre risulta essere accurata.

Il contributo maggiore è dato dall'offset nel segnale originale che se integrato, pesando per tutta la durata della registrazione, può produrre errori considerevoli.

Un metodo pratico utilizzato per ridurre l'influenza dell'offset consiste nell'ipotizzare che il valore dell'offset rimanga costante per tutta la registrazione. Tale ipotesi, nel caso pratico della misura delle scariche parziali è abbastanza veritiera⁷ in quanto data la modesta durata dei frames le componenti a bassa frequenza indotte nel segnale possono essere ritenute praticamente costanti.

In base a questa ipotesi, avendo acquisito un adeguato numero di punti di pretrigger⁸, è sufficiente farne la media e sottrarla alla registrazione completa.

Un secondo problema della integrazione diretta si ha qualora i segnali acquisiti presentino delle oscillazioni o nel caso in cui i segnali acquisiti siano nella forma molto diversi dal segnale di calibrazione.

In questo caso, infatti, se il segnale è fortemente oscillante il valore dell'integrale non è costante e vengono a mancare i punti di riferimento tra calibrazione e segnale acquisito.

⁷ La riduzione dell'offset attraverso la media è efficace nel caso in cui il massimo dell'integrale sia rilevato in prossimità del punto di trigger della registrazione.

⁸ Per eseguire l'operazione di sottrazione dell'offset si è utilizzato un pretrigger pari al 30 % della durata della registrazione.

Nel caso in cui il valore dell'integrale risulti associato ad una deriva lenta dell'integrale, la valutazione del massimo diviene poco significativa.

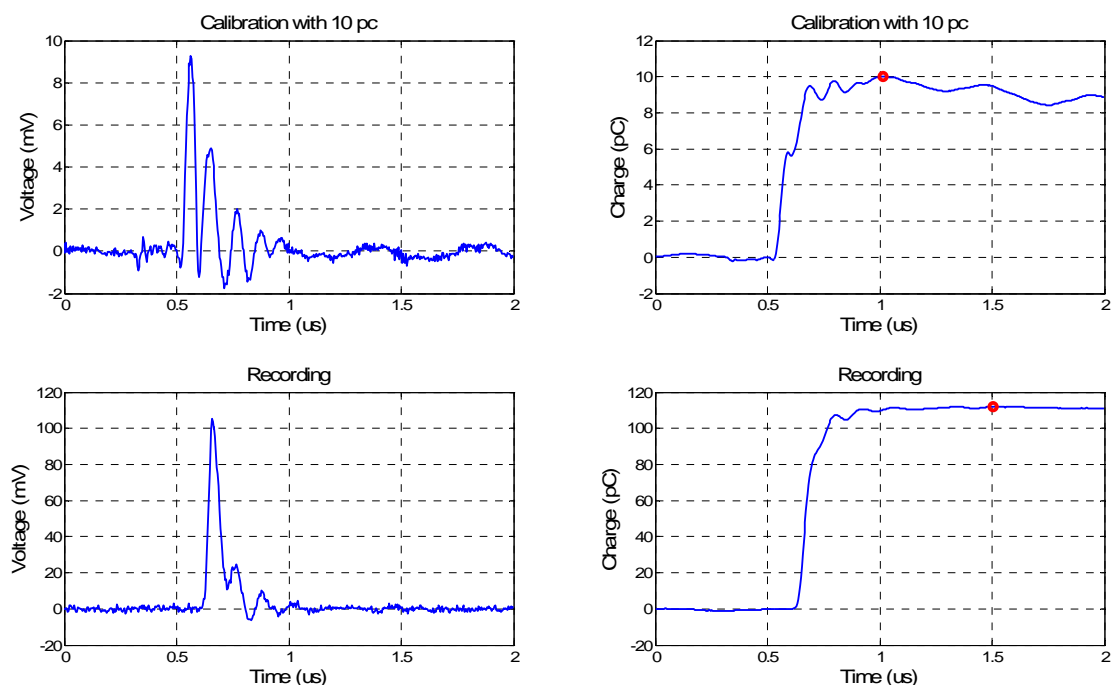


Figura 4-11: Esempio di integrazione numerica del segnale. Il segnale è stato registrato ai capi di un resistore di alta tensione. Si noti che la funzione integrale potrebbe non essere lineare con il valore della carica in funzione della quantità e della ampiezza delle oscillazioni.

4.5.2 Pseudointegrazione numerica

È stato sviluppato un secondo metodo per ricavare il valore dell'integrale del segnale e consiste nel fare, numericamente ciò che viene fatto dalla strumentazione analogica ossia una pseudointegrazione di tipo numerico.

Il segnale impulsivo registrato e ripulito dagli offset viene convoluto con la risposta impulsiva di un sistema del secondo ordine avente una frequenza naturale nell'ordine delle centinaia di chilo hertz.[4]

Il vantaggio del metodo consiste nel ridurre i problemi della integrazione numerica ed in particolare di ridurre i problemi legati all'oscillazione ed alla deriva della funzione integrale.

È da evidenziare che il metodo utilizzato essendo di natura numerica consente di variare i parametri della risposta impulsiva per tenere conto delle varie esigenze che possono nascere nel corso della misura.

I principali svantaggi del metodo risiedono nella elevata capacità elaborativa richiesta dai sistemi di calcolo e dall'elevato tempo di elaborazione.

Il sistema proposto è stato valutato dal punto di vista metrologico e sul campo mediante l'analisi di impulsi di carica registrati nel corso di una misura di scariche parziali in banda ultra larga.

4.5.2.1 Validazione del metodo di pseudointegrazione numerica

Per validare il metodo proposto sono state condotte delle prove al fine di stabilire la robustezza del metodo nei confronti della possibile variazione del segnale nel corso delle misure.

Per simulare la presenza di segnali di diversa natura è stato utilizzato un generatore di onda quadra in grado di operare con dei filtri in uscita. Tale artificio ha consentito di poter variare il contenuto armonico della forma d'onda in uscita dal generatore.

La forma d'onda così ottenuta è stata posta in serie ad un condensatore in un circuito del tutto simile a quello previsto dalla normativa per la realizzazione dei calibratori, si noti che la carica iniettata è rimasta costante non essendo variata la tensione del generatore.

Il complesso così ottenuto è stato chiuso nella impedenza a 50Ω dell'oscilloscopio utilizzato per la misura e le forme d'onda sono state registrate (Figura 4-12) evidenziando la grande differenza di queste nel contenuto armonico.

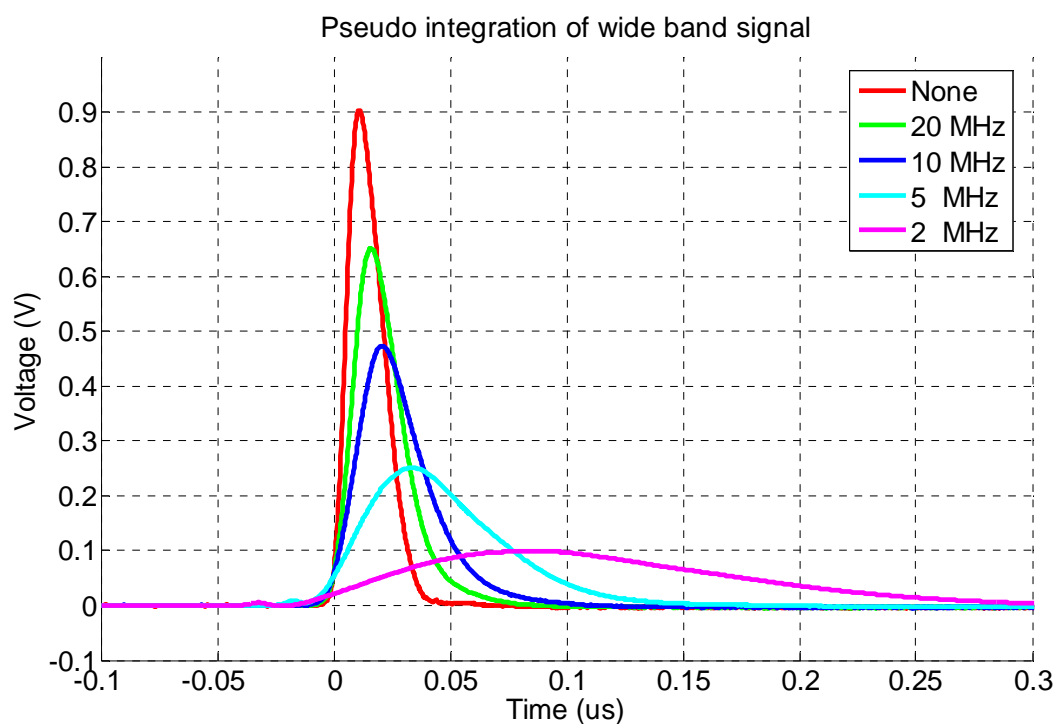


Figura 4-12: Un segnale impulsivo è stato generato attraverso un generatore che consente di produrre impulsi con diverso contenuto armonico, in modo da simulare i diversi segnali che possono provenire dal circuito di misura.

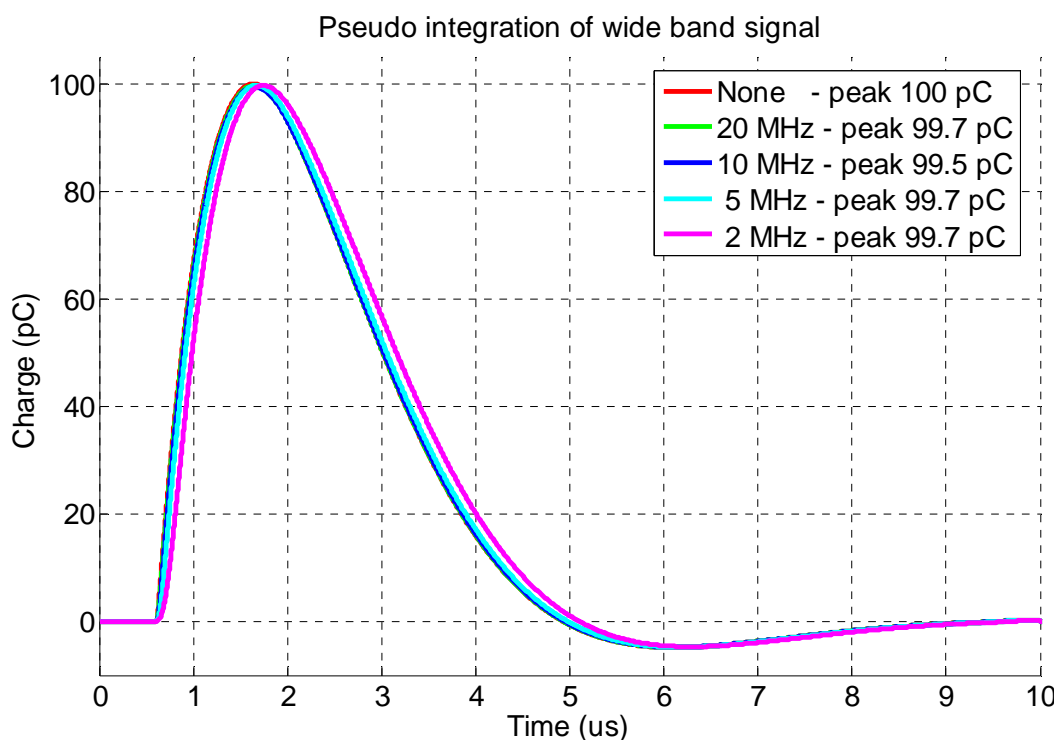


Figura 4-13: Pseudointegrazione numerica delle forme d'onda di Figura 4-12. Si noti che l'incertezza massima è contenuta entro lo 0,5%.

I segnali registrati sono stati integrati con il metodo proposto utilizzando la risposta impulsiva di un sistema del secondo ordine avente le seguenti caratteristiche:⁹

Pulsazione caratteristica	=	150 kHz
Fattore di smorzamento	=	0,7

I risultati sono mostrati in Figura 4-13.

Il metodo della pseudointegrazione, a fronte di segnali molto diversi ha portato alla stessa quantificazione della carica con una differenza massima contenuta entro lo 0,5 %.

⁹ Il valore è stato scelto per ottenere caratteristiche simili alle risposte di alcuni sistemi a banda larga.

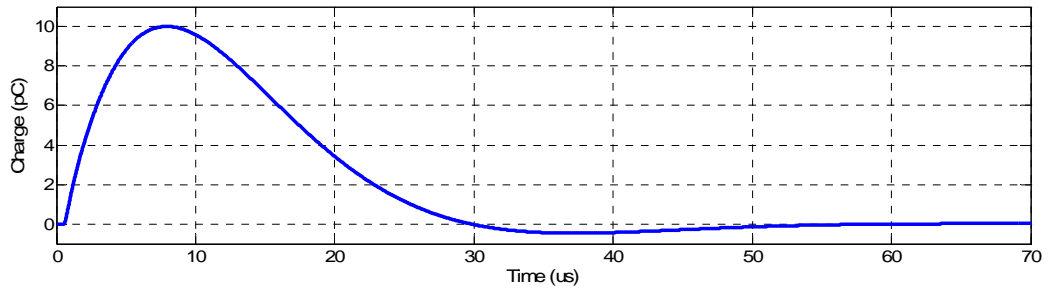
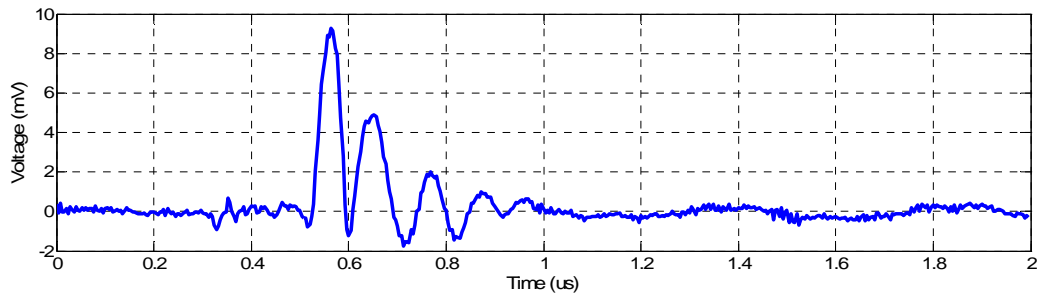


Figura 4-14: Esempio di pseudointegrazione numerica. Impulso di calibrazione con carica apparente pari a 10 pC.

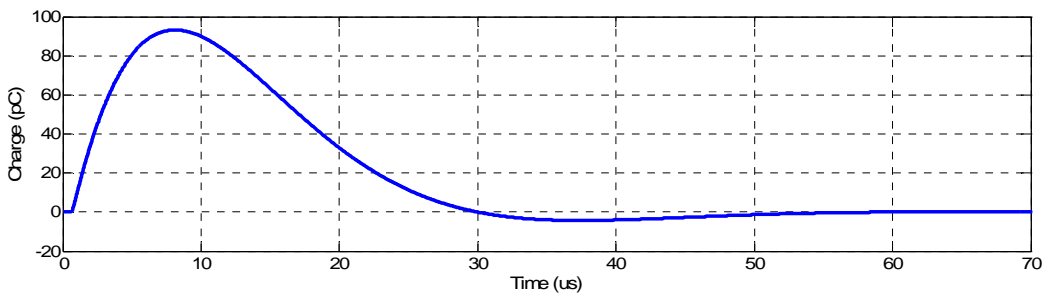
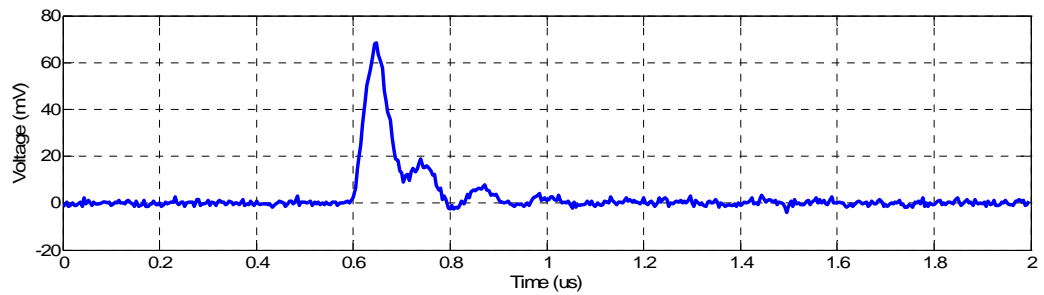


Figura 4-15: Esempio di pseudointegrazione numerica. Impulso di scarica parziale registrato in un trasformatore di tensione.

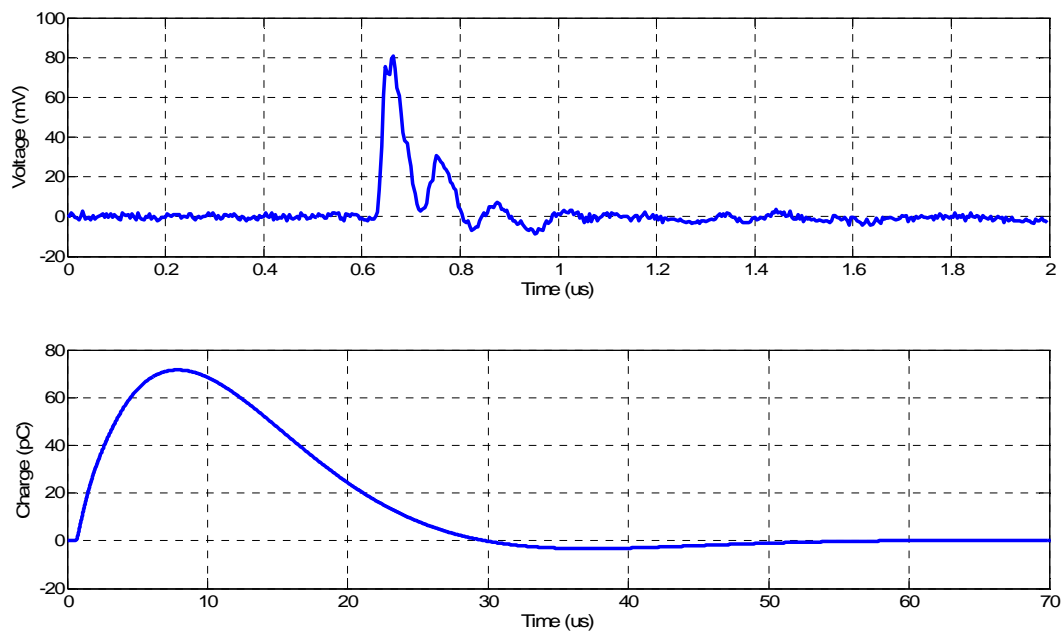


Figura 4-16: Esempio di pseudointegrazione numerica. Impulso di scarica parziale registrato in un trasformatore di tensione.

4.6 Limiti nei circuiti di misura a banda ultra larga e limiti nella strumentazione

Nel corso della misura delle scariche parziali a banda ultra larga condotte sia con la strumentazione autocostruita che con la strumentazione di tipo commerciale si è rilevato che il contenuto armonico dei segnali misurati non era compatibile con quanto previsto in letteratura.

In pratica il contenuto armonico dei segnali misurati risultava essere sempre inferiore a quanto previsto e non superava mai il valore di 30 – 40 MHz.[20][21]

Secondo quanto riportato in letteratura il contenuto armonico nei segnali costituisce una informazione importante in merito alla evoluzione della scarica parziale e dunque sulla propria origine.

Nella pratica come detto tali informazione non è praticamente mai risultata disponibile ed i segnali rilevati, anche in presenza di scariche canoniche risultavano fortemente diversi da quanto previsto.

L'indagine condotta ha portato a definire l'influenza del circuito di misura come principale limitazione nel contenuto armonico dei segnali.

Infatti i circuiti di misura utilizzati, derivati dai circuiti IEC60270 presentano, per ragioni dovute sia alla classe di isolamento dei componenti che alla potenza nominale degli stessi una estensione non trascurabile dell'ordine di alcuni metri.

Considerando inoltre che gli oggetti in prova hanno estensione di alcuni metri la riduzione delle dimensioni del circuito diviene spesso impossibile ed i circuiti sovente presentano spire di misura di alcuni metri.

Le precedenti considerazioni porterebbero ritenere che il metodo proposto sia inapplicabile, per quanto esposto, nella pratica delle misura delle scariche parziali nei sistemi industriali.

Come sarà esposto nei capitoli successivi, nella misura delle scariche parziali a banda ultra larga la informazione sulla forma d'onda dell'impulso di corrente differisce dalla forma d'onda dell'impulso originario a causa della influenza della funzione di trasferimento del circuito di misura e dello stesso oggetto in prova qualora abbia una dimensione fisica non trascurabile.

In ogni caso siccome la informazione sulla forma d'onda della corrente dell'impulso viene utilizzata solo per separare impulsi di natura diversa tale limite, se controllato non è tale da invalidare il metodo di misura.

In conclusione, i circuiti di misura, date le proprie caratteristiche, riducono la banda passante del sistema di misura e introducono nei segnali modifiche che possono renderli completamente diversi dall'impulso originale.

Ai fini della misura delle scariche parziali con i metodi proposti l'informazione sulla forma d'onda della corrente non può essere utilizzata in quanto funzione sia della funzione di trasferimento del circuito di misura che dell'oggetto stesso.

L'informazione che deve essere ricavata dalle misure di scariche parziali in banda ultra larga deve riguardare la forma d'onda degli impulsi in senso lato, devono solo essere distinti impulsi aventi le medesime caratteristiche per poter in seguito, con tecniche note, riconoscere la natura delle distribuzioni per ricondursi al fenomeno di scarica.

Per quanto riguarda l'influenza della funzione di trasferimento dell'oggetto in prova, se complesso, si deve ammettere che la sua influenza nei segnali può essere registrata fornendo una informazione sulla presenza di fenomeni della stessa natura ma ubicati in punti geometricamente distinti dell'oggetto in prova.

La analisi riportata ha come scopo la caratterizzazione della influenza di vari circuiti di misura delle scariche parziali in banda ultra larga in funzione della riduzione del contenuto armonico degli impulsi di carica apparente.

Sono stati analizzati vari circuiti, aventi diversa estensione in quanto previsti per diverse tensioni.

4.6.1 Misura della influenza dei circuiti di misura nella forma d'onda della corrente delle scariche parziali

Per verificare l'influenza dei circuiti sulla forma d'onda della corrente dovuta alle scariche parziali sono stati verificati tre diversi condensatori di accoppiamento aventi diverse tensioni massime di esercizio.

Si sono provati i seguenti condensatori:

- A) Condensatore ceramico, con capacità nominale pari a 2 nF, tensione massima pari a 20 kV ed altezza di circa 30 mm.
- B) Condensatore in carta olio, con capacità nominale pari a 2 nF, tensione massima pari a 50 kV ed altezza di circa 500 mm.
- C) Condensatore in carta olio per alte tensioni, con capacità nominale pari a 500 pF, tensione massima pari a 500 kV ed altezza di circa 2000 mm.



Figura 4-17: Condensatore ceramico di capacità nominale pari a 2 nF e tensione massima pari a 20 kV efficaci.



Figura 4-18: Condensatore isolato in carta olio di capacità nominale pari a 2 nF e tensione massima pari a 50 kV efficaci.



Figura 4-19: Condensatore isolato in carta olio di capacità nominale pari a 500 pF e tensione massima pari a 500 kV efficaci.

Per eseguire la prova si è allestito un circuito come riportato nella Figura 4-20. mediante un calibratore, composto da un generatore di onda quadra e da un condensatore posto in serie, si è iniettato un impulso di corrente ai capi del condensatore di accoppiamento. In serie al circuito descritto, al fine di misurare l'impulso di corrente, si è posto un canale dell'oscilloscopio adattato sui 50 Ohm.

È stata registrata dapprima la corrente del generatore (senza condensatore di accoppiamento) ed in seguito le varie altre correnti modificate dall'introduzione nel circuito dei vari condensatori in prova.

I risultati della misura hanno evidenziato che esiste un legame tra le dimensioni fisiche degli oggetti in prova ed il contenuto armonico delle correnti rilevate.

Infatti maggiori sono le dimensioni di circuiti, maggiore è l'influenza dei parametri parassiti del circuito e minore è il contenuto armonico nelle correnti.

Essendo che, la distinzione tra la forma d'onda dei vari impulsi alla base del metodo di misura delle scariche parziali a banda ultra larga, i circuiti devono essere scelti al fine di permettere la distinzione tra diversi impulsi e dunque la deformazione introdotta dal circuito deve essere valutata.

Le esperienze pratiche condotte nella misura delle scariche parziali con sistemi a banda ultra larga hanno dimostrato che, con circuiti la cui influenza sul contenuto armonico della corrente sia limitata a 20 – 25 MHz, è ancora possibile la distinzione tra impulsi di natura diversa mentre con circuiti nei quali l'influenza sul contenuto armonico diviene più pesante la distinzione tra gli impulsi diventa difficile o addirittura impossibile.

Nei casi esaminati risulta che nei circuiti di media tensione, di normali dimensioni, la misura delle scariche parziali con metodi a banda ultra larga è normalmente possibile mentre non lo è nei circuiti di alta tensione dove le dimensioni fisiche dei componenti, imposte dai requisiti legati alla elevata tensione, costituiscono una fortissima limitazione al contenuto armonico dei segnali rilevabili tanto da rendere impossibile la distinzione tra impulsi diversi. Con tale limitazione si conclude che la misura delle scariche parziali in banda ultra larga su componenti in alta tensione condotte mediante circuiti derivati dalla norma IEC60270 è molto difficile e spesso impossibile.

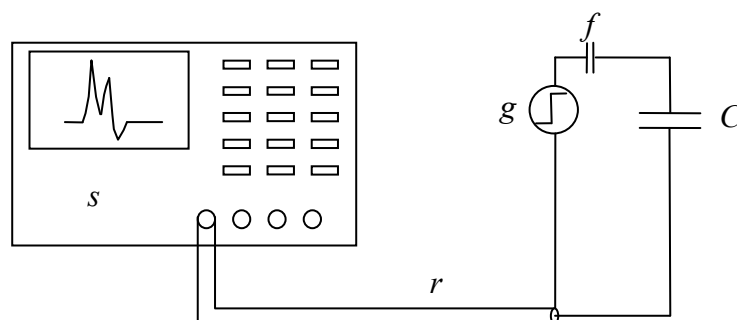


Figura 4-20: Circuito utilizzato per la verifica dell'influenza dei condensatori di accoppiamento sul contenuto armonico della corrente. (s) Oscilloscopio (Impedenza di misura 50 Ohm), (r) Cavo coassiale da 50 Ohm, (g) Generatore impulsivo di onda quadra, (f) Condensatore di calibrazione (50 pF), (C) Condensatore in prova.

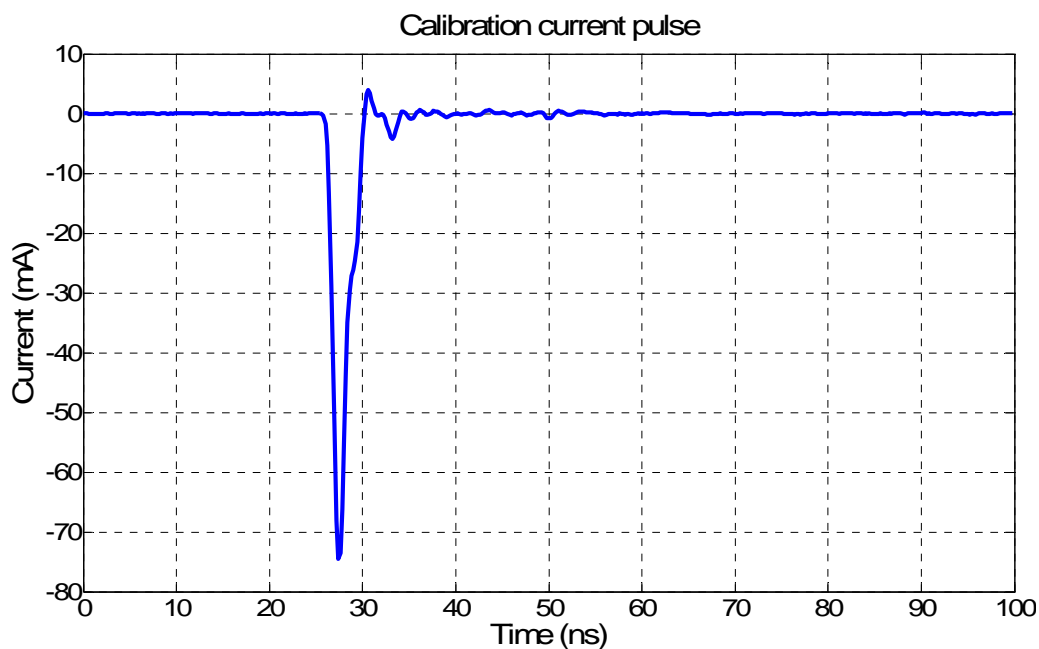


Figura 4-21: Impulso di corrente del calibratore, registrato senza la presenza di alcun condensatore di accoppiamento.

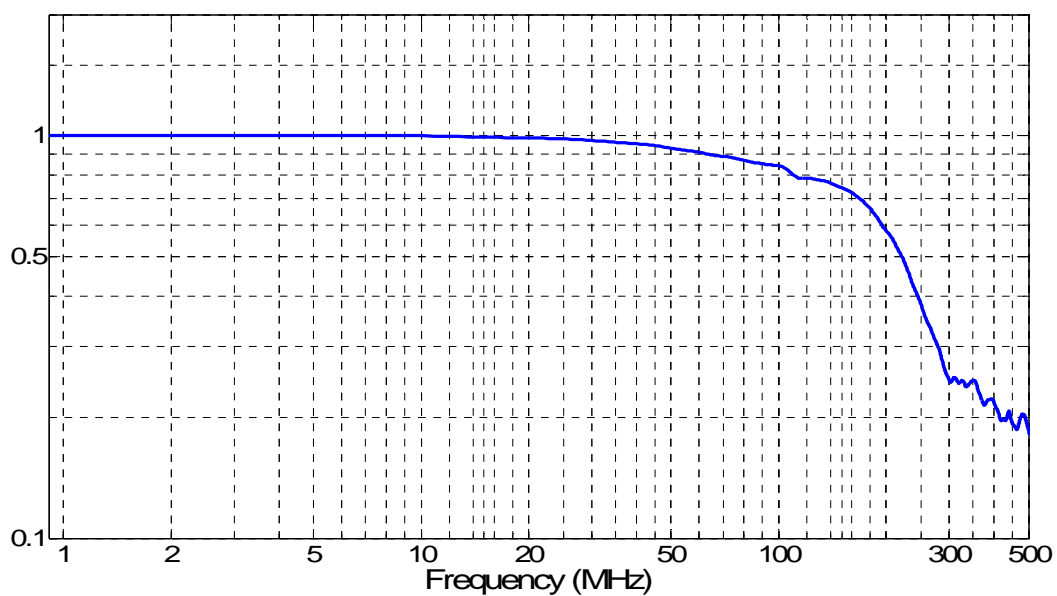


Figura 4-22: Spettro dell'impulso di corrente del calibratore, registrato senza la presenza di alcun condensatore di accoppiamento. Si noti l'elevato contenuto armonico del segnale.

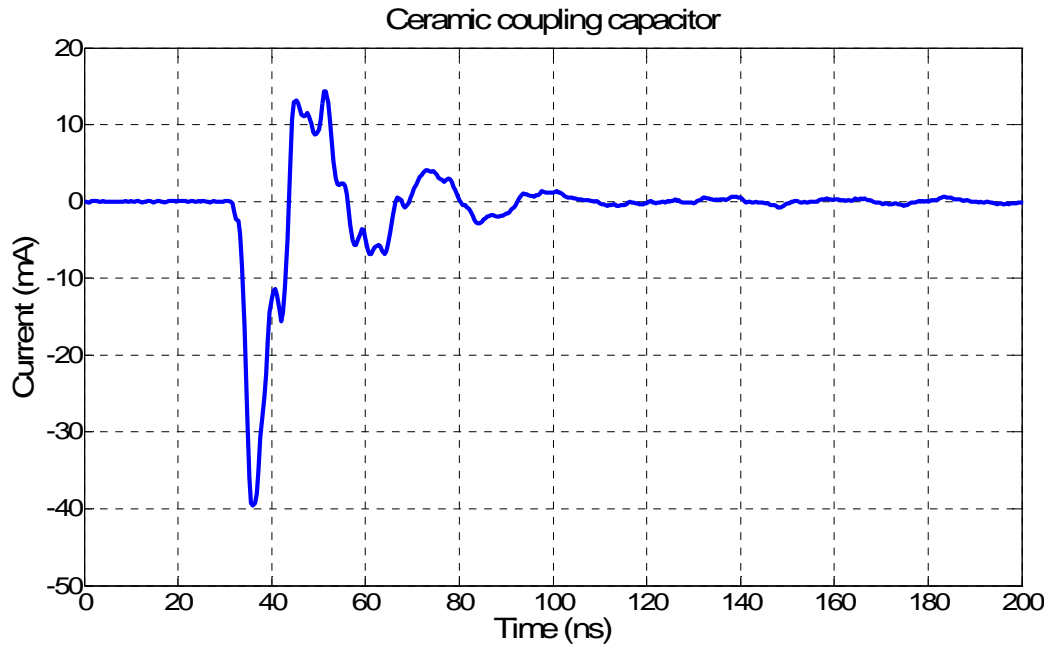


Figura 4-23: Impulso di corrente del calibratore, registrato con la presenza del condensatore di accoppiamento ceramico (A).

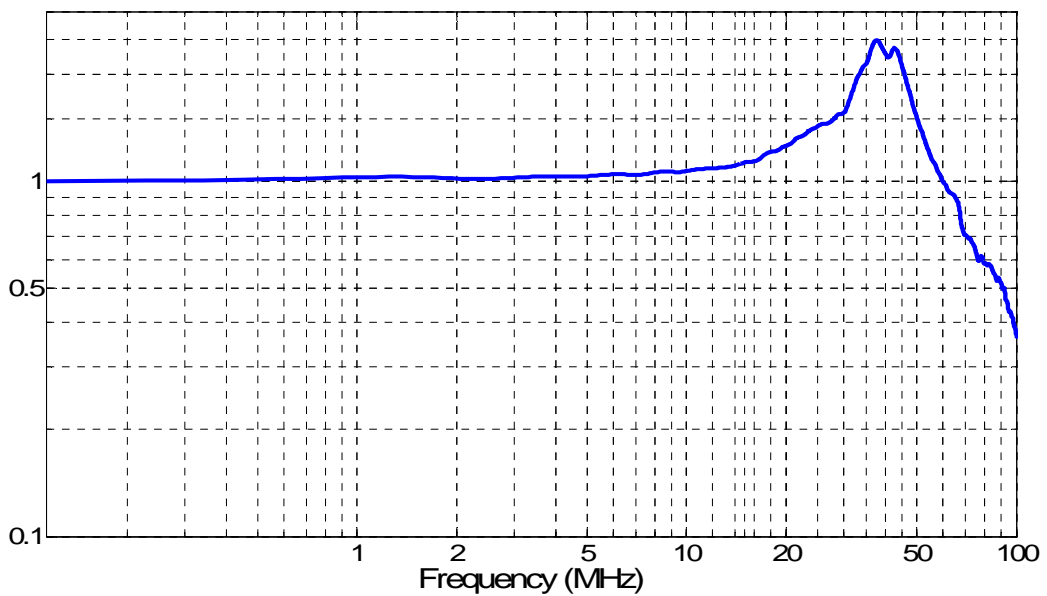


Figura 4-24: Spettro dell' impulso di corrente del calibratore, registrato con la presenza del condensatore di accoppiamento ceramico (A). Si noti che la presenza del condensatore ha notevolmente ridotto il contenuto armonico del segnale.

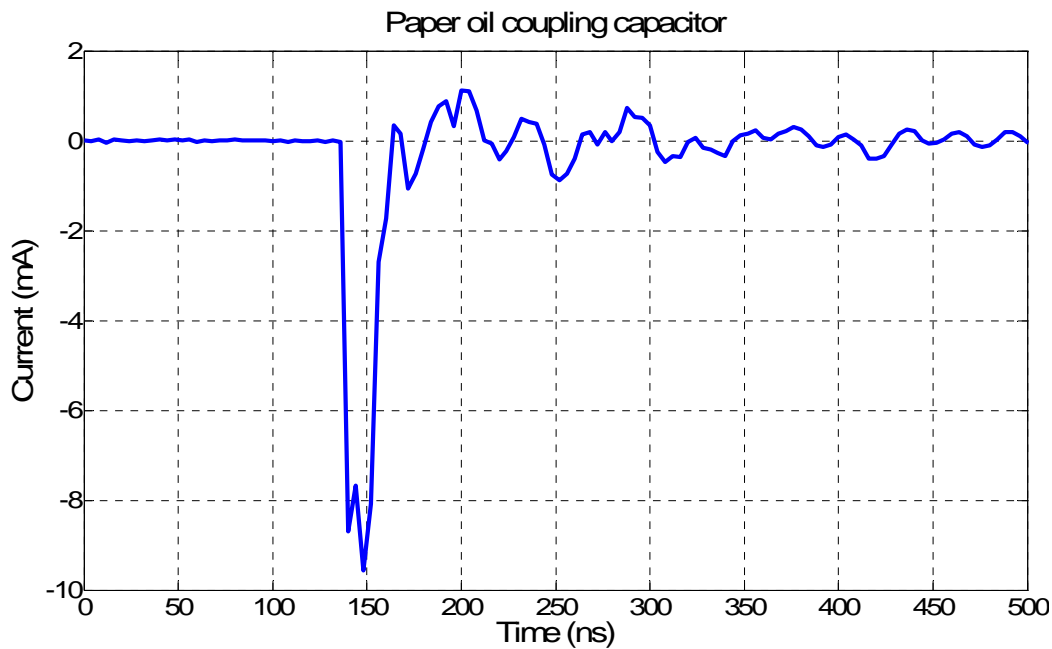


Figura 4-25: Impulso di corrente del calibratore, registrato con la presenza del condensatore di accoppiamento in carta olio (B).

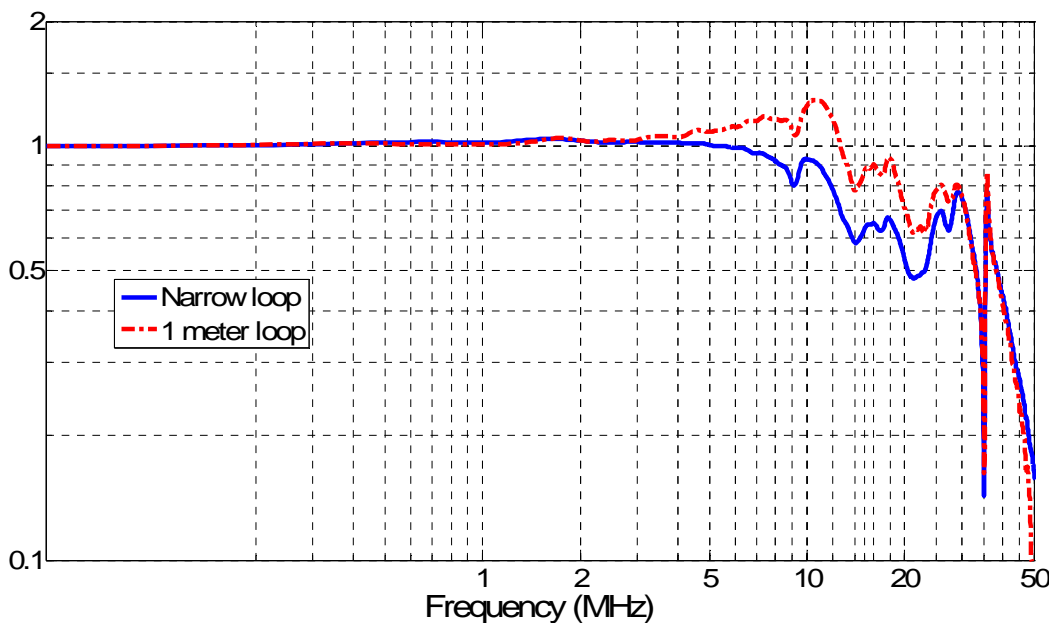


Figura 4-26: Spettro dell' impulso di corrente del calibratore, registrato con la presenza del condensatore di accoppiamento in carta olio (B). Vengono riportati due casi: nel primo si è realizzata una spira con minima area, nel secondo caso si è realizzata una spira avente dimensioni simili a quella utilizzata nelle normali prove. Si noti che la presenza del condensatore ha notevolmente ridotto il contenuto armonico del segnale.

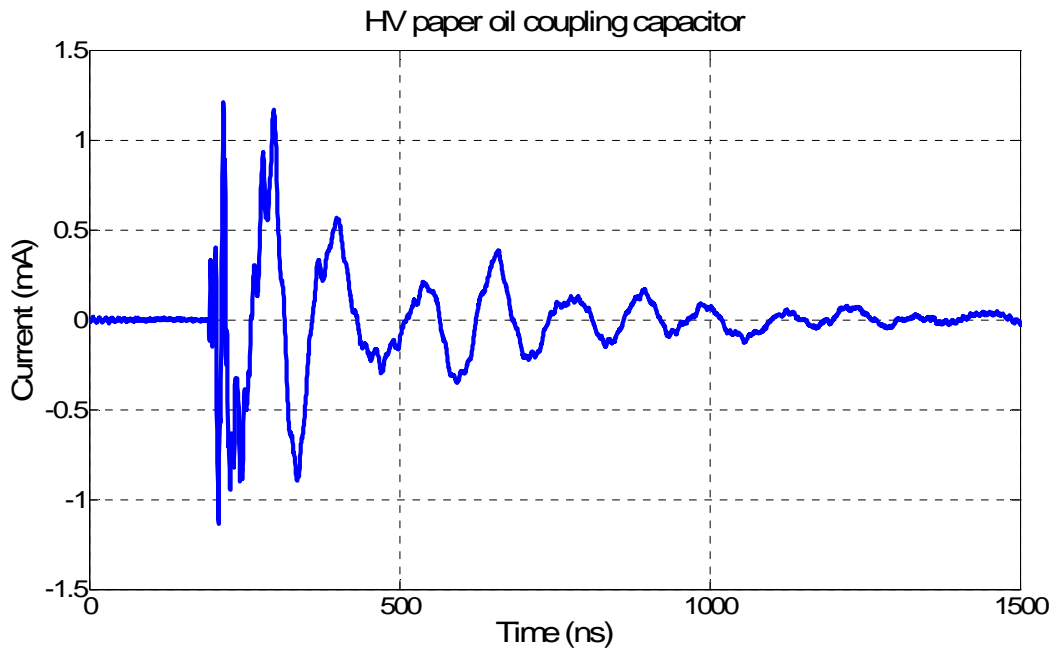


Figura 4-27: Impulso di corrente del calibratore, registrato con la presenza del condensatore di accoppiamento in carta olio per alte tensioni (C). Si noti che dalla forma d'onda rilevata non è più possibile ricavare alcuna informazione sulla forma d'onda dell'impulso originale. Ciò che si osserva è la risposta impulsiva del sistema.

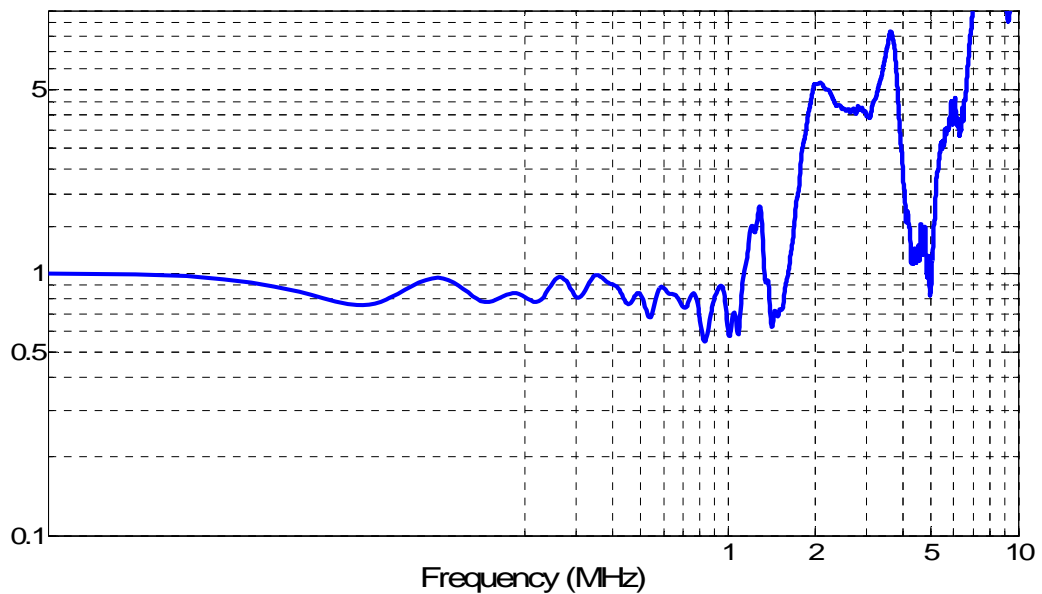


Figura 4-28: Spettro dell'impulso di corrente del calibratore, registrato con la presenza del condensatore di accoppiamento in carta olio per alte tensioni (C). Si noti che la presenza del condensatore ha notevolmente ridotto il contenuto armonico del segnale a valori bassissimi (Circa 2 MHz!).

5 I trasformatori

Al fine di poter eseguire correttamente una misura diagnostica su un trasformatore isolato in resina epossidica è essenziale una analisi dei principi costruttivi e dei principali difetti di tali macchine.

Il presente capitolo fornisce alcune informazioni in merito alle principali tecniche costruttive ed ai principali difetti dei trasformatori incapsulati in resina.

5.1 **Principi costruttivi dei trasformatori incapsulati in resina epossidica.**

5.1.1 **Introduzione**

Si definiscono trasformatori a secco tutti i trasformatori i cui avvolgimenti sono raffreddati ed isolati gli uni dagli altri dall'aria atmosferica. Di questa categoria fanno parte i trasformatori isolati in aria ed i trasformatori isoalti in resina epossidica.

Dal punto di vista storico, per quanto riguarda l'impiego dei trasformatori per il trasporto della energia elettrica, i trasformatori a secco, data la loro semplicità costruttiva, sono stati i primi ad essere impiegati soprattutto per quanto riguarda la distribuzione secondaria.

L'aumento della richiesta di energia elettrica, spinse ad incrementare la tensione nelle reti elettriche ed ad aumentare pure la potenza installata per singola rete. Tali modifiche ai sistemi di trasmissione dell'energia resero i trasformatori in aria molto meno economici dei trasformatori isolati con olio minerale.

Questa seconda tipologia di trasformatori, rispetto ai trasformatori a secco, sfrutta un liquido isolante sia per isolare le parti attive, sia per il raffreddamento degli avvolgimenti. Essendo le proprietà degli oli molto superiori alle proprietà dielettriche e di conducibilità termica dell'aria si ottiene come risultato che i trasformatori in olio, rispetto ad un equivalente trasformatore in aria, operano con campi elettrici e densità di potenza molto maggiori, risultando essere più piccoli e leggeri e dunque maggiormente economici.

È da sottolineare che oltre a quanto esposto i trasformatori in olio, rispetto ai trasformatori in aria necessitano di minori oneri di manutenzione e sono molto meno sensibili ai guasti derivanti da sovratensioni e surriscaldamenti dovuti sovra-correnti limitate nel tempo.

I vantaggi descritti per i trasformatori in olio li portarono ad essere la soluzione standard per il mercato della distribuzione della energia sino agli anni '60 e '70.

Negli anni '60 però si scoprì la pericolosità per la salute umana di alcuni composti chimici detti policlorobifenili (PCB) un gruppo di composti chimici aventi formula generale $C_{12}H_{12}Cl_{10-x}$, composti che erano pesantemente impiegati per addizionare gli oli minerali aumentandone notevolmente il punto di infiammabilità

La messa al bando dei PCB ebbe come conseguenza, da un lato la ricerca di oli alternativi, da un altro la ricerca di soluzioni alternative ai trasformatori isolati in liquido minerale.

Il ritorno alla considerazione da parte degli impiantisti della tecnologia dei trasformatori a secco, fu favorita dalla introduzione (negli anni 60-70) di nuove tipologie di materiali isolanti di natura polimerica (Mylar – Nomex - ecc) in grado di resistere a temperature di esercizio molto elevate (Sino alla classe F - H) ed a notevoli campi elettrici interni paragonabili se non superiori a quelli che si potevano ottenere in olio.

Di conseguenza il divario economico tra trasformatori a secco e trasformatori in olio poteva essere notevolmente ridotto ma il vero cambiamento è però dovuto ad una nuova tecnologia che prendeva piede in quegli anni: l'introduzione delle resine epossidiche.

Le resine epossidiche, infatti consentono una notevole riduzione delle distanze isolanti all'interno degli avvolgimenti e, date le loro proprietà termiche, l'incremento dello scambio termico tra gli avvolgimenti e l'ambiente.



Figura 5-1: Trasformatore isolato in aria 400 V / 231 V per distribuzione dell'energia elettrica (SEA)



Figura 5-2: Trasformatore isolato in aria MT -BT per la conversione statica della energia elettrica. Si noti l'avvolgimento primario diviso in due sezioni (SEA)



Figura 5-3: Trasformatore isolato in olio 20000 V / 400 V per distribuzione dell'energia elettrica (SEA)



Figura 5-4: Trasformatore isolato in olio 20000 V / 400 V per distribuzione dell'energia elettrica (Spaccato)



Figura 5-5: Trasformatore isolato in resina per distribuzione dell'energia elettrica (SEA)

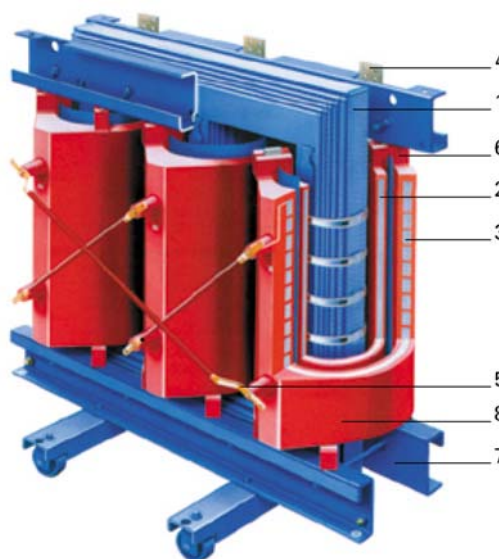


Figura 5-6: Trasformatore isolato in resina per distribuzione dell'energy elettrica (Siemens)

- 1) Nucleo
- 2) Bassa tensione
- 3) Alta tensione
- 4) Terminali di bassa tensione
- 5) Terminali di alta tensione
- 6) Spaziatori o tacchetti per l'ammarraggio e l'isolamento delle bobine
- 7) Armature per il contenimento del pacco magnetico
- 8) Resina epossidica costituente l'isolamento della media tensione

I trasformatori in resina, presentano rispetto ai trasformatori in aria numerosi vantaggi quali ad esempio:

- 1) Possibilità di operare con classi di isolamento termico maggiormente elevate
- 2) Possibilità di riduzione delle distanze elettriche all'interno degli avvolgimenti
- 3) Possibilità di avere una ridotta manutenzione annuale (le bobine di media tensione, dove i campi sono maggiormente elevati non si impolverano)
- 4) Maggiore efficienza termica derivata dalla elevata conducibilità della resina.
- 5) Riduzione dei pesi e delle perdite (Maggior rendimento)
- 6) Maggiore solidità meccanica delle bobine agli sforzi elettrodinamici
- 7) Maggiore praticità costruttiva che si traduce in maggiore economicità.
- 8) Maggiore resistenza degli avvolgimenti agli attacchi chimici, all'inquinamento ed all'effetto dell'umidità

I trasformatori isolati in resina, si presentarono sul mercato come alternativa concreta ai trasformatori in olio, con un sovrapprezzo, rispetto all'equivalente di circa 20 – 30 %. Tale sovrapprezzo è peraltro compensato nelle nuove installazioni dalla eliminazione dei costi dovuti alle opere civili necessarie alla realizzazione delle vasche contenitive per gli oli isolanti.

Attualmente, il mercato dei trasformatori da distribuzione in Europa sta premiando la soluzione in resina epossidica e si osserva una graduale riduzione, di anno in anno, della richiesta dei trasformatori in olio.

La scelta di un trasformatore in resina piuttosto che un trasformatore in olio comporta i seguenti vantaggi:

- 1) Maggiore resistenza degli avvolgimenti agli attacchi chimici, all'inquinamento ed all'effetto dell'umidità
- 2) Eliminazione del rischio di propagazione degli incendi.
- 3) Riduzione delle emissioni tossiche in caso di guasto.
- 4) Eliminazione delle spese per opere civili.
- 5) Diretto accesso alle parti in tensione con possibilità di cambiare in forma semplice l'entrata cavi.

Oltre a dei vantaggi, rispetto ai trasformatori in olio si debbono rilevare pure degli svantaggi:

- 1) Eliminazione del rischio di propagazione degli incendi.
- 2) Maggiori perdite nel ferro e negli avvolgimenti dovute alle maggiori distanze in aria.
- 3) Necessità di installazione in ambiente chiuso oppure in armadio, per evitare che agenti conduttivi, come ad esempio l'acqua, possano cortocircuitare le parti attive.
- 4) Necessità di proteggere le persone inibendo l'accesso ai locali di installazione delle macchine.

- 5) Minore capacità di tenuta ai sovraccarichi legata alla minore inerzia termica delle parti attive, necessità di installazione di opportuni sensori di temperatura.
- 6) Impiego praticamente totale di materiali isolanti non autoripristinanti.
- 7) Impossibilità (Pratica) di riparazione degli avvolgimenti eventualmente danneggiati.
- 8) Necessità (Costruttiva) di avere impianti e tecnologie adeguate.
- 9) Necessità di un ottimo controllo del processo produttivo.

Attualmente i trasformatori in resina costituiscono gran parte del mercato della distribuzione di energia elettrica e sono in corso sviluppi per nuovi prodotti quali ad esempio i trasformatori totalmente inglobati alta tensione e bassa tensione (Riduzione di tutte le distanze elettriche) e trasformatori in resina in grado di essere installati in ambienti esterni.

Confronto tra trasformatori da distribuzione in resina ed in olio aventi circa le medesime caratteristiche				
	Trasformatori in olio		Trasformatori in resina	
Tipologia (SEA)	TTO-2		TTR-C50	
Sn (kVA)	630	1600	630	1600
v_{cc} (%)	6	6	6	6
P_0 (W)	800	2600	1650	3100
P_{cc} (W)	6750	17000	7800	16050
Massa totale (kg)	1830	3390	1900	3100
Costo approx (€)	10980	20340	15200	24800

Tabella 4: Confronto tra le principali caratteristiche dei trasformatori in olio ed in resina

5.1.2 Principi costruttivi dei trasformatori in resina

I trasformatori in resina, costruttivamente, hanno molte analogie con i trasformatori in aria. In particolare la tecnologia utilizzata per la realizzazione degli avvolgimenti di bassa tensione è la medesima ed analoga è la realizzazione delle parti meccaniche e magnetiche.

La peculiarità dei trasformatori in resina consiste nella realizzazione degli avvolgimenti di media tensione. Tali avvolgimenti, data la necessità di operare in un sistema isolante complesso debbono essere costruiti tenendo conto sia degli aspetti di natura elettrica (distribuzione dei campi elettrici, delle perdite addizionali) che di quelli meccanici (dilatazione termica delle bobine) e costruttivi (tecniche di inglobamento).

Nei trasformatori di media tensione, per aumentare la tenuta degli isolamenti alle prove impulsive non si adottano generalmente avvolgimenti a strati, dove tutta la tensione impulsiva cadrebbe su pochi millimetri, ma si adottano tecniche di avvolgimento a sezioni o cellette. Mediante questa tecnologia, l'avvolgimento viene diviso in diverse sezioni, dipendenti dalla classe di isolamento richiesta cosicché la massima tensione si ha, di regola, in punti dell'avvolgimento geometricamente lontani.

Sempre per motivi dielettrici la eventuale commutazione di tensione è ristretta in un campo generalmente del $\pm 5\%$ o al massimo $\pm 10\%$ ed è realizzata nel centro della bobina in sezioni dell'avvolgimento dedicate.

La costruzione delle singole sezioni o cellette è invece funzione della corrente di avvolgimento: queste vengono realizzate in filo per correnti di modesta entità ed in lastra per correnti elevate.

Nelle bobine di media tensione degli avvolgimenti in resina, per motivi dielettrici è molto difficile realizzare dei canali di raffreddamento interni all'avvolgimento e pertanto, qualora necessario per motivi di corrente, si tende a realizzare più avvolgimenti che sono poi posti in parallelo.

Sia nel caso in cui gli avvolgimenti vengono realizzati con filo smaltato che nelle soluzioni con con lastra di alluminio, per ottenere l'isolamento tra i vari strati che compongono la sezione, si utilizzano isolanti polimerici come Mylar o Nomex.

Tra le varie sezioni, l'isolamento è costituito dalla sola resina ed eventualmente, a seconda della tecnica di colata che si intende realizzare (orizzontale o verticale) possono essere interposti o meno tra le sezioni dei tacchetti aventi la stessa costante dielettrica relativa della resina.

I materiali che vengono posti all'interno dell'avvolgimento oltre ad essere chimicamente compatibili con la resina debbono consentire una ottima adesione con la massa per evitare possibili fessurazioni o distacchi: è pertanto essenziale il trattamento superficiale di questi elementi. e la loro pulizia.

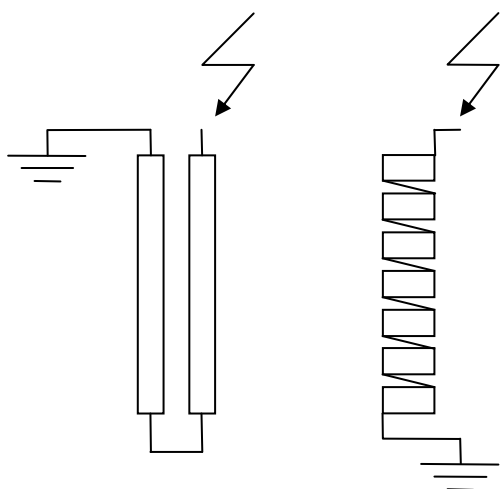


Figura 5-7: Schema di avvolgimento realizzato a strati e a sezioni o cellette.



Figura 5-8: Avvolgimento realizzato in sezioni o cellette a filo (SEA)



Figura 5-9: Realizzazione di un avvolgimento di media tensione in sezioni o cellette in lastra di alluminio. (Costruzione SEA)

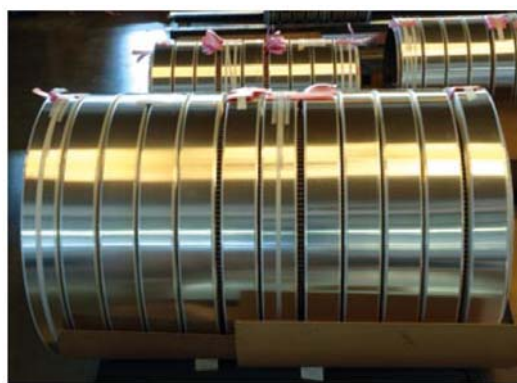


Figura 5-10: Avvolgimento di media tensione in sezioni o cellette in lastra di alluminio prima della fase di colata. (Costruzione SEA)

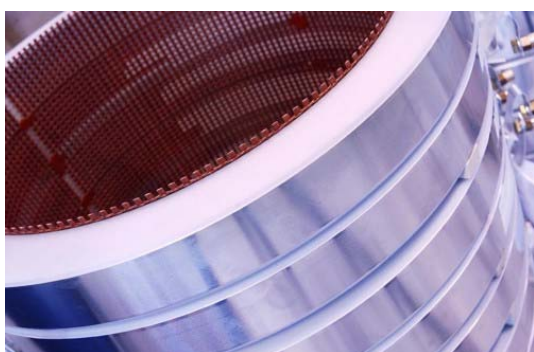


Figura 5-11: Avvolgimento di media tensione in sezioni o cellette in lastra di alluminio prima della fase di colata. Si noti la rete di rinforzo e l'isolante in film tra le spire (Costruzione TMC)



Figura 5-12: Avvolgimenti di media tensione in fase di colata verticale (Costruzione TMC)

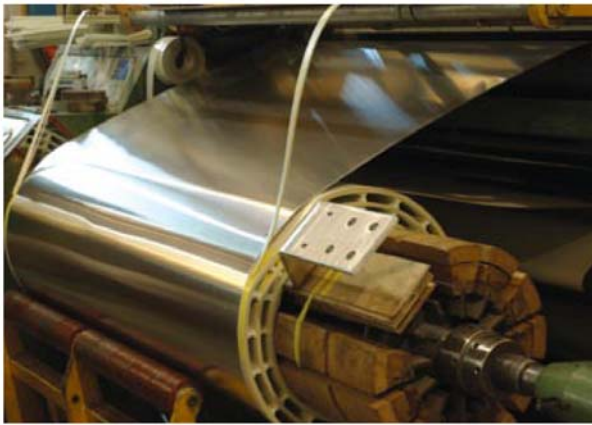


Figura 5-13: Avvolgimento di bassa tensione realizzato in lastra di alluminio (Costruzione SEA)



Figura 5-14: Avvolgimento di bassa tensione inglobato in resina. (Campi elettrici limitati e dunque possibilità di realizzazione dei canali di raffreddamento)

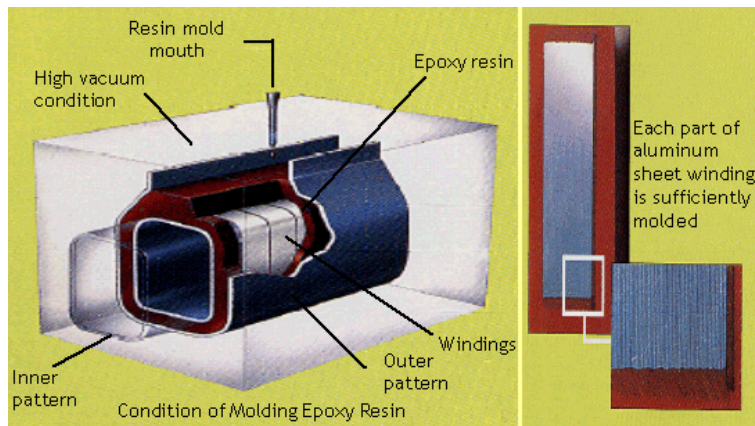


Figura 5-15: Schema di colata di una bobina in resina (Costruzione Japan AE Power Systems Corporation)



Figura 5-16: Impianto per la colata delle bobine in resina (TESAR)

Per quanto riguarda il dimensionamento meccanico degli avvolgimenti deve essere tenuto presente che i trasformatori in resina debbono operare, salvo diverso accordo tra costruttore e cliente, nel campo di temperature compreso tra $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; considerando una sovratemperatura media ammissibile per gli avvolgimenti di $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Classe F) si ottiene che le bobine dei trasformatori in resina debbono operare in un campo di variazione della temperatura di circa $165\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tale variazione termica deve essere sopportata dagli avvolgimenti senza dare luogo a tensioni meccaniche eccessive in grado di danneggiare le bobine o di portare a distacchi di materiali o vacuoli che possono originare scariche parziali.

La scelta effettuata dalla quasi totalità dei costruttori di trasformatori è l'impiego di materiale conduttore in alluminio che rispetto al rame presenta un coefficiente di dilatazione termica molto vicino a quello della resina e dunque concorre alla riduzione delle tensioni meccaniche interne alla bobina.

Da non trascurare è anche la qualità della miscela di resina. La miscela infatti, per questioni normative deve essere ignifuga e non dar luogo ad emissione di gas tossici ad alte temperature. Questa esigenza di solito si traduce in miscele di resina ricche di quarzo ed allumina ma tale scelta generalmente si scontra con l'esigenza di avere una limitata fragilità delle resine che è una causa accertata di fessurazione delle bobine.

Nella pratica, considerati i problemi normativi legati alle prove di tipo ed ai vari requisiti delle macchine, la composizione delle resine rimane un segreto industriale di ciascun costruttore raggiunto con l'esperienza e pertanto, nel mercato si possono trovare moltissime combinazioni di prodotti.

In generale ogni resina contiene una percentuale di questi prodotti:

- 1) Resina epossidica + Indurente
Costituisce il legante della bobina ed è presente in percentuali dell'ordine del 30 ÷ 40 % del peso totale
- 2) Farina di quarzo
Costituisce il riempitivo a basso costo, aumenta il coefficiente di scambio termico della resina
- 3) Allumina tri-idrata
Composto chimico che migliora le proprietà di autoestinguenza delle resine

Infine dopo aver realizzato le bobine va considerata l'installazione ossia il posizionamento rispetto alle altre parti del trasformatore a diverso potenziale. Esistono pertanto degli opportuni ammaraggi o tacchetti i quali sono studiati in modo apposito per eliminare il problema delle scariche superficiali.

5.1.3 I più comuni difetti riscontrabili nei trasformatori isolati in resina epossidica

Oltre ai normalissimi difetti riscontrabili in ogni categoria di trasformatore, i trasformatori in resina possono presentare specifici difetti collegati alla particolare realizzazione degli avvolgimenti.

In pratica questi difetti, essendo ubicati nella parte di isolamento non autorpristnate sono quelli che devono in maniera categorica essere individuati prima della messa in esercizio della macchina al fine di eliminare il rischio di fuori servizio degli impianti.

A parte eventuali improbabili errori di dimensionamento, molti dei difetti possono essere ricondotti alla colata di resina ed in particolare alla tecnica impiegata per la realizzazione del prodotto:

- 1) Miscela errata
- 2) Inglobamento di occlusioni estranee (metalli, polveri, ecc)
- 3) Presenza di vacuoli
- 4) Mancanza di adesione tra la resina e le altre parti della bobina
- 5) Difetti di centraggio della forma con conseguente distribuzione anormale delle distanze isolanti
- 6) Tensioni meccaniche di colata, formazione di cricche
- 7) Spostamento delle parti attive – sistema di colata
- 8) Spostamento degli isolanti
- 9) Utilizzo improprio del prodotto chimico distaccante
- 10) Eccessiva velocità di raffreddamento delle bobine colate
- 11) Eccessiva viscosità della resina in fase liquida
- 12) Eccessivo ritiro della resina in fase di polimerizzazione

Difetti dell' avvolgimento

- 1) Distanze elettriche errate
- 2) Utilizzo di isolante solido difettoso o rottura di uno o più strati di isolante polimerico
- 3) Utilizzo di combinazioni di materiali non adeguate e conseguenti distribuzioni anomale di campi elettrici
- 4) Mancanza di adesione tra le parti attive e la resina

Difetti esterni alle bobine

- 1) Errate distanze tra alta e bassa tensione
- 2) Errato centraggio delle bobine
- 3) Errata distanza tra Alta tensione e parti a massa
- 4) Errata scelta dei tacchetti / installazione
- 5) Presenza di materiale conduttivo nella superficie delle bobine
- 6) Parti del trasformatore a potenziale flottante
- 7) Schermi realizzati in modo inadeguato

Un problema comune è l'utilizzo di zeppe o tacchetti aventi parti metalliche a potenziale flottante oppure con linea di fuga moto ridotta.

Su tali parti non è infrequente il rilievo di scariche parziali di natura superficiale.

5.2 **Analisi delle principali cause di malfunzionamento dei trasformatori isolati in resina epossidica.**

I principali difetti dei trasformatori in resina sono legati al processo di manifattura delle bobine di media tensione [76]. Nelle seguenti sezioni verranno indicate in breve le principali cause di malfunzionamento rilevate da un costruttore di trasformatori in seguito ad una campagna di analisi condotte su trasformatori ritirati dal servizio.

5.2.1 **Fessurazioni**

Le fessurazioni sono dovute principalmente alle tensioni meccaniche all'interno delle bobine in resina. Tali tensioni meccaniche possono essere determinate da vari fattori quali ad esempio il diverso coefficiente di dilatazione dei materiali costituenti la bobina, urti meccanici, difetti di colata.

Una causa molto probabile di fessurazione è il rapido raffreddamento delle bobine dopo la colata perché in questi casi i ritiri di materiale possono provocare tensioni meccaniche non trascurabili.

A seguito di una fessurazione possono penetrare all'interno della bobina corpi estranei e generalmente inquinanti come polveri sottili ed acqua.

La fessurazione, se in un campo elettrico elevato, costituisce un vacuolo di grande dimensione ed è tipicamente sede di scariche parziali di elevatissima intensità che in breve tempo portano alla propagazione della fessurazione sino al cedimento totale del sistema isolante.

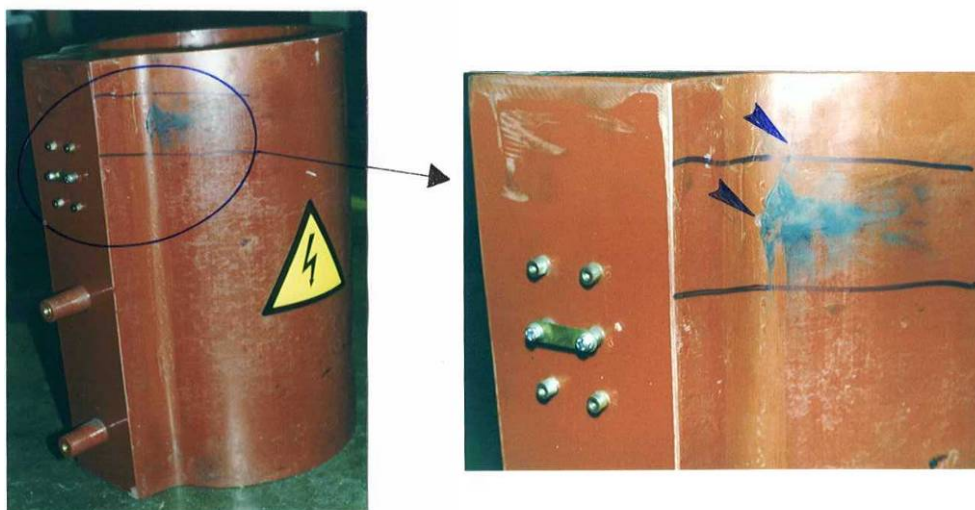


Figura 5-17: Vista della superficie esterna di una bobina in resina epossidica. Una fessurazione ha causato un arco elettrico di cui si vedono le tracce.

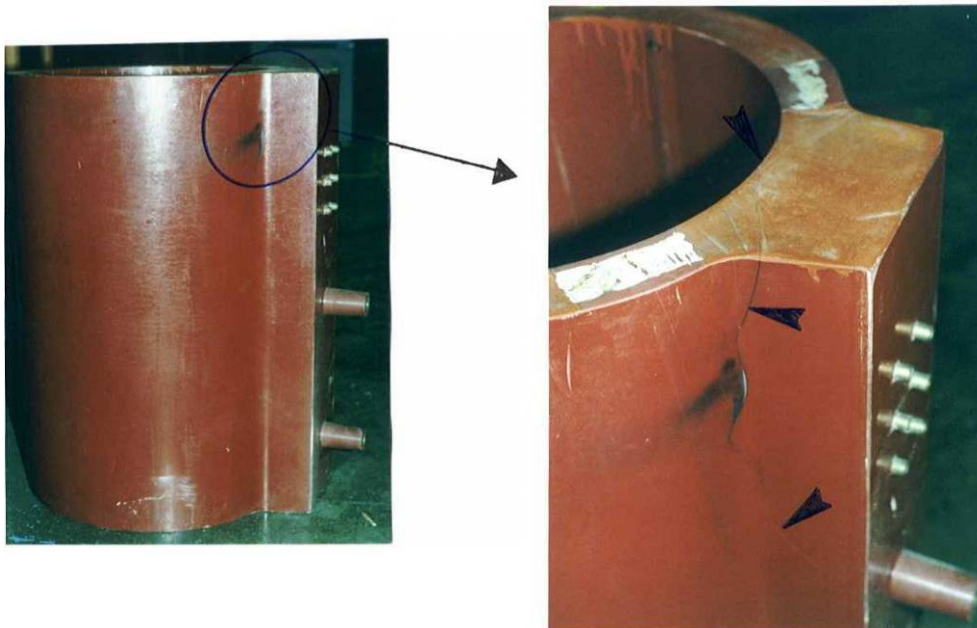


Figura 5-18: Fessurazione avvenuta in corrispondenza di una grande massa di resina. Problema di ritiro di materiale dovuto ad una eccessiva velocità di raffreddamento delle bobine dopo la fase di colata.

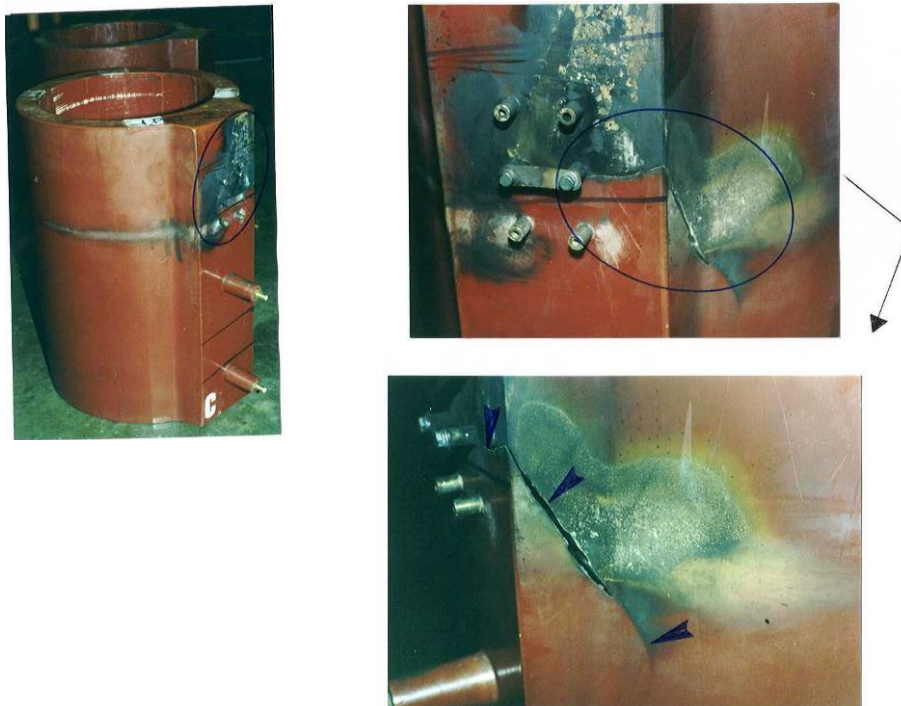


Figura 5-19: Scarica elettrica causata da una fessurazione della resina epossidica

5.2.2 Distacchi

I distacchi sono difetti di contiguità tra la resina ed i materiali costituenti l'avvolgimento. In pratica l'adesione tra le superfici viene persa e si formano dei vucoli di notevolissime dimensioni. all'interno dell'avvolgimento I distacchi sono spesso provocati dall'errato trattamento delle superfici costituenti i metalli inglobati: se infatti le superfici sono troppo lisce non vi è adesione e presto, a causa di modestissime tensioni meccaniche oppure delle semplici vibrazioni della macchina vi è il distacco.

Altra causa dei distacchi è la presenza al momento della colata di agenti estranei sulle superfici quali ad esempio oli, grassi, polvere, oppure lo stesso distaccante utilizzato per non far aderire le resine agli stampi. Nel caso il distacco avvenga in una zona abbastanza grande e vicina alla superficie di bobina può risultare evidente come nel caso riportato.



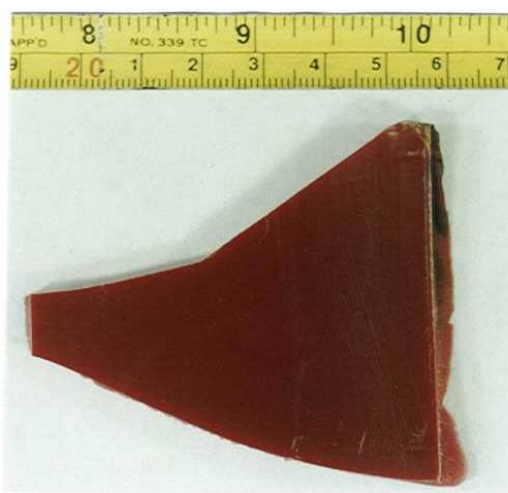
(A)



(B)



(C)



(C)

Figura 5-20: Vista della superficie esterna di una bobina in resina epossidica. In questo caso si è in presenza di un distacco di materiale (A –B). Vista delle due superfici rimosse dal distacco sopra riportato: si noti che la superficie interna risulta totalmente pulita, senza alcuna rugosità che evidenzia come non vi fosse adesione tra la resina e l'alluminio (C).

5.2.3 Occlusioni gassose, vacuoli

Può accadere che nelle colate di resina, per vari motivi, legati ad un difetto dell'impianto per il vuoto oppure alla eccessiva velocità di colata, o ancora alla eccessiva viscosità del fluido, rimangano all'interno della stessa occlusioni di gas oppure vacuoli.

Tali vacuoli se ubicati in zone dove il campo elettrico non è trascurabile, sono sede di scariche parziali.

L'individuazione di tali difetti con metodi non elettrici (ad esempio radiografia X) non è semplice soprattutto nel caso si tratti di vacuoli di piccola dimensione ubicati lontano dalla superficie delle bobine.

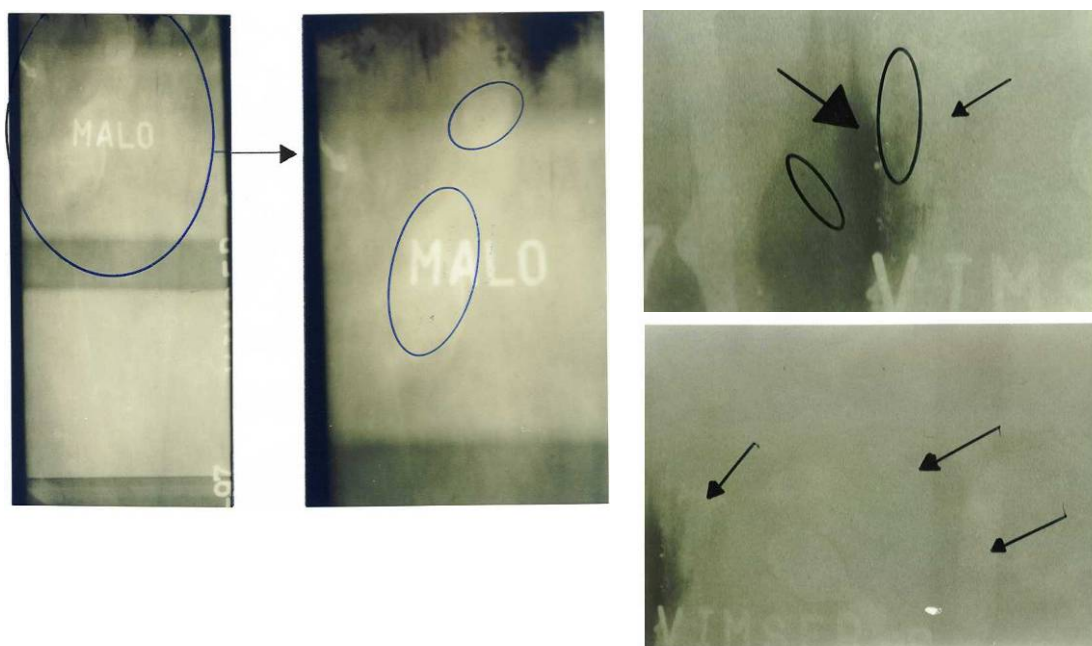


Figura 5-21: Fotografie ai raggi X dell'interno di una bobina in resina; nei punti evidenziati si nota la presenza di vacuoli.

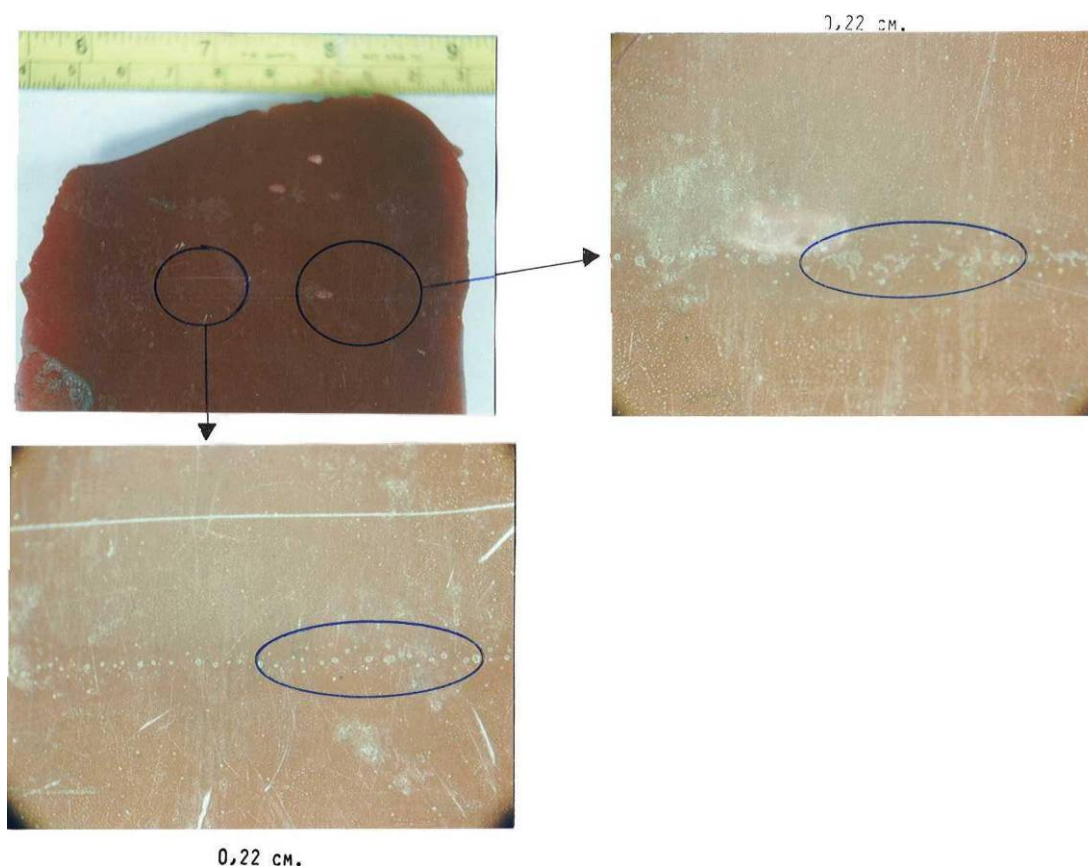


Figura 5-22: Fotografia dell'interno della bobina in resina; nei punti evidenziati si nota la presenza di piccolissimi vacuoli.

5.2.4 Occlusioni di materiali estranei

Può accadere che nelle colate di resina, per vari motivi, rimangano all'interno delle bobine dei materiali estranei ed inquinanti come ad esempio le polveri metalliche o altro. Tali materiali possono modificare il campo elettrico all'interno delle bobine dando luogo a zone di forte addensamento del campo con conseguente cedimento locale degli isolanti.

5.2.5 Vacuoli per ritiro della resina

In alcuni casi può accadere che nelle colate di resina, per motivi legati alla eccessiva viscosità della resina oppure per cattivo mescolamento della stessa con il reagente vi siano zone all'interno delle bobine dove la stessa non è riuscita a penetrare.

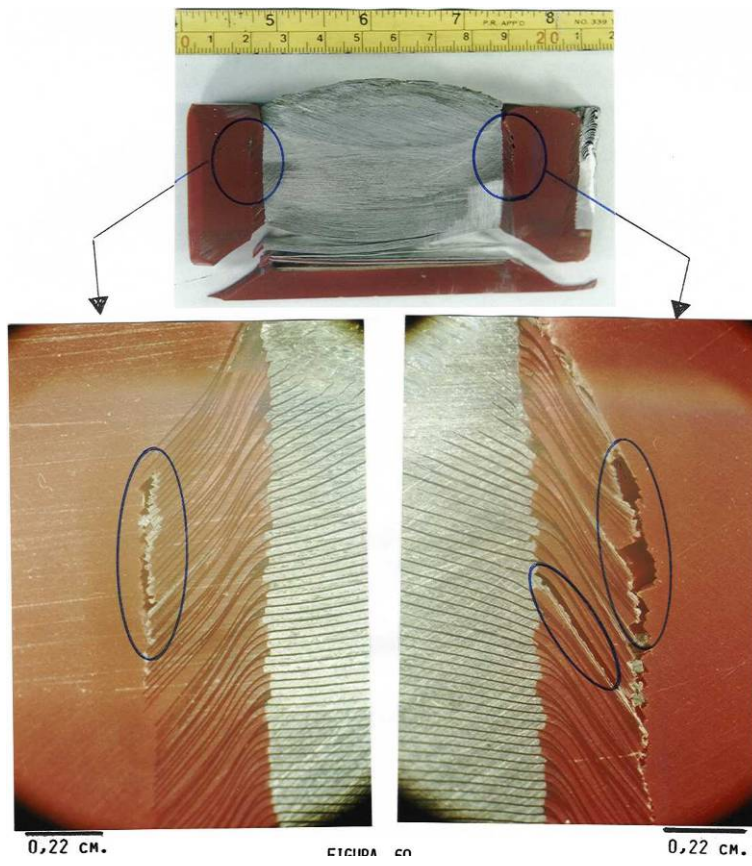


Figura 5-23:
 Vista di dettaglio di alcuni vacuoli creati per cattiva penetrazione della resina. La zona evidenziata è quella tra le sezioni; si nota che in alcuni punti (dove sporge l'isolante in film) la resina non è presente

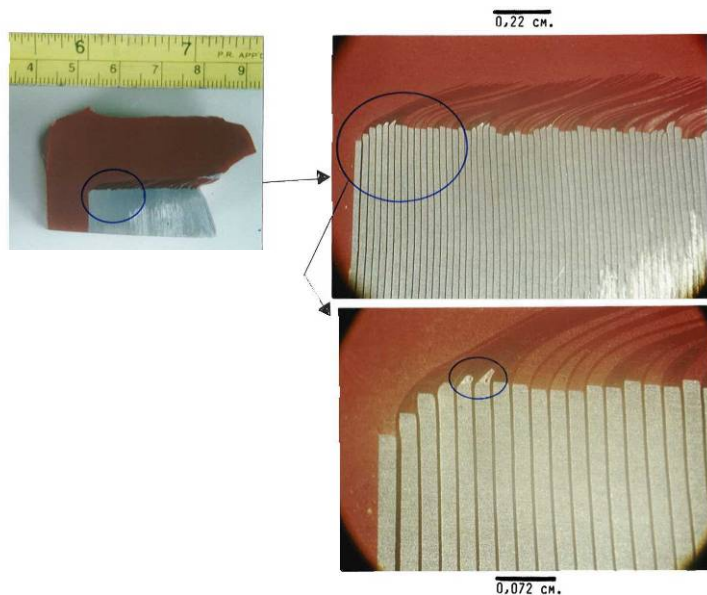


Figura 5-24: Vista di dettaglio di alcuni vacuoli creati per cattiva penetrazione della resina. La zona evidenziata è quella tra le sezioni. Si nota che in alcuni punti (dove sporge l'isolante in film) la resina non è presente

5.2.5.1 Degrado termico

Qualora all'interno degli avvolgimenti vi siano punti molto caldi questi danno luogo ad un invecchiamento precoce della resina. In particolare la resina sovrariscaldata polimerizza molto rapidamente perdendo di conseguenza le proprietà termiche ed elettriche.

A differenza dei difetti citati in precedenza, che possono essere rilevati sin in fase di collaudo del trasformatore, i difetti dovuti al degrado termico sono legati alla vita ed all'utilizzo della macchina e quindi non sono individuabili in sede di collaudo.

Le immagini proposte di seguito danno un'idea del motivo per il quale le scariche parziali, che sono legate alla presenza di difetti negli avvolgimenti possano essere utilizzate anche come mezzo diagnostico per la valutazione dello stato di degrado degli isolanti.

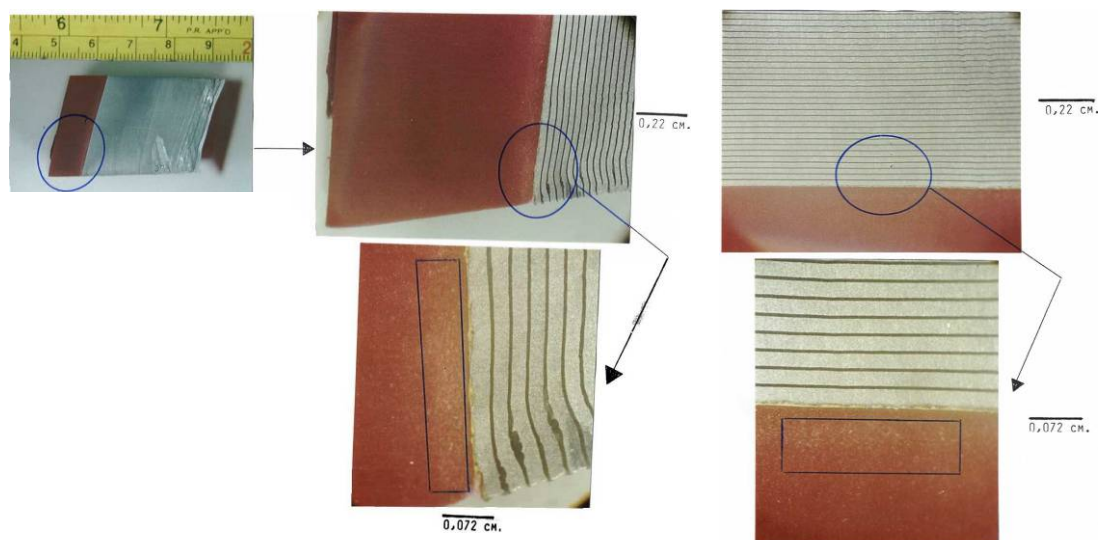


Figura 5-25: Fotografia dell'interno della bobina in resina, nei punti evidenziati si nota il diverso colore della resina. Tale colore è stato accertato essere dovuto ad un eccessivo riscaldamento del materiale

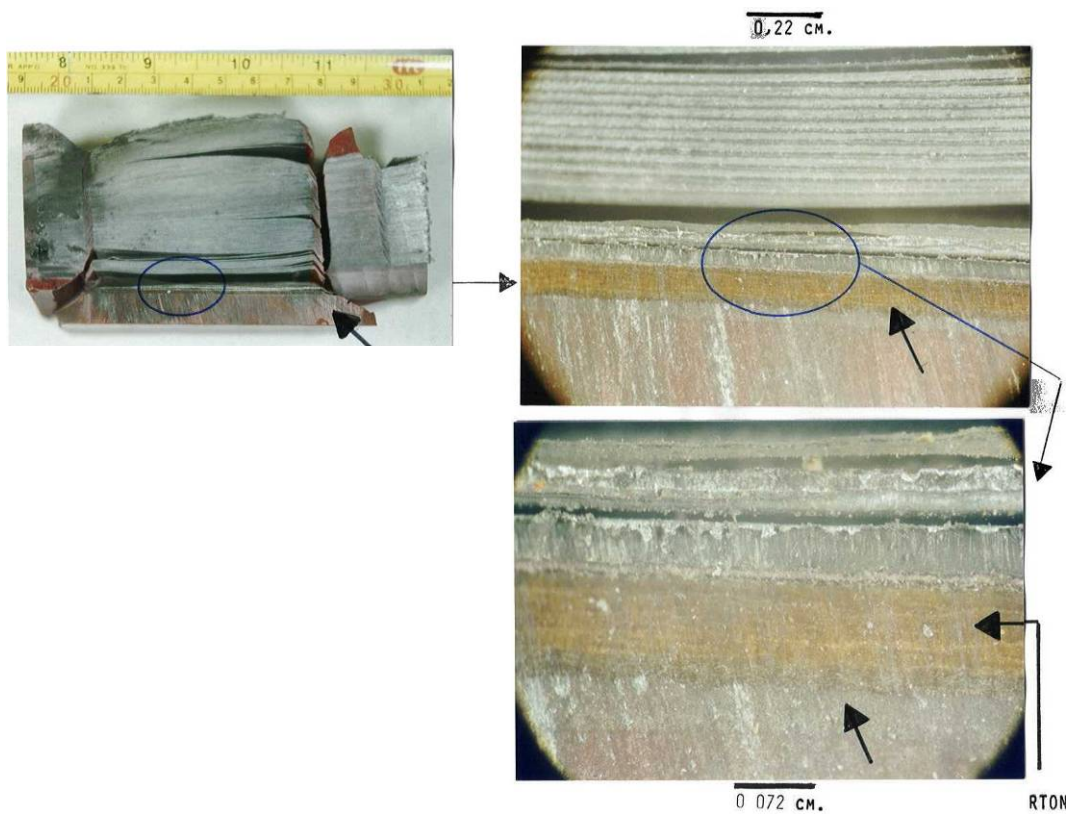


Figura 5-26: Fotografia dell'interno della bobina in resina, nei punti evidenziati si nota il diverso colore della resina. Tale colore è stato accertato essere dovuto ad un eccessivo riscaldamento del materiale

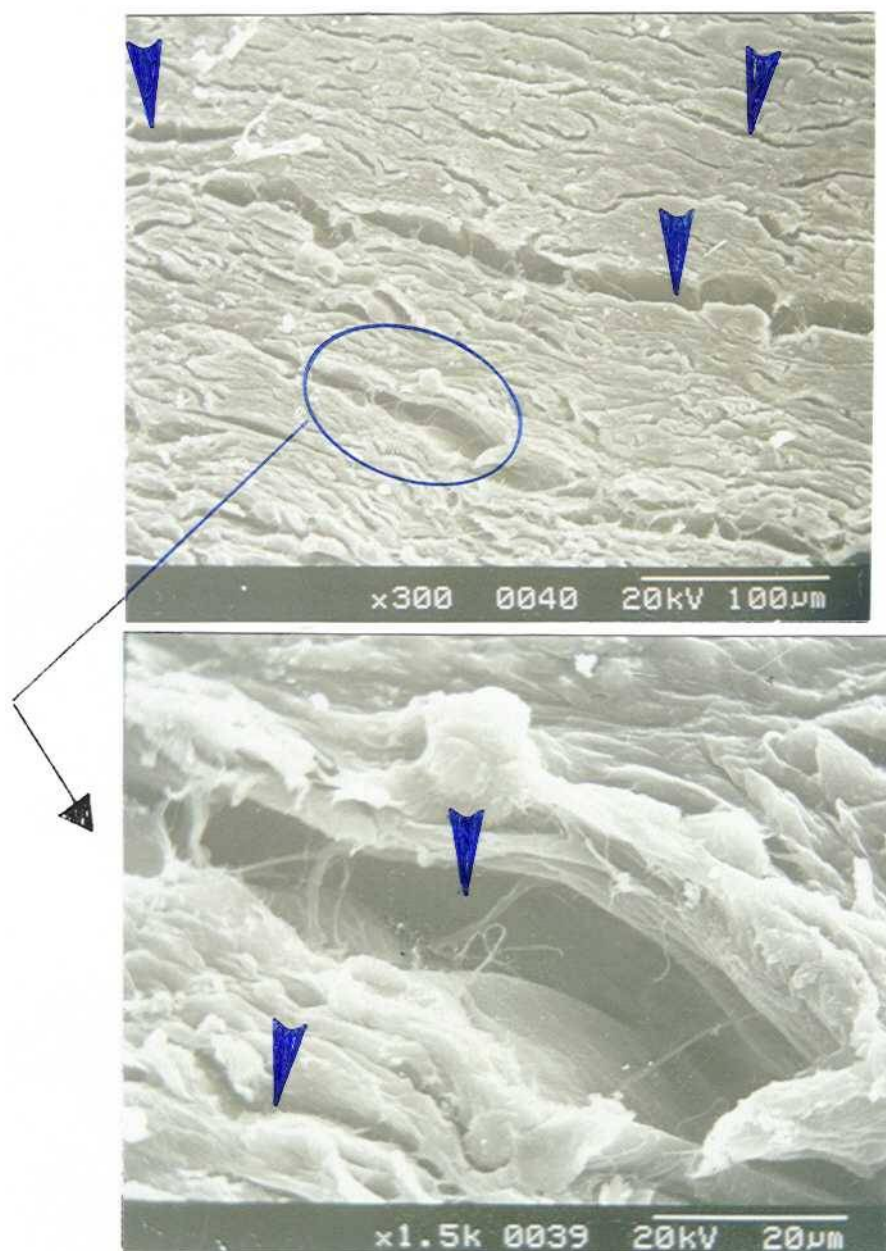


Figura 5-27: Fotografia al microscopio elettronico dell'interno della bobina in resina, nei punti interessati dal degrado termico. Si notano le fessurazioni causate dal ritiro del materiale degradato. Dalla presente immagine si ha una idea chiara del motivo per il quale le scariche parziali possono essere utilizzate come mezzo diagnostico.

6 La misura delle scariche parziali nei trasformatori

6.1 Limiti nella misura delle scariche parziali nei trasformatori secondo le normative IEC60270 – IEC60076 -11

Secondo la normativa tecnica IEC 60076-11, la misura delle scariche parziali sui trasformatori a secco è una misura di routine da svolgersi su ogni macchina in sede di collaudo di accettazione.

La normativa, salvo previo accordo tra le parti, fissa il livello delle scariche parziali apparenti ai capi dell'oggetto in prova in 10 pC.

Qualora il trasformatore in esame risultasse avere un livello di scariche parziali maggiori sarebbe da considerarsi non conforme alla normativa e dunque non accettabile da parte del cliente, qualora inferiore accettato, senza alcuna tolleranza nei valori misurati.

Nella pratica la quasi totalità dei costruttori di trasformatori a secco utilizza apparecchiature per la misura delle scariche parziali a banda larga conformi alla normativa IEC 60270, aventi cioè frequenza limite inferiore tra 30 - 100 kHz e superiore di 500 kHz circa.

Nel corso della campagna di misure condotta per lo svolgimento del presente lavoro si sono verificate alcune incongruenze nelle misure svolte con strumentazione a larga banda di natura diversa, nel caso particolare tra le misure effettuate dal costruttore di un trasformatore e le misure condotte in sede di verifica della macchina.

In particolare siccome si erano rilevate differenze estremamente grossolane, anche tra le misure condotte con strumentazione a larga banda ed a banda ultra larga, si è deciso di indagare sul fenomeno al fine di metterne in luce l'origine.

Le indagini hanno portato alla luce che le scariche parziali interne alle bobine generano oscillazioni all'interno degli avvolgimenti che causano, nella strumentazione a banda larga conforme alla normativa IEC 60270, un errore di integrazione e conseguentemente un errore nella valutazione della carica apparente.

Tali limiti, trascurati nel passato, portano ad avere una mancata riproducibilità della misura tra strumentazione di natura diversa e potrebbero, se adeguatamente pesati portare alla revisione del criterio di misura delle scariche parziali nei trasformatori.

6.2 Comportamento in frequenza delle bobine di media tensione

Le bobine di media tensione dei trasformatori in resina sono costruite con tecniche di avvolgimento non sempre semplici. In numerosi casi per ridurre la tensione tra punti geometricamente vicini si utilizzano avvolgimenti complessi dove il numero totale di spire richieste viene diviso in sezioni all'interno delle quali si eseguono veri e propri avvolgimenti a strati.

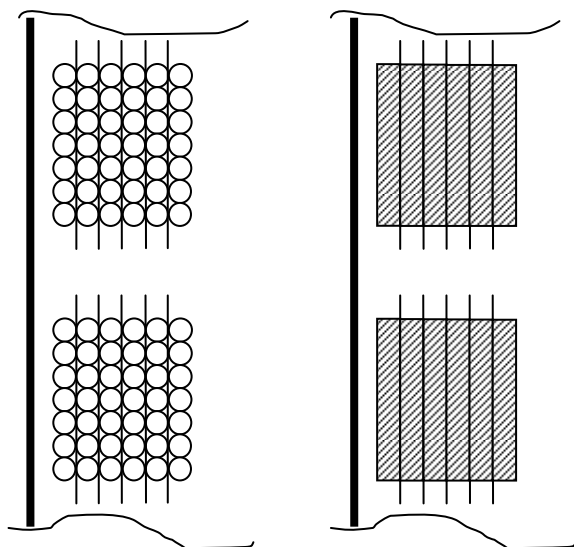


Figura 6-1: Schema della realizzazione pratica di un avvolgimento di media tensione di un trasformatore in resina epossidica. Si notino le due soluzioni, a filo per correnti di modesta entità, a lastra per correnti più elevate.

Tali tipologie costruttive rendono il circuito equivalente dell'avvolgimento molto complesso in quanto debbono essere considerati molti parametri parassiti, come le capacità tra sezioni vicine.

Allo stato attuale della tecnica non esiste una schematizzazione che, dati i parametri geometrici dell'avvolgimento conduca alla realizzazione di un circuito equivalente affidabile ai fini della previsione delle frequenze di risonanza o di eventuali comportamenti particolari come ad esempio la distribuzione delle sollecitazioni in particolari punti dell'avvolgimento in seguito all'applicazione di tensioni rapidamente variabili come impulsi atmosferici o sovratensioni di manovra.

I progettisti conseguentemente si affidano alla propria esperienza al fine di scegliere i criteri costruttivi che ritengono maggiormente adeguati.

Per dare un'idea di come potrebbe essere rappresentato un circuito equivalente in frequenza di una bobina di un trasformatore in resina ci si può ricondurre, in linea di principio alla Figura 6-2.

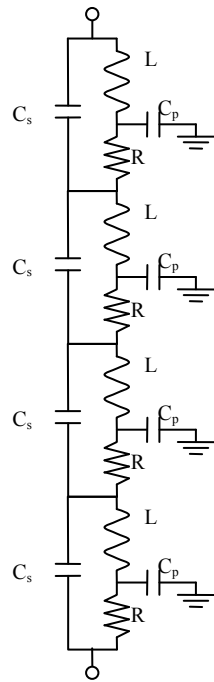


Figura 6-2: Schema semplificato del circuito equivalente di una bobina di media tensione di un trasformatore incapsulato in resina epossidica.

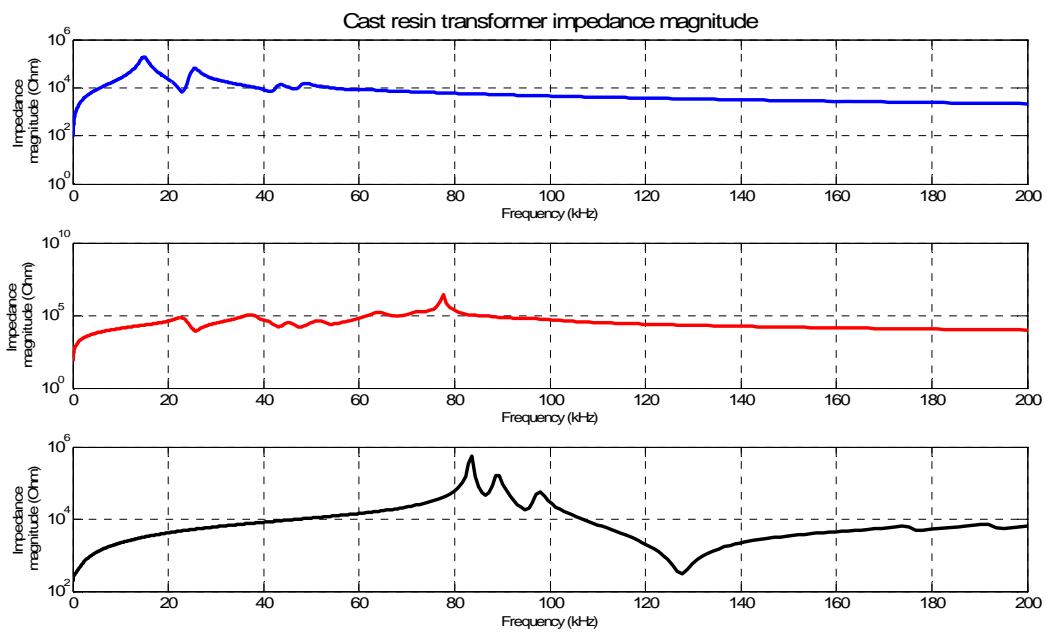


Figura 6-3: Rilievo della impedenza di bobine di media tensione di tre diversi trasformatori in resina. Si noti la presenza di diverse risonanze nel campo di misura della strumentazione per il rilievo delle scariche parziali a banda stretta ed a banda larga.
 (a) Trasformatore 630 kVA 20 kV, (b) Trasformatore 400 kVA 15 kV, (c) Trasformatore 1250 kVA 20 kV.

Per dare rilievo pratico a quanto esposto si è rilevata l'impedenza delle bobine di media tensione di vari trasformatori in resina. Si è rilevato che quasi sempre esistono nel campo di frequenze comprese tra 15 kHz e 200 kHz delle frequenze di risonanza dell'avvolgimento ed in conclusione l'andamento della impedenza non è mai monotono con la frequenza. Maggiori dettagli possono essere ricavati dalla Figura 6-3.

In conclusione, per quanto riguarda la misura delle scariche parziali in modalità a banda larga, come previsto dalla normativa IEC 60270 si fa sempre l'ipotesi che, nel campo di amplificazione dello strumento, in frequenza, lo spettro dell'impulso debba considerarsi piatto.[26]

Nel caso di un impulso prodotto all'interno di un avvolgimento, ai capi dello stesso si rileva un segnale che è la convoluzione dell'impulso con la funzione di trasferimento della bobina, dal punto di origine del segnale ai terminali della stessa.

Può accadere pertanto che l'impulso rilevato, modificato dalla funzione di trasferimento della bobina, contenga armoniche nel campo di amplificazione della strumentazione. In tal caso, non essendo soddisfatte le ipotesi di pseudointegrazione, la risposta dello strumento di misura differisce dalla propria risposta impulsiva e l'informazione sulla carica ottenuta è completamente errata.

Attraverso la normale strumentazione utilizzata anche dai costruttori di trasformatori non è possibile rilevare direttamente se la forma d'onda prodotta dallo strumento di misura sia o meno congruente con la risposta impulsiva della strumentazione e pertanto l'errore di misura e la relativa mancata riproducibilità della stessa è estremamente probabile.

6.3 Prove

Al fine di verificare quanto esposto nella pratica sono stati provati diversi trasformatori di media tensione in resina prodotti da diversi costruttori¹⁰.

I trasformatori provati, diversi per costruzione, erano tutti affetti da scariche parziali all'interno degli avvolgimenti e la misura degli impulsi, condotta con diversi strumenti, di diversi costruttori, e diverse configurazioni, portava ad una notevole dispersione nella valutazione della carica apparente tale da rendere incompatibili i risultati.

La valutazione dell'errore di integrazione dovuto alla influenza della funzione di trasferimento delle bobine dei trasformatori sull'impulso di corrente generato dalle scariche parziali è stata effettuata registrando il segnale iniettato e le relative risposte degli strumenti di misura.

Per avere maggiore conferma si è anche iniettato un segnale generato da un calibratore ai morsetti del commutatore di tensione delle bobine registrando errori di integrazione molto simili a quelli registrati nel corso della misura reale.

¹⁰ Amadori, SEA e Stem

6.3.1 Prove con lo strumento James Biddle modello 66-2J

Il primo misuratore di scariche parziali a banda larga provato è stato il misuratore di scariche parziali in dotazione al laboratorio di alte tensione, il James Biddle modello 66-2J.

Lo strumento è dotato di un selettore che può variare la parte resistiva della impedenza di misura in gradini fissi¹¹ e di un altro selettore di posizione che rende possibile variare la banda di frequenze di lavoro nell'intervallo compreso tra qualche decina di kHz e circa 200 kHz.

L'indicazione della carica apparente misurata può essere visualizzata tramite un misuratore interno con relativa visualizzazione analogica oppure tramite un registratore esterno collegabile allo strumento attraverso una apposita uscita posta sul retro dello strumento.

La particolarità principale del misuratore intero allo strumento è quella di disporre di una visualizzazione degli impulsi di tipo logaritmico a tre decadi, da 1 a 1000 pC.

La presenza di un amplificatore di tipo logaritmico rende lo strumento particolarmente sensibile sia agli impulsi di modesta che di elevata intensità.

Il guadagno degli amplificatori interni può essere variato grossolanamente mediante un commutatore a sei posizioni con passi da 20 dB ed in maniera fine per mezzo di un regolatore continuo.

Nel corso delle prove effettuate sono state acquisite le risposte impulsive dello strumento all'impulso di corrente di calibrazione per le varie configurazioni strumentali.

In seguito si è realizzato mediante l'oscilloscopio un circuito che permettesse l'acquisizione contemporanea dell'impulso di corrente in ingresso ed in uscita allo strumento in modo da verificare quali caratteristiche dell'impulso in ingresso fossero tali da rendere critica la misura.

Sia la registrazione dell'impulso di calibrazione iniettato sulle prese del commutatore e sia la registrazione degli impulsi di corrente associati alle scariche parziali hanno messo in luce che la pesante influenza sull'errore di integrazione dello strumento è data dalla oscillazione innescata dall'impulso di corrente all'interno della bobina. Tale frequenza, anche se di modesta intensità se confrontata con il modulo dell'impulso, si trova, infatti, nel campo di amplificazione dello strumento e contribuisce pertanto pesantemente alla risposta dello strumento. (Figura 6-10 e Figura 6-11)

A seguito sono riportati come esempio alcuni dei risultati raccolti nel corso della misura.

¹¹ 3,3 k Ω , 1 k Ω , 333 Ω , 100 Ω , 33 Ω e 10 Ω .

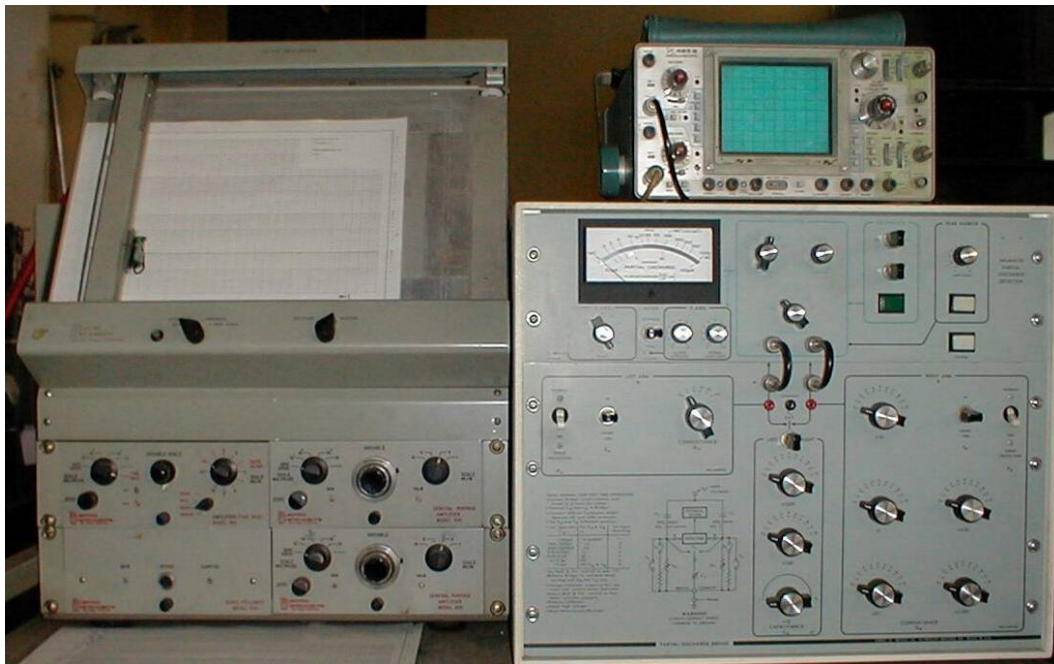


Figura 6-4: Sistema di misura per scariche parziali di tipo tradizionale a pseudointegrazione, provvisto di circuito di misura a ponte, modello Biddle 66-2J (cat. 665702 ser. 088102), completo di registratore X-Y ed oscilloscopio Tektronix modello 445.

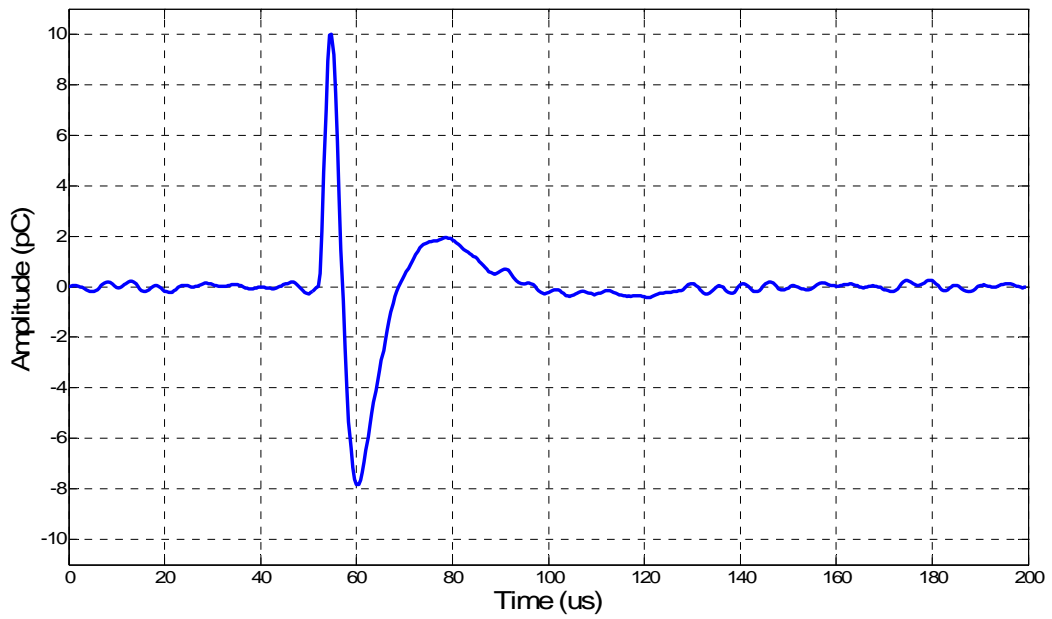


Figura 6-5: Risposta impulsiva dello strumento Biddle 66-2J con configurazione dell'ingresso GIL2.

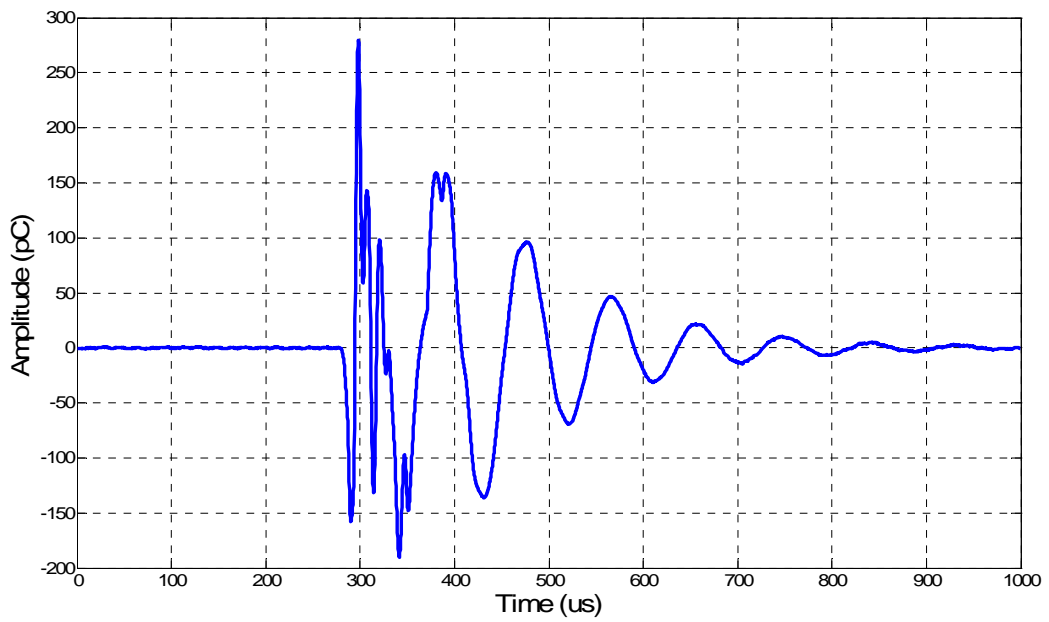


Figura 6-6: Risposta strumento Biddle 66-2J in configurazione GIL2 ad un impulso proveniente dalla bobina del trasformatore.

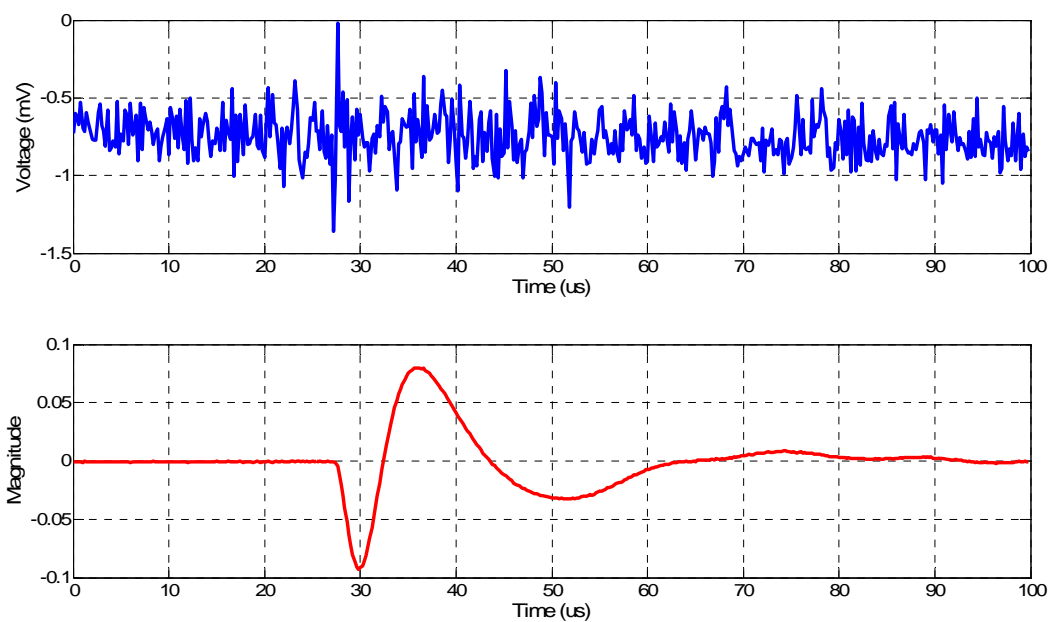


Figura 6-7: Risposta strumento Biddle 66-2J in configurazione GIL2 ad un impulso di calibrazione ai terminali dell'avvolgimento.
 Sopra - impulso rilevato all'entrata dello strumento
 Sotto - impulso rilevato all'uscita dello strumento

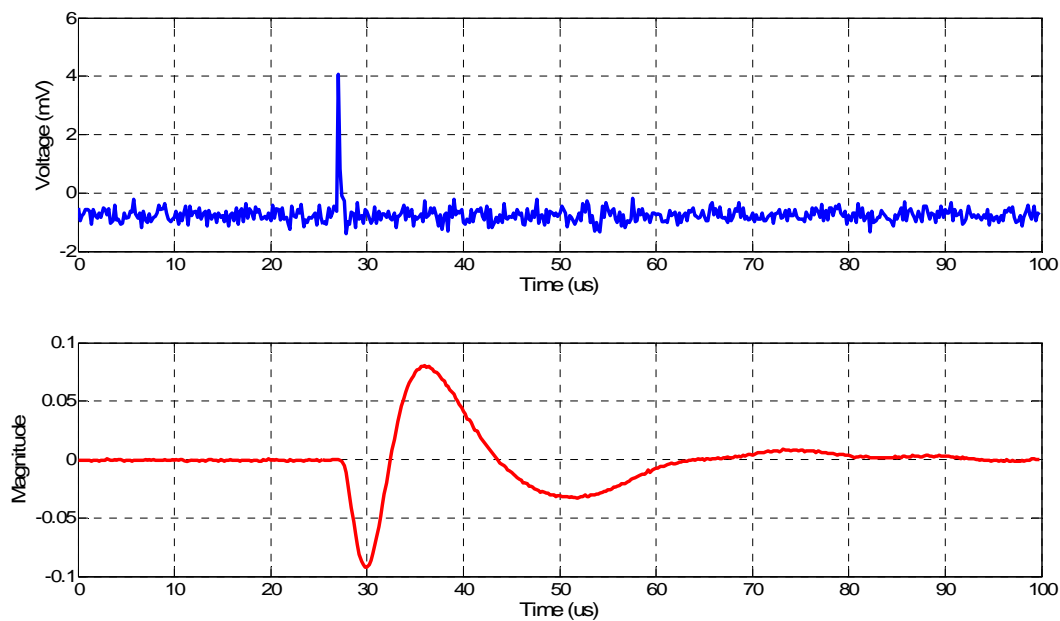


Figura 6-8: Risposta strumento Biddle 66-2J in configurazione GIL2 ad un impulso di calibrazione ai terminali dell'avvolgimento.
 Sopra - impulso rilevato all'entrata dello strumento
 Sotto - impulso rilevato all'uscita dello strumento

Si noti che pur in presenza di rumore con intensità molto diverse le risposte in uscita dallo strumento sono sostanzialmente uguali.

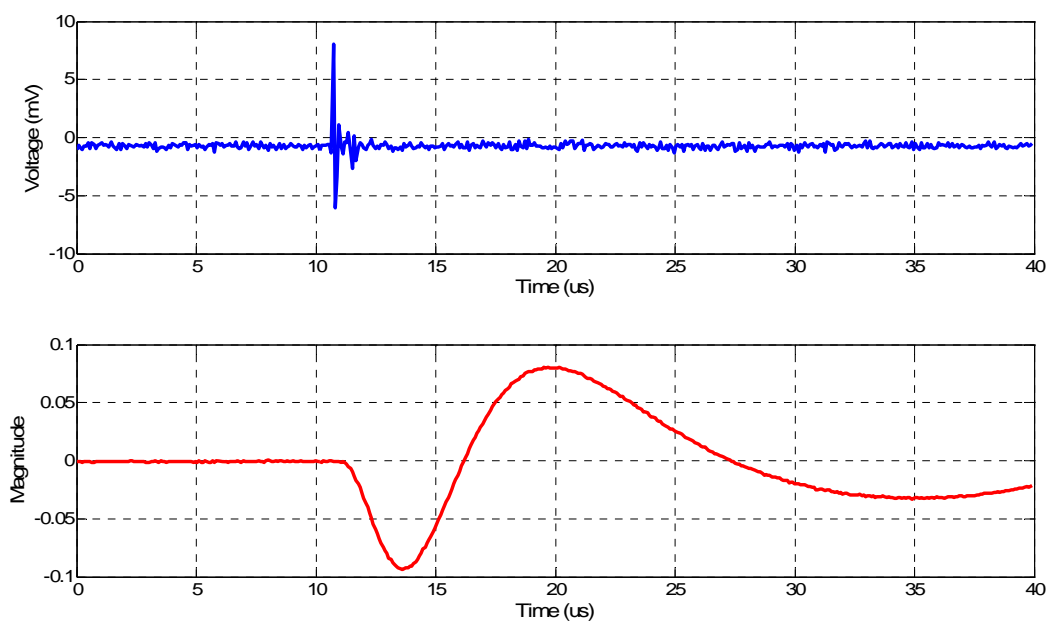


Figura 6-9: Risposta strumento Biddle 66-2J in configurazione GIL2 ad un impulso di calibrazione ai terminali dell'avvolgimento.
 Sopra - impulso rilevato all'entrata dello strumento
 Sotto - impulso rilevato all'uscita dello strumento

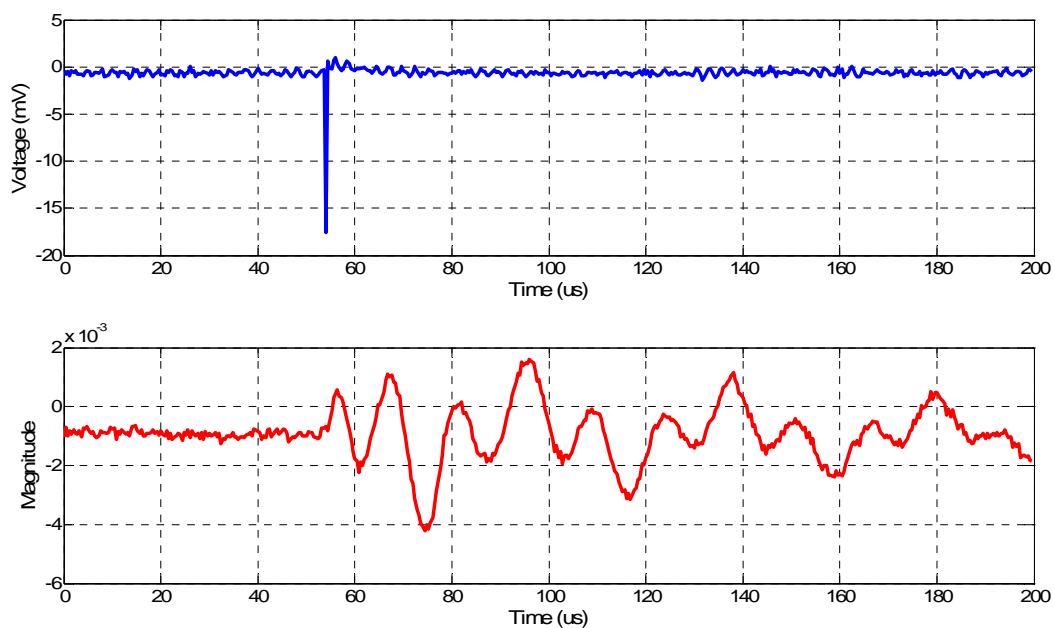
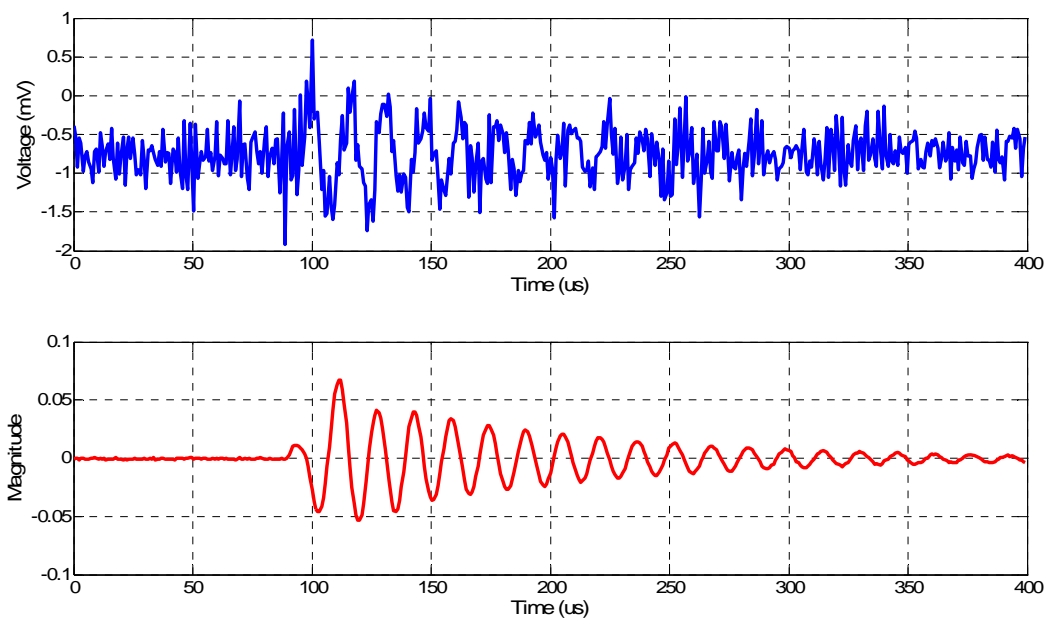


Figura 6-10: Risposta strumento Biddle 66-2J in configurazione GIL2 ad un impulso di calibrazione iniettato in corrispondenza delle prese del commutatore.
 Sopra - impulso rilevato all'entrata dello strumento
 Sotto - impulso rilevato all'uscita dello strumento



*Figura 6-11: Risposta strumento Biddle 66-2J in configurazione GIL2 ad un impulso reale di scarica parziale proveniente da una bobina di media tensione del trasformatore.
Sopra - impulso rilevato all'entrata dello strumento
Sotto - impulso rilevato all'uscita dello strumento*

6.3.2 Prove con lo strumento Haefely modello 561

Il secondo misuratore di scariche parziali provato è stato il misuratore di scariche parziali Haefely Modello 561 completo di quadripolo d'accoppiamento AKV 568..

Lo strumento è un misuratore di scariche parziali di tipo tradizionale a banda larga, provvisto di una impedenza di misura interna da 75 Ω , collegabile a mezzo cavo coassiale RG59 a una impedenza di misura esterna, nel caso specifico alla impedenza di misura esterna Haefely Modello AKV 568.

Il campo di frequenze di misura può essere spostato tramite un commutatore posto sul fronte dello strumento su tre bande di misura distinte comprese da qualche decina di kHz e circa 500 kHz¹².

La misura della carica apparente può essere eseguita sia sul Meter interno (con scala lineare), che tramite un registratore esterno collegabile attraverso una uscita posta sul retro dello strumento.

Il guadagno dell'amplificatore può essere variato tramite un commutatore a gradini con passo di 20 dB e tramite una regolazione fine di tipo continuo.

Lo strumento ha, come al solito, la possibilità di variare il guadagno degli amplificatori interni, sia tramite commutatore a quattro posizioni con passi di 20 dB, che per mezzo di una regolazione continua.

Un aspetto particolare rispetto ad altra strumentazione, è la possibilità di filtrare segnali sincroni con la tensione di prova (gating dell'amplificatore). Tale caratteristica è molto utile qualora vi siano disturbi provenienti dalla rete di alimentazione.

Anche nelle prove eseguite con questo strumento sono state acquisite le risposte impulsive all'impulso di corrente di calibrazione per le varie configurazioni strumentali.

Anche in questo caso sia le registrazioni dell'impulso di calibrazione iniettato sulle prese del commutatore e sia le registrazioni degli impulsi di corrente associati alle scariche parziali hanno messo in luce che, la pesante influenza sull'errore di integrazione dello strumento è data dalla oscillazione innescata dall'impulso di corrente all'interno della bobina.

A seguito sono riportati come esempio alcuni dei risultati raccolti nel corso della misura.

¹²Le bande indicate sono: BW1 70 ... 80 kHz, BW2 140 ... 150 kHz, BW3 40 ... 400 kHz.

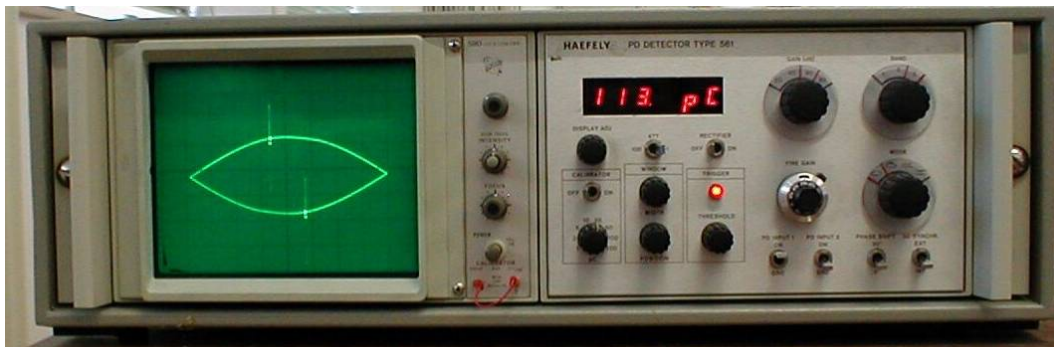


Figura 6-12: Misuratore di scariche parziali a banda larga Haefely Tipo 561.



Figura 6-13: Quadripolo d'accoppiamento AKV 568 per strumento di misura Haefely Tipo 561.

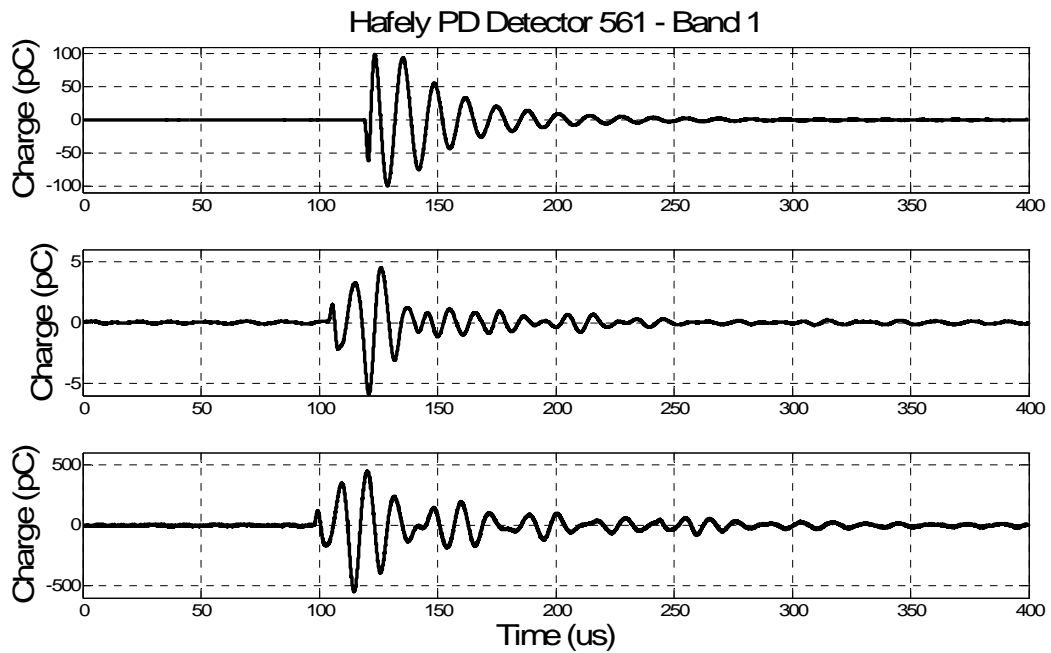


Figura 6-14: Impulso di calibrazione registrato sul trasformatore SEA matricola 88163. (a) Iniezione della calibrazione ai capi della bobina, (b) iniezione della calibrazione sulle prese del commutatore (c), impulso di corrente registrato nel corso della misura secondo normativa. Si noti l'errore di integrazione introdotto dalla funzione di trasferimento della bobina.

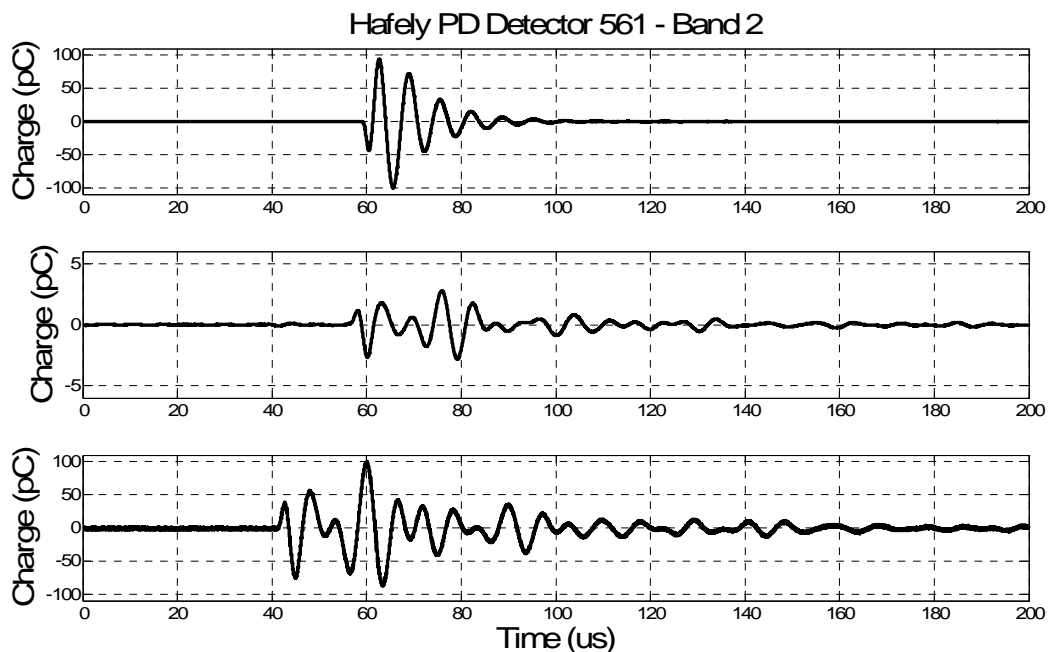


Figura 6-15: Impulso di calibrazione registrato sul trasformatore SEA matricola 88163. (a) Iniezione della calibrazione ai capi della bobina, (b) iniezione della calibrazione sulle prese del commutatore, (c) impulso di corrente registrato nel corso della misura secondo normativa. Si noti l'errore di integrazione introdotto dalla funzione di trasferimento della bobina.

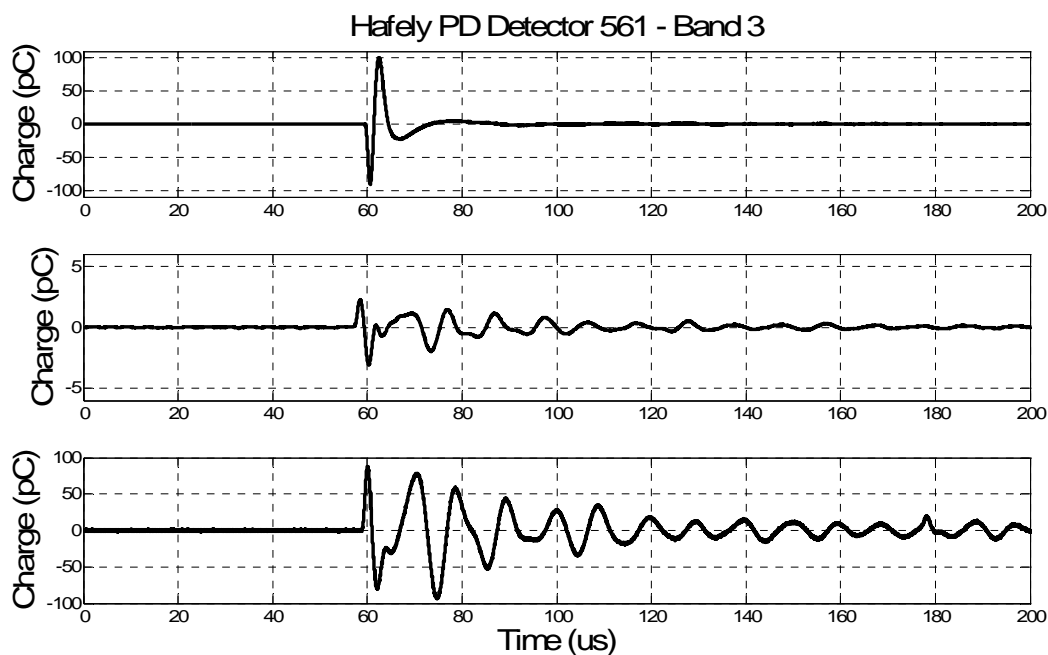


Figura 6-16: Impulso di calibrazione registrato sul trasformatore SEA matricola 88163. (a) Iniezione della calibrazione ai capi della bobina, (b) iniezione della calibrazione sulle prese del commutatore, (c) impulso di corrente registrato nel corso della misura secondo normativa. Si noti l'errore di integrazione introdotto dalla funzione di trasferimento della bobina.

7 Criteri di valutazione delle scariche parziali basati sull'analisi delle distribuzioni

7.1 Introduzione

Sin dagli albori delle misure delle scariche parziali era stato rilevato che alcune tipologie di fenomeni di ionizzazione presentavano una correlazione con la tensione di alimentazione: in alcuni casi potevano essere posti in relazione con il massimo o il minimo, mentre in altri con la derivata .

In seguito si iniziarono ad osservare le scariche parziali anche con strumenti analogici di visualizzazione come gli oscilloscopi, potendo osservare, grazie alla persistenza degli schermi, le scariche parziali su parecchi cicli della tensione di alimentazione rilevando che, in funzione delle varie tipologie di fenomeno potevano essere osservate diverse distribuzioni impulsive e, in base alla esperienza accumulata, si potevano costruire delle relazioni tra le immagini ed i fenomeni stessi.[14][45]

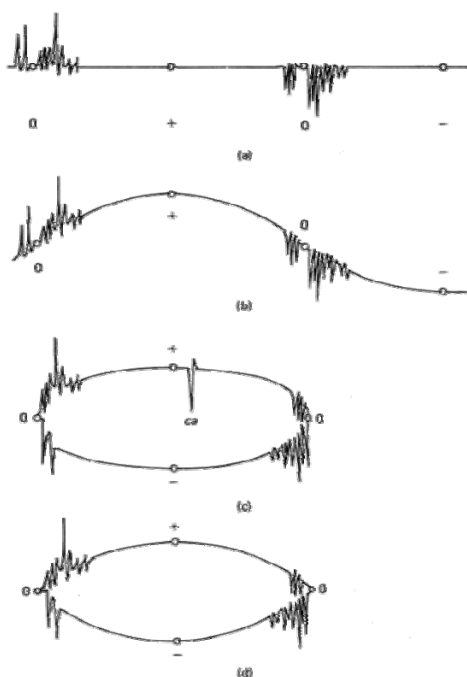


Figura 7-1: Visualizzazione delle scariche parziali su un oscilloscopio analogico (+,-,0) rappresentano rispettivamente il massimo, il minimo ed il passaggio per lo zero della tensione di alimentazione). (a) Visualizzazione semplice nella quale risultano filtrate le componenti a frequenza industriale, (b) Visualizzazione complessiva (Comprensiva delle frequenze industriali), (c) Visualizzazione in modalità XY modulata con frequenza di alimentazione, dove ca rappresenta l'impulso di calibrazione, (d) Visualizzazione in modalità XY con segnale modulato dal misuratore (Tipico Haefely)

Per alcune tipologie semplici di scariche parziali sono stati formalizzati dei diagrammi tipici, i quali, ad un occhio esperto, potevano fornire informazioni sufficienti alla identificazione dei fenomeni.[67]

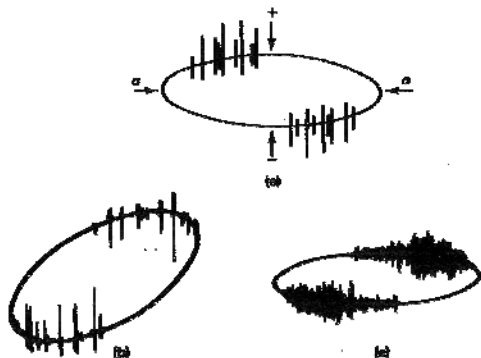


Figura 7-2: Esempi di rilievo di diversi fenomeni causanti scariche parziali mediante l'utilizzo di oscilloscopi.

Ovviamente, nel caso di osservazione dei fenomeni con l'oscilloscopio gli impulsi rilevati rimanevano impressi solo in funzione della persistenza dello schermo e dunque per qualche frazione di secondo.[155][156][158][161][162]

Un aiuto concreto alla evoluzione nella tecnica di misura delle scariche parziali a fini diagnostici è derivato dall'introduzione di registratori in grado di memorizzare i valori di carica apparente delle singole scariche parziali in funzione della tensione di alimentazione per periodi di prova abbastanza lunghi, anche dell'ordine di centinaia o migliaia di cicli della tensione di alimentazione che resero possibile il tracciamento dei cosiddetti "pattern" ossia dei diagrammi rappresentanti la distribuzione delle scariche parziali in funzione della fase della tensione di alimentazione. [28][69][120]

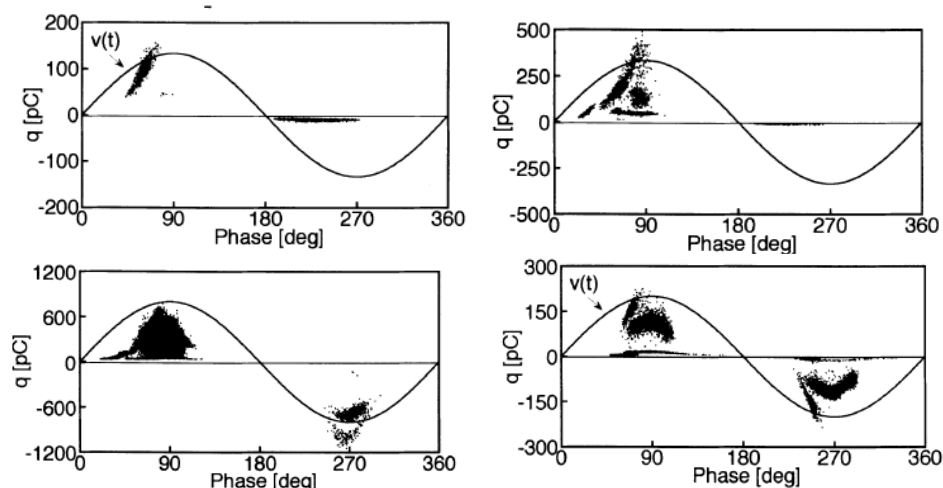


Figura 7-3: Esempi di pattern delle scariche parziali di tipo intensità – fase.

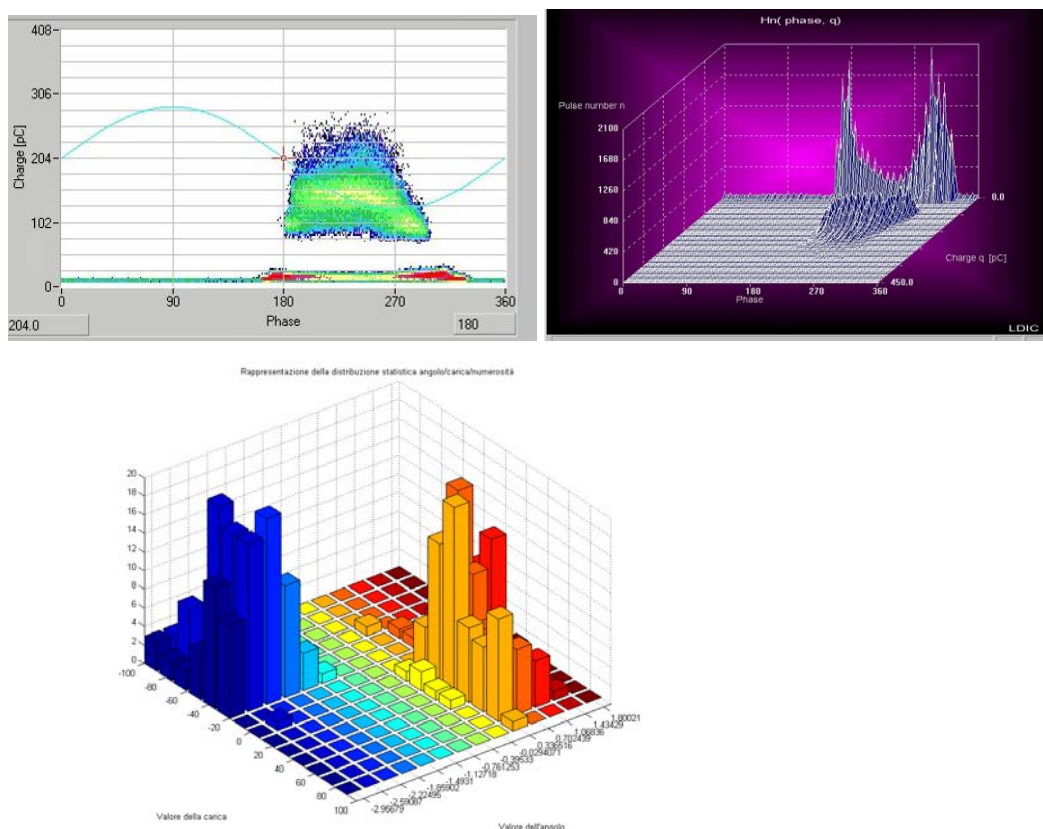


Figura 7-4: Esempi di pattern delle scariche parziali in due e tre dimensioni di tipo intensità, fase, numerosità. (FI, Q, N) [18]

Esperienze pratiche nel corso degli ultimi decenni hanno evidenziato la relazione diretta tra alcune tipologie di scariche parziali ed i relativi pattern ed attualmente, i diagrammi di pattern sono il mezzo più utilizzato per la valutazione dello stato di invecchiamento di un sistema isolante attraverso la misura delle scariche parziali. [30][56][58][61][64][119][121][122][123][124]

Il processo o la tecnica che consente il riconoscimento del particolare fenomeno a partire dal pattern è detto “Pattern recognition” o “Height distribution analysis”.

In pratica, a partire da un pattern composto dalla relazione intercorrente tra l'intensità della scarica parziale, espressa in tensione, corrente o carica, e la fase della tensione di alimentazione si individuano gli andamenti della funzione e si ricava, per confronto con un insieme di dati ricavati dalla esperienza pregressa il tipo di fenomeno in corso.

La valutazione dei fenomeni derivata dall'analisi del pattern, può essere affidata alla sola esperienza degli operatori oppure ad una valutazione automatica basata su una serie di parametri codificati.[134][137][138]

Attualmente la tendenza nelle misure è orientata alla diminuzione, per quanto possibile, del fattore umano e dunque vi è una forte spinta allo sviluppo di sistemi automatici di valutazione in grado di rendere la valutazione della misura completamente indipendente dal giudizio dell'operatore.

La determinazione automatica dei pattern è, come detto, basata sulla valutazione delle distribuzioni di alcuni parametri che sono stati sviluppati nel tempo da autori diversi e che non risultano spesso concordi.

[126][129][143][149][150][151][152]

L'obiettivo della seguente sezione è di presentare i parametri che nella pratica risultano essere maggiormente impiegati fornendo per ciascuno una breve introduzione.

7.2 Gli indici nella valutazione dei pattern

Al fine di poter eseguire dei confronti tra diverse distribuzioni di fenomeni impulsivi si è resa necessaria l'introduzione di opportuni indici numerici in grado di sintetizzare il più possibile le informazioni contenute nei diagrammi. [29][31]

Gli indici numerici definiti sono molteplici e variano a seconda degli autori e della tipologia di analisi che si intendono eseguire ma, possono essere in generale divisi in tre fondamentali categorie, suddivise in merito all'origine degli indici considerati.[34][35][37]

Esistono dunque indici immediatamente disponibili dalla singola acquisizione, indici derivati da misure prolungate nel tempo ed indici ricavati per analisi statistica di altri indici.

[39][40][42][54][57][69][79][80][104][107][109][111][113][114][115][117][118][119]

Le tre categorie di indici sono:

- 1) Indici di base, Misurati direttamente nel corso della misura.
- 2) Indici derivati, Derivati da operazioni svolte sulle quantità osservate nel corso della misura.
- 3) Operatori statistici, Operatori derivati dagli indici ed utilizzati per le analisi di tipo statistico

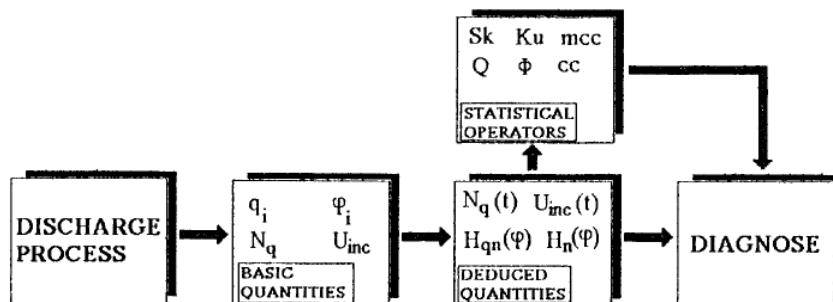


Figura 7-5: Rappresentazione schematica dell'utilizzo degli indici nella valutazione dei pattern delle scariche parziali.

7.2.1 Indici di base

Gli indici di base sono i parametri che possono essere acquisiti direttamente nel corso della misura e riguardano le relazioni fondamentali tra le grandezze osservate. Parte degli indici sono definiti in seno alla normativa IEC 60270.

7.2.1.1 Intensità di carica delle scariche rilevate

L' intensità della scarica i-esima q_i

Si tratta del valore di carica della scarica rilevata. Ai fini diagnostici questo è un valore relativo nella misura e può essere dunque espresso come valore di carica (pC) oppure come intensità della scarica sulla impedenza di misura (V).

Unico requisito per la strumentazione che rileva questo parametro è la linearità in funzione della carica associata alla scarica parziale rilevata.

Intensità della minima scarica rilevata q_{\min}

Si tratta della minima carica i-esima rilevata nel corso della intera registrazione. Si noti che nel caso si utilizzi strumentazione di registrazione di tipo digitale tale valore potrebbe essere influenzato dal livello del trigger impostato.

Intensità della massima scarica rilevata q_{\max}

Si tratta della massima carica i-esima rilevata nel corso della intera registrazione.

7.2.1.2 Tensione di alimentazione

Tensione di innesco delle scariche parziali U_i

Si tratta del valore efficace della tensione di alimentazione sinusoidale alla quale i fenomeni di scarica parziale diventano di intensità rilevabile dalla apparecchiatura utilizzata per la misura.

Tensione di estinzione delle scariche parziali U_e

Si tratta del valore efficace della tensione di alimentazione sinusoidale alla quale i fenomeni di scarica parziale diventano di intensità tale da non poter essere più rilevabili dalla apparecchiatura utilizzata per la misura.

Tensione di innesco nel periodo

U_{inc}

Viene definita come il valore istantaneo della tensione di alimentazione a cui si osserva la prima scarica parziale.

Tale tensione deve essere rilevata sia per il semiperiodo positivo che per quello negativo.

Tensione di estinzione nel periodo

U_{ext}

Si tratta, considerato un periodo della tensione di alimentazione, della tensione istantanea alla quale si osserva l'ultima scarica parziale.

Tale tensione deve essere rilevata sia per il semiperiodo positivo che per quello negativo.

Fase della tensione di innesco nel periodo

φ_{inc}

Fase alla quale si registra la tensione di innesco nel periodo U_{inc}

Fase della tensione di estinzione nel periodo

φ_{ext}

Fase alla quale si registra la tensione di estinzione nel periodo U_{ext} .

7.2.1.3 Relazione tra grandezze misurate**Angolo di fase della scarica i-esima**

φ_i

Relazione di fase intercorrente tra la tensione di alimentazione e il tempo al quale viene rilevata la scarica parziale i-esima. Secondo quanto riportato dalla normativa la definizione di questo parametro è:

$$\varphi_i = 360 \frac{t_i}{T}$$

Eq. 7-1

dove t_i è il tempo misurato tra l'istante di passaggio per lo zero del fronte montante della tensione di alimentazione precedente alla scarica e l'istante di rilevazione dell'impulso di scarica parziale mentre T rappresenta il periodo della tensione di prova.

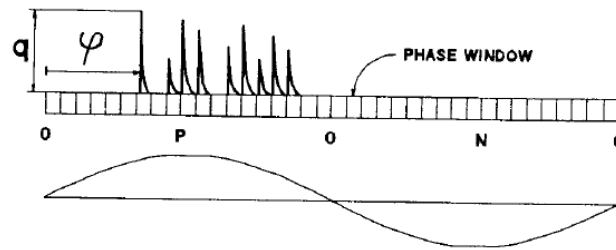


Figura 7-6: Angolo di fase φ e carica q rispetto alla tensione di alimentazione. Si noti che il dominio della fase è stato diviso in intervalli discreti detti finestre di fase.

7.2.1.4 Quantità delle scariche

Numerosità delle scariche

$$N_t$$

Numero complessivo delle scariche rilevate

Tasso di ripetizione degli impulsi

$$n$$

Rapporto tra il numero di impulsi rilevato in un dato intervallo di tempo e la durata di tale intervallo.

Numero di scariche per periodo

$$N_q$$

Numero di cariche rilevate in un periodo della tensione di alimentazione. Il valore può essere globale nel periodo oppure essere distinto in due componenti, una relativa al semiciclo positivo della tensione di alimentazione ed una a quello negativo.

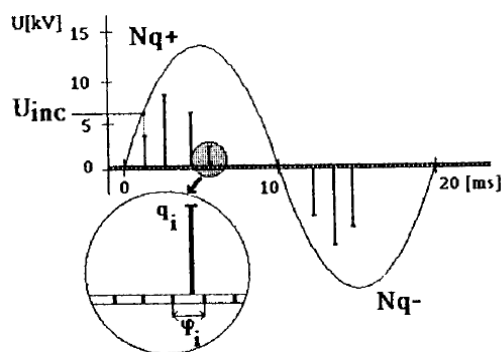


Figura 7-7: Tensione di innesco nel periodo U_{inc} , intensità della carica i -esima q_i Numerosità della carica positiva e negativa $Nq+$, $Nq-$.

7.2.2 Indici derivati

Sono quantità derivate dagli indici di base una volta che siano state eseguite delle registrazioni per un sufficiente numero di periodi della tensione di alimentazione. Il rilievo di queste grandezze implica una analisi dei dati acquisiti su tempi piuttosto lunghi (dell'ordine di qualche centinaio di cicli della tensione di alimentazione) e fornisce di conseguenza una indicazione sulla variazione nel tempo delle grandezze di base, ossia una variazione dell'andamento delle scariche parziali nel corso del tempo di osservazione.

Gli indici derivati hanno importanza perché, oltre a fornire indicazioni in merito alle variazioni statistiche dei fenomeni di scarica, forniscono informazioni sulle modificazioni delle proprietà dei siti dove le scariche parziali sono originate; in particolare l'osservazione degli andamenti è importante al fine di definire l'evoluzione del fenomeno in corso.

Gli indici derivati prendono in considerazione le modificazioni nel tempo degli indici di base, in particolare della tensione di innesco e di estinzione delle scariche parziali nel periodo e le variazioni della numerosità di queste nel tempo.

I dati raccolti vengono usualmente rappresentati in funzione della fase della tensione di alimentazione, graficamente sono riprodotti "condensati" in un ciclo della tensione di alimentazione.

All'interno del ciclo di riferimento della tensione di alimentazione la fase viene divisa in intervalli finiti entro i quali vengono condensate le informazioni raccolte per tutte le scariche parziali avvenute in un angolo di fase con la tensione appartenente all'intorno considerato.

I dati raccolti divengono pertanto delle distribuzioni statistiche degli indici di base nelle varie finestre di fase.

L'analisi delle distribuzioni così ottenute con distribuzioni canoniche di fenomeni noti può essere considerato come il primo criterio identificativo per il fenomeno impulsivo ed a tal fine vengono definiti i seguenti indici derivati:

7.2.2.1 Distribuzioni

Distribuzione media degli impulsi $H_n(\varphi)$
(Pulse count distribution)

Numero di scariche rilevate per ogni finestra di fase in funzione dell'angolo di fase: a seconda delle esigenze la distribuzione può essere divisa in due distribuzioni ulteriori, una rappresentante la distribuzione degli indici nel semiciclo positivo della tensione di alimentazione $H_n^+(\varphi)$ e l'altra per il semiciclo negativo $H_n^-(\varphi)$.

Distribuzione media delle ampiezze $H_{qn}(\varphi)$
(Mean Height distribution)

Rappresenta l'ampiezza media delle scariche per ogni finestra di fase in funzione dell'angolo di fase: è ottenuta dalla somma complessiva della carica contenuta in ogni scarica appartenente alla finestra temporale e divisa per il numero di scariche rilevate nella finestra.

Anche questa distribuzione, a seconda delle esigenze, può essere suddivisa in due parti, una indicante la distribuzione relativa al semiciclo positivo della tensione di alimentazione $H_{qn}^+(\varphi)$ ed una indicante l'andamento della distribuzione per quanto riguarda il semiciclo negativo $H_{qn}^-(\varphi)$.

La rappresentazione delle distribuzioni può essere effettuata con diagrammi bidimensionali oppure, come tecnica alternativa, in diagrammi tridimensionali ove le due distribuzioni sono rappresentate contemporaneamente in funzione dell'intervallo di fase. Allo stato attuale non esiste uno standard affermato in quanto le esigenze pratiche a volte rendono un metodo preferibile rispetto agli altri o viceversa.

7.2.3 Operatori statistici

Gli operatori statistici sono grandezze derivate dagli indici derivati, che ne analizzano l'andamento al fine di poter realizzare la sintesi e la comparazione tra diverse distribuzioni.

Anche nel caso degli operatori statistici esistono diverse versioni a seconda degli autori ma in generale questi operatori puntano ad analizzare i parametri fondamentali delle distribuzioni H in funzione della fase della tensione di alimentazione.

In particolare alcuni autori analizzano il rapporto esistente tra le distribuzioni di scariche parziali in ragione della parte positiva e della parte negativa della tensione di alimentazione definendo:

7.2.3.1 Asimmetrie

Asimmetria delle scariche

 Q

Data una distribuzione di carica $H_{qn}(\varphi)$, l'asimmetria delle scariche definisce il rapporto tra la carica media delle scariche parziali registrata nel semiciclo positivo della tensione di alimentazione rispetto al semiciclo negativo della stessa.

La asimmetria delle scariche Q è dunque:

$$Q = \frac{Q_s^- / N^-}{Q_s^+ / N^+}$$

Dove Q_s^+ e Q_s^- rappresentano la somma della carica associata ad ogni singolo impulso di carica registrato in corrispondenza alla parte positiva e negativa della tensione di alimentazione ed N^+ ed N^- il numero delle scariche registrate rispettivamente in corrispondenza alla parte positiva e della parte negativa della tensione di alimentazione.

Asimmetria della fase

 Φ

La asimmetria della fase Φ è un parametro che definisce, data la distribuzione di carica $H_{qn}(\varphi)$ il rapporto esistente tra la fase della tensione di innesco nel periodo delle scariche parziali nel semiciclo positivo rispetto a quello negativo.

La asimmetria della fase è definita come:

$$\Phi = \frac{\varphi_{in}^-}{\varphi_{in}^+}$$

Eq. 7-2

7.2.3.2 Fattori

Fattore di correlazione incrociata *cc*
(Cross correlation factor)

È un fattore usato per valutare la differenza di forma tra la distribuzione $H_{qn}(\varphi)$ positiva e negativa (tra $H_{qn}^+(\varphi)$ e $H_{qn}^-(\varphi)$) la cui definizione è:

$$cc = \frac{\sum xy - \sum x \sum y / n}{\sqrt{[\sum x^2 - (\sum x)^2 / n][\sum y^2 - (\sum y)^2 / n]}} \quad \text{Eq. 7-3}$$

dove x rappresenta la carica media del semiciclo positivo della tensione di alimentazione mentre y rappresenta quella del semiciclo negativo ed n rappresenta il numero di intervalli di fase per semiciclo.

In conclusione la distribuzione $H_{qn}(\varphi)$ della ampiezze degli impulsi viene valutata con riferimento al semiciclo positivo e negativo della tensione di alimentazione mediante tre parametri indipendenti.

I tre parametri valutano la simmetria o l'asimmetria della distribuzione. In pratica valori dei parametri pari a 1 indicheranno la completa simmetria della distribuzione mentre parametri pari a zero o infinito avranno significato di distribuzione completamente asimmetrica.

Fattore di correlazione incrociata modificato *mcc*

Il fattore di correlazione incrociata modificato è stato introdotto per poter definire mediante un unico parametro i tre parametri di asimmetria precedentemente introdotti. Mediante questo parametro è dunque possibile esprimere nel medesimo istante informazioni relative ad asimmetrie di diversa natura.

$$mcc = \Phi \cdot Q \cdot cc$$

Skewness *Sk*

Data una distribuzione di eventi impulsivi, il parametro Sk (Skewness) rappresenta il momento del terzo ordine della distribuzione.

Questo parametro rappresenta il fattore di asimmetria della distribuzione. Se la distribuzione è simmetrica $Sk = 0$, se è asimmetrica a sinistra $Sk > 0$, se asimmetrica verso destra $Sk < 0$.

La rappresentazione matematica della funzione è data:

$$Sk = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 p_i}{\sigma^3}$$

dove: x_i = valore di carica i-esimo

p_i = probabilità della frequenza dell'evento i-esimo

μ = valore medio della carica ($\mu = \sum x_i p_i$)

σ = varianza ($\sigma^2 = \sum (x_i - \mu)^2 p_i$)

Curtosi
(Kurtosis)

Ku

Il parametro Curtosi meglio conosciuto come in inglese come Kurtosis (Ku) rappresenta il momento del quarto ordine della distribuzione e fornisce una indicazione della deviazione della distribuzione dalla distribuzione gaussiana. In pratica il parametro è nullo se la distribuzione è di tipo gaussiano, positivo se la distribuzione è più concentrata rispetto alla media, negativo in caso di distribuzioni appiattite. Informazioni sul significato della funzione possono essere ricavate dalla figura.

La rappresentazione matematica della funzione è

$$Ku = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 p_i}{\sigma^4} - 3$$

dove: x_i = valore di carica i-esimo

p_i = probabilità della frequenza dell'evento i-esimo

μ = valore medio della carica ($\mu = \sum x_i p_i$)

σ = varianza ($\sigma^2 = \sum (x_i - \mu)^2 p_i$)

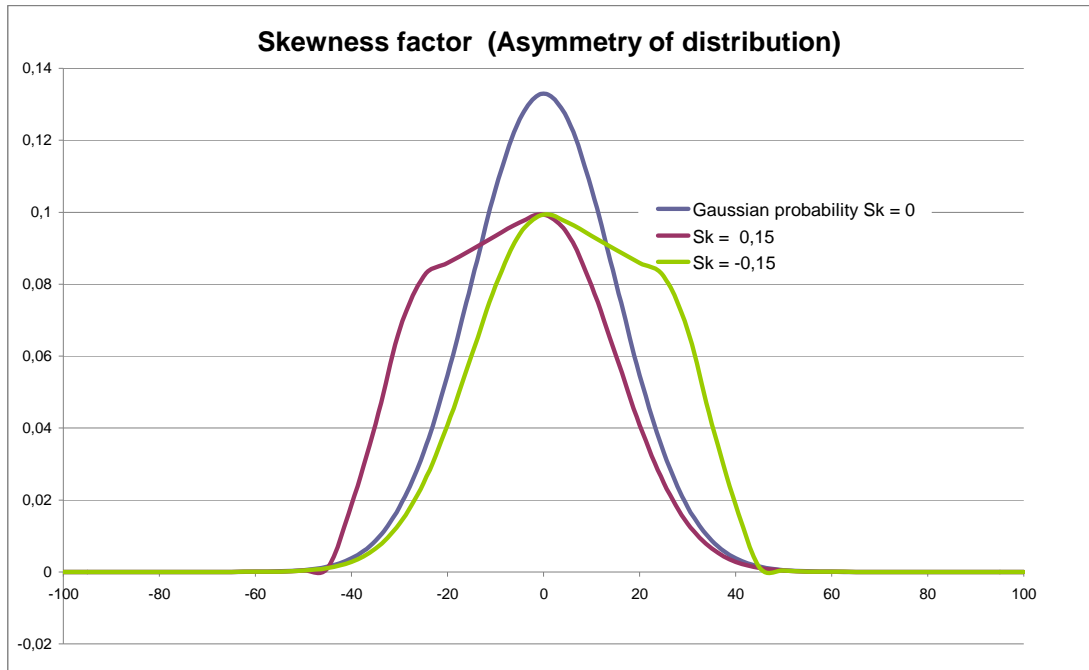


Figura 7-8: Significato del fattore di Skewness

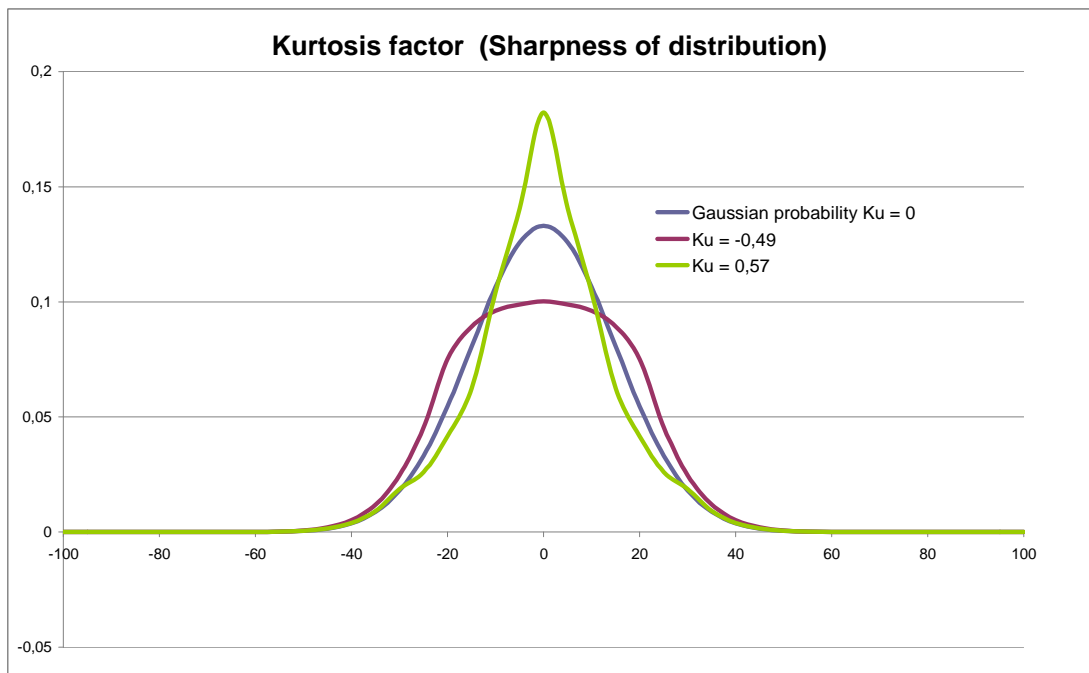


Figura 7-9: Significato del fattore di Curtosi

7.2.4 Analisi statistica delle distribuzioni

Nella pratica le distribuzioni raccolte vengono analizzate per trovare dei parametri che rendano il gran numero di dati raccolto facilmente confrontabile con altri dati contenuti in una base di dati. In pratica si cercano dei dati riassuntivi.

Spesso si calcolano, parametri statistici come media e deviazione standard ma, sovente, negli algoritmi commerciali le distribuzioni di parametri legati alla ampiezza delle scariche parziali vengono analizzati in base alla distribuzione statistica di Weibull.[44][48]

Tale analisi, porta a definire, a seconda del tipo di distribuzione considerata i due o tre parametri della distribuzione i quali costituiscono una informazione ulteriore da utilizzarsi nel confronto con le distribuzioni note.

Usualmente si trovano approssimazioni della distribuzione delle ampiezze delle scariche parziali mediante la distribuzione di Weibull a due parametri in quanto, a livello computazionale è molto più semplice della distribuzione a tre coefficienti.[70]

Di seguito vengono elencati, per ogni distribuzione, i principali parametri utilizzati dagli algoritmi commerciali per il confronto con le basi di dati. Ovviamente, essendo tali tecniche di analisi ancora in fase di sviluppo e validazione,, i dati riportati riguardano solo una parte della strumentazione commerciale.

1. Distribuzione media degli impulsi $H_n(\varphi)$

Numero delle scariche rilevate	N
Angolo di fase minimo	φ_{\min}
Intervallo di fase	$\Delta\varphi$
Fase media	φ_{med}
Deviazione standard	Std
Fattore di Skewness	Sk
Fattore di Curtosi	Ku

2. Distribuzione media della ampiezze $H_{qn}(\varphi)$

Numero delle scariche rilevate	N
Angolo di fase minimo	φ_{\min}
Intervallo di fase	$\Delta\varphi$
Fase media	φ_{med}
Deviazione standard	Std
Fattore di Skewness	Sk
Fattore di Curtosi	Ku

3. Ampiezza delle scariche

Primo coefficiente della distribuzione di Weibull	α
Secondo coefficiente della distribuzione di Weibull	β
Test di significatività Kramer Von Mises	KVM
Livello di significatività del test Kramer Von Mises	LDS
Carica minima	q_{\min}
Carica massima	q_{\max}

Allo stato attuale della tecnica, come anticipato, non esiste alcuno schema preferenziale di analisi dei dati, e diversi autori hanno proposto metodologie totalmente differenti, con interpretazione dei dati ricavati mediante algoritmi complessi basati su logiche neurali [32][36][38][41][43][46][68][135] o fuzzy [47][133][136] oppure ancora di tipo statistico [75][81] [82].

Per basi di dati modeste comunque un confronto tra dati può essere fatto anche a livello visivo come riportato per esempio in Figura 7-13.

7.3 La valutazione dei pattern su base sperimentale.

La valutazione dei pattern e la costituzione degli indici menzionati nella sezione precedente è frutto di una serie di sperimentazioni eseguite negli anni su varie tipologie di scariche parziali e finalizzate alla descrizione dei pattern correlati alle sorgenti di scariche parziali più comuni.

È chiaro che le sperimentazioni sono state eseguite su provini ed i pattern ottenuti potrebbero risultare differenti qualora gli stessi difetti venissero rilevati su apparecchiature complete le quali, nella pratica presentano quasi sempre alcuni fenomeni di scarica particolari difficilmente simulabili con provini. A titolo di esempio si pensi alle delaminazioni nelle macchine rotanti oppure alle scariche sul commutatore per trasformatori a secco oppure alle scariche dovute a corpi a potenziale flottante nei trasformatori in olio.

In ogni caso l'esposizione che segue vuole dare una idea del metodo proposto e la effettiva consistenza pratica nella determinazione delle differenti tipologie di pattern per mezzo di opportuni provini.

Nel corso del presente lavoro sono stati costruiti dei provini per simulare l'andamento delle scariche parziali interne ad un isolamento in resina epossidica di cui si daranno maggiori dettagli in seguito.

I provini sono stati realizzati con lo scopo di simulare i tipici fenomeni di scariche parziali riscontrabili in un trasformatore in resina, in modo da poter poi utilizzare i dati raccolti come base di dati per i confronti.

Nella raccolta dei dati si è seguito un procedimento analogo a quanto riportato in letteratura (Figura 7-10, Figura 7-11, Figura 7-12 e Figura 7-13), acquisendo tutti i parametri ricavabili dalle misure ma confrontando i valori trovati per una frazione modesta di questi in modo da semplificare il problema e ridurre, almeno in prima battuta il numero di confronti da fare. [31] [34]

Si considerano dunque la distribuzione media degli impulsi $H_n(\varphi)$, per semiciclo positivo $H_n^+(\varphi)$ e negativo $H_n^-(\varphi)$ e la distribuzione media delle ampiezze $H_{qn}(\varphi)$ per semiciclo positivo $H_{qn}^+(\varphi)$ e negativo $H_{qn}^-(\varphi)$.

Per tali distribuzioni sono stati calcolati i parametri di Skewness (Sk), Kurtosis (Ku), asimmetria delle scariche (Q), fattore di correlazione (cc), di correlazione modificata (mcc), fattore di picco (Pe)¹³, fase media (\emptyset) e deviazione standard.

¹³ Il fattore Pe quantifica se la distribuzione possiede uno o più picchi.







Smooth surface	roughness [μm] 0,05 	d [mm]	h [mm]	Nonsymmetric rough surface	roughness [μm] 3,2 	d1/d2 [mm]	h [mm]
		1,0	1,0			10 / 2	1,5
		2,0	1,0			10 / 5	2,0
		3,0	1,0				
		5,0	1,0				
		10,0	1,0				
10,0	0,1						
Rough surface	roughness [μm] 3,2 	d [mm]	h [mm]	surface discharges	d 	d [mm]	h [mm]
		1,0	0,5			0,0	2,0
		2,0	0,5			16,0	5,0
		5,0	0,5				
		10,0	1,0				
		1,0	5,0				
Rough surface	roughness [μm] 3,2 	d [mm]	h [mm]	treeing	R 	R [μm]	h [mm]
		1,0	1,0			100	40
		2,0	2,0				
		1,0	5,0				
		1,0	10,0				

Figura 7-10: Esempio di realizzazione dei provini (Letteratura)

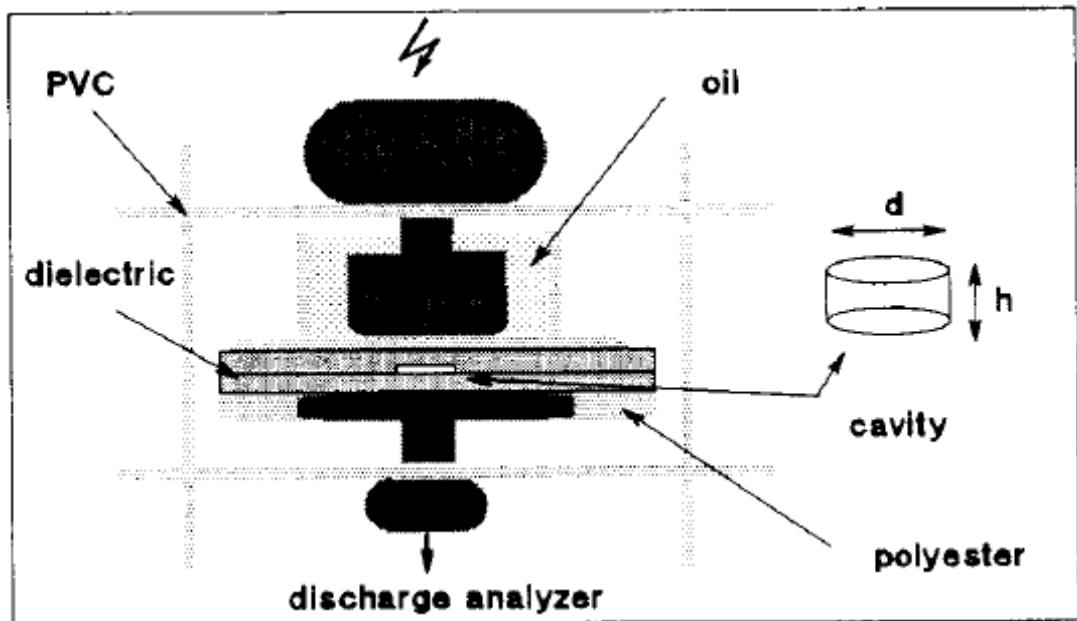


Figura 7-11: Esempio di realizzazione dei provini (Letteratura). Nel caso specifico si tratta di un provino per simulare una cavità in un corpo solido.

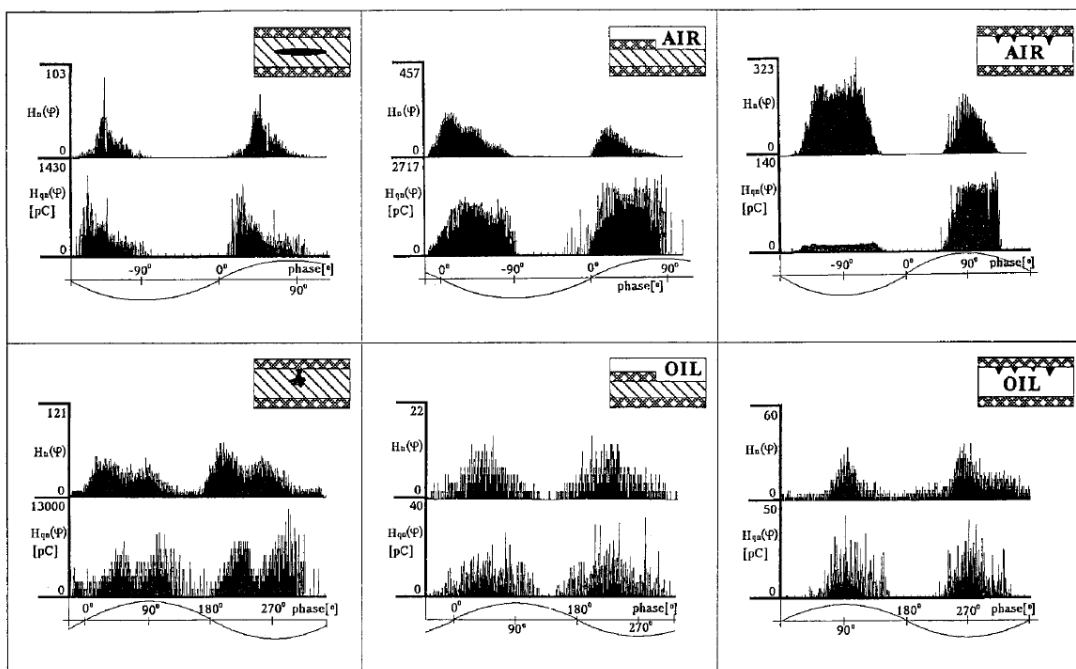


Figura 7-12: Misure effettuate su vari provini. (Letteratura)

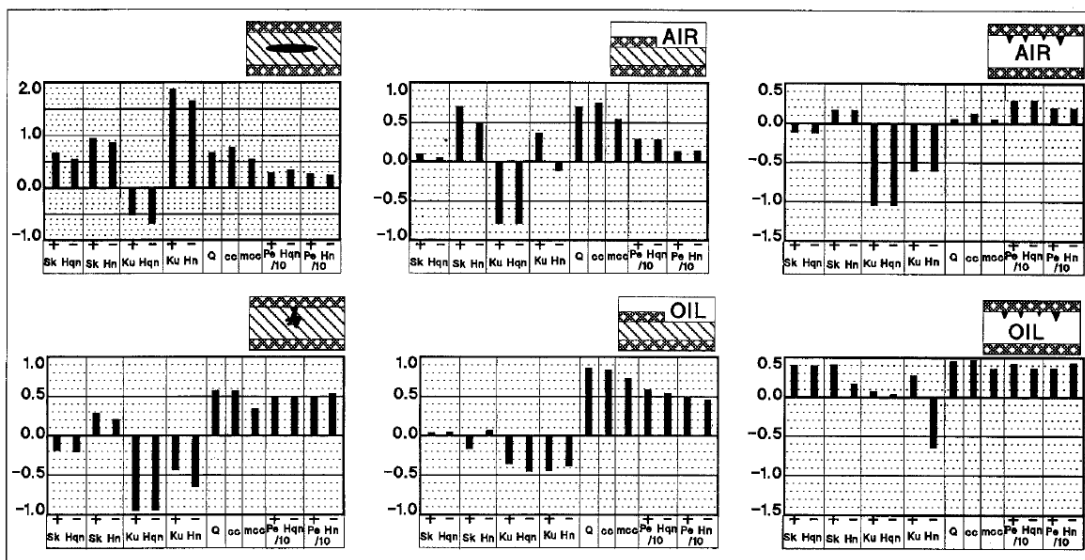


Figura 7-13 Confronto tra parametri rilevati per ogni provino. È chiara la differenza dei parametri per ogni tipologia di scarica. (Letteratura)

7.3.1 I provini

La costruzione di provini per la simulazione delle varie tipologie di scariche parziali è un'operazione abbastanza complessa in quanto deve tener conto che qualora venga costruito un provino per la determinazione delle caratteristiche di una determinata tipologia di scariche parziali il provino deve essere realizzato in maniera da non presentarne altre altrimenti si avrebbe una sovrapposizione di pattern.

7.3.1.1 Provini per la simulazione di scariche in aria

Al fine di acquisire dati riguardo al comportamento delle scariche in aria è stato utilizzato un dispositivo realizzato per studiare le scariche in gas. Tale dispositivo, riportato in Figura 7-14, è costituito da due elettrodi circolari posti parallelamente tra i quali è posta una punta. La distanza tra la punta e l'elettrodo a diverso potenziale è regolabile per mezzo di una vite posta alla base della punta stessa.

L'atmosfera nella quale è immersa la punta è controllabile, in quanto una barriera in plexiglass isola l'ambiente interno da quello esterno.

Il diametro della punta è circa 5 mm e la tensione di innesco del corona negativo è circa pari a 15 kV.



Figura 7-14: *Provino in aria. Il provino è stato realizzato allo scopo di simulare il comportamento delle scariche parziali in gas.*

Le misure condotte sul provino hanno portato ai risultati riassunti nei grafici e nelle tabelle seguenti:

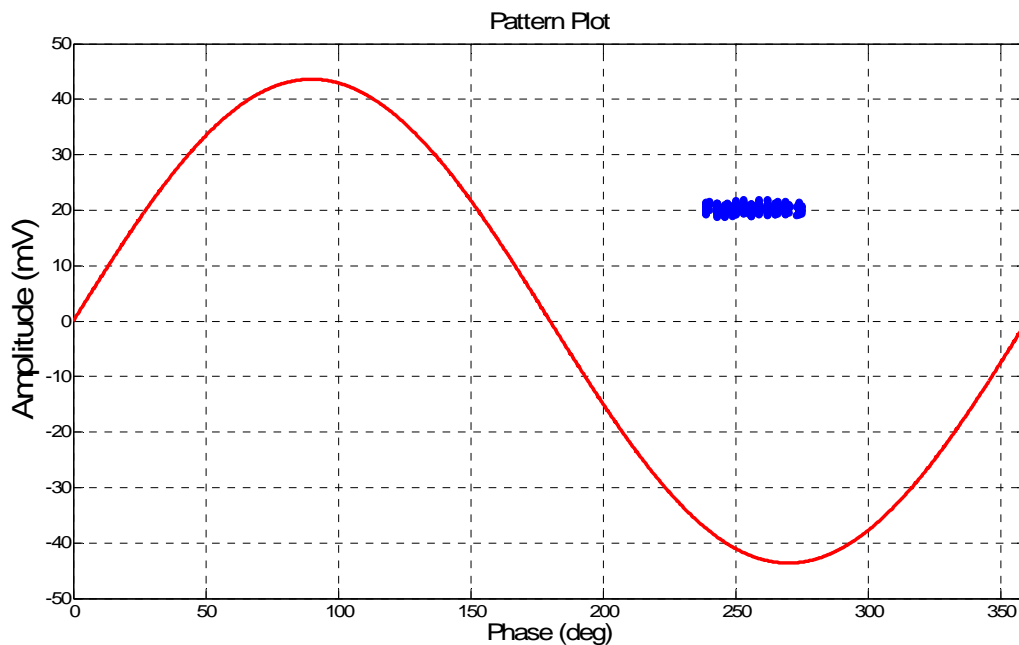


Figura 7-15: Pattern rilevato a circa 16 kV.

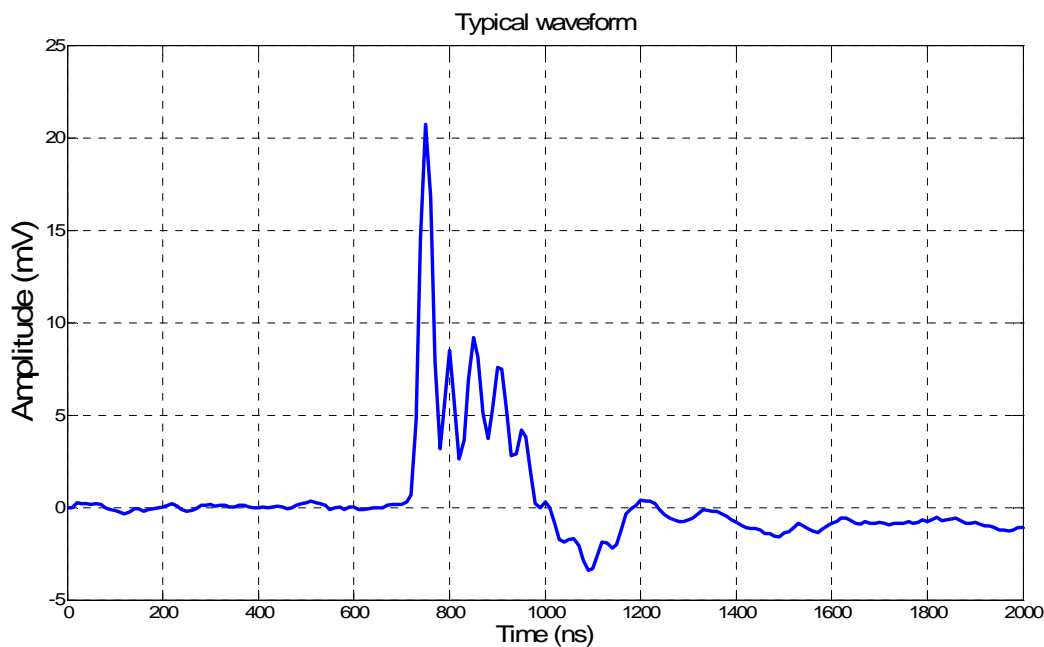


Figura 7-16: Forma d'onda dell'impulso di corrente relativa ad un corona in aria

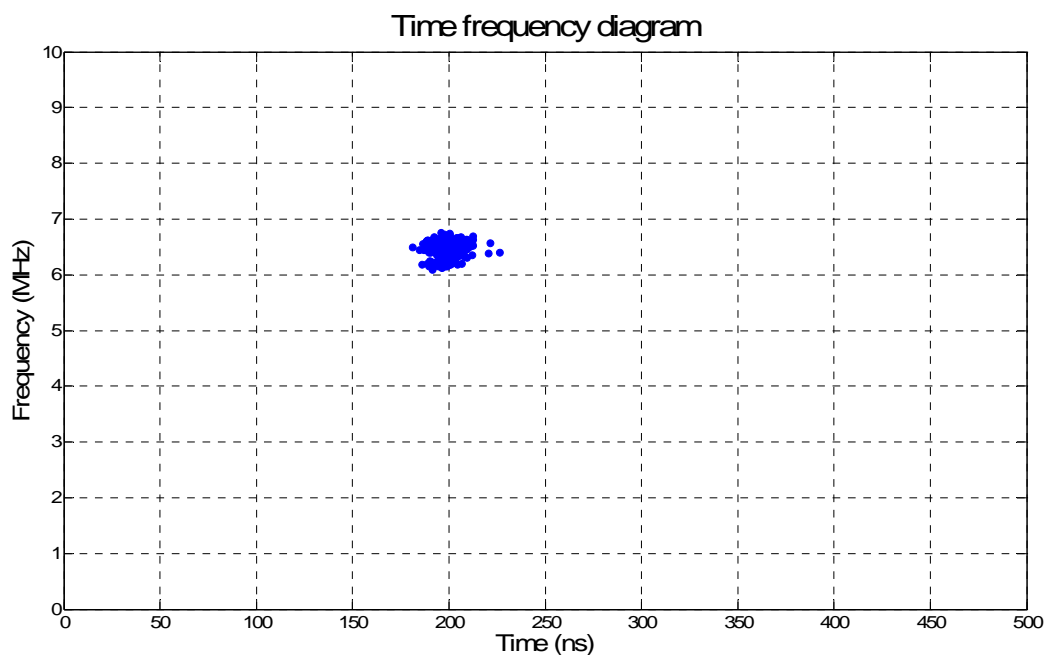


Figura 7-17: Diagramma Tempo-Frequenza del corona in aria

Indici calcolati per la valutazione del pattern			
Distribuzione	POSITIVA	NEGATIVA	
Numero di scariche	500	0	
Tensione minima rilevata	0,02	0,00	(V)
Tensione massima rilevata	0,02	0,00	(V)
Tensione media rilevata	0,02	0,00	(V)
Somma delle tensioni rilevate	10,17	0,00	(V)
Fase minima	59	0	(°)
Fase massima	95	0	(°)
Fase media (calcolata in base alla numerosità degli impulsi)	75,96	0,00	(°)
Fase media (calcolata in base alla tensione degli impulsi)	77,33	0,00	(°)
Deviazione standard $H_n(\varphi)$	10,57	0,00	
Skewness $H_n(\varphi)$	0,09	0,00	
Kurtosis $H_n(\varphi)$	-1,05	0,00	
Deviazione standard $H_{qn}(\varphi)$	10,79	0,00	
Skewness $H_{qn}(\varphi)$	0,02	0,00	
Kurtosis $H_{qn}(\varphi)$	-1,08	0,00	
Weibull (alfa)	0,02	0,00	(V)
Weibull (beta)	39,23	0,00	

Tabella 5: Indici calcolati per la valutazione dei pattern del corona in aria.

7.3.1.2 Provini per la simulazione delle scariche superficiali

Per caratterizzare le scariche superficiali è stato costruito un provino costituito da due elettrodi sferici tra i quali è stato interposto uno strato di isolante in “Teflon” dello spessore di circa 3 mm (Figura 7-18).

La tensione di innesco delle scariche superficiali rilevata è circa pari a 4,3 kV.



Figura 7-18: Provino in aria-teflon. Il provino è stato realizzato allo scopo di simulare il comportamento delle scariche parziali di tipo superficiale.

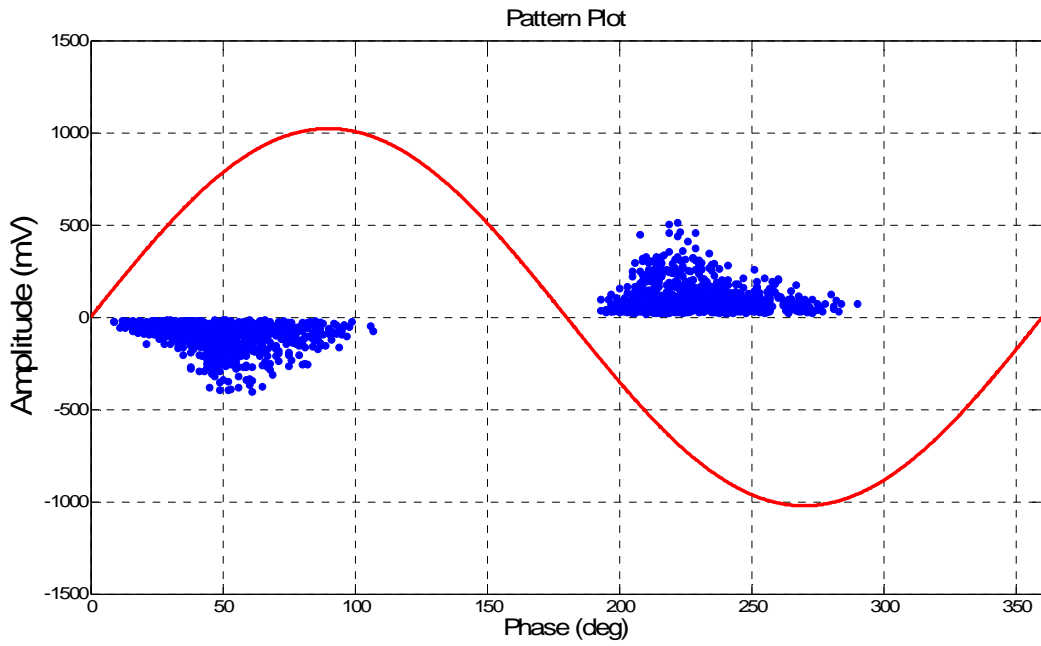


Figura 7-19: Pattern relativo alla scarica superficiale

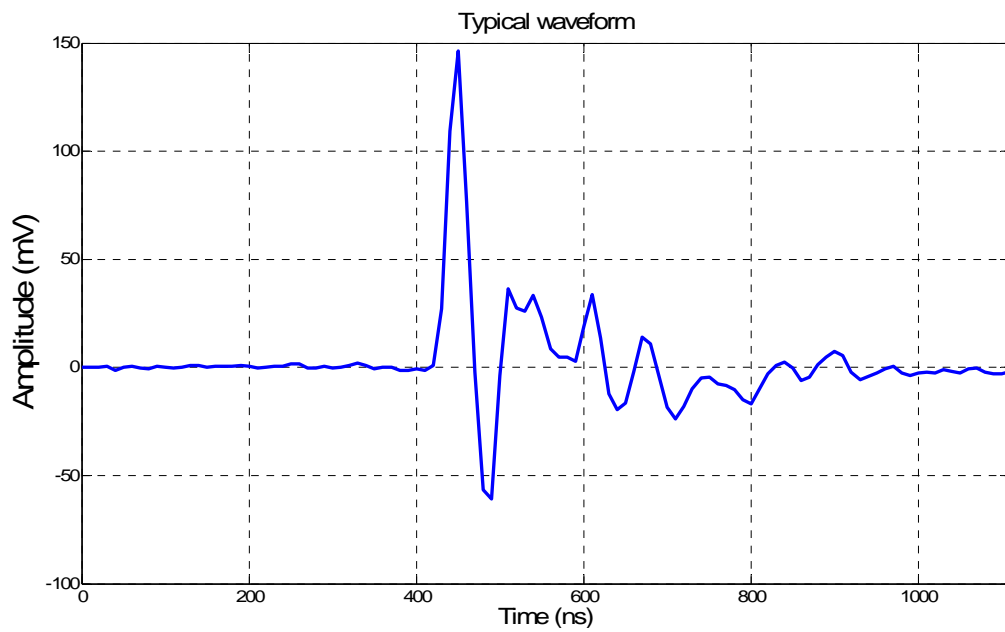


Figura 7-20: Forma d'onda di un impulso di corrente relativo ad una scarica superficiale.

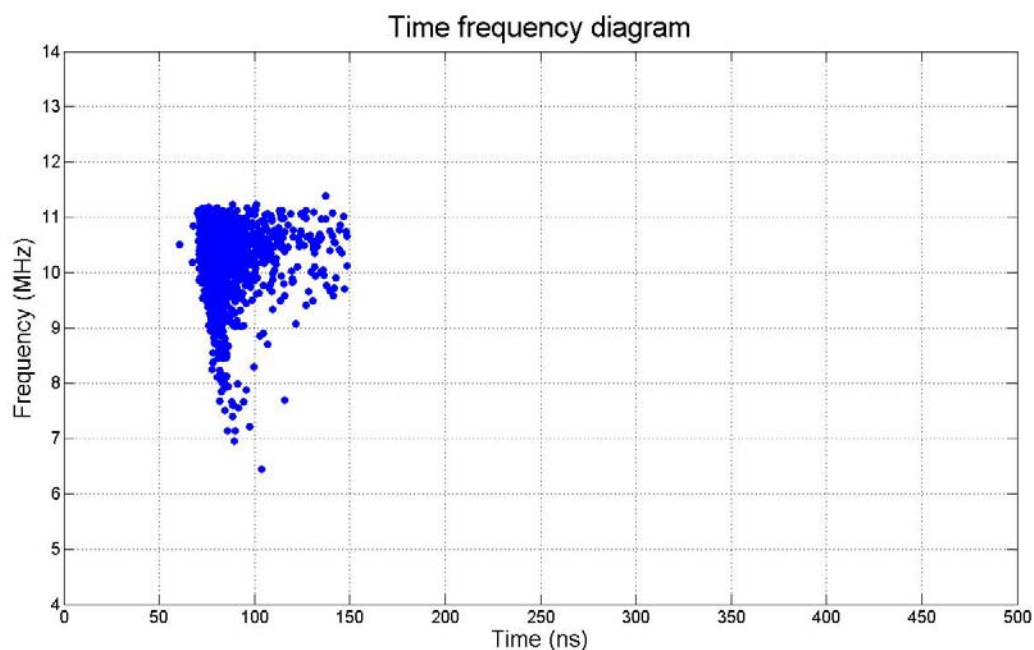


Figura 7-21: Diagramma Tempo-Frequenza relativo ad una scarica superficiale.

Indici calcolati per la valutazione del pattern			
Distribuzione	POSITIVA	NEGATIVA	
Numero di scariche	980	934	
Tensione minima rilevata	0,02	-0,01	(V)
Tensione massima rilevata	0,51	-0,41	(V)
Tensione media rilevata	0,10	-0,09	(V)
Somma delle tensioni rilevate	95,08	-87,41	(V)
Fase minima	13	9	(°)
Fase massima	110	107	(°)
Fase media (calcolata in base alla numerosità degli impulsi)	48,91	48,01	(°)
Fase media (calcolata in base alla tensione degli impulsi)	57,14	59,39	(°)
Deviazione standard $H_n(\varphi)$	18,57	19,07	
Skewness $H_n(\varphi)$	0,59	0,41	
Kurtosis $H_n(\varphi)$	-0,22	-0,33	
Deviazione standard $H_{qn}(\varphi)$	24,25	22,96	
Skewness $H_{qn}(\varphi)$	0,21	-0,09	
Kurtosis $H_{qn}(\varphi)$	-0,94	-0,75	
Weibull (alfa)	0,11	0,10	(V)
Weibull (beta)	1,41	1,44	
Asimmetria della carica Q		-0,9646	
Asimmetria della fase		0,6923	

Tabella 6: Indici calcolati per la valutazione dei pattern di una scarica superficiale.

7.3.1.3 Provini per la simulazione delle scariche interne

Al fine di verificare il comportamento delle scariche superficiali legate a possibili distacchi tra materiali diversi all'interno di una colata si è ricorsi ad un provino realizzato per simulare l'isolamento interno di una bobina in resina di media tensione di un trasformatore a secco.

Si è voluto simulare l'isolamento presente tra due sezioni di bobine interne all'avvolgimento e pertanto il provino è stato realizzato mediante due elettrodi piani e paralleli tra i quali è stato interposto dell'isolante in poliestere ed un distanziatore in vetroresina.

La tensione di innesco delle scariche parziali è circa pari a 18 kV.



Figura 7-22: Provino in resina. Tale provino è stato realizzato allo scopo di simulare la configurazione di campo presente all'interno di una bobina di media tensione in resina epossidica. Il provino è affetto da scariche parziali di tipo interno.

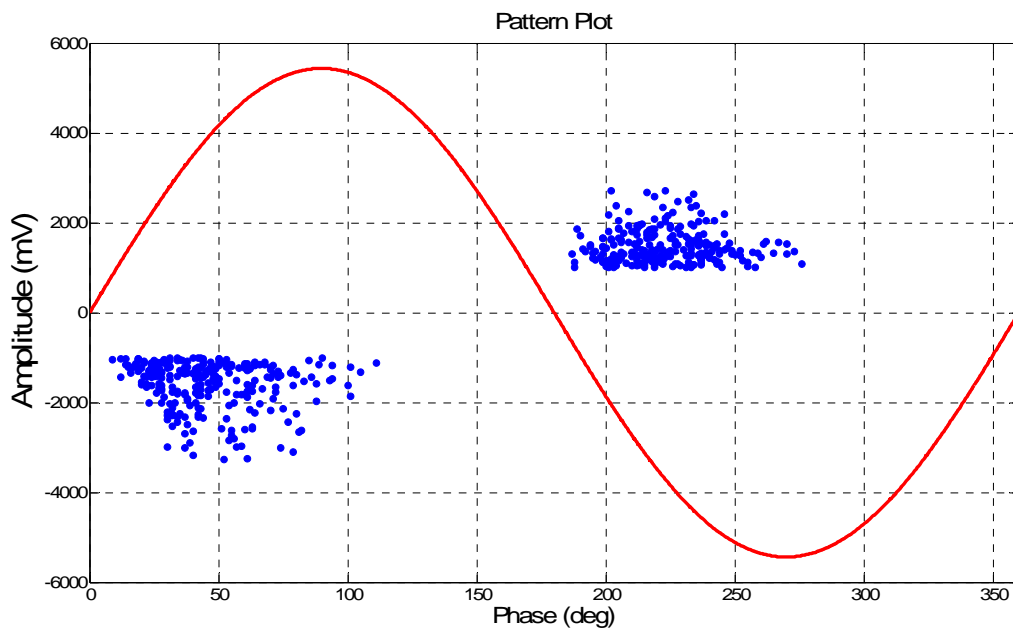


Figura 7-23: Pattern relativo alla scarica interna

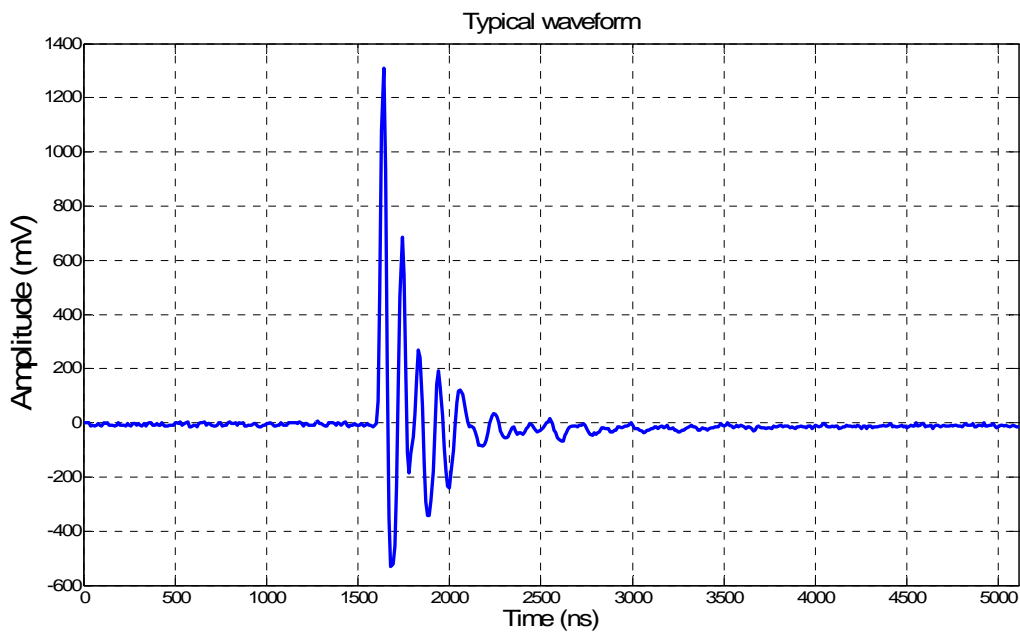


Figura 7-24 Forma d'onda di un impulso di corrente relativo ad una scarica parziale interna.

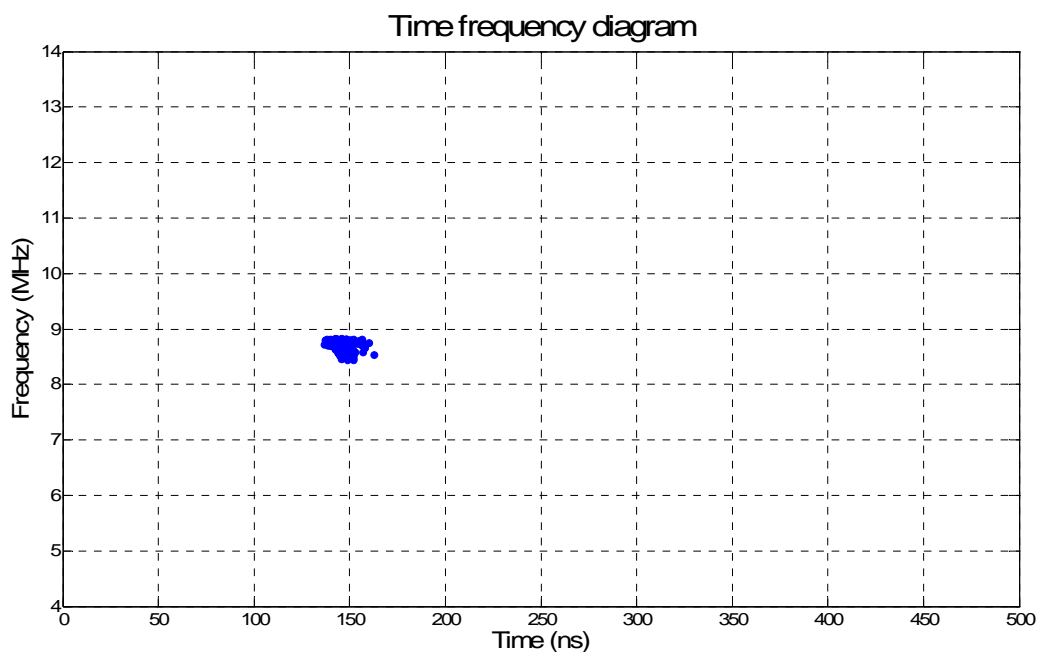


Figura 7-25: Diagramma Tempo-Frequenza relativo ad una scarica interna.

Indici calcolati per la valutazione del pattern			
Distribuzione	POSITIVA	NEGATIVA	
Numero di scariche	240	260	
Tensione minima rilevata	1,01	-1,01	(V)
Tensione massima rilevata	2,72	-3,26	(V)
Tensione media rilevata	1,47	-1,60	(V)
Somma delle tensioni rilevate	353,76	-416,88	(V)
Fase minima	7	9	(°)
Fase massima	96	111	(°)
Fase media (calcolata in base alla numerosità degli impulsi)	42,94	45,99	(°)
Fase media (calcolata in base alla tensione degli impulsi)	46,58	54,44	(°)
Deviazione standard $H_n(\varphi)$	18,19	20,41	
Skewness $H_n(\varphi)$	0,40	0,71	
Kurtosis $H_n(\varphi)$	-0,19	0,06	
Deviazione standard $H_{qn}(\varphi)$	23,06	24,13	
Skewness $H_{qn}(\varphi)$	0,15	0,15	
Kurtosis $H_{qn}(\varphi)$	-0,90	-0,85	
Weibull (alfa)	1,62	1,79	(V)
Weibull (beta)	3,88	3,11	
Asimmetria della carica Q	-1,0878		
Asimmetria della fase	1,2857		

Tabella 7: Indici calcolati per la valutazione dei pattern di una scarica interna

7.3.1.4 Provini per la simulazione delle scariche parziali in particolari tipologie di isolamenti

In aggiunta alle tipologie prima elencate, le apparecchiature possono presentare situazioni particolari dipendenti dalla particolare tecnica costruttiva. Nel caso dei trasformatori a secco i vari strati di conduttore sono separati gli uni dagli altri mediante un isolamento in film di poliestere. Tale film di poliestere, se non adeguatamente impregnato potrebbe essere interessato da scariche interne agli strati del film e da scariche di tipo superficiale. [33][88][89][94]

Al fine di caratterizzare questa particolare tipologia di fenomeno si è costruito un provino adeguato costituito da uno strato di conduttori ed uno schermo isolante composto da vari giri di isolante in poliestere.

La tensione di innesco delle scariche parziali nel provino è stata rilevata essere pari a 6,5 kV.

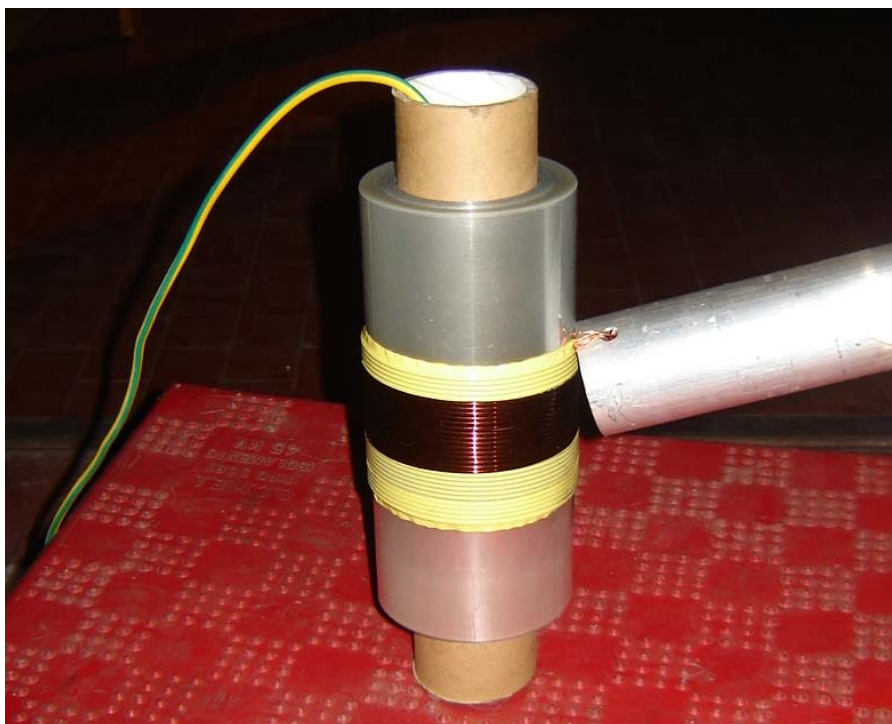


Figura 7-26: Provino realizzato per simulare il comportamento dei vari strati di film di poliestere.

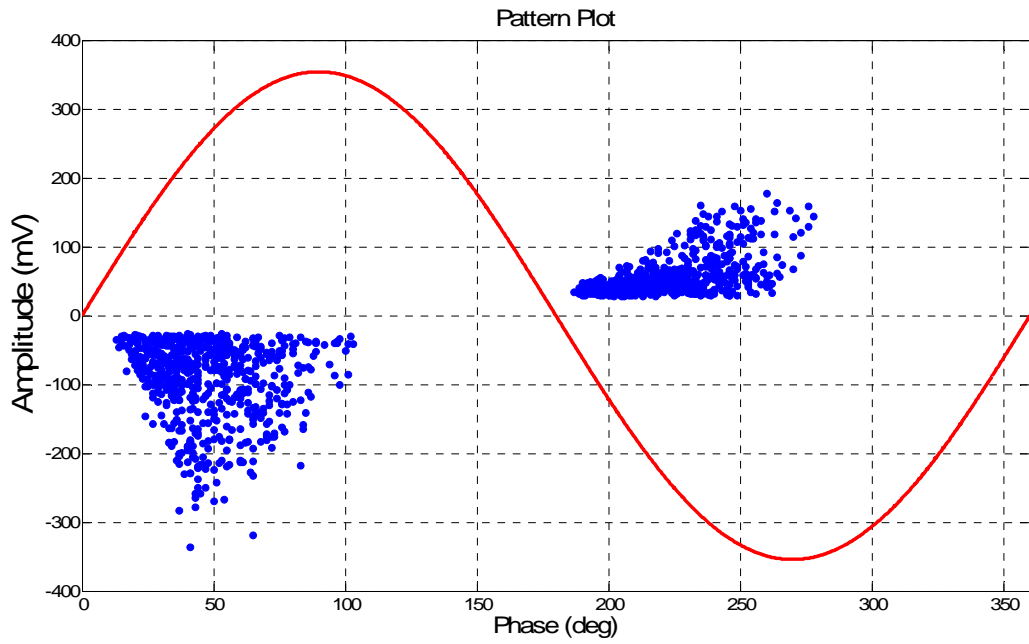


Figura 7-27: Pattern relativo alla scarica sul provino per la simulazione dei vari strati di poliestere.

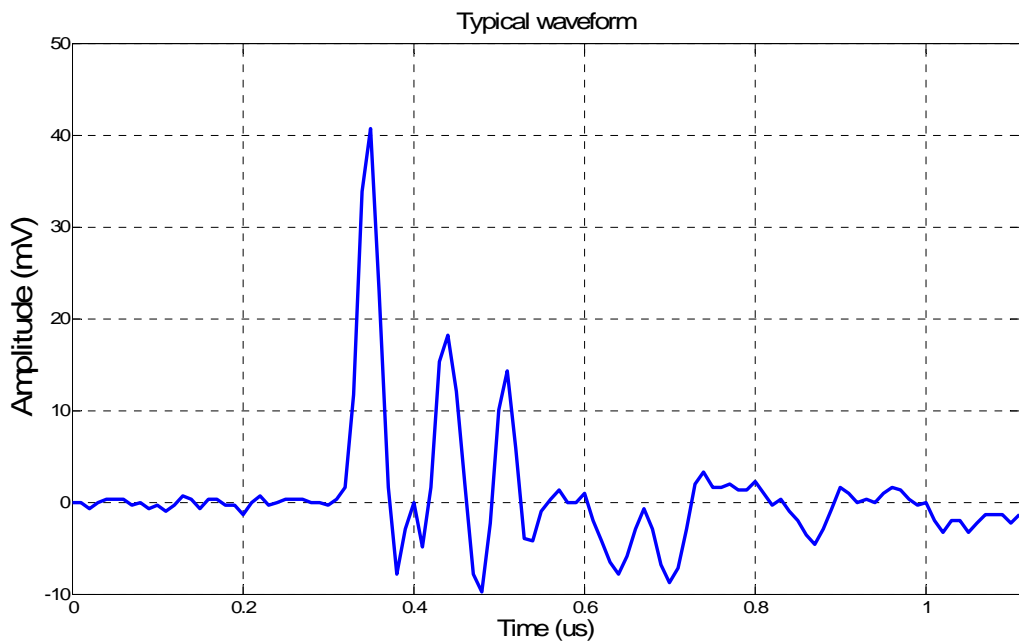


Figura 7-28: Forma d'onda dell'impulso di corrente relativo alla scarica sul provino per la simulazione dei vari strati di poliestere.

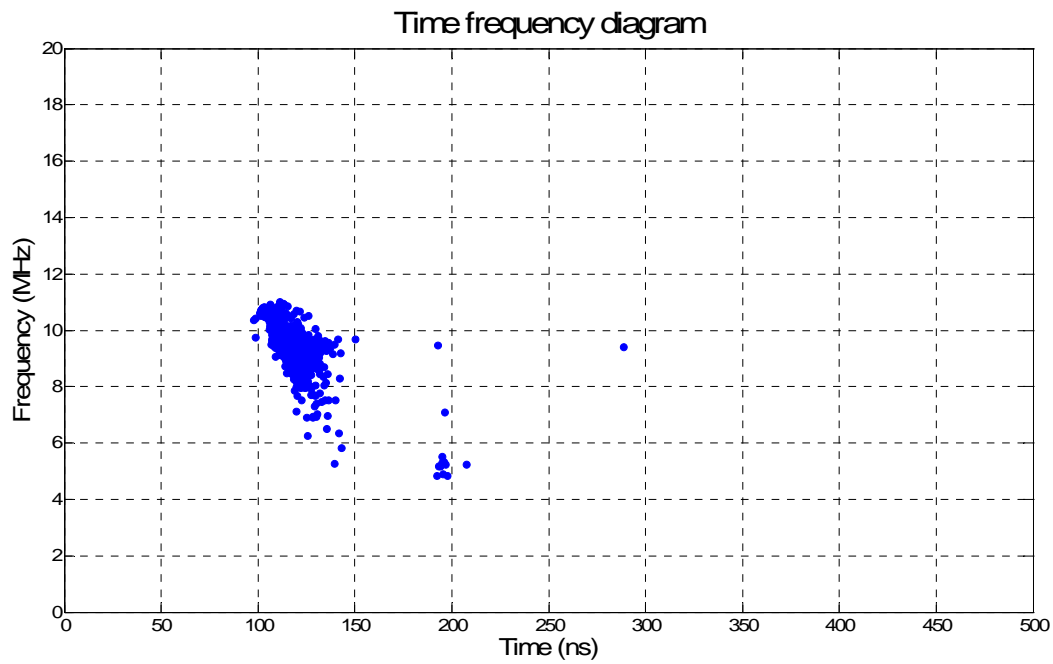


Figura 7-29: Diagramma Tempo-Frequenza relativo al provino per la simulazione dei vari strati di poliestere.

Indici calcolati per la valutazione del pattern			
Distribuzione	POSITIVA	NEGATIVA	
Numero di scariche	563	630	
Tensione minima rilevata	0,03	-0,03	(V)
Tensione massima rilevata	0,18	-0,34	(V)
Tensione media rilevata	0,06	-0,09	(V)
Somma delle tensioni rilevate	32,94	-58,94	(V)
Fase minima	7	13	(°)
Fase massima	98	103	(°)
Fase media (calcolata in base alla numerosità degli impulsi)	44,23	47,50	(°)
Fase media (calcolata in base alla tensione degli impulsi)	58,74	56,76	(°)
Deviazione standard $H_n(\varphi)$	20,15	18,36	
Skewness $H_n(\varphi)$	0,21	0,62	
Kurtosis $H_n(\varphi)$	-0,73	-0,09	
Deviazione standard $H_{qn}(\varphi)$	24,61	22,13	
Skewness $H_{qn}(\varphi)$	-0,30	0,05	
Kurtosis $H_{qn}(\varphi)$	-0,95	-0,85	
Weibull (alfa)	0,07	0,11	(V)
Weibull (beta)	2,10	1,74	
Asimmetria della carica Q	-1,5991		
Asimmetria della fase	1,8571		

Tabella 8: Indici calcolati per la valutazione dei pattern di una tipologia di scariche parziali relativa al provino per la simulazione dei vari strati di poliestere.

Sempre per acquisire confidenza con le particolari tipologie di fenomeni impulsivi è stato provato pure un resistore per riscaldamento. Tale resistore previsto per essere impiegato come elemento riscaldante dei forni elettrici presentava una attività di scariche parziali, partire già da tensioni modeste, tra gli elementi attivi e la cassa metallica di contenimento.

La tensione di innesco del componente è stata rilevata essere pari a 6,5 kV.

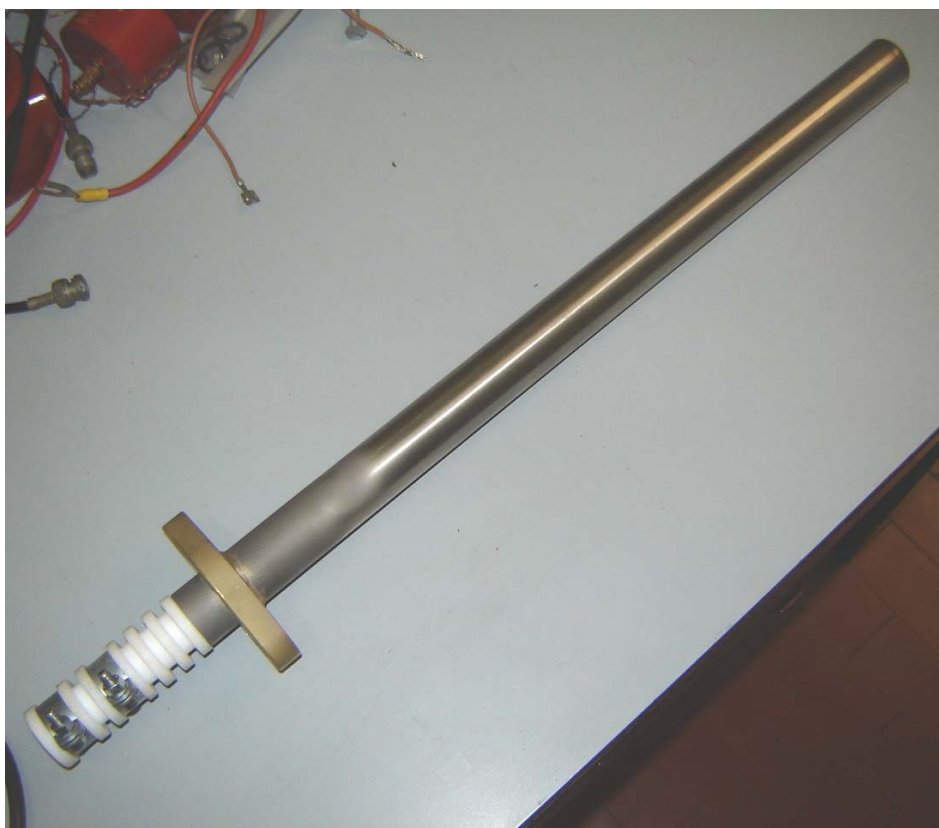


Figura 7-30: Resistore per riscaldamento dei forni.

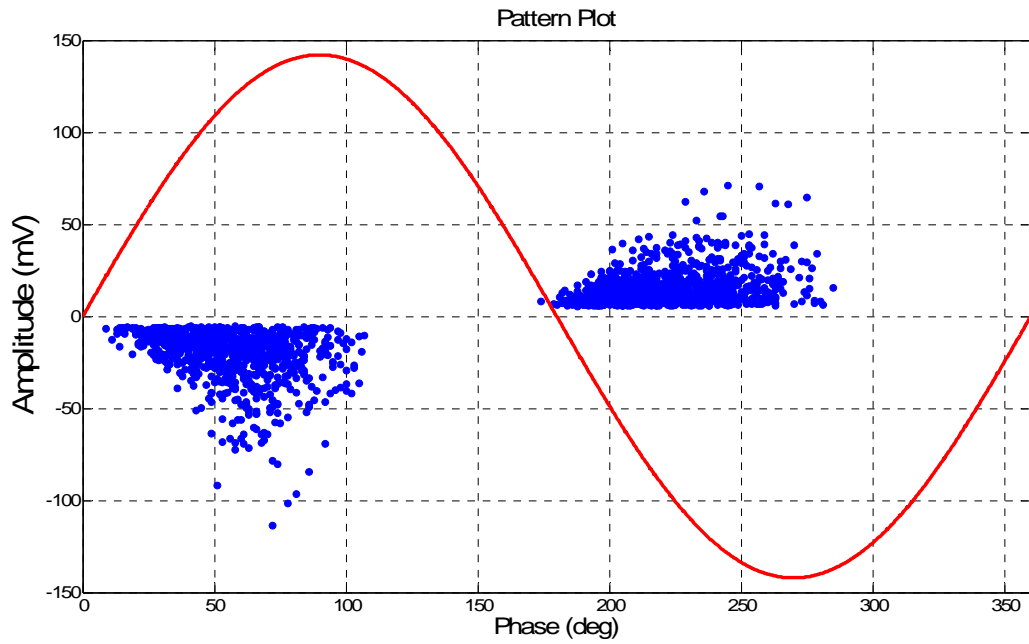


Figura 7-31: Pattern relativo alle scariche parziali rilevate sul resistore per riscaldamento

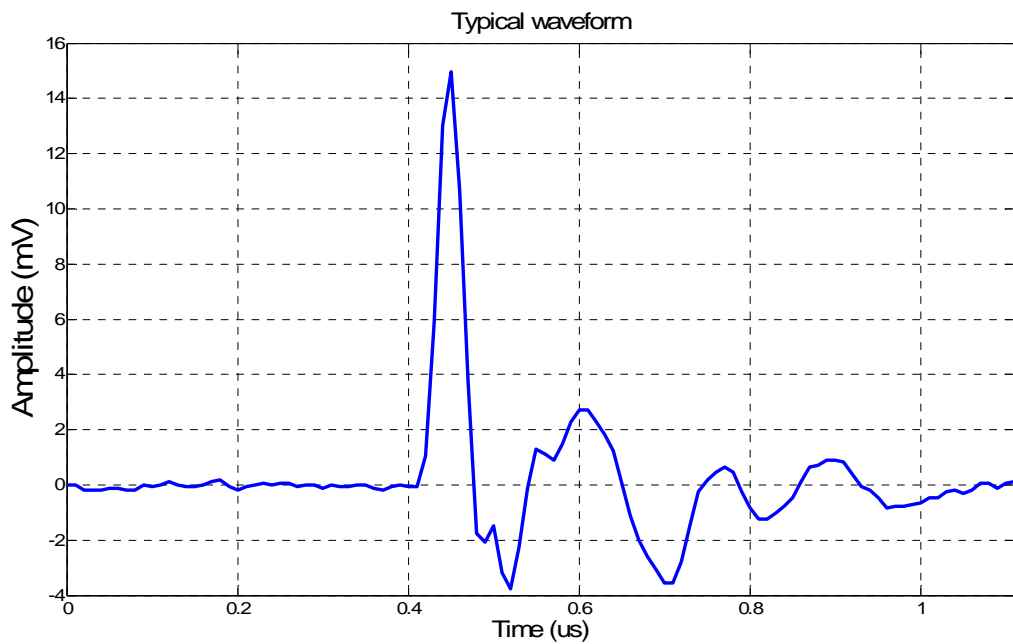


Figura 7-32: Forma d'onda dell'impulso di corrente relativo alla scarica parziale sul resistore per riscaldamento.

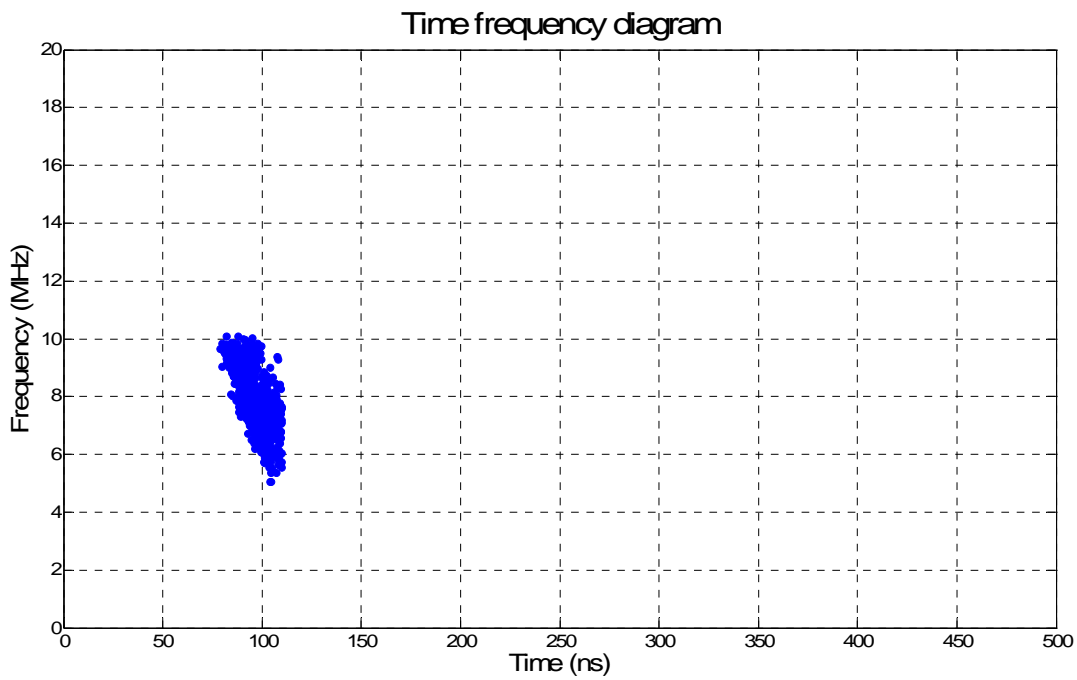


Figura 7-33: Diagramma Tempo-Frequeza relativo al resistore per riscaldamento.

Indici calcolati per la valutazione del pattern			
Distribuzione	POSITIVA	NEGATIVA	
Numero di scariche	995	887	
Tensione minima rilevata	0,01	-0,01	(V)
Tensione massima rilevata	0,07	-0,11	(V)
Tensione media rilevata	0,02	-0,02	(V)
Somma delle tensioni rilevate	15,22	-18,20	(V)
Fase minima	-6	9	(°)
Fase massima	105	107	(°)
Fase media (calcolata in base alla numerosità degli impulsi)	41,84	55,41	(°)
Fase media (calcolata in base alla tensione degli impulsi)	56,90	65,21	(°)
Deviazione standard $H_n(\varphi)$	22,07	19,75	
Skewness $H_n(\varphi)$	0,34	0,15	
Kurtosis $H_n(\varphi)$	-0,66	-0,56	
Deviazione standard $H_{qn}(\varphi)$	28,60	24,58	
Skewness $H_{qn}(\varphi)$	-0,26	-0,28	
Kurtosis $H_{qn}(\varphi)$	-1,04	-0,80	
Weibull (alfa)	0,02	0,02	(V)
Weibull (beta)	1,78	1,57	
Asimmetria della carica Q	-1,3411		
Asimmetria della fase	0,0517		

Tabella 9: Indici calcolati per la valutazione dei pattern di una tipologia di scariche parziali relativa al resistore per riscaldamento.

8 Limiti nella analisi delle distribuzioni

8.1 **Limiti nella valutazione delle distribuzioni delle scariche parziali mediante l'utilizzo dei pattern.**

Come visto nei capitoli precedenti, l'analisi dei pattern delle scariche parziali per mezzo di parametri statistici, database ed algoritmi in grado di aggiornare le basi di dati in funzione delle nuove esperienze acquisite costituisce un mezzo efficiente per la determinazione della natura dei fenomeni impulsivi.

Nella pratica però, soprattutto per quanto riguarda misure condotte su apparecchiature complesse e prove in campo, si rileva che i pattern ottenuti sono abbastanza diversi da quelli che si possono rilevare sui provini in condizioni di laboratorio controllate, ad esempio si deve osservare una forte presenza di segnali estranei alla misura come ad esempio rumori e disturbi.[73][74][91]

In molti casi, oltre ai precedenti segnali, può essere rilevata anche la presenza di più fenomeni impulsivi di natura diversa presenti contemporaneamente sullo stesso oggetto in prova con parziale sovrapposizione dei pattern; in oggetti con più difetti della stessa natura può essere osservata la sovrapposizione pressoché totale dei pattern con conseguente impossibilità, con ogni mezzo statistico di operare una discriminazione.[50][55][59][60]

La pratica impossibilità di riuscire ad ottenere una discriminazione, oltre a limitare il riconoscimento dei fenomeni impulsivi diviene particolarmente grave nel caso siano utilizzati sistemi di acquisizione auto-apprendenti o con base di dati aggiornabile. In questo caso ogni sovrapposizione di pattern genera un nuovo pattern con caratteristiche sempre diverse che viene di volta in volta immagazzinato generando in breve tempo l'impossibilità di condurre una valutazione realistica della tipologia di fenomeno impulsivo.

La tecnica dell'analisi dei pattern, condotta in maniera tradizionale, a motivo dei limiti esposti, non ha avuto, nonostante l'efficacia teorica, una grande diffusione almeno sino a momento in cui non è stato possibile operare un trattamento dei dati preliminare che consentisse di separare i segnali in gruppo omogenei, (definiti "Clusters") da poter essere analizzati separatamente.[49]

Mediante la separazione dei segnali in gruppi omogenei si ottengono una serie di vantaggi:

- 1) Separazione del rumore dai segnali utili
- 2) Separazione dei disturbi
- 3) Analisi di segnali omogenei e dunque aventi presumibilmente la stessa natura.
- 4) Eliminazione o forte riduzione del rischio di avere pattern sovrapposti.
- 5) Possibilità di riconoscimento di scariche aventi la stessa natura ma ubicate in punti geometricamente diversi della macchina in esame.
- 6) Facile confronto con i segnali accumulati nei database.

7) Riduzione del rischio di falso apprendimento perché si immagazzinano i segnali della stessa natura senza il rumore.

8) Riconoscimento delle varie tipologie di fenomeni impulsivi mediante l'utilizzo dei sistemi di acquisizione a banda larga

Per arrivare a questi risultati non è possibile operare con sistemi di misura delle scariche parziali a banda stretta oppure a banda larga perché entrambi, di fronte a qualsiasi segnale impulsivo, rispondono sempre con la medesima risposta funzione della propria risposta impulsiva caratteristica e dunque ogni informazione, eccezion fatta per il valore della carica, viene perso.

La natura dei sistemi di misura a banda ultra larga consente invece di rilevare la forma d'onda dell'impulso di corrente e dunque di poter ottenere maggiori informazioni in merito ai segnali.

Gli studi effettuati sulle scariche parziali con strumentazione a banda ultra larga hanno evidenziato come i fenomeni impulsivi di diversa natura, a causa dei diversi fenomeni fisici in origine, generino diverse tipologie di forme d'onda della corrente. È stato osservato inoltre che tali impulsi, avendo dinamiche molto veloci coinvolgono frequenze molto elevate e come tali frequenze possano essere modificate in funzione delle funzioni di trasferimento dei circuiti di misura e degli stessi oggetti in prova in funzione della ubicazione delle sorgenti di carica.

In pratica gli impulsi di corrente relativi alle scariche parziali nei sistemi estesi (industriali) vengono rilevati sempre deformati rispetto agli impulsi originali, in dipendenza delle caratteristiche fisiche dei circuiti di misura e dei rilevatori impiegati.

Dagli studi condotti si sono definite le caratteristiche in frequenza che dovrebbero presentare i circuiti e le strumentazioni di misura a banda ultra larga al fine di poter consentire, sia pure in presenza di inevitabili deformazioni, una discriminazione tra i segnali di natura diversa.

Con i sistemi a banda ultra larga, (qualora siano rispettati i requisiti minimi in frequenza), nel corso della misura delle scariche parziali vengono acquisiti impulsi di corrente diversi a seconda della diversa tipologia di scarica e in funzione della distorsione introdotta dalla funzione di trasferimento dell'oggetto stesso¹⁴. Come risultato si ha che le scariche parziali vengono suddivise oltre che per la natura delle stesse anche per l'origine e dunque si riesce meglio ad identificare il numero di sorgenti di natura impulsiva.

Nel seguito vengono riportati alcuni esempi delle forme d'onda della corrente che possono essere rilevate nel corso della misura delle scariche parziali in banda ultra larga. Si noti che il sistema di acquisizione utilizzato ha una banda passante di circa 20 MHz.

¹⁴ La distorsione introdotta dalla funzione di trasferimento dell'oggetto stesso consente di discriminare scariche parziali aventi medesima natura ma ubicate in punti diversi dell'oggetto in prova.

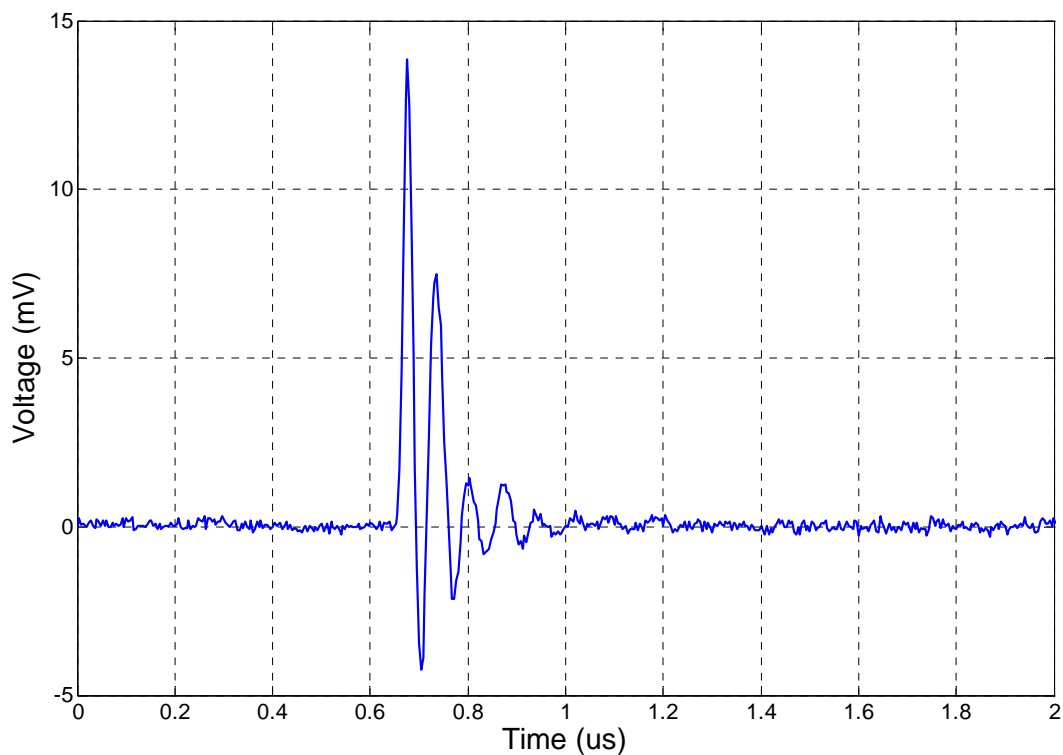


Figura 8-1: Esempio di impulso di corrente relativo ad una scarica parziale in una resistenza elettrica per alta tensione. La tensione è stata rilevata ai capi di un resistore avente resistenza nominale pari a 100 Ohm.

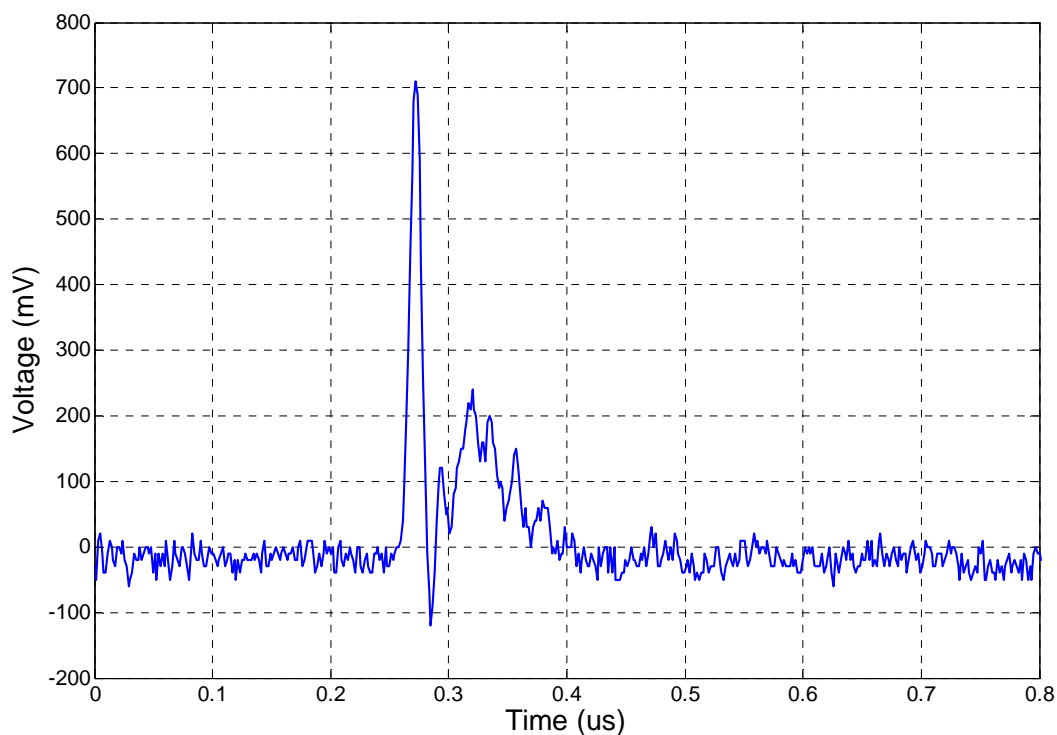


Figura 8-2: Esempio di impulso di corrente relativo ad una scarica superficiale su provino. La tensione è stata rilevata ai capi di un resistore avente resistenza nominale pari a 100 Ohm.

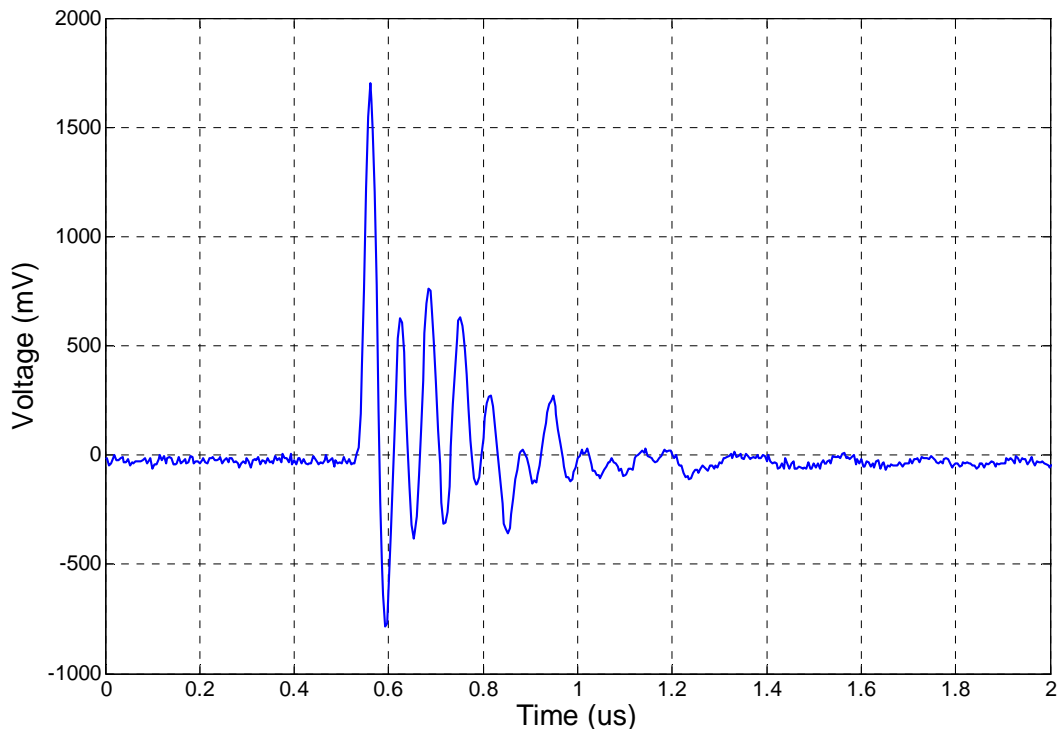


Figura 8-3: Esempio di impulso di corrente relativo ad una scarica interna al provino in resina. La corrente è stata rilevata ai capi di un resistore avente resistenza nominale pari a 100 Ohm.

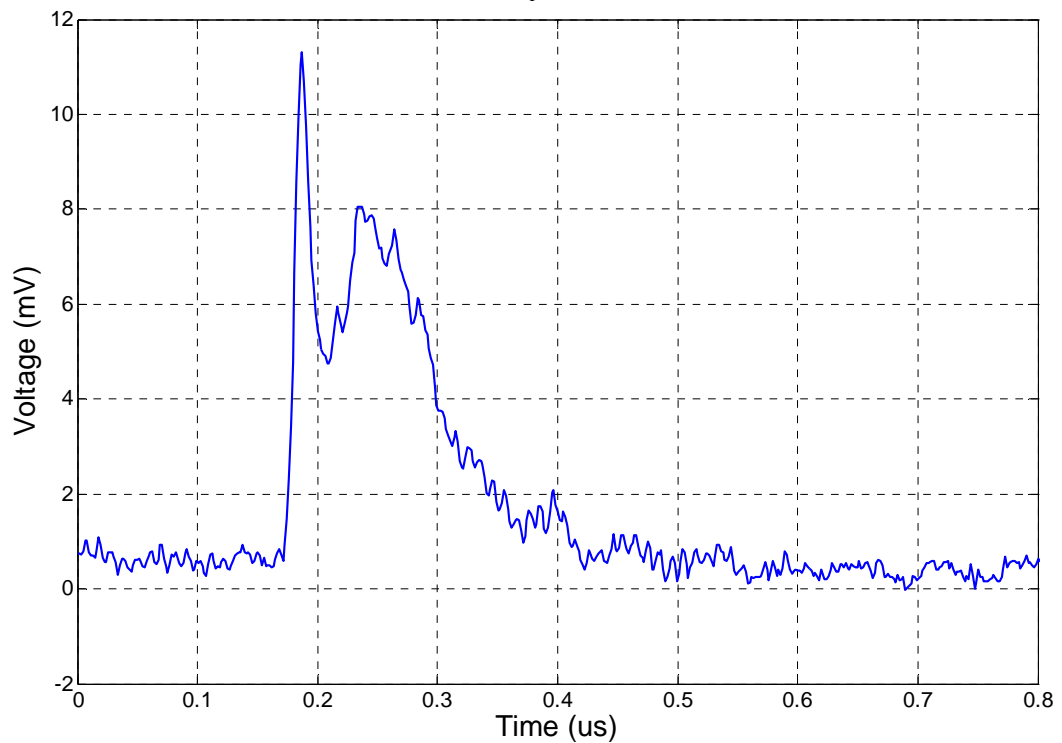


Figura 8-4: Esempio di impulso di corrente relativo ad una scarica in aria di tipo 'Corona'. La corrente è stata rilevata ai capi di un resistore avente resistenza nominale pari a 100 Ohm.

8.2 Il metodo Tempo-Frequenza.

8.2.1 Introduzione

La necessità di discriminare impulsi di diversa natura non è un problema nuovo introdotto dallo studio delle scariche parziali ma è una questione aperta da molti anni e sviluppata da tempo nei più svariati campi applicativi.[5]

Nella più banale delle applicazioni gli impulsi possono essere distinti ad occhio nudo considerando le forme d'onda e confrontando i diversi andamenti ma è ovvio che un approccio simile al problema può essere consentito solo qualora gli impulsi siano in numero ridotto mentre qualora il numero degli impulsi divenga elevato si pone la necessità di definire degli algoritmi che ne rendano automatica la classificazione.

Esistono in letteratura svariate metodologie di riconoscimento degli impulsi (Pattern Recognition) basate su diverse strategie e diverse definizioni di parametri da valutare.

In pratica non esiste una strategia di riconoscimento migliore delle altre in assoluto ma per ogni applicazione esiste una strategia che meglio delle altre si presta alla risoluzione del problema.

Nel riconoscimento dei testi (OCR) ad esempio, essendo il set di caratteri noto a priori e si adottano strategie matriciali dove si riconoscono, confrontando con un database predefinito, le caratteristiche principali dei caratteri noti, ad esempio cerchi, stanghette ecc al fine di ricondurre il simbolo acquisito alla forma nota che con maggior probabilità lo rappresenta.

In altre applicazioni dove si ha la necessità di classificare gli impulsi potrebbero essere osservati altri parametri come tempo di salita, tempo di discesa ecc..

Nel caso delle scariche parziali in banda larga la quantità di impulsi da analizzare è generalmente molto elevata e conseguentemente i tempi di elaborazione e la quantità di memoria da impiegare per lo svolgimento delle operazioni di riconoscimento debbono essere tenuti in debito conto.

Anche la quantità di parametri ricavata dall'analisi di ogni singolo impulso deve essere limitata ma rappresentativa delle principali caratteristiche dell'impulso il esame.

Un problema simile all'analisi degli impulsi associati alle scariche parziali in banda ultra larga era già stato affrontato nel passato per il riconoscimento dei segnali associati ai suoni oppure ai sonar.

In questo tipo di segnali l'informazione, come nel caso delle scariche parziali, è contenuta sia nella evoluzione temporale delle ampiezze che nelle frequenze messe in gioco da ogni singolo impulso.

Il riconoscimento di impulsi simili deve pertanto avvenire tramite l'analisi simultanea di almeno due grandezze, una legata al tempo (evoluzione temporale) ed una legata alla frequenza (andamento delle frequenze).

La tecnica sviluppata, che prende il nome di TEMPO FREQUENZA o TIME FREQUENCY ANALYSIS, consente di condensare l'informazione relativa ad ogni

singolo impulso in una coppia di valori reali, una funzione del tempo e l'altro funzione dello spettro delle armoniche presenti nel segnale.[18][95][125]

I parametri che vengono calcolati per ogni singolo impulso prendono il nome di tempo equivalente (Equivalent time length oppure Time standard deviation) e banda equivalente (Equivalent bandwidth oppure frequency standard deviation), le formule per il calcolo sono a seguito riportate.

$$t_0 = \frac{\sum_{i=0}^K t_i \cdot s_i(t_i)^2}{\sum_{i=0}^K s_i(t_i)^2} \quad \text{Eq. 8-1}$$

$$T^2 = \frac{\sum_{i=0}^K (t_i - t_0)^2 \cdot s_i(t_i)^2}{\sum_{i=0}^K s_i(t_i)^2} \quad \text{Eq. 8-2}$$

$$W^2 = \frac{\sum_{i=0}^K f_i^2 \cdot |X_i(f_i)|^2}{\sum_{i=0}^K |X_i(f_i)|^2} \quad \text{Eq. 8-3}$$

K	=	numero dei campioni acquisiti
$s_i(t_i)$	=	campione i-esimo rilevato al tempo i-esimo
$X_i(f_i)$	=	campione i-esimo della trasformata numerica di Fourier del segnale
t_0	=	baricentro temporale del segnale
T	=	lunghezza temporale equivalente del segnale
W	=	larghezza di banda equivalente del segnale

Le coppie di valori ottenute a seguito dell'applicazione delle precedenti formule vengono riportate su un grafico cartesiano bidimensionale detto grafico Tempo-Frequenza.

Dall'analisi del grafico, sotto determinate ipotesi, possono essere visibili delle costellazioni o dei gruppi di punti che possono risultare distinti: tali costellazioni rappresentano impulsi aventi le medesime caratteristiche e dunque appartenenti alla stessa famiglia.

Attraverso particolari algoritmi o molto più semplicemente in modo manuale, tali costellazioni possono essere facilmente separate dando luogo al filtraggio che rende possibile l'identificazione dei vari gruppi omologhi (Clusters).

Per ogni gruppo omologo (Clusters) sarà costruito il relativo pattern che facilmente, essendo privo di disturbi e sovrapposizioni, potrà essere analizzato e confrontato con i database raccolti in precedenza.

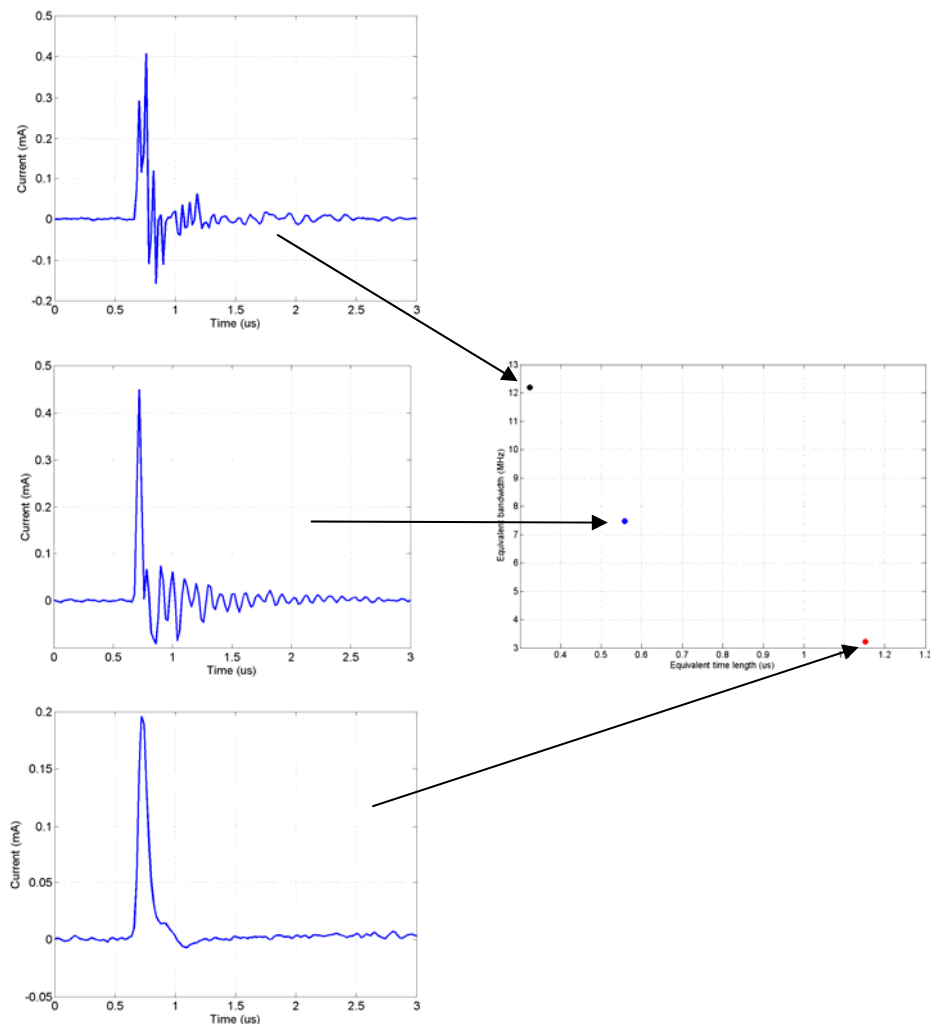


Figura 8-5: Esempio di come segnali diversi si collochino in punti diversi del diagramma Tempo-Frequenza.

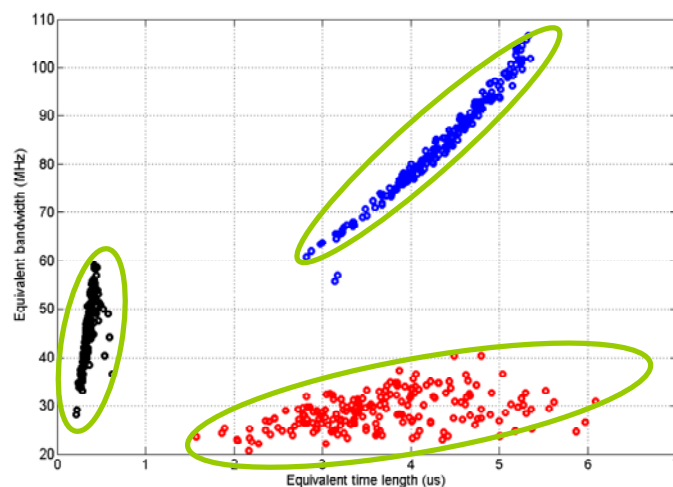


Figura 8-6: Esempio di diagramma Tempo-Frequenza.

Di seguito viene riportato un esempio pratico di analisi Tempo-Frequenza eseguito su due impulsi di corrente registrati nel corso della medesima prova condotta su un resistore per alta tensione che presentava due tipologie di scariche parziali, individuate a seguito di ulteriori analisi, essere di natura interna all'oggetto e superficiale sui terminali di alimentazione.

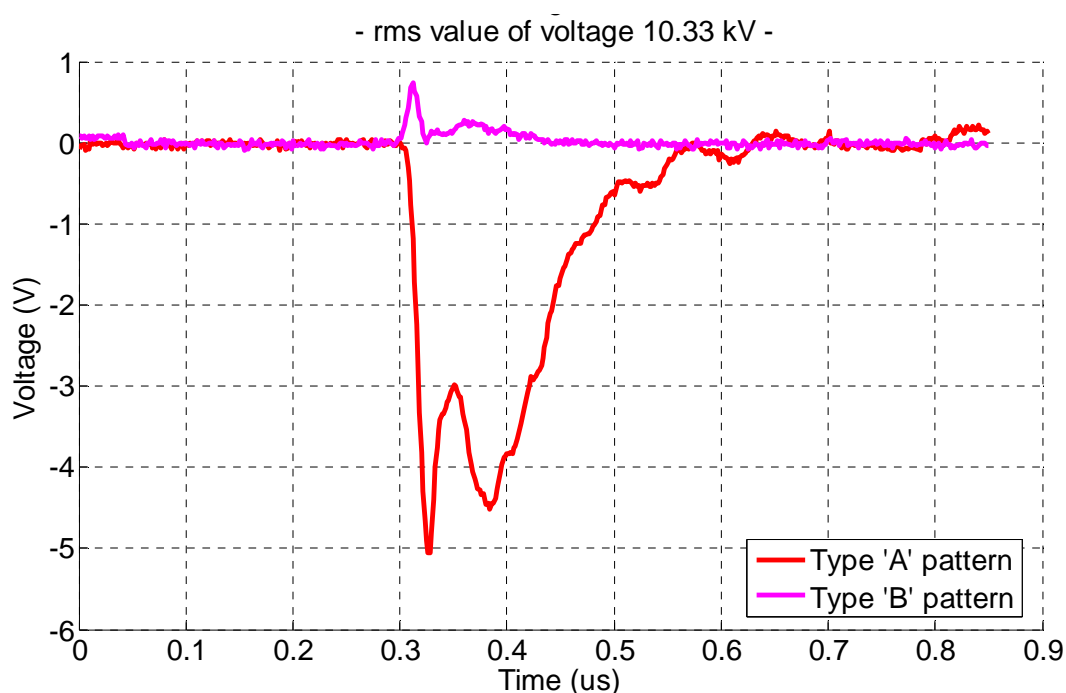


Figura 8-7: Esempio di impulsi di corrente relativi a due tipologie diverse di scariche parziali rilevati nel corso della medesima registrazione. La corrente è stata rilevata ai capi di un resistore avente resistenza nominale pari a 100 Ohm.

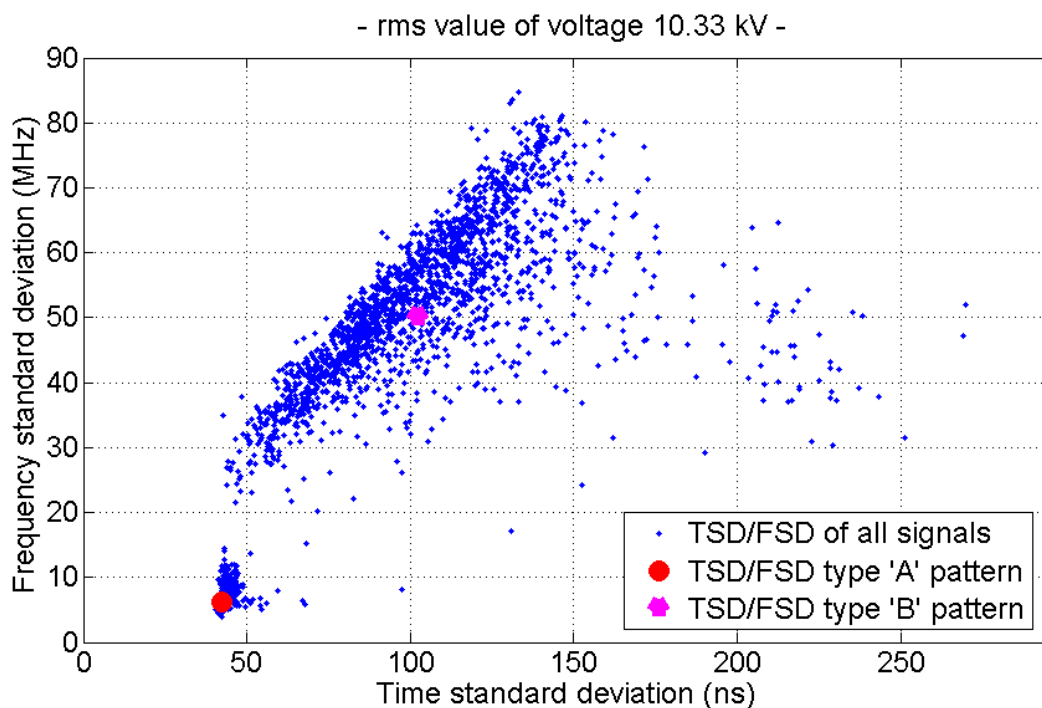


Figura 8-8: Grafico Tempo-Frequenza degli impulsi rilevati nel corso della registrazione citata alla Figura 8-7. Sono evidenziate le diverse collocazioni dei due segnali riportati in figura precedente.

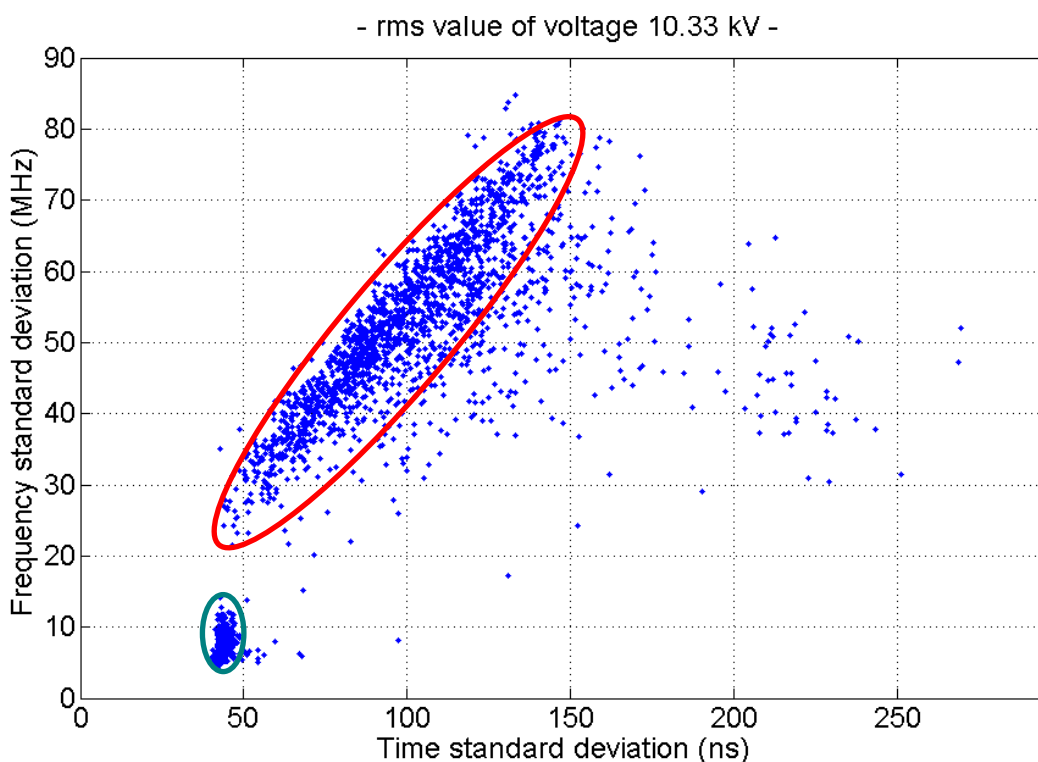


Figura 8-9: Esempio di come si possa effettuare, per mezzo di un diagramma Tempo-Frequenza, la suddivisione tra gruppi di segnali aventi caratteristiche diverse.

Come osservato in precedenza il metodo Tempo-Frequenza è lo strumento che rende possibile la separazione tra gli impulsi di natura diversa e consentendo l'analisi separata dei pattern omologhi.

Ovviamente il metodo esposto deve consentire una facile separazione tra le varie costellazioni: infatti, maggiore è la distanza fra queste, maggiore sarà il grado di precisione con il quale sarà possibile discriminare gruppi di impulsi con caratteristiche diverse.

Nel corso della esperienza condotta mediante l'utilizzo del metodo Tempo-Frequenza, si è osservato che in talune situazioni il metodo proposto presentava dei problemi nella separazione delle varie costellazioni.

La ricerca in merito ha portato ad individuare i principali difetti dello stesso, a formulare i criteri di utilizzo ed a proporre un miglioramento nella tecnica in grado di rendere più efficace la discriminazione tra i segnali.

8.2.2 Influenza di più segnali nella registrazione.

Nei diagrammi Tempo-Frequenza si vedono spesso degli impulsi rappresentati in punti isolati e dispersi rispetto al cluster. E' stato verificato che tali impulsi possono essere causati da eventi anomali o da disturbi oppure possono essere causati dalla presenza di più impulsi nella stesso frame della registrazione. In tal caso l'analisi Tempo-Frequenza associa nel grafico un punto che è molto diverso dal punto in cui il singolo impulso facente parte della registrazione sarebbe ubicato.

Tali segnali non costituiscono un grande disturbo per i diagrammi Tempo-Frequenza in quanto nella pratica gli impulsi doppi rappresentano una quota molto modesta (qualche percento) degli impulsi totali e la loro ubicazione nel diagramma Tempo-Frequenza cambia fortemente in funzione del intervallo temporale che li separa. Poiché questo è fortemente variabile, tale tipologia di impulsi non genera praticamente mai alcun punto di accumulazione.

Nel corso della analisi dei dati (post processing) gli impulsi doppi sono facilmente identificabili e dunque eliminabili dalla registrazione.

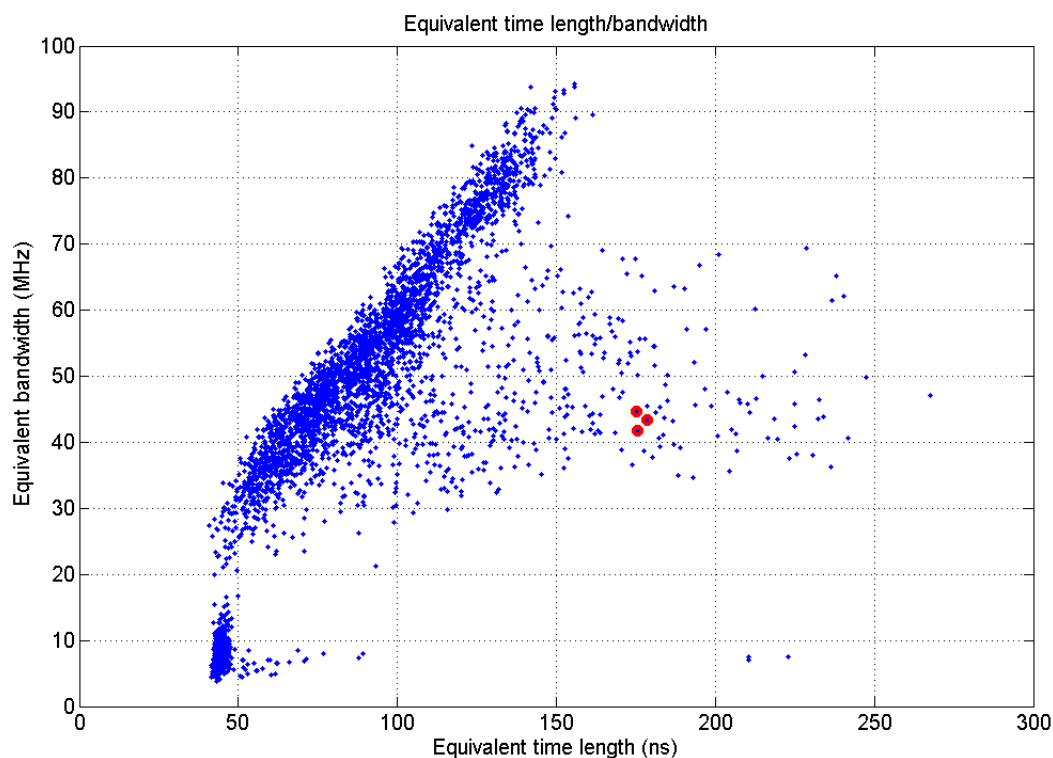


Figura 8-10: Ubicazione dei segnali multipli nel diagramma Tempo-Frequenza.

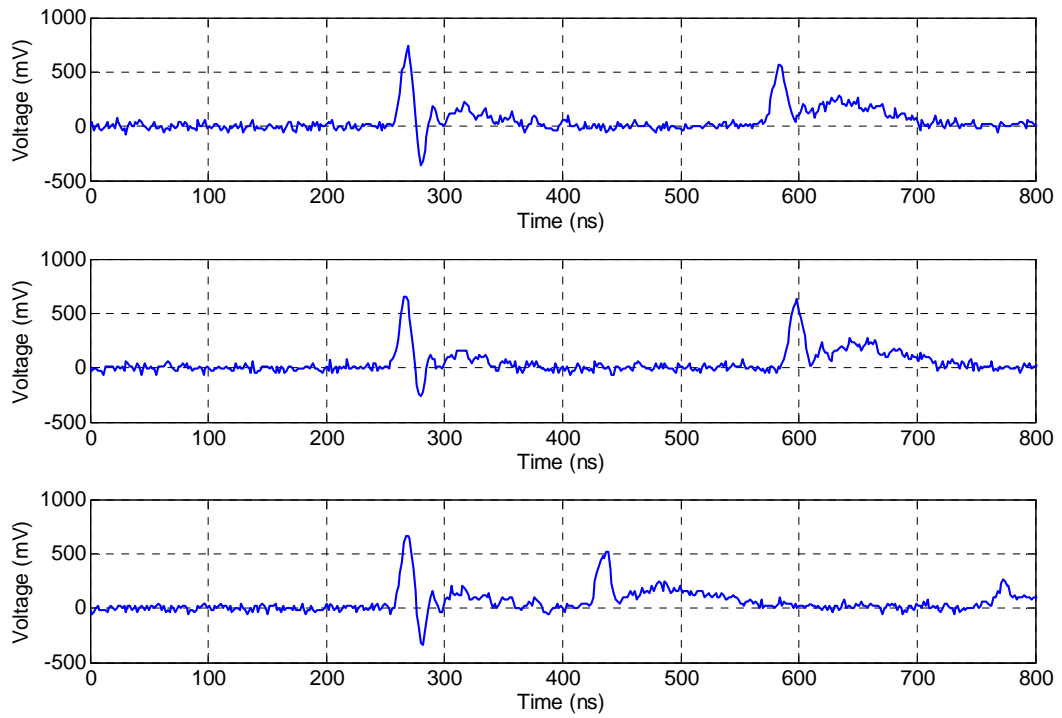


Figura 8-11: Segnali multipli relativi al diagramma Tempo-Frequenza di Figura 8-10.

8.2.3 Influenza del rumore nel segnale.

Una acquisizione di un segnale condotta mediante l'utilizzo di un registratore contiene sempre una parte di segnale ed una parte di rumore. Il rapporto tra le due quantità è definito come rapporto tra segnale e disturbo.[19]

Il rumore nella acquisizione ha sempre due sorgenti, più o meno importanti in termini relativi: una è di origine esterna al registratore e dipende da fattori come l'ambiente, il segnale misurato, l'utilizzo eventuale di sonde ecc., l'altra è interna e dovuta principalmente al condizionamento del segnale ed al processo di quantizzazione.

La riduzione del rumore proveniente dall'oggetto in prova e dall'ambiente di misura può essere ottenuta mediante l'impiego di opportuni filtri ed amplificatori oltre che con l'uso di opportune schermature.

La riduzione del rumore interno al registratore, invece, è di norma più difficile, soprattutto considerando che la misura della corrente associata alle scariche parziali è generalmente affetta da una grande aleatorietà tra le ampiezze dei segnali, con differenze che spesso possono arrivare ad un ordine di grandezza.

Nel merito delle misure degli impulsi relativi alle scariche parziali di norma l'ampiezza delle finestre di quantizzazione è fissata a priori, regolata in modo da non saturare né danneggiare lo strumento in funzione degli impulsi di maggiore intensità, conseguentemente i segnali di minore intensità presentano un rapporto tra segnale utile e rumore più basso.

Da non trascurare, nel caso di segnali di corrente associati alle scariche parziali è che l'influenza del rumore è molto più pesante che nel caso di segnali di altra natura. Gli impulsi di corrente associati alle scariche parziali, infatti, sono sovente impulsi molto rapidi e talvolta innescano dei fenomeni oscillatori. Anche le lunghezze delle registrazioni sono fissate a priori al fine di recuperare informazioni anche su tali transitori e come conseguenza si ha che, nel caso di impulsi di breve durata, l'energia del segnale utile è concentrata in una modesta porzione di registrazione mentre l'energia del rumore è distribuita, uniformemente o quasi, su tutta la lunghezza della registrazione e quindi una modesta ampiezza del rumore nella registrazione si traduce in una forte influenza nel segnale acquisito.

La strumentazione di recente costruzione è generalmente dotata di opportuni algoritmi al fine di permettere la riduzione dell'influenza del rumore nei segnali acquisiti.

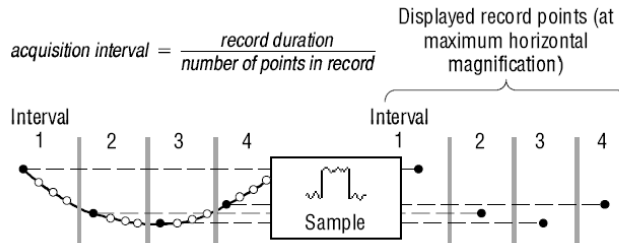
Tali algoritmi basano la loro efficacia considerando la aleatorietà del rumore rispetto al segnale: in pratica, considerando il rumore come segnale non deterministico, si ha che, nel tempo, la sua media è nulla.

In caso di segnali ripetitivi si può operare acquisendo il segnale varie volte estraendone quella che è la media ottenendo una riduzione del rumore che è funzione del numero di medie effettuate ma nel caso di segnali impulsivi essendo non ripetitivi tale media non può essere eseguita e si utilizza pertanto un algoritmo di "media al volo" detto commercialmente, per alcuni fabbricanti, HIREs.

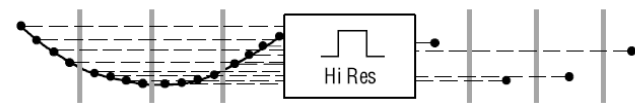
Mediante l'algoritmo HIREs il segnale viene sovracampionato di un fattore dipendente dalla differenza esistente tra la massima velocità di campionamento del registratore e la velocità di campionamento scelta per il segnale.

Sul numero di punti campionato viene eseguita una media ed il risultato di tale media costituisce il campione acquisito.

Sample mode retains the first sampled point from each acquisition interval. Sample is the default mode.



Hi Res mode calculates the average of all the samples for each acquisition interval. Hi-Res provides a higher-resolution, lower-bandwidth waveform.



Average mode calculates the average value for each record point over many acquisitions. Average uses Sample mode for each individual acquisition. Use average mode to reduce random noise.

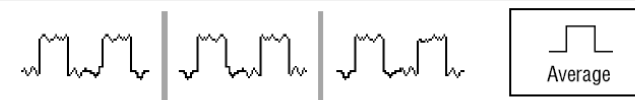


Figura 8-12: Esempio di differenti strategie di quantizzazione (Oscilloscopio TEK 5054B), Quantizzazione semplice (SAMPLE MODE), Quantizzazione in alta risoluzione (HIRES MODE), Quantizzazione in media (AVERAGE MODE).

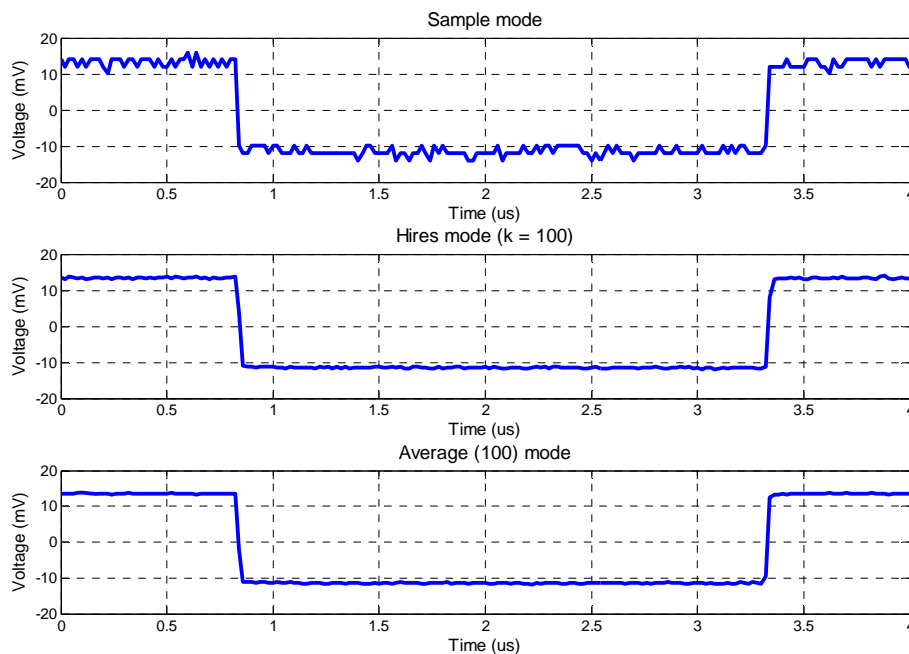


Figura 8-13: Confronto tra le differenti strategie di quantizzazione (Oscilloscopio TEK 5054B), Quantizzazione semplice (SAMPLE MODE), Quantizzazione in alta risoluzione (HIRES MODE), Quantizzazione in media (AVERAGE MODE).

8.2.4 Influenza del rumore nei diagrammi Tempo-Frequenza.

La valutazione della influenza del rumore nei diagrammi Tempo-Frequenza è possibile in forma analitica utilizzando l'ipotesi che il rumore del segnale sia di tipo bianco.

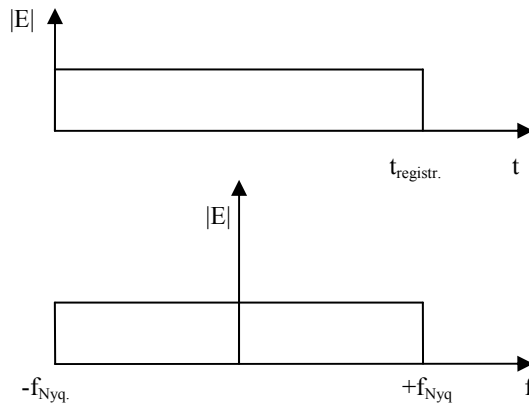


Figura 8-14: Si definisce rumore bianco il particolare rumore che presenta, nel tempo, energia costante per ogni punto della finestra di osservazione e energia costante per tutte le frequenze.

Mediante l'ipotesi di rumore bianco (avente ampiezza costante per tutta l'ampiezza della finestra di acquisizione ed ampiezza nella frequenza costante per tutte le armoniche) si può dimostrare che il punto di asintoto del rumore è:

$$t_0 = \frac{\int_0^{T_{registraz}} tE(t)dt}{\int_0^{T_{registraz}} E(t)dt} \tag{Eq. 8-4}$$

$$t_0 = \frac{E \int_0^{t_{registraz}} tdt}{Et_{registraz}} = \frac{\frac{T^2}{2} \Big|_0^{t_{registraz}}}{t_{registraz}} = \frac{t_{registraz}}{2} \tag{Eq. 8-5}$$

$$T^2 = \frac{\int_0^{t_{registraz}} (t - t_0)^2 E(t) dt}{\int_0^{t_{registraz}} E(t) dt} \quad \text{Eq. 8-6}$$

$$T^2 = \frac{E \int_0^{t_{registraz}} \left(t - \frac{t_{registraz}}{2} \right)^2 dt}{Et_{registraz}} = \frac{\int_{-\frac{t_{registraz}}{2}}^{+\frac{t_{registraz}}{2}} (t')^2 dt}{t_{registraz}} = \frac{(T')^3 \Big|_{-\frac{t_{registraz}}{2}}^{+\frac{t_{registraz}}{2}}}{3t_{registraz}}$$

$$T^2 = \frac{\frac{t_{registraz}^3}{4}}{3t_{registraz}} = \frac{t_{registraz}^2}{12} \Rightarrow T_{rumore} = \frac{t_{registraz}}{2\sqrt{3}} \quad \text{Eq. 8-7}$$

Per quanto riguarda la trasformata di Fourier de segnale, la media è ovviamente nulla e:

$$W^2 = \frac{\int_{-f_{Nyq}}^{+f_{Nyq}} f^2 E(f) df}{\int_{-f_{Nyq}}^{+f_{Nyq}} E(f) df} \quad \text{Eq. 8-8}$$

$$W^2 = \frac{E \int_{-f_{Nyq}}^{+f_{Nyq}} f^2 df}{2Ef_{Nyq}} = \frac{F^3 \Big|_{-f_{Nyq}}^{+f_{Nyq}}}{6f_{Nyq}} = \frac{f_{Nyq}^3}{3f_{Nyq}}$$

$$W^2 = \frac{F_{Campionamento}^2}{12} \Rightarrow W_{rumore} = \frac{F_{Campionamento}}{2\sqrt{3}} \quad \text{Eq. 8-9}$$

- T_{rumore} Coordinata della lunghezza temporale di accumulazione del rumore
- t_{registrazione} Lunghezza della registrazione
- W_{rumore} Coordinata della larghezza di banda di accumulazione del rumore
- F_{campionamnto} Frequenza di campionamento (2f_{Nyq})

Con una semplice ipotesi semplificativa si è ricavato un punto di coordinate:

$\left(\frac{t_{\text{registrazione}}}{2\sqrt{3}}, \frac{F_{\text{Campionamento}}}{2\sqrt{3}} \right)$ che rappresenta il punto di asintoto del rumore ossia un punto caratteristico a cui tutti segnali tendono in funzione del loro contenuto di rumore rispetto al segnale utile.

8.2.5 Validazione sperimentale della influenza del rumore nelle analisi Tempo-Frequenza.

Al fine di poter validare quanto esposto dal punto di vista pratico si è ricorsi alla realizzazione di un diagramma Tempo-Frequenza derivante da segnali, uguali come forma ma di ampiezza diversa in modo da poter variare entro ampi limiti l'influenza del rumore. Per condurre la prova si è preso come segnale di riferimento un segnale molto simile ad un segnale di corrente relativo ad una scarica parziale, costituito da un impulso avente durata complessiva di circa 30 ns. Tale segnale è stato modulato in ampiezza, mantenendo costante la scala di acquisizione dell'oscilloscopio e dunque il rumore di acquisizione.

Il segnale di riferimento, ovvero il segnale per il quale si potesse ritenere trascurabile il contenuto di rumore dal punto di vista del diagramma Tempo-Frequenza, è stato acquisito ottimizzando la finestra di quantizzazione ed utilizzando un segnale ripetitivo su cui è stato possibile effettuare 1000 medie.

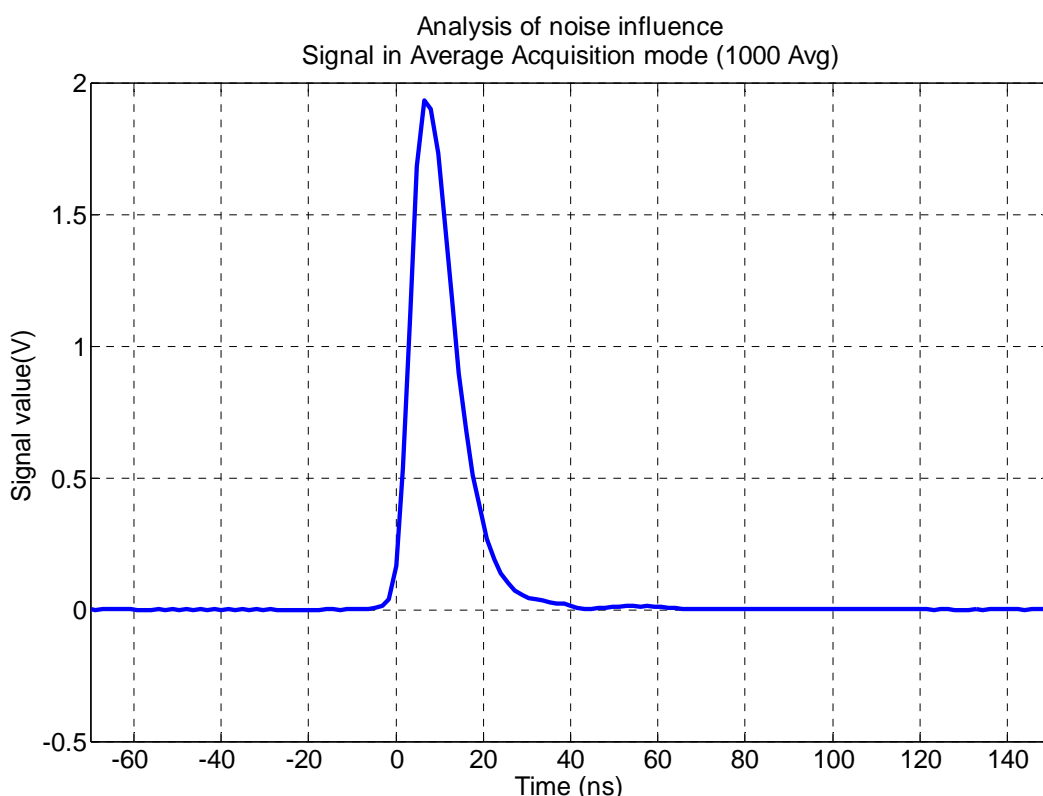


Figura 8-15: Segnale di corrente acquisito da un calibratore di scariche parziali. Il segnale è stato mediato per mille volte al fine di rendere trascurabile il contenuto di rumore.

I segnali modulati in ampiezza ed il rumore di fondo sono stati acquisiti sia in modalità di campionamento normale sia in modalità HIRES. Operativamente per rendere più veloce la misura è stata utilizzata anche la tecnica di frammentazione della memoria (FAST FRAME).

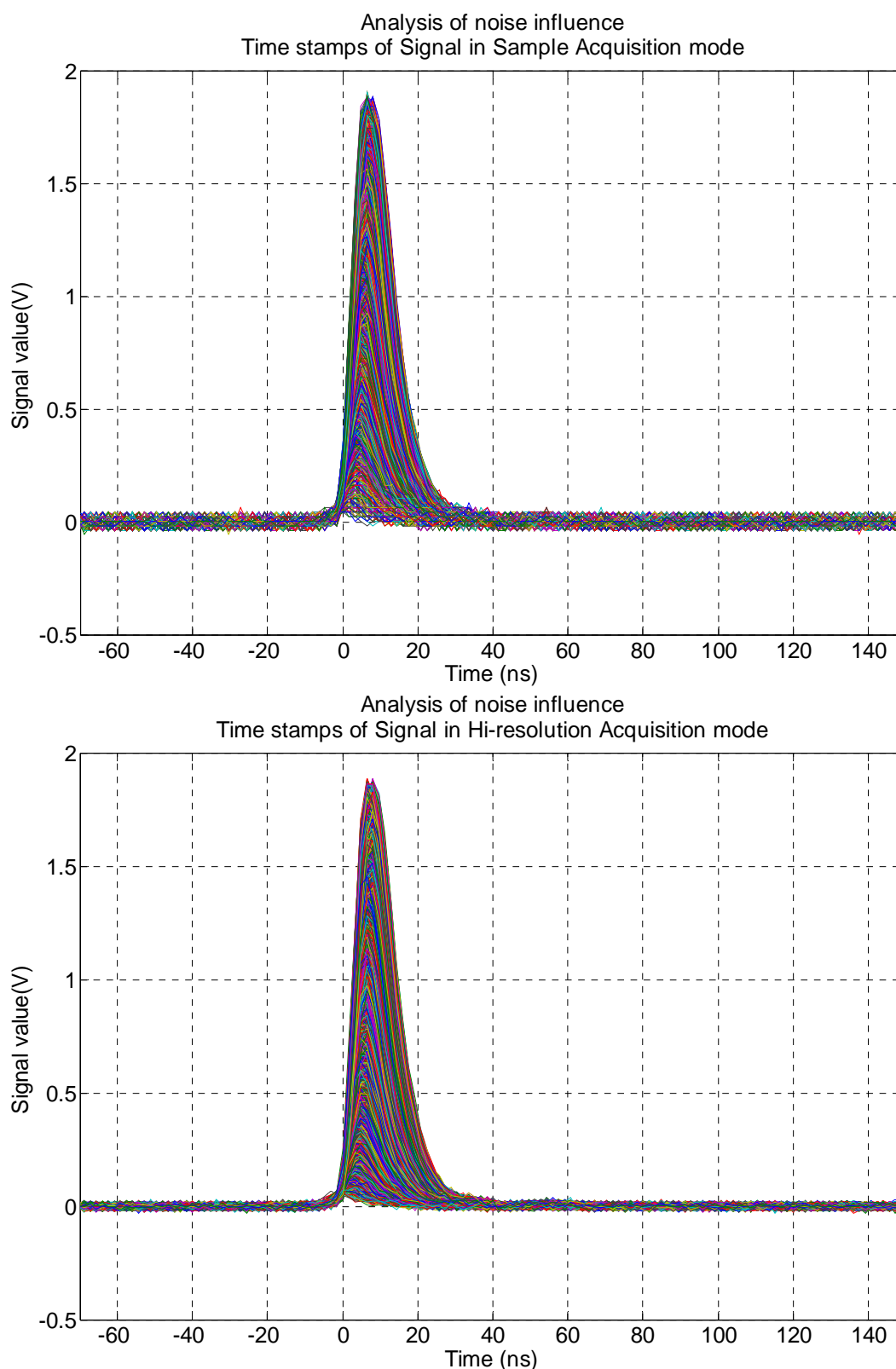


Figura 8-16: Segnali di corrente acquisiti da un calibratore di scariche parziali. I segnali sono stati modulati in ampiezza per rendere variabile l'influenza del rumore. Nel primo caso i segnali sono stati acquisiti in campionamento normale, nel secondo caso adoperando la tecnica di campionamento al volo "HIRES".

Per tutti segnali acquisiti si è eseguita l'analisi Tempo-Frequenza ed i risultati sono stati riportati in un diagramma comune che permettesse sia la valutazione della influenza del rumore che la valutazione delle differenze tra le varie tecniche di acquisizione disponibili.

Sul grafico è stato anche riportato il punto di rumore, calcolato in base alla finestra di acquisizione ed alla frequenza di campionamento utilizzata.

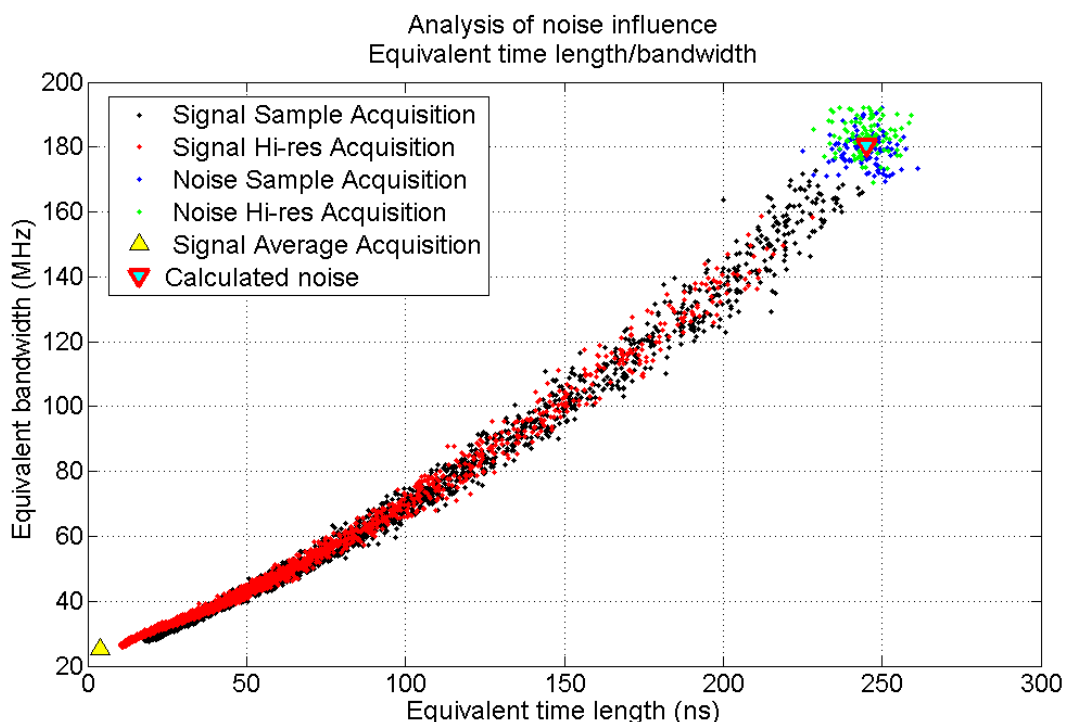


Figura 8-17: Grafico Tempo-Frequenza dei vari segnali di corrente acquisiti dal calibratore di scariche parziali. Si noti la diversa dispersione tra i segnali acquisiti in modalità si camminamento normale rispetto ai segnali acquisiti in modalità "HIRES".

I risultati ottenuti hanno confermato quanto previsto in teoria: i segnali con diverso contenuto di rumore si dispongono nel diagramma tempo frequenza tra il punto dove sarebbe ubicato il segnale privo di rumore ed il punto di asintoto del rumore, risultando più vicini all'uno o all'altro a seconda del rapporto segnale/disturbo.

I punti relativi allo stesso segnale che pertanto dovrebbero essere sovrapposti si trovano ad essere dispersi nel grafico finendo vicini al punto di asintoto del rumore quando questo è elevato.

Per quanto riguarda le diverse tecniche di acquisizione si vede che nella tecnica HIRES, il minor contenuto di rumore non solo determina un minor dispersione della galassia ma comporta anche un maggior addensamento dei punti vicino al punto di ubicazione del segnale privo di rumore.

La dispersione tra le varie costellazioni diviene importante qualora vi siano più sorgenti di segnale disposte, nel diagramma Tempo-Frequenza a distanze non molto elevate. In tal caso dispersioni contenute nei segnali divengono utili ai fini

della discriminazione tra i segnali consentendo una maggior risoluzione e quindi una migliore applicabilità del metodo.

Data l'aleatorietà del rumore, sia nel caso in cui si campioni direttamente che in quello in cui si utilizzino tecniche di decimazione il punto di asintoto del rumore non cambia, e non cambia neppure la dispersione dei vari punti relativi al solo rumore rispetto al baricentro.

Si noti che il calcolo effettuato nella teoria del posizionamento del punto di rumore, date le caratteristiche della registrazione effettuata, nell'ipotesi di rumore bianco è coerente con quanto osservato dato che il punto calcolato si dispone nel mezzo delle costellazioni del rumore.

8.2.6 Conclusioni

Da quanto emerso l'applicazione della tecnica tempo frequenza non è indipendente dalla influenza del rumore nelle registrazioni: la presenza del rumore può infatti perturbare la misura fino ai livelli tali da rendere inefficace l'applicazione del metodo.

A livello pratico, siccome le finestre di acquisizione sono fissate prima della registrazione sia nel tempo che nella ampiezza ed i segnali catturati possono avere grande aleatorietà nelle due dimensioni, è necessario valutare quella che è la risoluzione del diagramma Tempo-Frequenza per la specifica misura.

È necessario evitare di lavorare nei pressi del punto asintotico di rumore, in quanto, siccome tutti i segnali convergono a tale punto non sarebbe per ovvie ragioni possibile operare alcuna discriminazione tra le varie costellazioni.

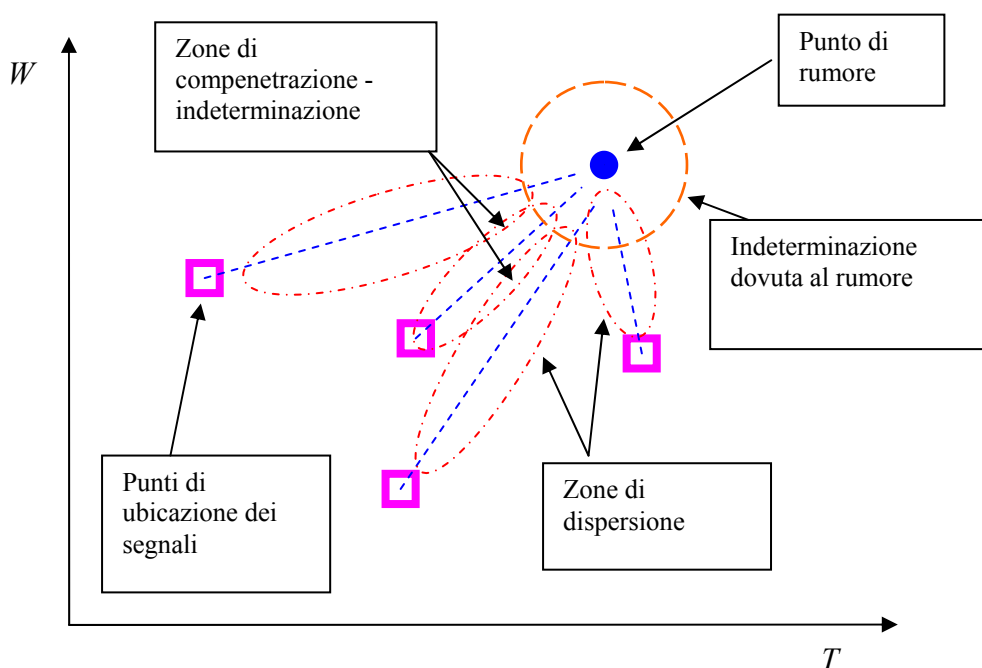


Figura 8-18: Schematizzazione dell'influenza del rumore in un diagramma Tempo – Frequenza.

Al fine di spostare il punto asintotico di rumore rispetto ai punti relativi ai segnali utili è sufficiente cambiare, nella registrazione, l'ampiezza della finestra di registrazione ed il numero di punti campionati.

In ogni caso l'aumento della finestra di osservazione incide sull'energia associata al rumore - circa costante in tutta la finestra- che aumenta rispetto all'energia associata al segnale impulsivo, concentrata in una porzione limitata della finestra di osservazione e porta quindi ad un aumento nella dispersione dei segnali.

Per quanto riguarda il rumore questo può essere ridotto in primo luogo riducendo il gradino di quantizzazione, per via software (HIRES o tecniche simili), in secondo luogo aumentando il numero di bit reali del campionatore utilizzato.

In tali operazioni non va dimenticato che se esiste un limite fisico del rumore legato al numero di bit di quantizzazione, tale rumore rappresenta solo una porzione del rumore totale, che risulta essere dovuto anche al rumore proprio segnale acquisito ai capi della apparecchiatura in prova.

Nel caso della esperienza maturata nel corso delle misure industriali condotte, è emerso che è sempre utile amplificare il più possibile il segnale di corrente acquisito prima di inviarlo ai dispositivi di acquisizione.

Infine, in sede di progettazione di una apparecchiatura di acquisizione deve essere valutato sia il rumore di quantizzazione che il rumore nel segnale acquisito e tali valori devono essere coerenti al fine sfruttare in maniera opportuna tutto l'hardware.

8.2.7 Miglioramento della capacità di risoluzione della tecnica Tempo-Frequenza mediante l'utilizzo delle funzioni analitiche.

I segnali che si acquisiscono durante una misura sono per loro natura segnali di tipo reale che pertanto, nel dominio della frequenza, soddisfano la seguente relazione:

$$X(-f) = X^*(f) \quad \text{Eq. 8-10}$$

In termini energetici significa che lo spettro dell'energia $|X(f)|^2$ è simmetrico rispetto alla frequenza nulla e di conseguenza la frequenza media è sempre pari a zero.

In termini di valutazione del segnale il fatto di avere una media nulla conduce al perdere informazioni ovvero risoluzione nei digrammi Tempo-Frequenza.

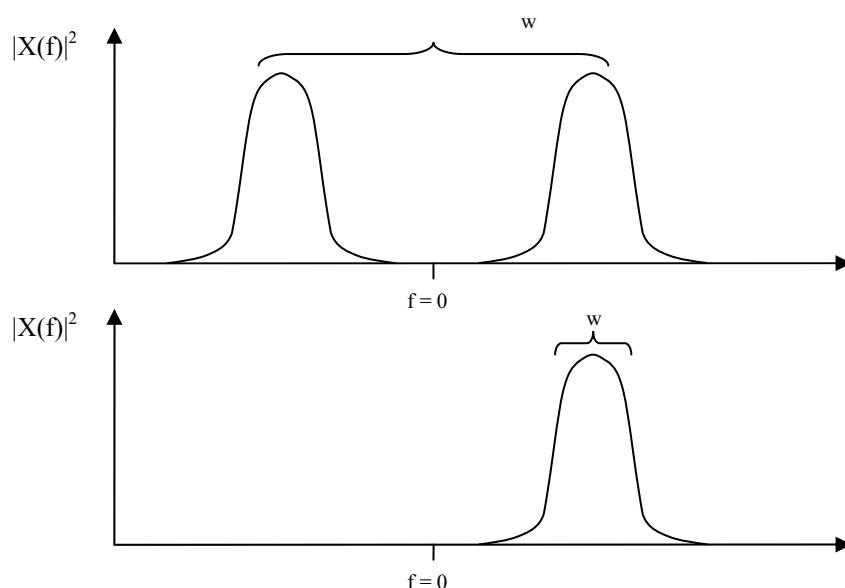


Figura 8-19: Schematizzazione del vantaggio di utilizzare segnali analitici.

Per recuperare l'informazione in merito alla energia media in frequenza si può procedere in due modi: uno consiste nel valutare la media del segnale dalla frequenza nulla ad infinito, trascurando le frequenze negative, l'altro di definire una nuova categoria di segnali che abbiano la stesso spettro di frequenze positive ma frequenze negative nulle.

$$w_0 = \frac{\int_0^{\infty} f \cdot |X(f)|^2}{\int_0^{\infty} |X(f)|^2}$$

Eq. 8-11

I metodi esposti sono del tutto equivalenti ma il vantaggio del secondo metodo consiste nel calcolare la media delle frequenze direttamente dal segnale e quindi avere il segnale acquisito una volta per tutte.

8.2.8 I segnali analitici

I segnali che possiedono uno spettro di frequenze solo positive vengono definiti segnali analitici. I segnali analitici possono essere calcolati nel dominio del tempo a partire dallo spettro del segnale reale mediante la relazione:

$$s(t) = 2 \int_0^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df$$

Eq. 8-12

Dove il fattore 2 è stato inserito per tener conto che l'integrale è esteso solo a metà del dominio delle frequenze.

Dal punto di vista energetico essendo che nel segnale reale è verificato che:

$$|X(-f)| = |X(f)|$$

Eq. 8-13

E che la parte reale del segnale analitico è stata posta esser uguale alla parte reale del segnale originale, in termini energetici non vi è più equivalenza tra i segnali:

$$E_s = \int |X(f)|^2 df = 2 \int_0^{\infty} |X(f)|^2 df = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} |2X(f)|^2 df = \frac{1}{2} E_z$$

Eq. 8-14

E_s energia del segnale originale

E_z energia del corrispondente segnale analitico

L'energia del segnale analitico è due volte l'energia del segnale originale e l'energia della parte reale del segnale analitico è uguale alla energia della parte reale del segnale originario.

8.2.9 Diagrammi Tempo-Frequenza con segnali analitici

Dal punto di vista pratico l'utilizzo dei segnali analitici è vantaggioso in quanto vi è una riduzione della dispersione tra i segnali che compongono lo stesso punto di accumulazione, il che porta ad un aumento della risoluzione dei diagrammi Tempo-Frequenza.

Rispetto ai classici diagrammi Tempo-Frequenza che utilizzano le funzioni reali, l'utilizzo delle funzioni analitiche consente di avere un parametro di osservazione ulteriore rappresentato dal momento del primo ordine del segnale nel dominio della frequenza.

L'utilizzo combinato di un diagramma Tempo-Frequenza, con momenti del primo ordine e del secondo ordine nella frequenza potrebbe sembrare assurdo nel caso si utilizzino funzioni analitiche in quanto queste, rispetto alle reali dovrebbero consentire una maggiore risoluzione. Evidentemente la maggiore risoluzione si ha solo per gli impulsi singoli mentre per gli impulsi doppi o spuri la maggiore risoluzione ha un peso trascurabile. Il caso riportato è esemplificativo perché dimostra come i segnali spuri possono interporsi tra due punti di accumulazione rendendo difficile la distinzione per via automatica.

La soluzione al problema, come anticipato, potrebbe essere quella di eliminare a priori dalla registrazione i segnali spuri per via software, oppure considerare nella valutazione sia il momento del primo che del secondo ordine delle frequenze. La valutazione combinata, fornisce infatti una maggiore risoluzione aggiungendo un parametro ulteriore.

La miglior rappresentazione trovata è una rappresentazione tridimensionale, funzione del tempo equivalente, del momento del primo e del secondo ordine della frequenza.

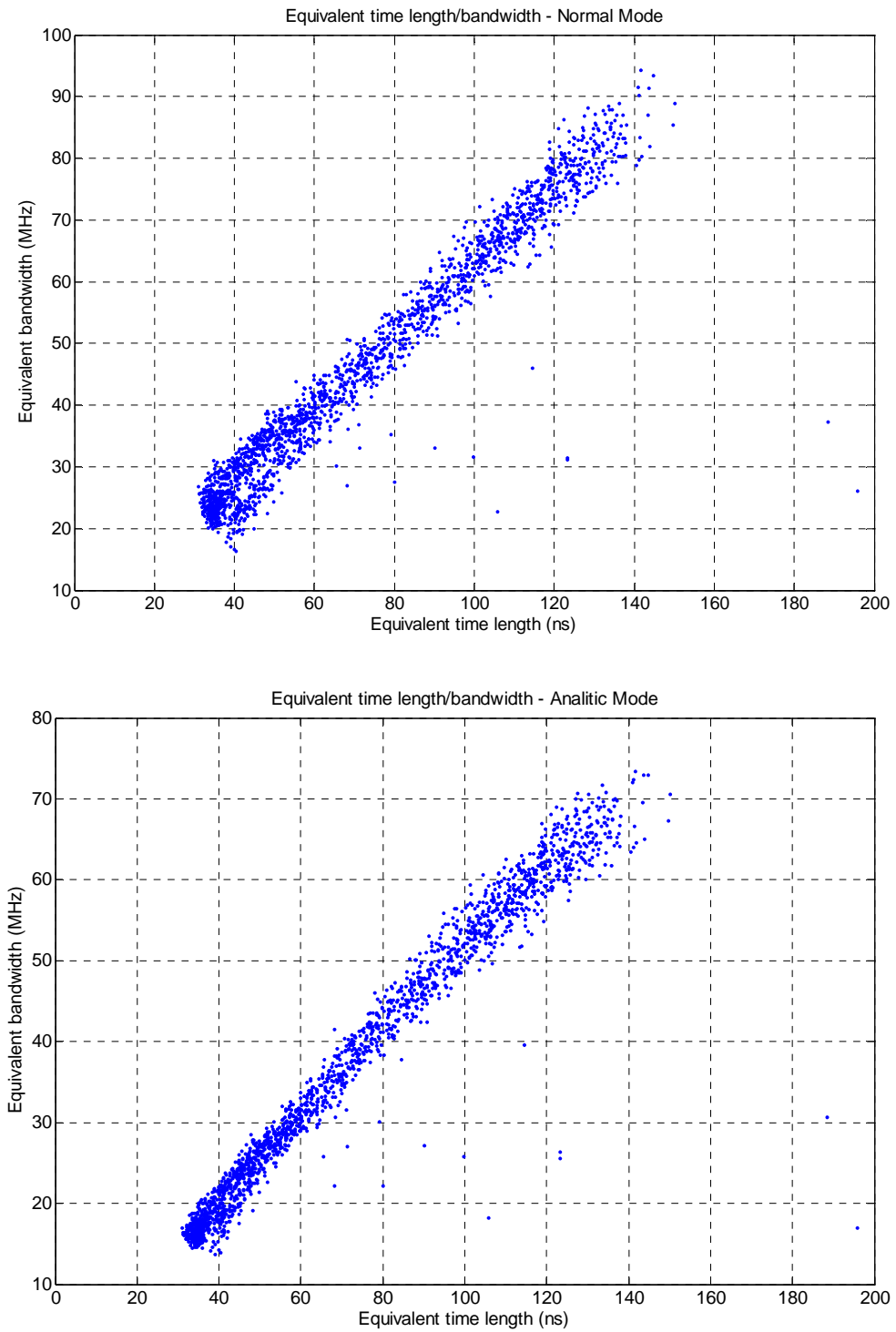


Figura 8-20: Schematizzazione dell'influenza del rumore in un diagramma Tempo – Frequenza, riduzione della dispersione tra i segnali.

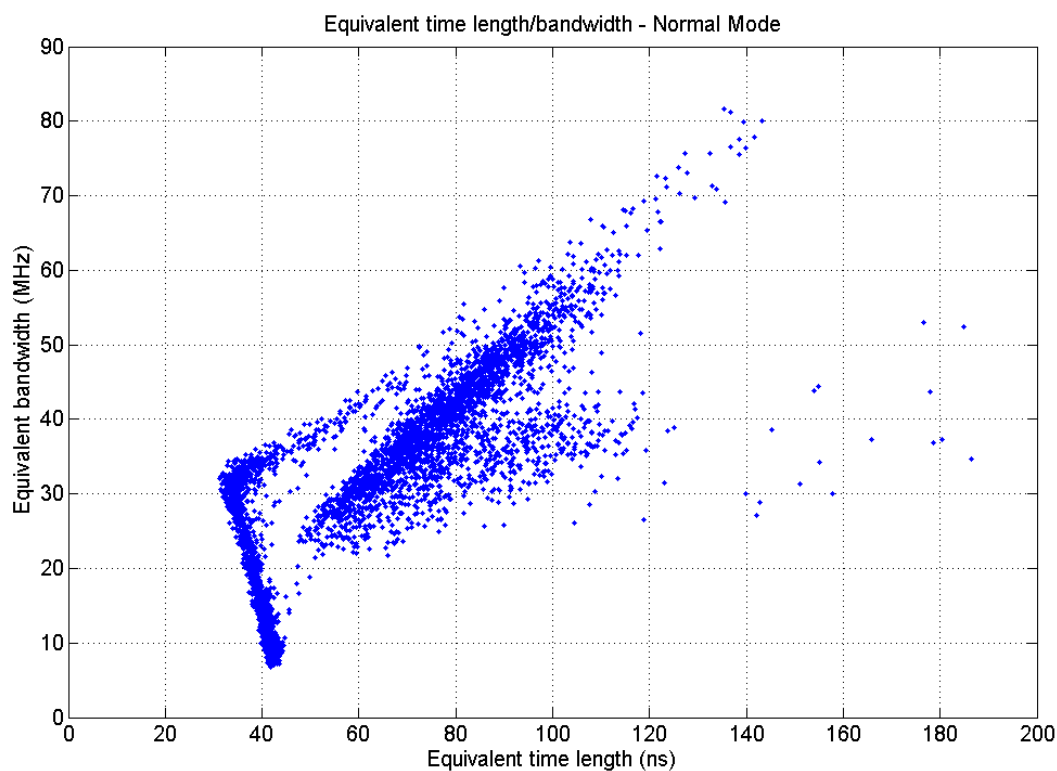


Figura 8-21: Diagramma Tempo-Frequenza classico.

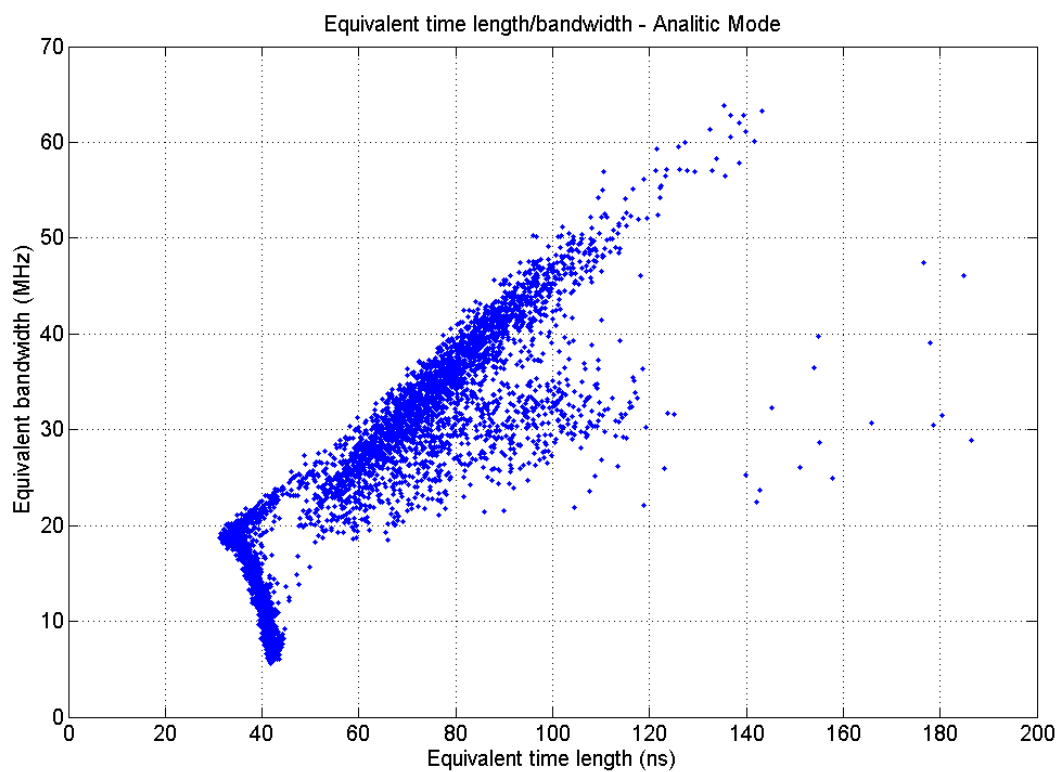


Figura 8-22: Diagramma Tempo-Frequenza mediante funzione analitica con momento della frequenza del secondo ordine. Si noti che per questo particolare caso la dispersione dovuta a segnali spuri si interpone tra i due punti di accumulazione.

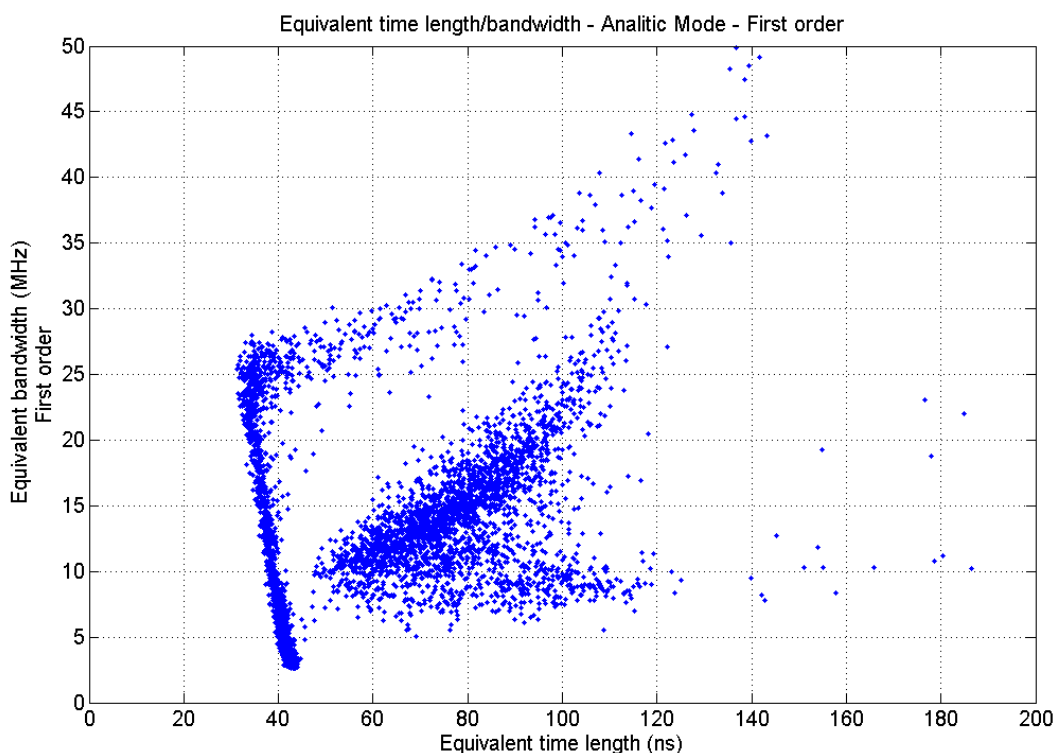


Figura 8-23: Diagramma Tempo-Frequenza mediante funzione analitica con momento della frequenza del primo ordine. Si confronti questo caso con il precedente e come tale diagramma metta in risalto maggiormente le due zone di accumulazione.

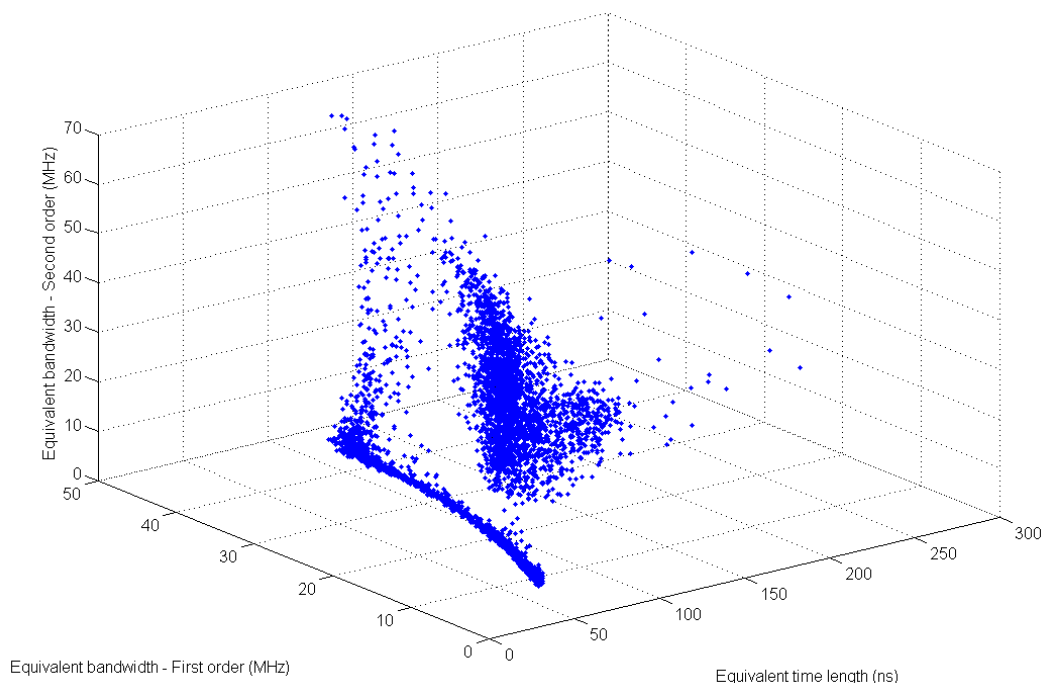


Figura 8-24: Diagramma Tempo-Frequenza tridimensionale mediante funzione analitica con momento della frequenza del primo e del secondo ordine. In questo caso si vede che le distanze tridimensionali tra i punti sono tali da rendere inequivocabile la distinzione tra i punti di accumulazione

9 Prove sui trasformatori con il metodo a banda ultra larga.

Al fine di dare una valutazione pratica di quanto esposto e validare il lavoro svolto sono state condotte delle misure di scariche parziali presso la sala prove di un costruttore di trasformatori.

Tale esperienza ha consentito, da un lato, di poter condurre delle misure su un consistente numero di macchine, dall'altro, di poter operare in un ambiente industriale nel quale erano presenti una elevata quantità di rumori e disturbi.

In particolare le misure svolte hanno consentito di accumulare maggiore esperienza in merito alla misura delle scariche parziali sui trasformatori e di potere simulare con il consenso ed il contributo del costruttore diverse tipologie di difetti costruttivi, come ad esempio l'inserzione di un materiale estraneo nella colata in resina oppure la presenza di un difetto in un tacchetto di centraggio della bobina di media tensione.

Le prove sono state effettuate in modalità monofase, avendo cura di rimuovere il collegamento di media tensione costituente il triangolo.

La connessione di triangolo tra i tre avvolgimenti, infatti, fa sì che impulsi di corrente prodotti da scariche parziali presenti in avvolgimenti non in prova siano rilevati dal sistema di misura connesso all'avvolgimento in prova con evidente errore nella relazione di fase.

9.1 Prove condotte su trasformatore da 800 kVA

È stato provato un trasformatore trifase da 800 kVA, isolato in resina epossidica avente i seguenti dati di targa:

Potenza nominale	800	kVA
Tensione primaria	11000	V
Tensione secondaria	420	V
Regolazione lato primario (Salterello a centro avv.)	±2x2,5	%

In particolare il trasformatore presentava, per dichiarazione del fabbricante una elevata intensità di scariche parziali, di natura interna alla bobina e dovute ad un difetto di esecuzione delle connessioni del commutatore.

Oltre a questo, il costruttore lamentava il fatto che l'intensità di scariche parziali rilevate, rispetto a macchine similari aventi lo stesso difetto costruttivo era estremamente più elevato.

Dopo una breve verifica dell'intensità della carica apparente rilevata dalla strumentazione in banda larga con connessione dell'avvolgimenti di media tensione a triangolo, si è rimosso tale collegamento andando a verificare, per vari livelli di tensione le forme d'onda di corrente rilevate.

9.1.1 Rilievo con connessione del triangolo non rimossa

La misura delle scariche parziali con triangolo connesso è stata effettuata solamente a fini metrologici per stabilire un confronto con quanto misurato in sede di collaudo dal costruttore del trasformatore.

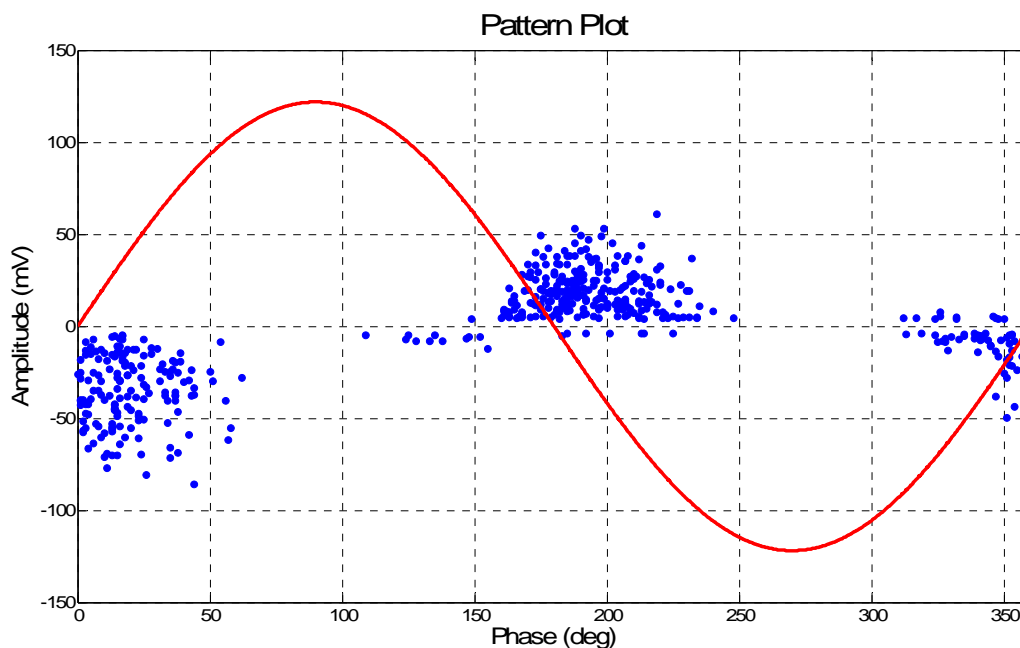


Figura 9-1: Pattern acquisito in modalità trifase. Si noti la presenza di rumore sovrapposto al segnale utile.

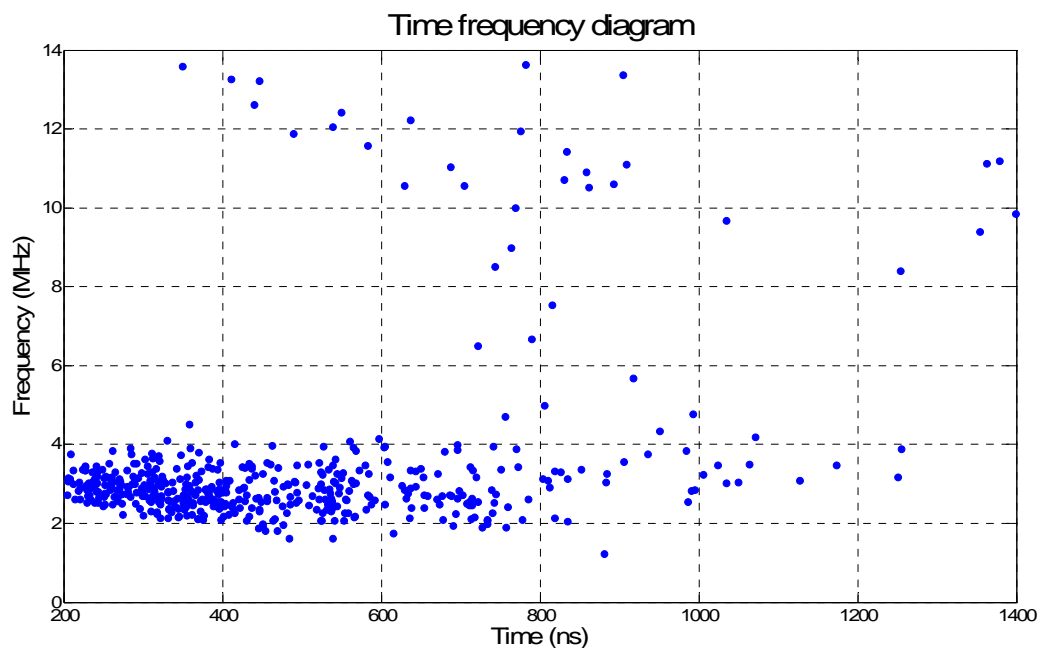


Figura 9-2: Diagramma Tempo-Frequenza del pattern di Figura 9-1.

Il pattern acquisito, alla tensione di 13 kV, analizzato assieme al diagramma Tempo-Frequenza dei segnali rappresentato in Figura 9-2, ha evidenziato la presenza contemporanea di segnali di natura diversa.

Si nota infatti un gruppo di segnali compresi tra 200 e 600 ns e tra 1 e 5 MHz (Gruppo A), ed un altro gruppo di segnali compreso tra 200 e 1450 ns e tra 6 e 14 MHz (Gruppo B).

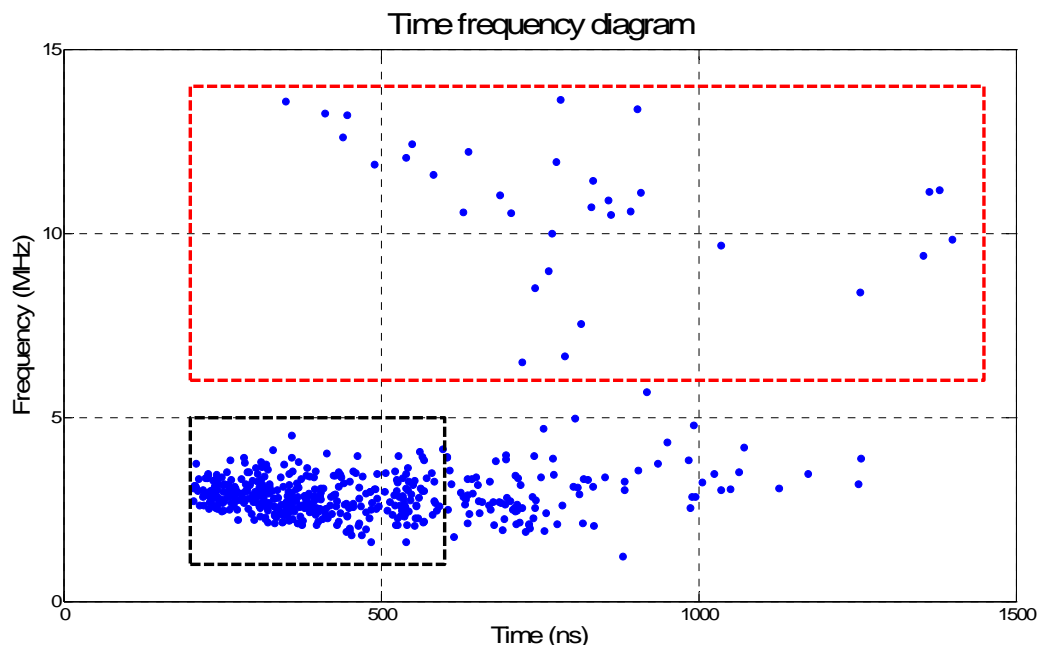


Figura 9-3: Diagramma Tempo-Frequenza dei segnali acquisiti. Si noti che i segnali appartenenti al gruppo 600 e 1450 ns / 1 e 5 MHz rappresentano segnali doppi.

Le forme d'onda tipiche dei segnali del gruppo A sono riportate in Figura 9-4 mentre una forma d'onda appartenente al gruppo B è riportata in Figura 9-5. I pattern dei segnali acquisiti sono riportati rispettivamente nelle Figura 9-6 ed in Figura 9-7.

Si nota che le forme d'onda relative al gruppo B risultano essere, rispetto alle forme d'onda rilevate per il gruppo A, fortemente oscillanti ma mediamente più contenute in ampiezza.

Dalla analisi dei pattern si nota che la relazione di fase con la tensione di alimentazione è differente nei due casi.

Si è accertato che i due segnali infatti avevano provenienza diversa, uno (Gruppo A) risultava appartenente alla bobina in prova, l'altro (Gruppo B) risultava appartenente alla bobina adiacente.

Per semplificare l'analisi si è deciso dunque di operare le successive misure con triangolo di media tensione rimosso al fine di ridurre al minimo le interferenze tra fasi vicine.

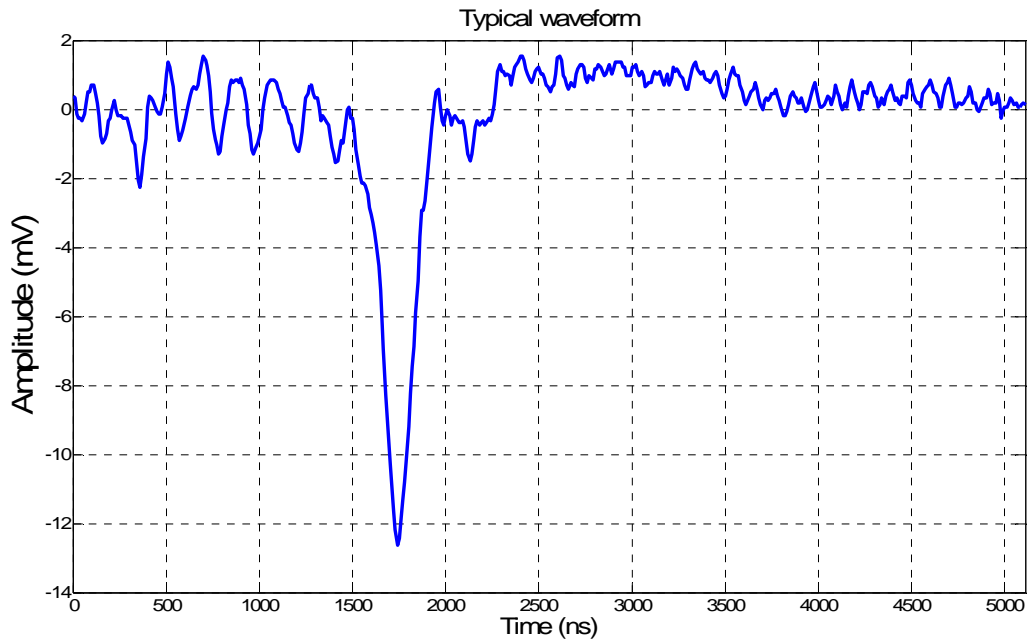


Figura 9-4: Tipica forma d'onda dell' impulso di corrente registrato per il gruppo A.

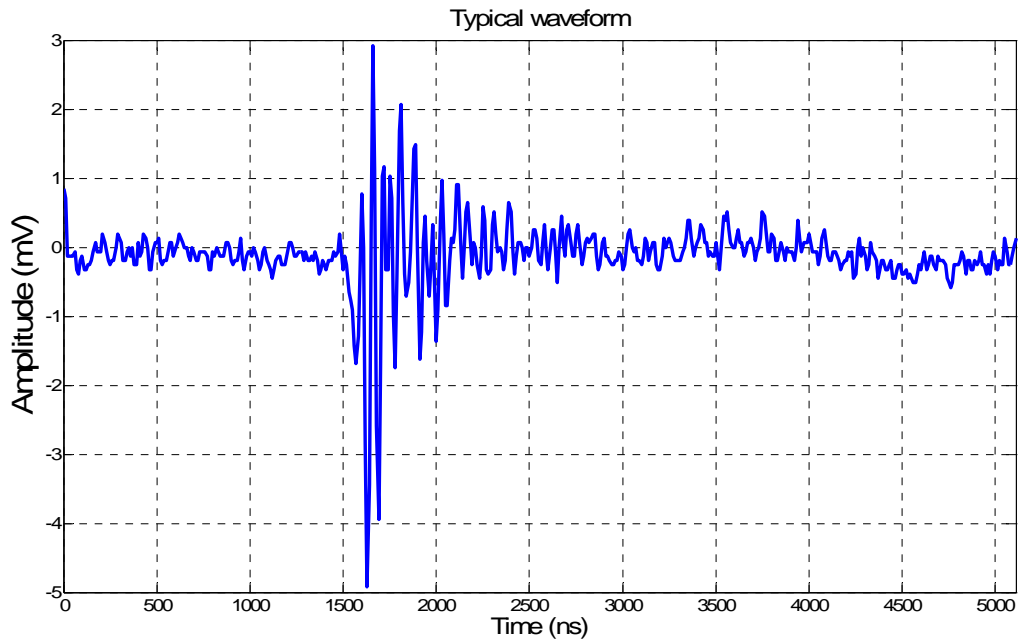


Figura 9-5: Tipica forma d'onda dell' impulso di corrente registrato per il gruppo B.

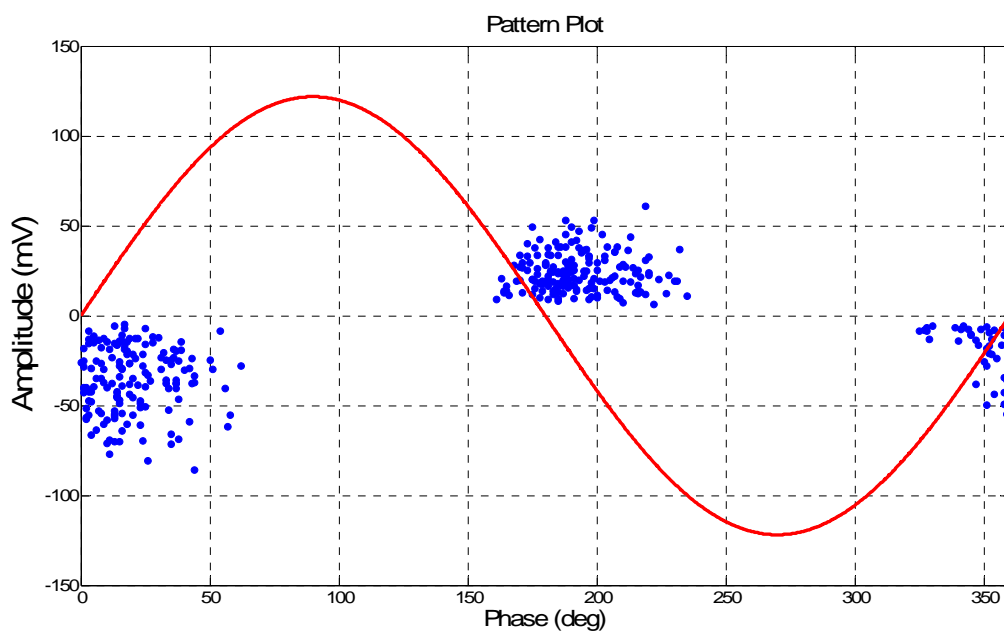


Figura 9-6: Pattern relativo ai segnali appartenenti al gruppo A.

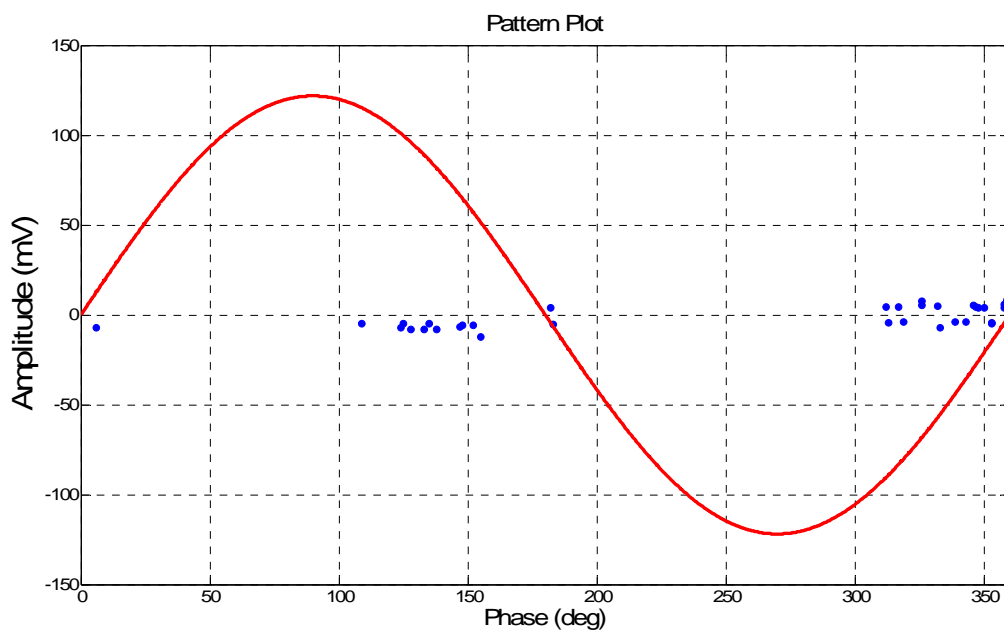


Figura 9-7: Pattern relativo ai segnali appartenenti al gruppo B.

9.1.2 Rilievo con connessione del triangolo rimossa

Dopo aver rimosso il triangolo del trasformatore sono state analizzate singolarmente le diverse bobine del trasformatore.

Alla tensione di 14 kV è stato rilevato il pattern riportato in Figura 9-8, il cui diagramma Tempo-Frequenza è riportato in Figura 9-9.

Rispetto alla misura effettuata con triangolo di media tensione chiuso, si nota che il fenomeno rilevato è di un'unica tipologia.

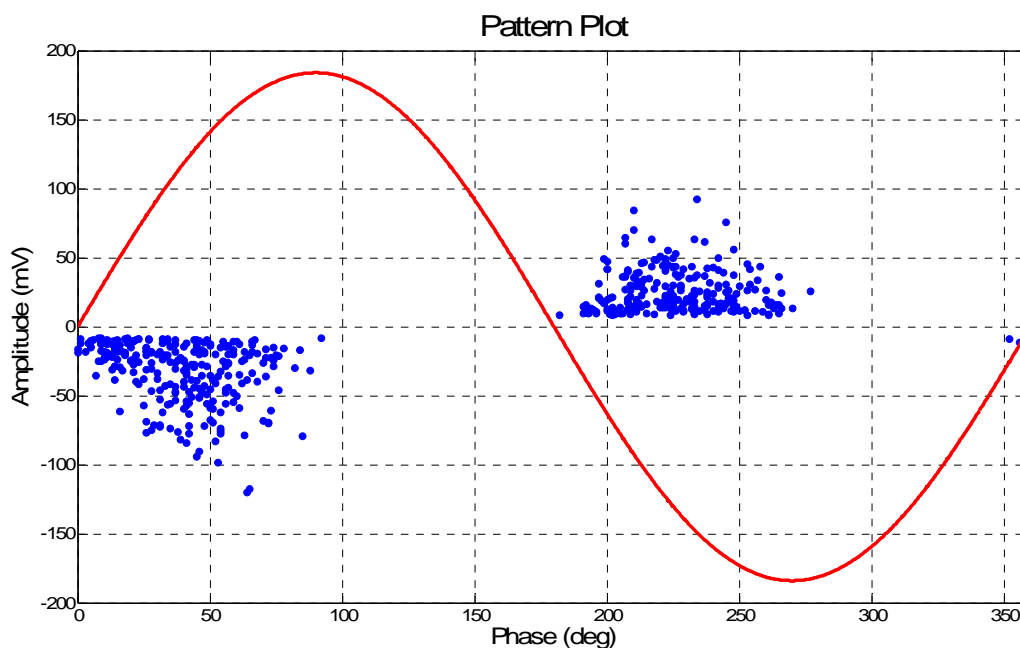


Figura 9-8: Pattern relativo alla misura in modalità monofase con triangolo aperto.

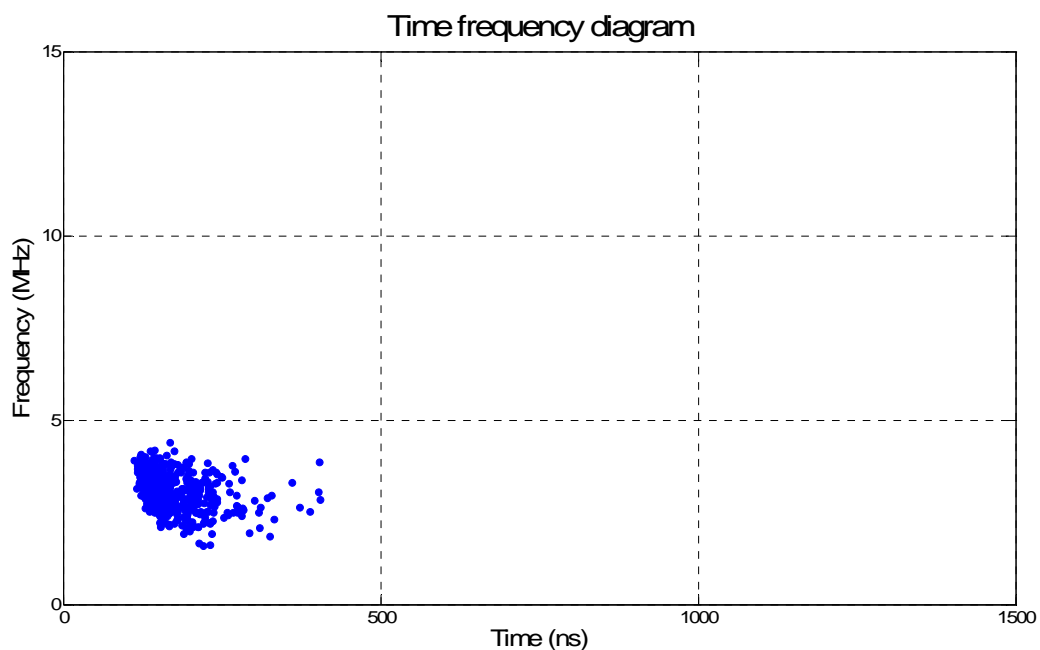


Figura 9-9: Diagramma Tempo-Frequenza relativo alla misura in modalità monofase con triangolo aperto.

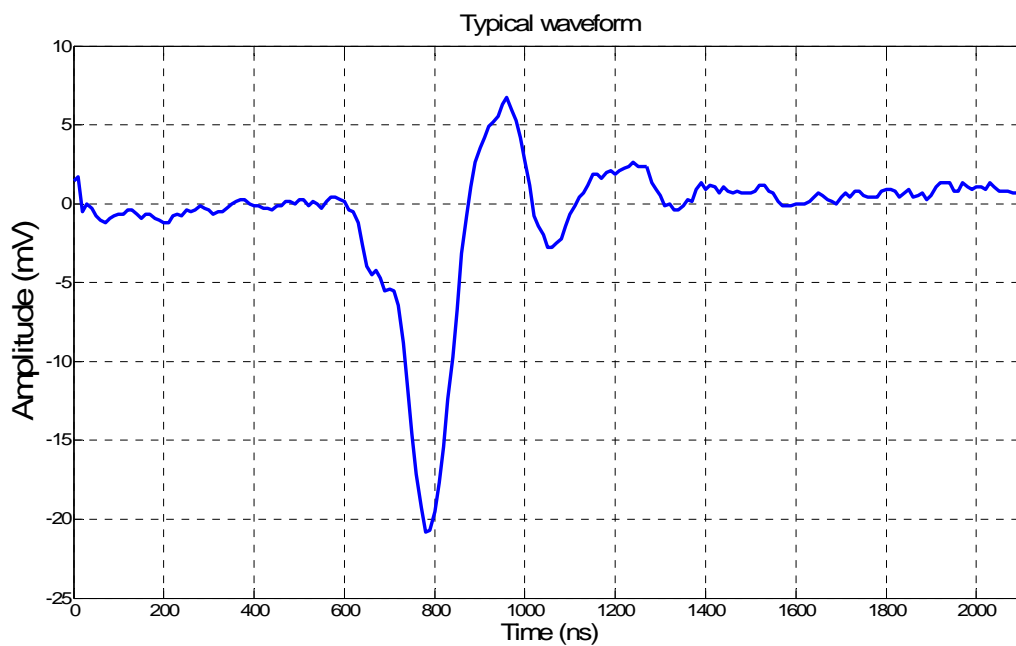


Figura 9-10: Forma d'onda dell'impulso di corrente relativo alla misura in modalità monofase con triangolo aperto.

Indici calcolati per la valutazione del pattern			
Distribuzione	POSITIVA	NEGATIVA	
Numero di scariche	228	272	
Tensione minima rilevata	0,01	-0,01	(V)
Tensione massima rilevata	0,09	-0,12	(V)
Tensione media rilevata	0,03	-0,03	(V)
Somma delle tensioni rilevate	5,78	-8,65	(V)
Fase minima	2	-8	(°)
Fase massima	97	92	(°)
Fase media (calcolata in base alla numerosità degli impulsi)	46,07	38,19	(°)
Fase media (calcolata in base alla tensione degli impulsi)	48,83	45,31	(°)
Deviazione standard $H_n(\varphi)$	19,59	20,92	
Skewness $H_n(\varphi)$	0,23	0,06	
Kurtosis $H_n(\varphi)$	-0,69	-0,70	
Deviazione standard $H_{qn}(\varphi)$	21,13	22,82	
Skewness $H_{qn}(\varphi)$	0,18	-0,16	
Kurtosis $H_{qn}(\varphi)$	-0,83	-0,73	
Weibull (alfa)	0,03	0,04	(V)
Weibull (beta)	1,79	1,55	
Asimmetria della carica Q	-1,2552		
Asimmetria della fase	-4		

Tabella 10: Indici calcolati per la valutazione dei pattern delle scariche parziali appartenenti alla bobina del trasformatore.

Aumentando la tensione di prova sino al valore di 15 kV si è visto un cambiamento del pattern con la comparsa di un nuovo fenomeno impulsivo, sovrapposto a quello rilevato a tensione più bassa e di comportamento completamente diverso.

Tale fenomeno impulsivo si manifestava con intensità superiore a quella del fenomeno rilevato a tensione più bassa.

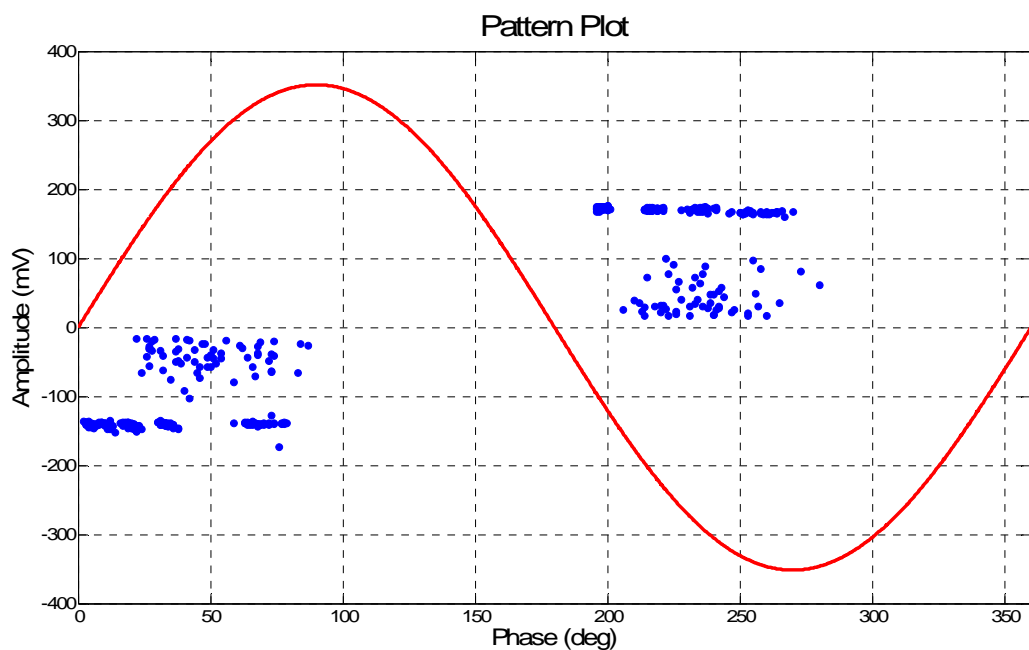


Figura 9-11: Comparsa di un secondo fenomeno alla tensione di 15 kV. Il nuovo fenomeno impulsivo si presenta con intensità maggiore rispetto al fenomeno innescato a tensione inferiore.

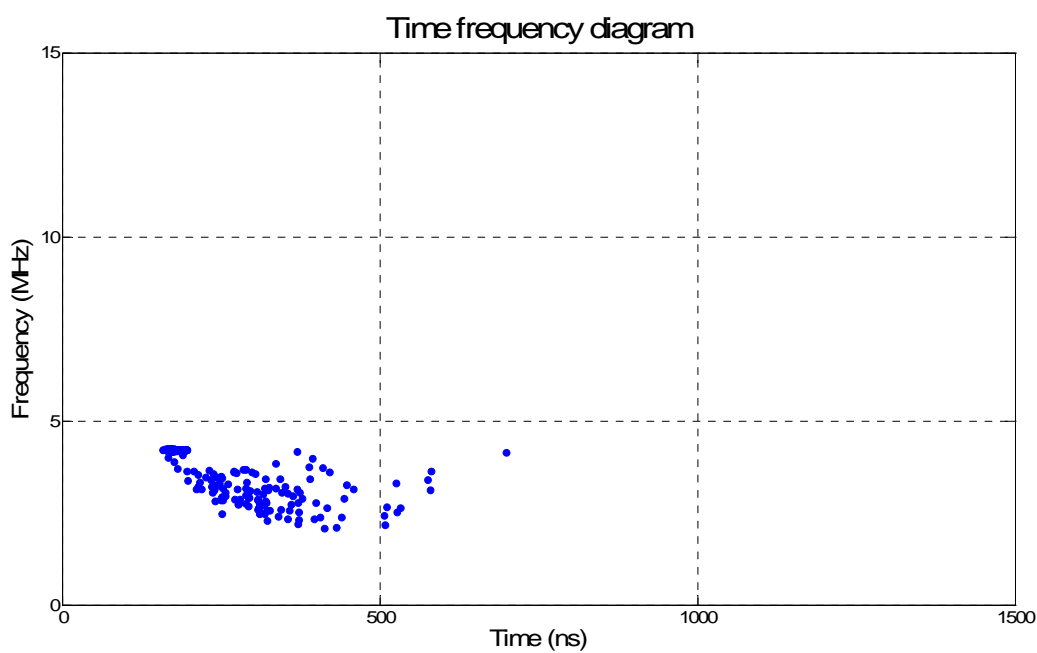


Figura 9-12: Diagramma Tempo-Frequenza della registrazione.

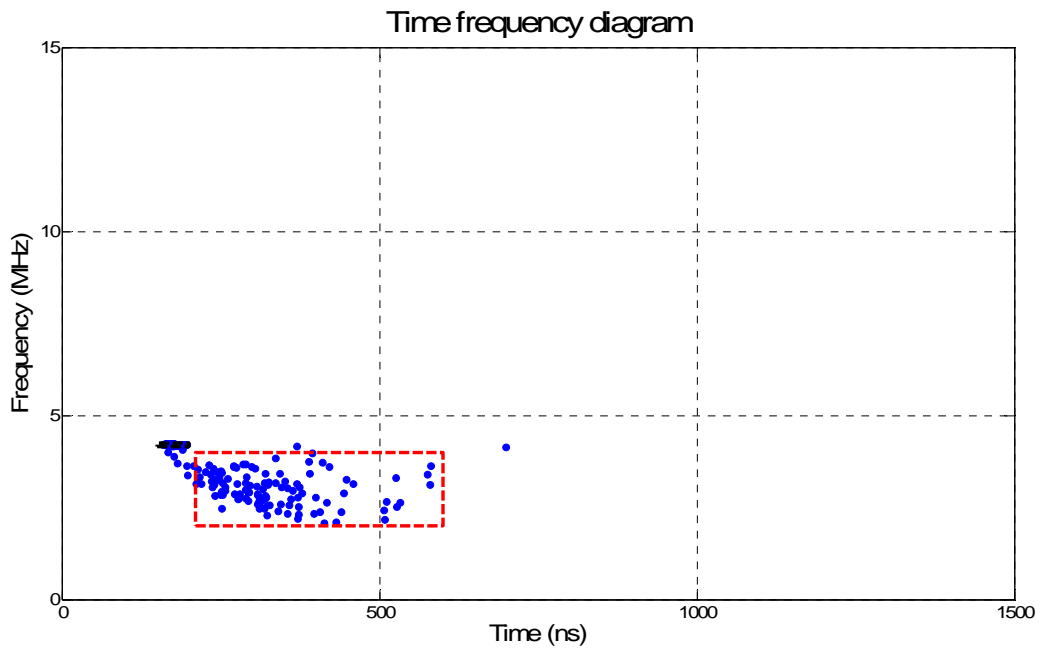


Figura 9-13: Diagramma Tempo-Frequenza, separazione dei due fenomeni.

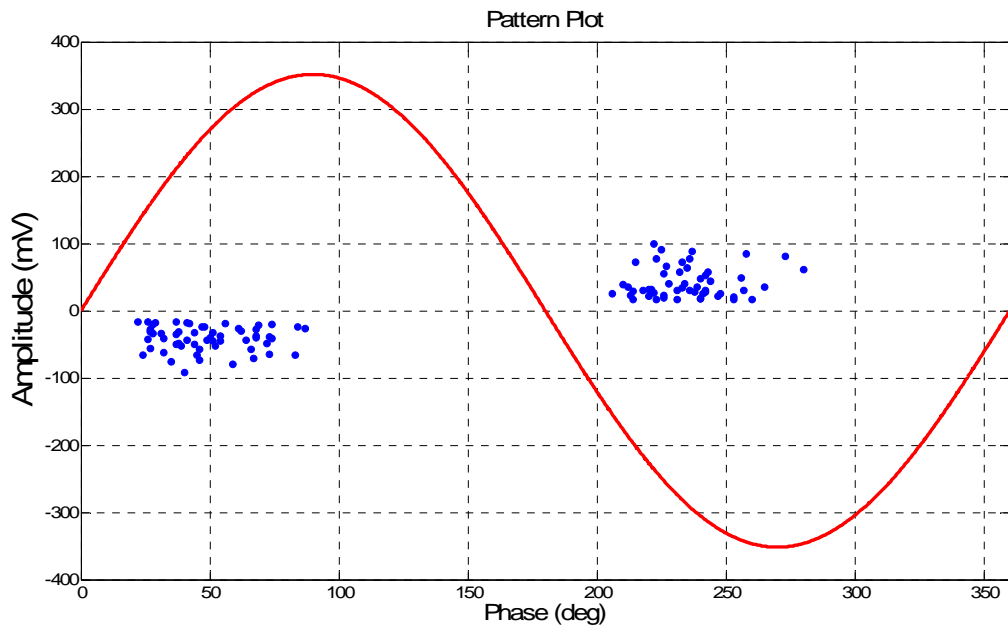


Figura 9-14: Pattern del fenomeno rilevato anche a tensione inferiore.

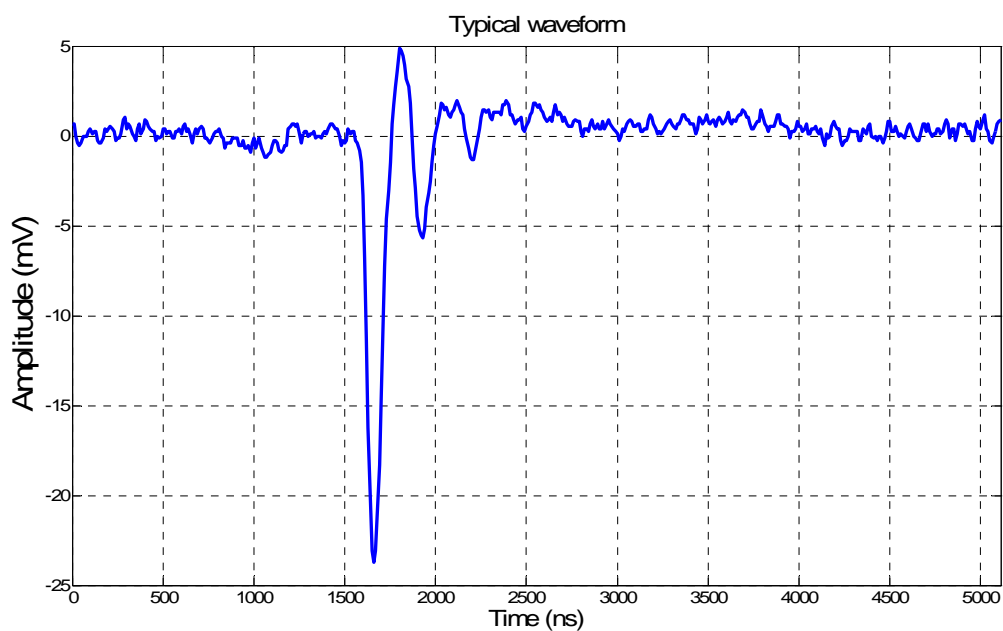


Figura 9-15: Forma d'onda dell'impulso di corrente relativo al fenomeno principale.

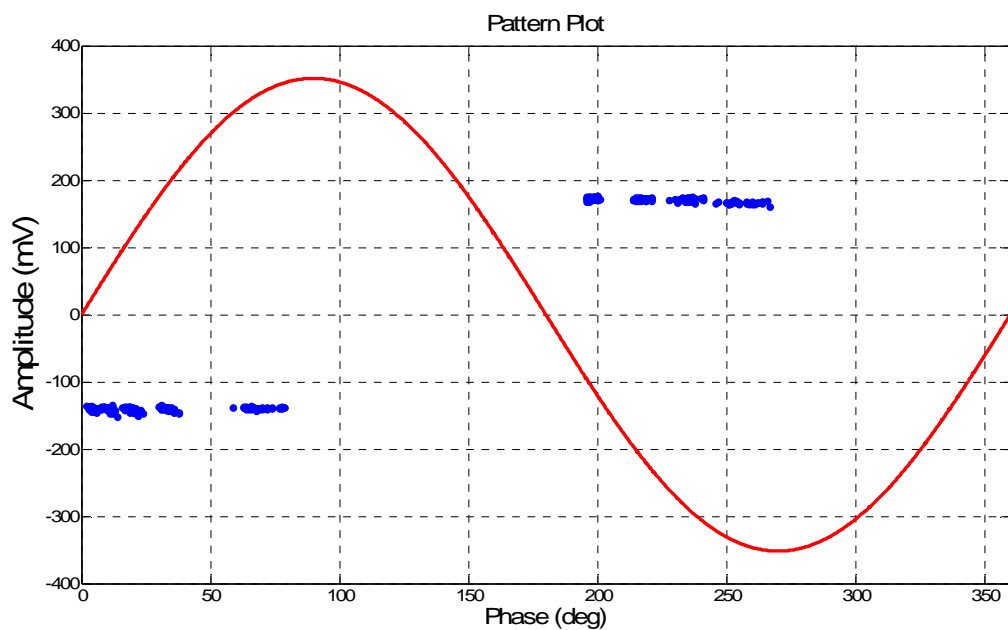


Figura 9-16: Pattern del fenomeno comparso alla tensione di circa 15 kV.

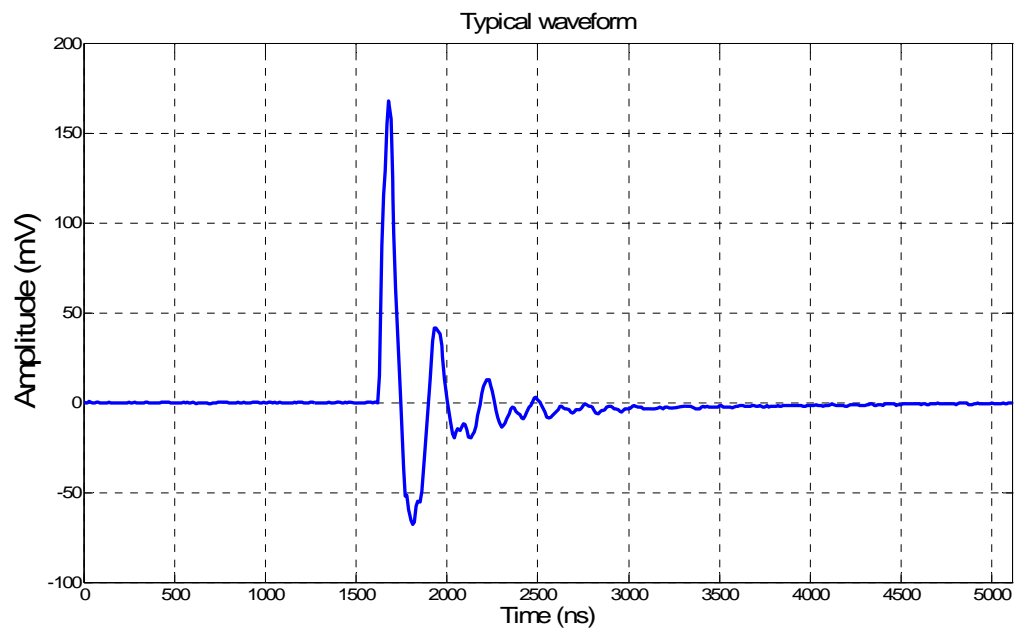


Figura 9-17: Pattern del fenomeno comparso alla tensione di circa 15 kV

Indici calcolati per la valutazione del pattern			
Distribuzione	POSITIVA	NEGATIVA	
Numero di scariche	164	216	
Tensione minima rilevata	0,16	-0,14	(V)
Tensione massima rilevata	0,18	-0,15	(V)
Tensione media rilevata	0,17	-0,14	(V)
Somma delle tensioni rilevate	27,92	-30,52	(V)
Fase minima	16	2	(°)
Fase massima	87	79	(°)
Fase media (calcolata in base alla numerosità degli impulsi)	44,18	28,47	(°)
Fase media (calcolata in base alla tensione degli impulsi)	54,91	34,48	(°)
Deviazione standard $H_n(\varphi)$	21,11	22,93	
Skewness $H_n(\varphi)$	0,28	0,86	
Kurtosis $H_n(\varphi)$	-1,03	-0,59	
Deviazione standard $H_{qn}(\varphi)$	21,31	25,50	
Skewness $H_{qn}(\varphi)$	-0,29	0,48	
Kurtosis $H_{qn}(\varphi)$	-1,02	-1,30	
Weibull (alfa)	0,17	0,14	(V)
Weibull (beta)	70,30	41,77	
Asimmetria della carica Q	-0,8301		
Asimmetria della fase	-0,1250		

Tabella 11: Indici calcolati per la valutazione dei pattern delle scariche parziali apparse in seguito all'aumento della tensione.

L'aumento ulteriore di tensione fino a 20 kV circa ha portato alla comparsa di un terzo fenomeno impulsivo, molto simile con il secondo.

Il pattern rilevato è riportato nella Figura 9-18. Si noti che il terzo fenomeno comparso, eccezion fatta per l'intensità di carica ha caratteristiche analoghe con il secondo.

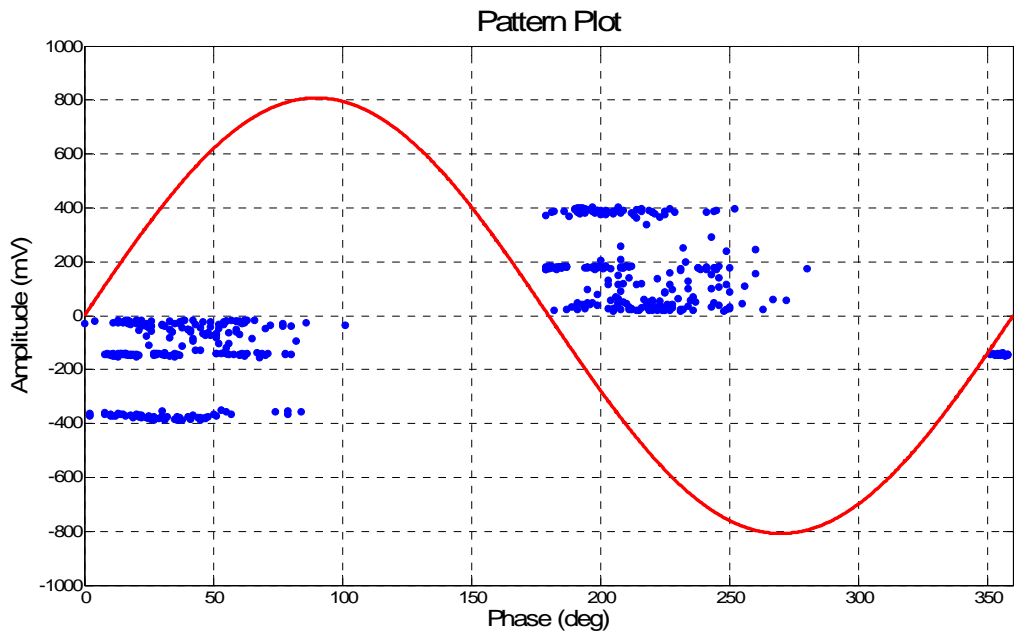


Figura 9-18: Pattern rilevato dopo la comparsa del secondo fenomeno impulsivo.

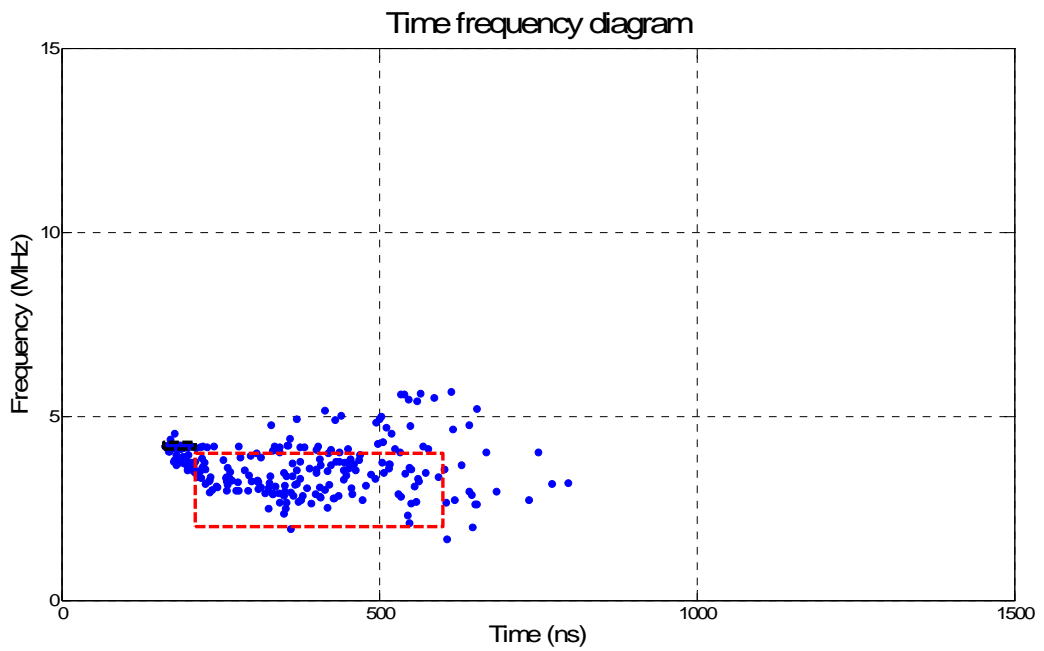


Figura 9-19: Diagramma Tempo-Frequenza. Si noti che il secondo ed il terzo fenomeno comparsi, non sono distinguibili nel diagramma Tempo-Frequenza in quanto presentano la medesima forma d'onda.

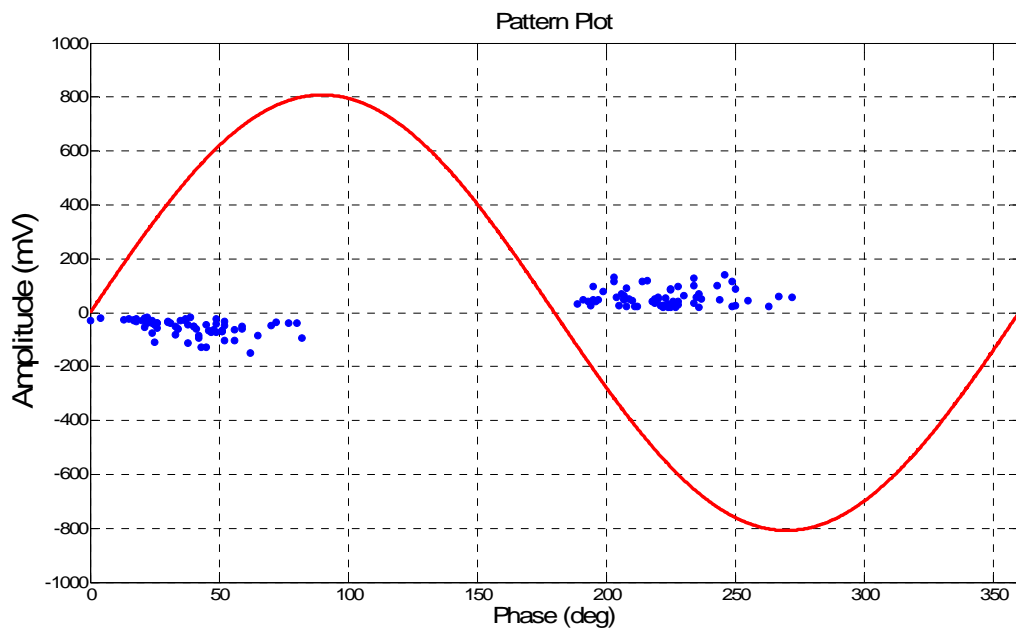


Figura 9-20: Pattern del primo fenomeno impulsivo rilevato.

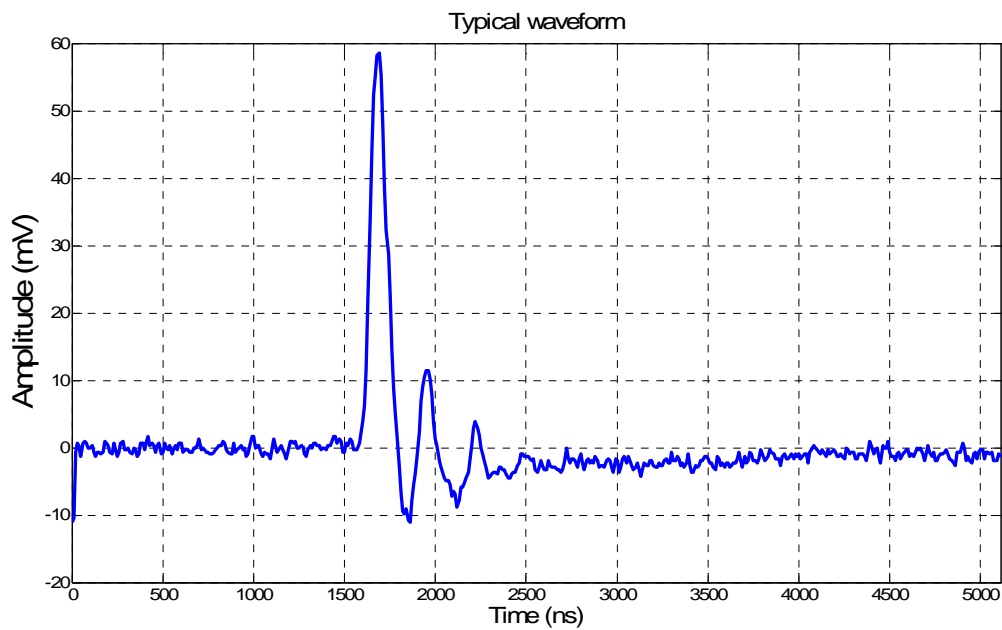


Figura 9-21: Forma d'onda dell'impulso di corrente relativo al primo fenomeno impulsivo rilevato.

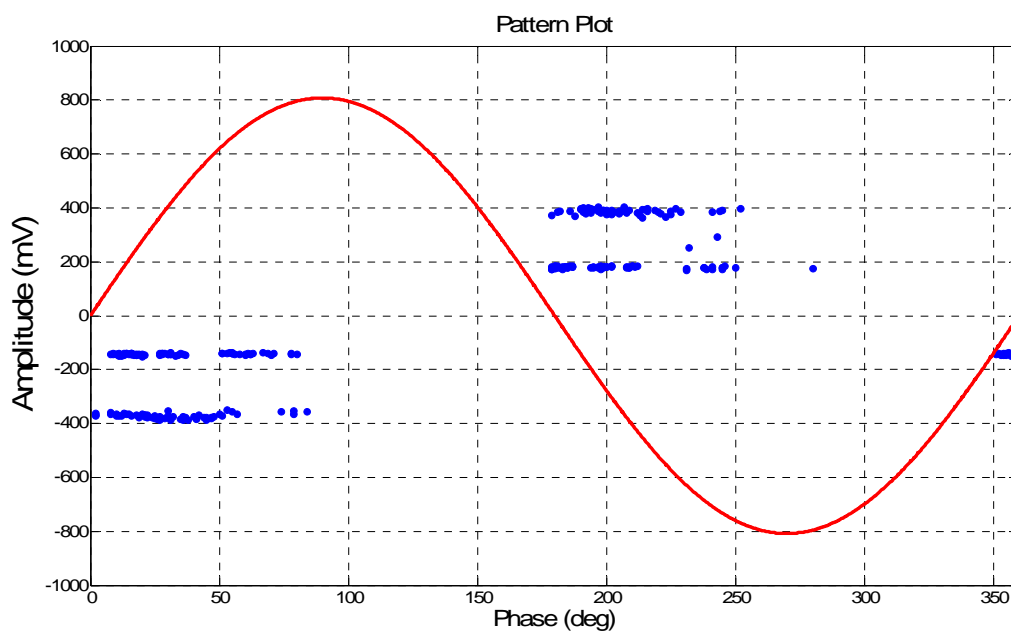


Figura 9-22: Pattern del secondo e del terzo fenomeno impulsivo rilevato.

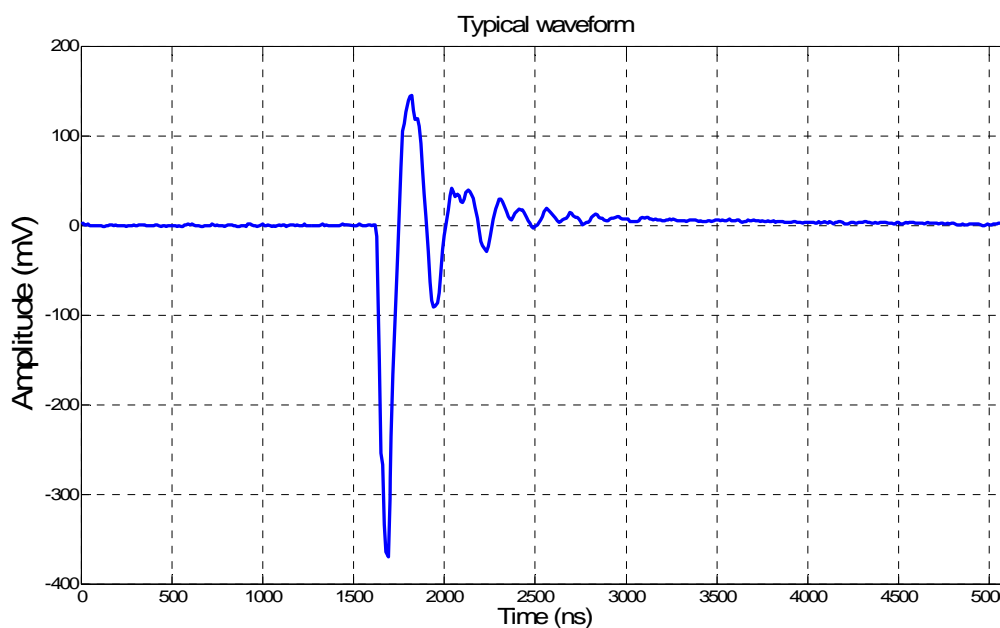


Figura 9-23: Forma d'onda dell'impulso di corrente relativo al secondo ed al terzo fenomeno impulsivo rilevato.

Una verifica sul trasformatore in prova ha portato alla luce che i terminali di media tensione erano connessi alle armature del trasformatore tramite degli isolatori portanti in resina epossidica. La rimozione di tali isolatori ha portato alla scomparsa del secondo e terzo fenomeno impulsivo a tutte le tensioni di prova.

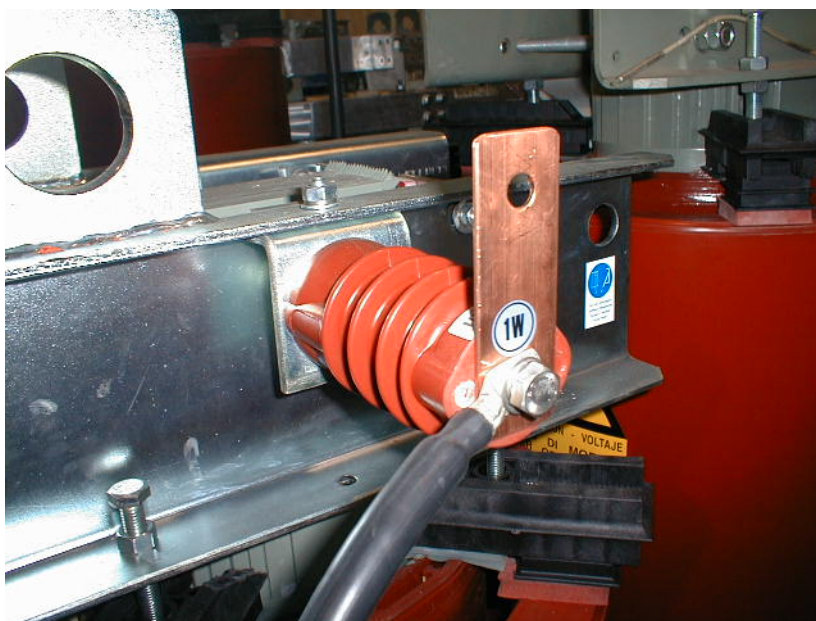


Figura 24: Isolatore origine del fenomeno impulsivo. Si noti che le boccole laterali risultano a potenziale flottante.

Il motivo per cui gli isolatori in resina epossidica fossero origine di tale fenomeno impulsivo è stato svelato analizzando la loro costruzione. Gli isolatori in resina epossidica possiedono, al loro interno degli inserti metallici filettati che ne consentono il montaggio e la centratura con riferimento alle sbarre. La parte superiore presenta tre di questi inserti e solo uno era avvitato alla sbarra di uscita mentre gli altri inserti si trovavano a potenziale flottante con la conseguente formazione di scariche. Per quanto riguarda il primo fenomeno rilevato si tratta invece di una scarica parziale di natura interna originata nella zona del commutatore. Tale asserzione è confermata da diversi elementi:

- 1) Similitudine del pattern a quello canonico associato a scariche parziali interne
- 2) Presenza di pesanti oscillazioni nella forma dell'impulso di corrente.
- 3) Rilievo effettuato con metodica indipendente usando rivelatore di tipo elettromagnetico nella disponibilità del Costruttore.



Figura 9-25: Rilevatore di tipo elettromagnetico che per mezzo di sensori capacitivi è in grado di localizzare le scariche parziali senza contatto. Il rilevatore viene utilizzato in sede di collaudo dei trasformatori per la localizzazione geometrica delle scariche parziali.

In merito all'analisi delle oscillazioni innescate dagli impulsi di corrente dovuti alle scariche parziali interne alle bobine dei trasformatori di media tensione è opportuno ricondursi alla analisi in frequenza fatta per le stesse.

Un impulso di corrente, infatti, costituisce l'eccitazione a seguito della quale all'interno delle bobine si genera un fenomeno oscillatorio proprio della risposta impulsiva del sistema (Figura 9-26 e Figura 9-27).

L'analisi della oscillazione può essere un fattore discriminante al fine di stabilire l'origine dell'impulso: tale oscillazione, infatti, non si manifesta per gli impulsi esterni al trasformatore come per esempio le scariche in aria e superficiali.

E' importante notare che che il fenomeno oscillatorio prodotto è la risposta del sistema dal punto di origine dell'impulso che risulta pertanto diversa qualora l'impulso sia generato in punti diversi dell'avvolgimento. Nelle misure sarebbe opportuno operare con una finestra di acquisizione di larghezza tale da permettere il rilievo di tale risposta che al limite può anche essere utilizzata come fattore discriminante per capire, almeno approssimativamente, la posizione dell'impulso all'interno della bobina.

La controindicazione che deve sempre essere tenuta presente è che finestre di acquisizione ampie portano spesso alla acquisizione di impulsi multipli con alterazione dei diagrammi Tempo-Frequenza.

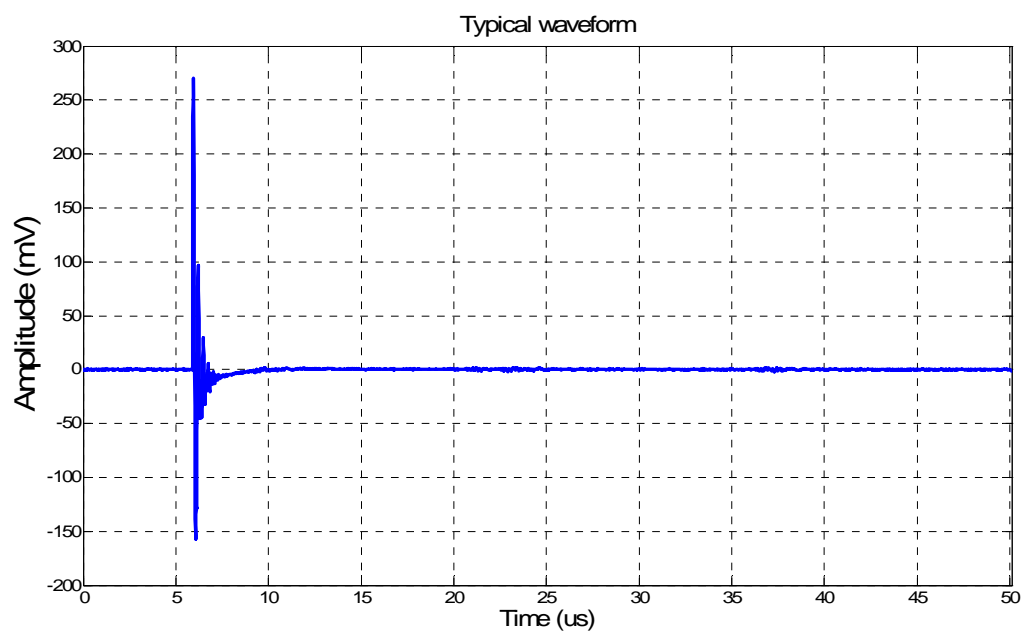


Figura 9-26: Impulso di corrente derivato da scariche parziali originate dall'isolatore portante in resina epossidica.

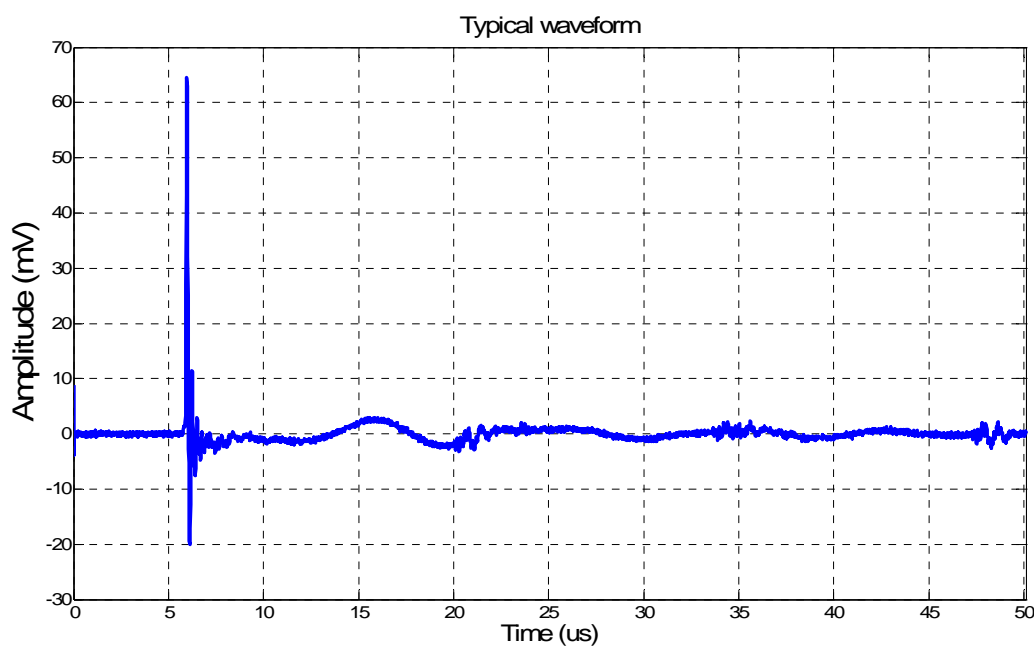


Figura 9-27: Impulso di corrente derivato da scariche parziali originate all'interno del trasformatore. Si noti l'oscillazione conseguente alla scarica.

9.2 Prove condotte su trasformatore da 400 kVA

È stato provato anche un trasformatore trifase da 400 kVA, isolato in resina epossidica avente i seguenti dati di targa:

Potenza nominale	100 kVA
Tensione primaria	20000 V
Tensione secondaria	400 V
Regolazione lato primario (Salterello a cento avv.)	+2-3x2,5 %

Il trasformatore presentava al momento della esecuzione delle prove, una elevatissima intensità di scariche parziali, dovute a numerosi errori nel processo di esecuzione della colata in resina.

In particolare, evidenze ottenute mediante il parziale sezionamento della bobina avevano dimostrato che il principale difetto di colata era ubicato nei pressi dei terminali di alimentazione nei quali erano stati inglobati dei componenti in vetroresina con funzione di distanziatore tra le bobine.

Tali distanziatori, non bene inglobati erano sede di scariche parziali molto intense, ridottesi in seguito alla asportazione meccanica di tali supporti da parte degli operatori. Il trasformatore è stato provato nella sola modalità monofase (senza connessioni per il triangolo La tensione di innesco delle scariche parziali rilevata è circa pari a 21 kV.

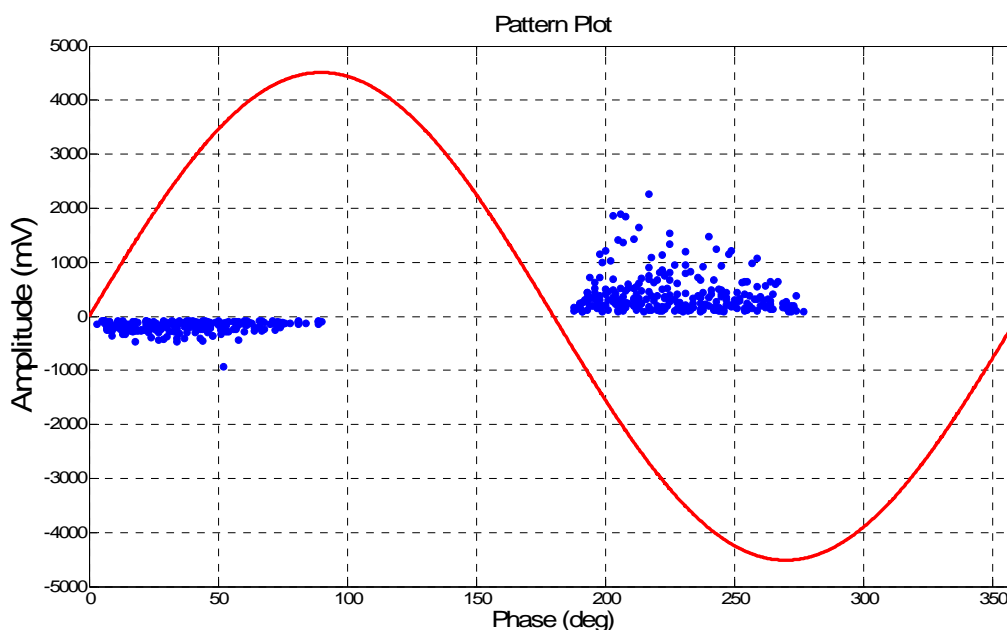


Figura 9-28: Pattern relativo alle scariche parziali rilevate nel trasformatore da 400 kVA

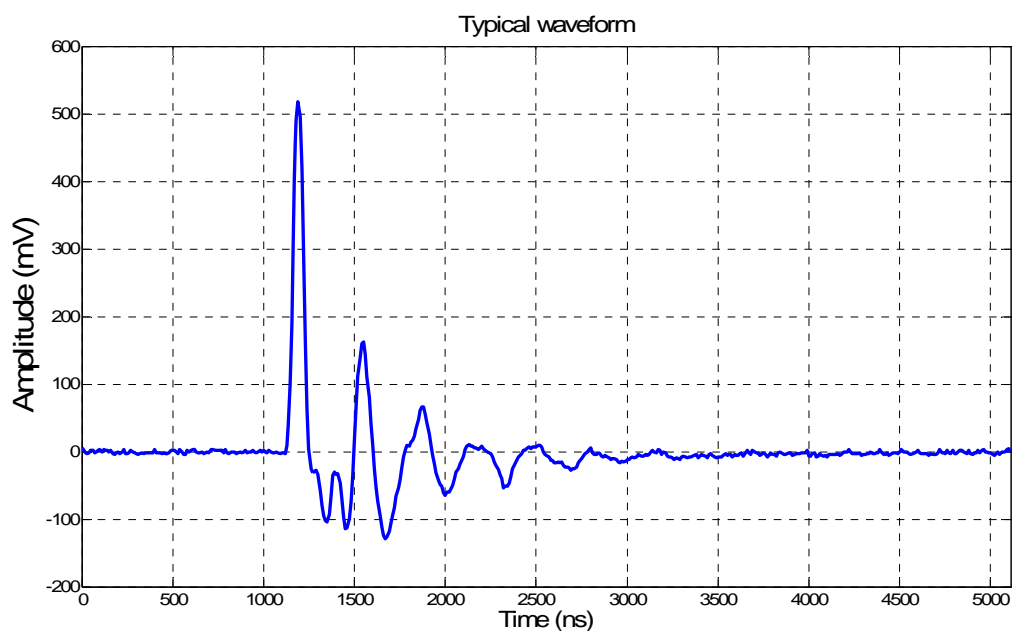


Figura 9-29: Forma d'onda degli impulsi di corrente rilevati nel trasformatore da 400 kVA

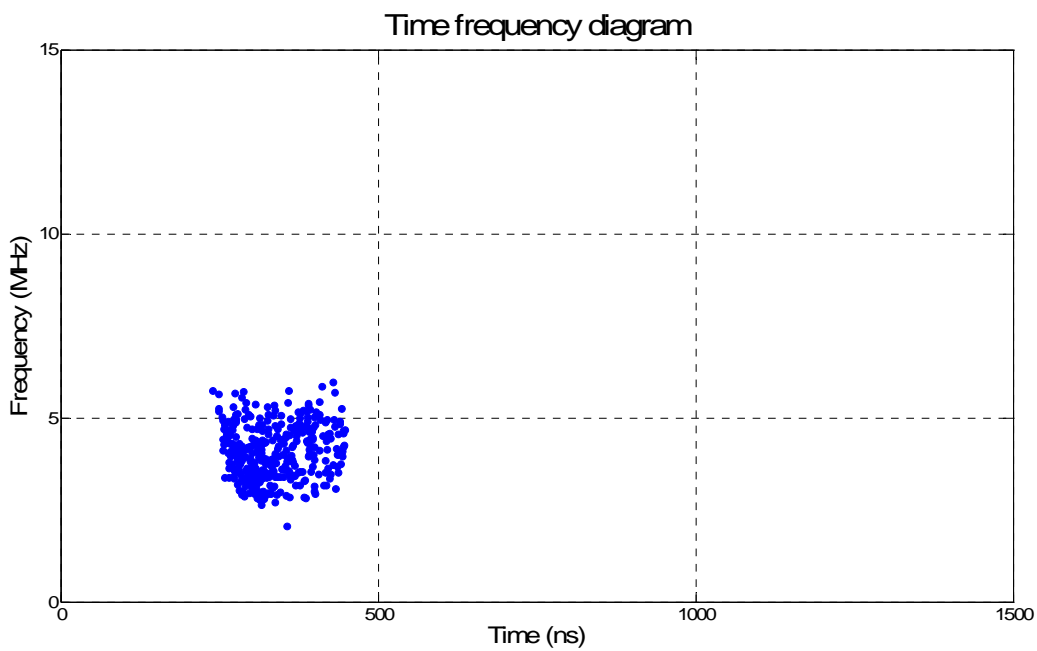


Figura 9-30: Diagramma Tempo-Frequenza relativo agli impulsi rilevati nel trasformatore da 400 kVA.

Indici calcolati per la valutazione del pattern			
Distribuzione	POSITIVA	NEGATIVA	
Numero di scariche	217	143	
Tensione minima rilevata	0,09	-0,08	(V)
Tensione massima rilevata	1,90	-0,93	(V)
Tensione media rilevata	0,42	-0,20	(V)
Somma delle tensioni rilevate	91,19	-28,99	(V)
Fase minima	9	3	(°)
Fase massima	94	89	(°)
Fase media (calcolata in base alla numerosità degli impulsi)	47,86	39,00	(°)
Fase media (calcolata in base alla tensione degli impulsi)	48,33	40,59	(°)
Deviazione standard $H_n(\varphi)$	23,65	22,39	
Skewness $H_n(\varphi)$	0,13	0,30	
Kurtosis $H_n(\varphi)$	-1,15	-0,90	
Deviazione standard $H_{qn}(\varphi)$	22,96	21,38	
Skewness $H_{qn}(\varphi)$	0,17	0,18	
Kurtosis $H_{qn}(\varphi)$	-1,15	-0,95	
Weibull (alfa)	0,47	0,23	(V)
Weibull (beta)	1,41	2,01	
Asimmetria della carica Q		-0,4824	
Asimmetria della fase		-0,3333	

Tabella 12: Indici calcolati per la valutazione dei pattern delle scariche parziali rilevate nel trasformatore da 400 kVA.

Sul trasformatore da 400 kVA, infine, è stato simulato un difetto molto comune dovuto all'assemblaggio dei trasformatori in resina: il posizionamento errato di un tacchetto di sostegno delle bobine.

Può accadere infatti che nella fase di fissaggio delle bobine di trasformatore non tutti i tacchetti di centraggio risultino a contatto con la superficie delle bobine e che tale falso contatto porti alla formazione di scariche parziali.

Il difetto particolare è stato simulato ponendo una punta, connessa al potenziale di terra a contatto con la superficie superiore di una bobina in resina in modo da provocare l'innesco delle scariche parziali.

Tale innesco è avvenuto alla tensione di 16 kV, molto inferiore alla tensione di innesco delle scariche parziali interne alla bobina pari a 21 kV circa.

I risultati della prova sono a seguito riportati. È da notare che a differenza di altri fenomeni rilevati, la presenza di un difetto del tipo simulato comporta la presenza di scariche parziali di entrambe le polarità per ciascun semiciclo della tensione.

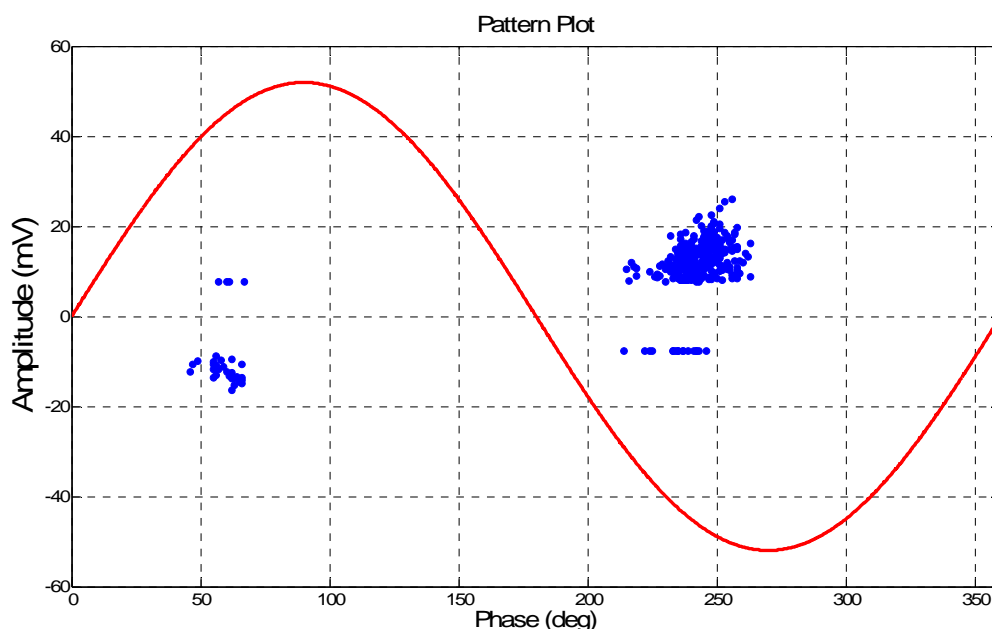


Figura 9-31: Pattern relativo alla simulazione di un tacchetto difettoso.

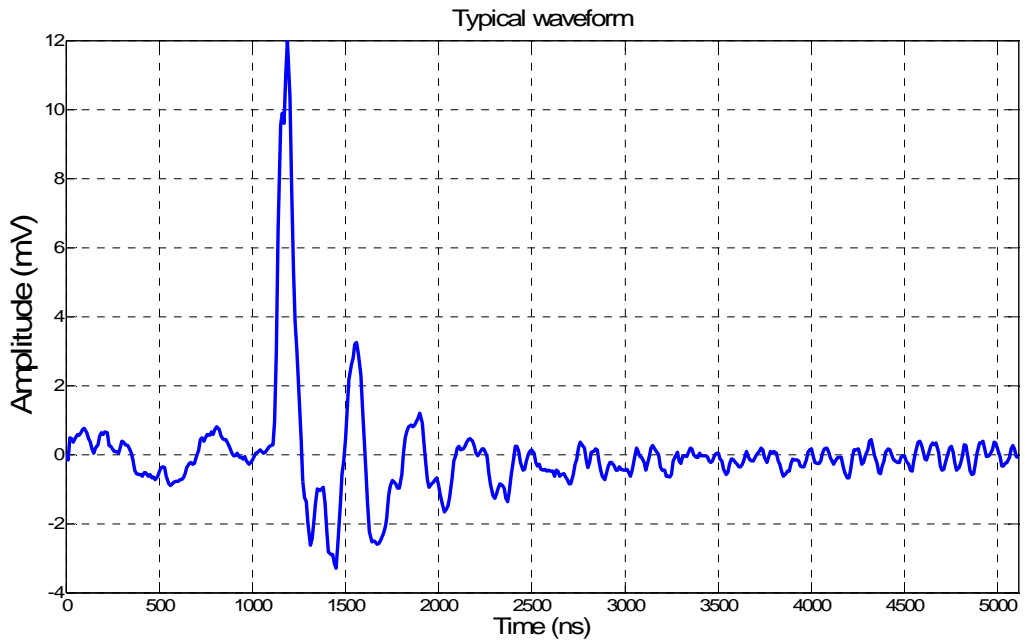


Figura 9-32: Impulso di corrente relativo alla simulazione di relativo alla simulazione di un tacchetto difettoso.

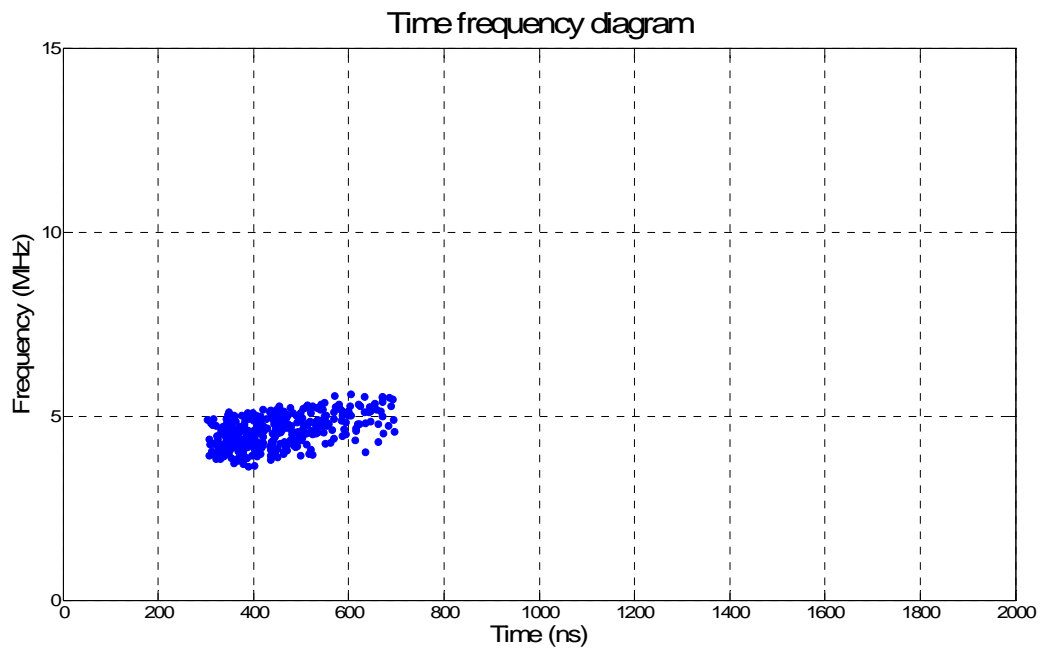


Figura 9-33: Diagramma Tempo-Frequenza relativo alla simulazione di un tacchetto difettoso.



Figura 9-34: Prove eseguite sui trasformatori presso la sala prove del costruttore.

10 Metodi alternativi ed ulteriori applicazioni della strumentazione a banda ultra larga

10.1 Applicazioni della risoluzione: prove nei cavi

I sistemi di misura a banda ultra larga possono essere utilizzati oltre che per quanto fin qui visto anche per applicazioni diverse.

Una caratteristica dei sistemi di misura delle scariche parziali a banda ultra larga è la capacità di avere una ottima capacità di risoluzione degli impulsi nel tempo, soprattutto se paragonata a quella dei sistemi tradizionali.

A seconda delle caratteristiche del sistema utilizzato tale caratteristica può essere utilizzata per localizzare geometricamente l'origine dei fenomeni impulsivi.

In pratica dato un oggetto di cui si conosca la legge di propagazione degli impulsi elettromagnetici è possibile calcolare la posizione dell'origine dell'impulso semplicemente calcolando il tempo di propagazione del segnale.

La tecnica appare particolarmente adatta a misure sui cavi: infatti la configurazione geometrica dei conduttori è semplice e quindi si può calcolare immediatamente la velocità di propagazione degli impulsi.

Nel caso particolare il sistema di misura delle scariche parziali auto costruito è stato utilizzato per determinare la sorgente delle scariche parziali in un cavo in prova.

Il cavo, dotato di due terminazioni, aveva un lunghezza molto ridotta, pari a 5 m ed durante una prova condotta con strumentazione a banda larga si erano evidenziate scariche parziali, localizzate con ogni probabilità in uno dei due terminali.

Non era stato possibile decidere quale fosse dei due, data la lunghezza molto modesta del cavo che non garantiva una attenuazione sufficiente del segnale che avrebbe potuto consentire la discriminazione, cambiando la posizione del sistema di misura. L'ubicazione delle scariche con metodi acustici risultava altrettanto impossibile per la modesta entità del fenomeno.

Si è utilizzato dunque il sistema di misura delle scariche parziali auto costruito utilizzando due canali e connettendoli a ciascuno dei due terminali del cavo in esame.

Si sono rilevati dunque gli impulsi di scarica riportati in Figura 10-1.

Dalla analisi della figura si nota subito che l'impulso di corrente viene rilevato prima dal canale 2 ed in seguito dal canale 1. Si nota anche che l'impulso presenta diverse riflessioni, e che l'intervallo di tempo tra un impulso e la sua riflessione è proporzionale al doppio della lunghezza del cavo. Si nota pure che il segnale rilevato al canale 1 è ubicato a metà tra il segnale al canale 2 e la sua prima riflessione. Si conclude pertanto che l'ubicazione del fenomeno impulsivo è ubicato in prossimità della terminazione connessa al canale 2 del misuratore.

La pratica ha dimostrato la veridicità della precedente affermazione in quanto con la sostituzione del terminale 2 i fenomeni sono scomparsi.

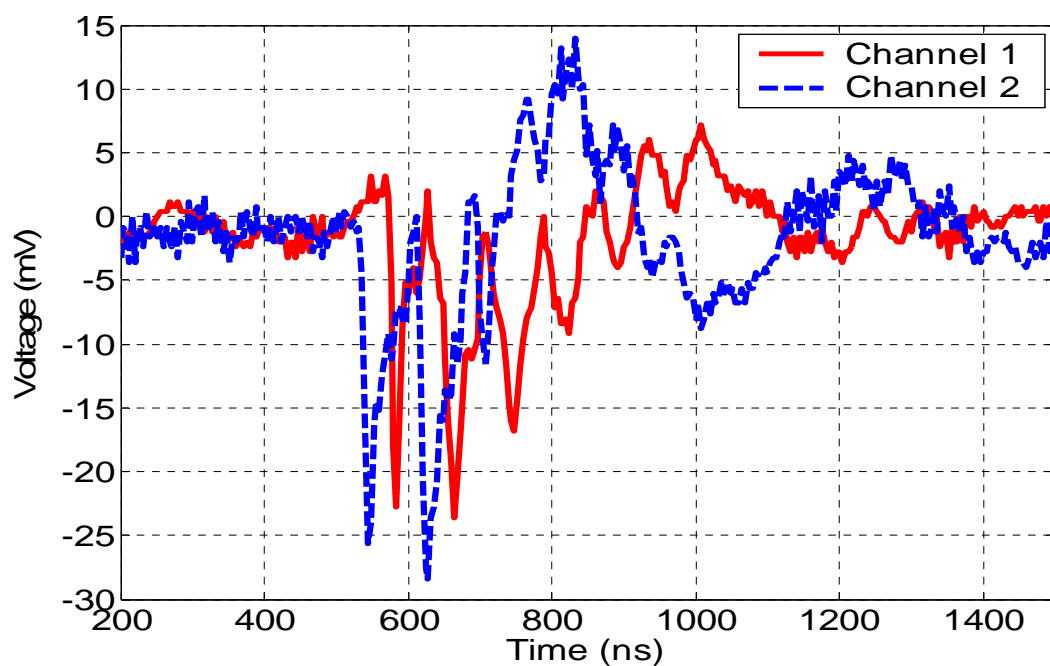


Figura 10-1: Rilevo delle scariche parziali a banda ultra larga in un cavo di media tensione di lunghezza pari a 5 metri. Si noti che il canale 1 rileva il segnale dopo il canale 2, esattamente a metà tra il tempo di rilievo dal canale 2 del segnale e della sua riflessione.

10.2 Identificazione della ubicazione delle scariche parziali nelle bobine dei trasformatori mediante l'analisi della polarità degli impulsi

La tipologia di scariche parziali all'interno di una bobina di un trasformatore di media tensione può essere ricavata dalla analisi della polarità delle correnti rilevate da un sistema di misura di scariche parziali a banda ultra larga connesso ai due terminali della bobina.[71][78]

Da una analisi circuitale risulta infatti che fenomeni impulsivi verso terra e fenomeni impulsivi interni producono all'esterno segnali con diversa polarità, uguale nel caso di impulsi verso terra, contraria nel caso di impulsi tra punti della bobina.

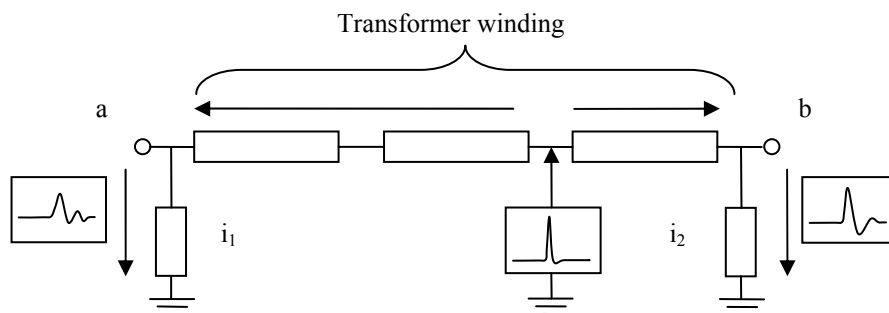


Figura 10-2: Scarica parziale verso terra.

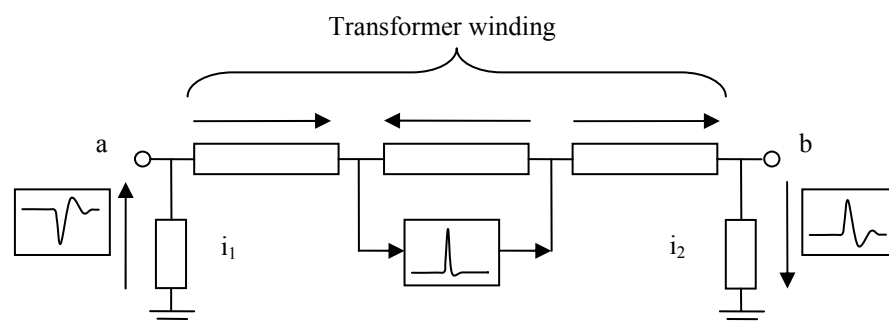


Figura 10-3: Scarica parziale tra due punti dell'avvolgimento

Nel caso di impulsi verso terra si ha, infatti, che la corrente si divide tra due parti dell'avvolgimento in parallelo connesse a terra rispettivamente attraverso ciascuno dei due terminali mentre nel caso di impulsi generati tra punti differenti della bobina si ha che due parti della bobina vengono a trovarsi in parallelo ed i terminali dell'avvolgimento risultano connessi in serie.

La precedente osservazione fornisce nella pratica un valido aiuto in quanto consente di estrapolare dalla semplice osservazione della polarità delle correnti

dovute alle scariche parziali informazioni in merito alla tipologia di scarica osservata.

Ora se si considera quanto detto in merito alla polarità degli impulsi di corrente rilevati in uscita dalla bobina si nota che, nel caso di impulsi verso terra, il segnale risulta diverso ma di omologa polarità tra le due uscite mentre nel caso di segnali aventi natura interna alla bobina il segnale risulta solo invertito di polarità conservando ampiezze sostanzialmente uguali.

10.3 **Analisi a mappatura di fdt**

L'analisi a mappatura della funzione di trasferimento (fdt) è un metodo di prova che si prefigge come scopo principale la localizzazione spaziale dell'origine delle scariche parziali all'interno di un sistema lineare, nel caso specifico all'interno di una bobina di un trasformatore.

[63][65][85][86][97][100][101][110][142][144][153][154][160]

In pratica ad una bobina di un trasformatore in resina può essere vista come un sistema lineare ad n ingressi ed m uscite.

Ogni ingresso è correlato ad ogni uscita tramite una funzione di trasferimento e complessivamente, definiti gli ingressi e le uscite del sistema può essere scritta una matrice di funzioni di trasferimento che correli ciascuna uscita a ciascun ingresso del sistema.

Supponendo che un ingresso sia sollecitato da un segnale, dalle uscite del sistema potrà essere vista la risposta al segnale in ingresso data matematicamente dalla convoluzione del segnale sorgente con la particolare funzione di trasferimento che collega il particolare ingresso con l'uscita.[90][92][96]

Se il segnale sorgente è unico, a partire dalle uscite del sistema, conoscendo le funzioni di trasferimento è possibile ricostruire la forma del segnale a ciascuna uscita. Se esistono almeno due uscite, per l'ipotesi di partenza vi sarà un solo punto di ingresso per il quale il segnale riprodotto a partire dalle due uscite è unico: ***tale punto rappresenta il punto di origine del segnale.***

Nella pratica, per quanto riguarda la bobina di un trasformatore esistono infiniti punti nei quali può generarsi una scarica parziale ma solo due punti nei quali l'impulso può essere agevolmente misurato ovvero i due terminali della bobina.

Operativamente si deve pertanto identificare nella bobina un serie di punti di ingresso, ripartiti geometricamente lungo l'altezza della stessa. Attraverso un accoppiamento di tipo capacitivo si inietta in ciascuno dei punti un segnale noto registrando la coppia di segnali in uscita. Il rapporto tra la corrente iniettata e le due correnti (o tensioni a seconda del circuito adottato) in uscita fornisce per ogni punto la coppia di funzioni di trasferimento ingresso-uscita.

Nel corso della misura delle scariche parziali, a seguito del fenomeno impulsivo, potranno essere registrati ai due terminali due impulsi, partendo dai quali sarà possibile calcolare per tutti gli ingressi considerati, l'ipotetica forma dell'impulso. Per l'unicità del fenomeno, vi sarà un solo punto per il quale il segnale ricostruito a partire dalle due uscite sarà univoco e tale punto rappresenta il punto di origine del fenomeno impulsivo.

Per quanto riguarda le misure oggettive, molto difficilmente un ingresso scelto per la mappatura della bobina sarà anche un punto di origine della scarica parziale e si procederà pertanto a determinare i punti di massima verosimiglianza dei segnali ricostruiti. Tra questi punti geometrici si troverà il punto di origine dell'impulso.

Un metodo efficace per il confronto dei segnali, soprattutto nel caso in cui si consideri un elevato numero di ingressi può essere il metodo Tempo-Frequenza, considerando la minima distanza tra coppie di segnali ricostruiti.

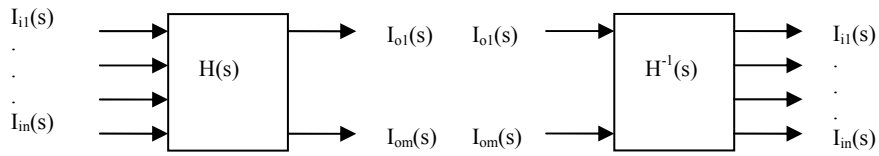


Figura 10-4: Schematizzazione del sistema lineare mediante la propria funzione di trasferimento.

Le relazioni che le legano gli ingressi alle uscite e viceversa sono a seguito rappresentate.

$$[I_{om}(s)] = [H_{mn}(s)][I_{in}(s)] \quad \text{Eq. 10-1}$$

E viceversa:

$$[I_{in}(s)] = [H^{-1}_{mn}(s)][I_{om}(s)] \quad \text{Eq. 10-2}$$

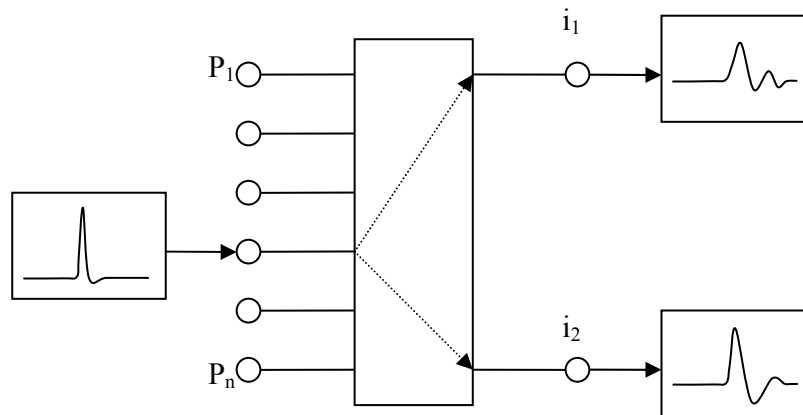


Figura 10-5: Mappatura della bobina. Iniettando un segnale noto in ognuno degli n punti che si possa ragionevolmente ritenere un ingresso del sistema, si ottengono in uscita n coppie di segnali. La relazione tra ingressi ed uscite formerà la mappa della relazione tra ingresso e coppie di uscite.

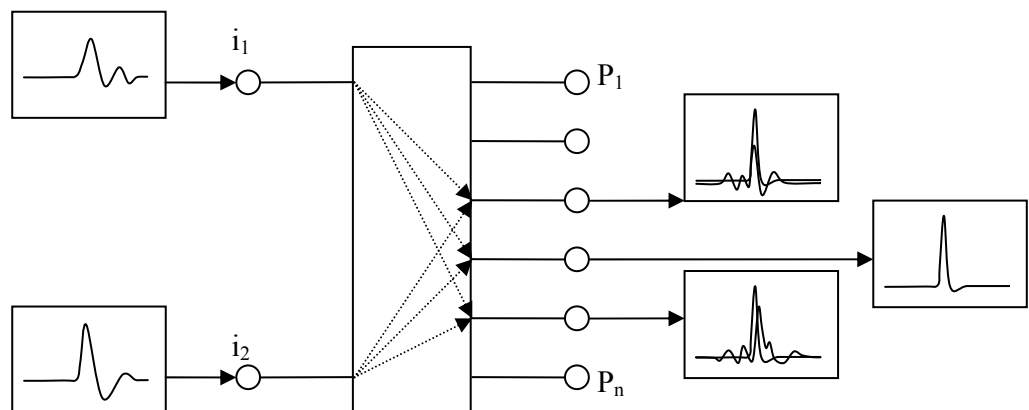


Figura 10-6: Rilievo del punto di origine del segnale e delle caratteristiche dello stesso. A seguito di un segnale originato da uno degli ingressi si rileva, alle uscite, un coppia di segnali. Per ogni coppia di segnali si ricostruisce, tramite le funzioni di trasferimento, l'ipotetica forma che il segnale avrebbe avuto se originato da uno degli n ingressi. Ovviamente, se il segnale in ingresso è unico, il punto di origine dello stesso corrisponde al punto per il quale i segnali ricostruiti, a partire dalle due uscite, ha la massima somiglianza.

10.3.1 Prove

Al fine di valutare il metodo proposto ed i relativi limiti sono state condotte una serie di prove su sei bobine in resina appartenenti a diversi trasformatori di media tensione.

Per semplificare il problema sono stati identificati tre ingressi per le bobine: i due terminali (P1 e P2) ed una presa sul commutatore (P3). Tale scelta è stata obbligata in quanto, in fase di calibrazione, l'iniezione di una corrente per via capacitiva avrebbe richiesto un generatore impulsivo avente una tensione troppo elevata.

Si deve ricordare infatti che nella misura descritta, per calcolare la funzione di trasferimento si effettua il rapporto tra due segnali ed è essenziale che il contenuto di rumore nelle grandezze utilizzate per la mappatura sia modesto per una buona riuscita della misura; i segnali utilizzati devono pertanto essere di ampiezza considerevole..

Operativamente, per l'iniezione della corrente di mappatura, si è utilizzato un generatore di impulsi di corrente ricavato da un calibratore per scariche parziali.

Il segnale iniettato è stato registrato mediante una pinza di corrente compensata per alte frequenze.

Le uscite delle bobine sono state connesse al potenziale di terra tramite due condensatori di tipo ceramico posti in serie a due resistenze di valore pari 50 Ohm con funzione di derivatore.

Una volta effettuata la mappatura come descritto, si è passati alla fase di identificazione del punto di iniezione del segnale. Attraverso un nuovo generatore, si è iniettato nei vari punti di ingresso un impulso di corrente avente caratteristiche dinamiche diverse dall'impulso utilizzato per la mappatura, registrando i segnali in tensione rilevati alle due uscite.

I risultati della prova sono riportati nelle figure che seguono; si noti che il segnale iniettato, è stato anche misurato e che la ricostruzione dello stesso a partire dai segnali di uscita è conforme a quanto iniettato.

Si conclude pertanto che in questa situazione il metodo proposto si è rivelato efficace riuscendo a discriminare sia il punto di origine del segnale che la forma dell'impulso iniettato.



Figura 10-7: Bobina di media tensione appartenente ad un trasformatore da 50 kVA – 20 kV.



Figura 10-8 Bobina di media tensione appartenente ad un trasformatore da 1250 kVA – 30 kV.



Figura 10-9: Calibratori, auto costruiti, utilizzati per il rilevamento delle funzioni di trasferimento della bobina.

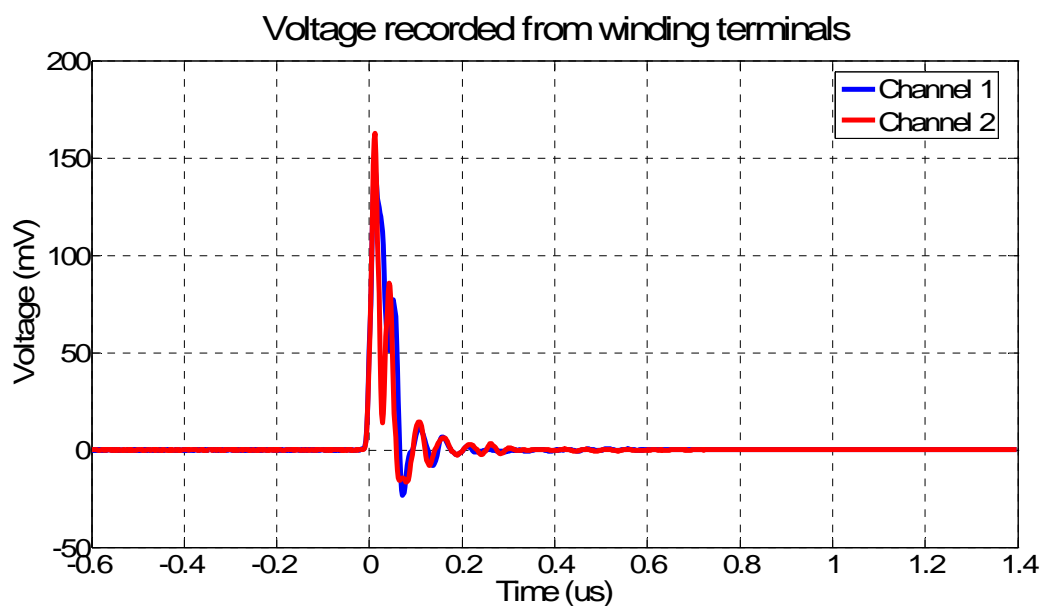


Figura 10-10: Tensioni rilevate ai terminali della bobina (Ai capi degli shunt da 50 Ohm).

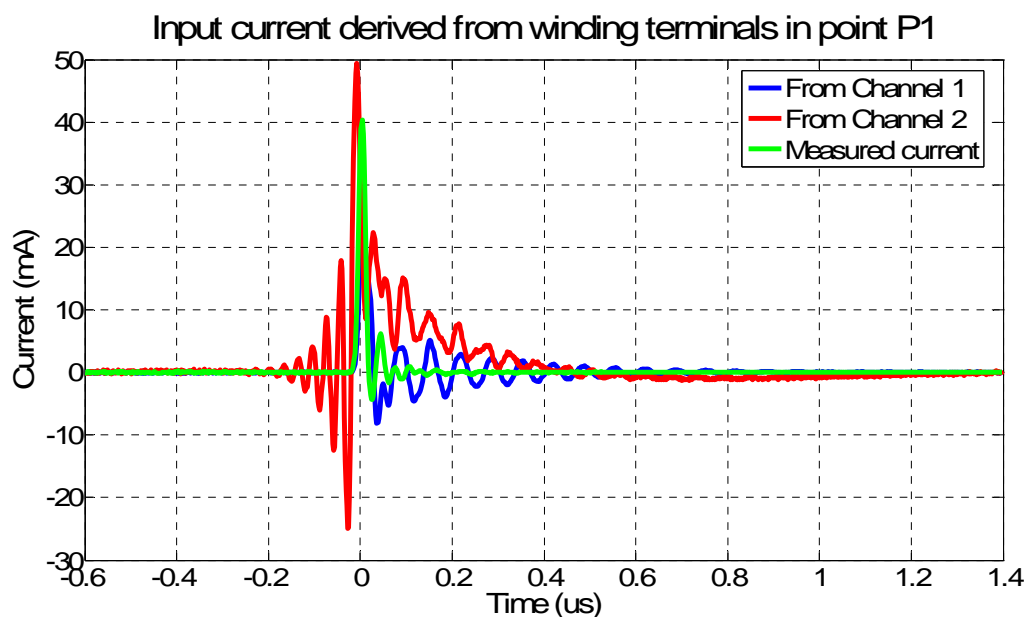


Figura 10-11: Ricostruzione, a partire dalle uscite del segnale di corrente al punto P1. Si noti che non vi è correlazione tra i segnali e pertanto il punto P1 non può essere considerato come ingresso.

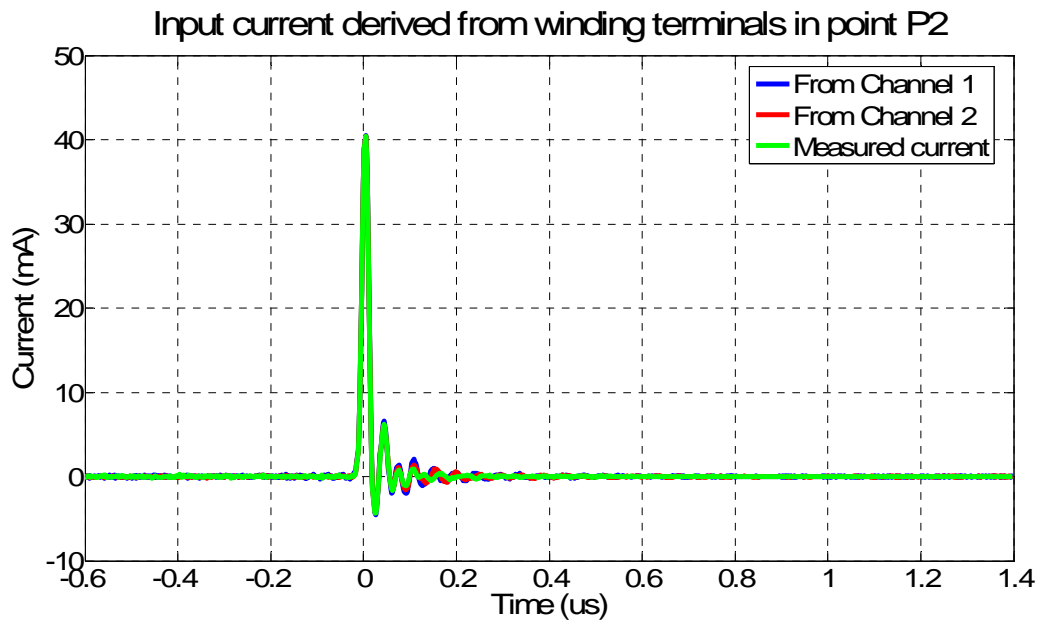


Figura 10-12: Ricostruzione, a partire dalle uscite del segnale di corrente al punto P2. Si noti che vi è una buona correlazione tra i segnali e tra questi ed il segnale iniettato e pertanto il punto P2 può essere considerato come ingresso e la forma dei segnali ricostruiti come la forma dell'impulso di corrente.

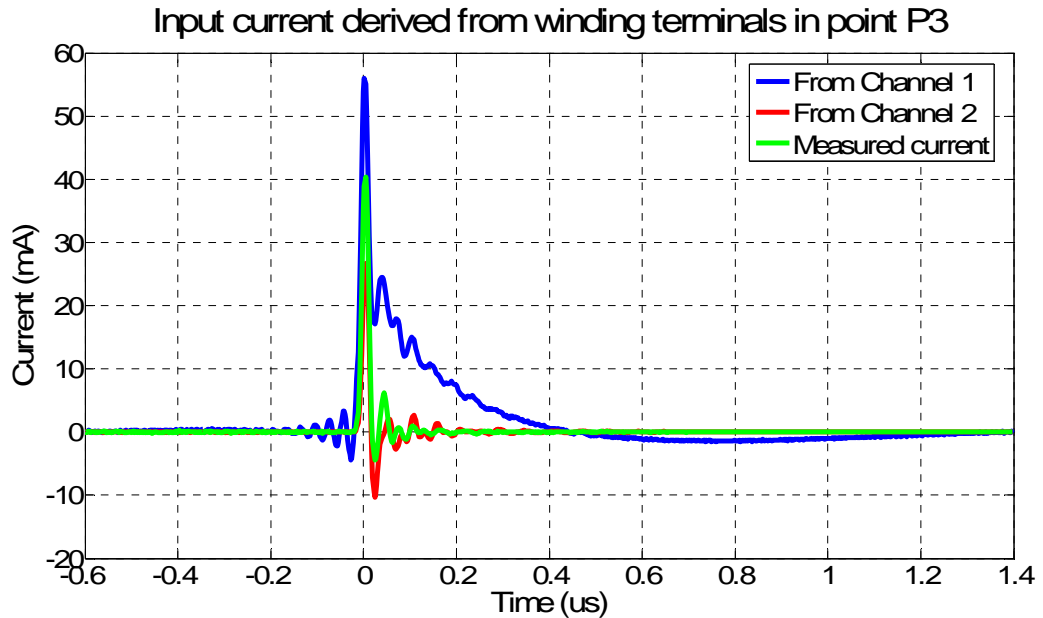


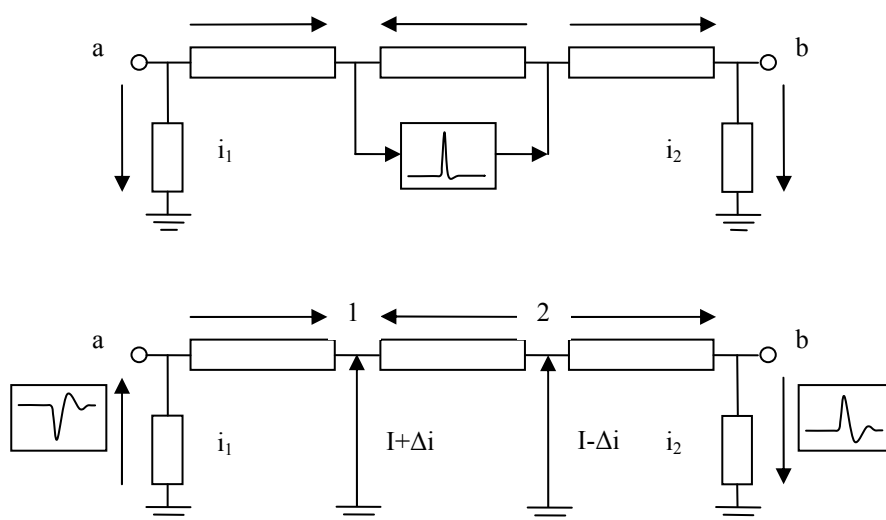
Figura 10-13: Ricostruzione, a partire dalle uscite del segnale di corrente al punto P3. Si noti che non vi è correlazione tra i segnali e pertanto il punto P3 non può essere considerato come ingresso.

10.4 Sviluppo del metodo

La teoria del metodo a mappatura di funzione di trasferimento fin qui proposto ha sempre considerato l'unicità del segnale iniettato.

Nel caso di scariche parziali tra punti diversi dell'avvolgimento, l'ipotesi posta perde di validità in quanto tutto va come se fossero iniettate due correnti diverse nei due punti dell'avvolgimento.

In realtà l'ipotesi fatta è troppo restrittiva in quanto come è risaputo dalla teoria un segnale qualsivoglia può essere scomposto in due segnali, uno di modo comune ed uno di modo differenziale. In definitiva il segnale prodotto tra due punti distinti dell'avvolgimento può essere visto come una coppia di segnali verso terra di opportuna entità.



Il calcolo dei due punti di origine del segnale può essere pertanto svolto in analogia a quanto fatto nel caso del segnale singolo. In questo caso bisogna però considerare le coppie di punti: i segnali in uscita devono essere visti come la somma di due segnali, ognuno dovuto ad una ipotetica corrente nel punto di iniezione.

$$\begin{cases} I_1(s) = H_{1a}(s)(I + \Delta i) + H_{2a}(s)(I - \Delta i) \\ I_2(s) = H_{1b}(s)(I + \Delta i) + H_{2b}(s)(I - \Delta i) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1a}(s) & H_{2a}(s) \\ H_{1b}(s) & H_{2b}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (I + \Delta i) \\ (I - \Delta i) \end{bmatrix}$$

È chiaro che il numero di tentativi da fare per trovare la coppia di punti è molto più elevato di quanto necessario nel caso di impulsi singoli verso terra. Anche

il numero di punti da mappare deve essere elevato in quanto è ragionevole che una scarica differenziale abbia luogo tra punti geometricamente molto vicini.

10.5 Conclusioni

A conclusione delle prove effettuate si è rilevata una sostanziale differenza tra segnali iniettati direttamente verso terra e segnali di modo differenziale. Si è dimostrata la possibilità di arrivare a discriminare in modo semplice le due tipologie di fenomeno e la capacità del metodo di riconoscere sia il punto di iniezione che l'andamento temporale pure per i segnali di tipo differenziale.

I segnali iniettati verso terra presentano una polarità omologa mentre i segnali iniettati in modo differenziale presentano polarità opposta ai due terminali. Si aggiunge che tipicamente i segnali di tipo differenziale sono rilevati con intensità generalmente inferiore rispetto ai segnali di modo comune in quanto per i primi vi è un ricircolo di corrente all'interno della bobina.

I segnali di tipo differenziale sono però simmetrici e la differenza tra i canali generalmente produce un segnale più robusto rispetto al rumore. Una volta identificato il tipo di segnale rilevato si deve ricercare la forma e l'origine del fenomeno.

Si rammenti che dato che solo una parte degli ingressi sono stati mappati, nei casi pratici la ricostruzione del fenomeno e del punto di iniezione sarà approssimata.

Se il segnale è di tipo comune è sufficiente la ricostruzione ai vari ingressi rilevando il punto al quale i segnali ricostruiti differiscono di meno mentre per quanto riguarda i segnali di tipo differenziale è necessaria una mappatura ed un rilievo molto più accurati.

Nella misura proposta è da tenere presente l'importanza della scelta dei punti di mappatura: , tali punti dovranno essere in un numero necessario e sufficiente alla corretta individuazione del punto di origine, mappature eccessive potranno portare ad errori nella corretta identificazione del punto di iniezione.

Anche la scelta del sistema di misura e della apparecchiatura per l'iniezione del segnale dovrà essere opportuna. Il segnale iniettato dovrà avere la massima ampiezza spettrale e il sistema di misura dovrà essere adeguato per poter ricostruire i segnali con la massima fedeltà.

Dovrà essere considerata anche la reiezione del rumore in fase di mappatura.

11 Appendice: Distribuzione di Weibull

11.1 Introduzione

La distribuzione di WEIBULL è uno dei modelli statistici per la rappresentazione della funzione di probabilità di una collezione di valori che spesso viene utilizzata anche nell'ambito della valutazione delle scariche parziali a fini diagnostici. [24]

La distribuzione presentata da WEIBULL nel 1951, è basata su una modellizzazione molto semplice della funzione di probabilità che consente di rappresentare in maniera ottimale, rispetto ad altre distribuzioni, molti fenomeni fisici.

La distribuzione di WEIBULL, presenta molti vantaggi che sono legati alla semplicità del modello utilizzato, e dimostra la sua utilità soprattutto in riferimento alla descrizione di fenomeni complessi che sono correlati alla probabilità di manifestazione di n fenomeni elementari aventi tutti la medesima funzione di densità di probabilità.

Un esempio di quanto esposto è il caso “dell’anello debole” ossia il caso nel quale il cedimento del sistema complessivo dipende dalla probabilità di cedimento di uno solo dei sotto sistemi elementari che lo costituiscono.

Altra particolarità del modello di WEIBULL è la capacità di descrivere molto bene fenomeni che siano correlati alla applicazione di una causa o sollecitazione in quanto il modello introduce il criterio del valore minimo o valore critico al di sotto della quale il fenomeno considerato ha probabilità nulla di verificarsi.

Rispetto ad altri modelli di distribuzione statistica, il modello di WEIBULL, non presenta solide basi teoriche ma la lacuna viene colmata da un lato dalla semplicità del modello stesso, dall’altro dalla quantità di fenomeni fisici diversi che mediante questo modello possono essere descritti in maniera ottimale.

11.2 Teoria

Data una variabile X attribuita ad una popolazione, la funzione di distribuzione della variabile X, detta F(x), può essere definita considerando il numero di elementi della popolazione per i quali sussiste che $X \leq x$, diviso per l'intero numero di elementi costituenti la popolazione.

Questa funzione fornisce la probabilità P di estrarre elementi dalla popolazione aventi $X \leq x$:

$$P(X \leq x) = F(x) \qquad \text{Eq. 11-1}$$

dove la funzione di distribuzione deve soddisfare le seguenti proprietà:

codominio limitato:

$$0 \leq F(x) \leq 1 \quad \text{Eq. 11-2}$$

monotonia crescente:

$$F(x_1) \leq F(x_2) \quad \text{se} \quad x_1 \leq x_2 \quad \text{Eq. 11-3}$$

condizioni limite definite:

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = F(-\infty) = 0 \quad \text{Eq. 11-4}$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = F(+\infty) = 1 \quad \text{Eq. 11-5}$$

Ogni funzione di distribuzione che soddisfi alle ipotesi esposte può essere descritta nella forma:

$$F(x) = 1 - e^{-\varphi(x)} \quad \text{Eq. 11-6}$$

e segue che:

$$1 - P = e^{-\varphi(x)} \quad \text{Eq. 11-7}$$

$$(1 - P)^n = e^{-n\varphi(x)} \quad \text{Eq. 11-8}$$

Questa semplice relazione dimostra la sua utilità pratica nei casi in cui si consideri che la probabilità di un evento sia legata alla probabilità di manifestarsi di una serie di eventi semplici, ognuno avente la stessa probabilità di verificarsi.

Si consideri ad esempio il caso pratico di un sistema isolante composto da n isolatori di uguale fattura. In questo caso il cedimento del sistema isolante, in assenza di altri fattori, è legato al cedimento di un singolo isolatore e dunque la probabilità di cedimento complessivo del sistema può essere commisurata alla probabilità di cedimento del singolo componente¹⁵.

Considerata dunque la probabilità P di cedimento di un singolo isolatore per i valori di tensione applicata x , la probabilità di tenuta dell'isolatore alla sollecitazione sarà data dal valore complementare:

$$1 - P \quad \text{Eq. 11-9}$$

mentre la probabilità di tenuta del sistema sarà data dal prodotto delle n singole probabilità:

¹⁵ Ovviamente in natura esistono molteplici altre situazioni in cui il ragionamento può essere applicato. Si consideri ad esempio la rottura per trazione di una catena (Weibull).

$$(1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot \dots = (1 - P)^n = e^{-n\varphi(x)} \quad \text{Eq. 11-10}$$

dunque:

$$P = 1 - e^{-n\varphi(x)} \quad \text{Eq. 11-11}$$

Esprime la probabilità di tenuta del sistema.

Per quanto detto sulle proprietà della funzione di distribuzione, $\varphi(x)$ può essere qualsiasi funzione che soddisfi le condizioni generali di essere positiva, non decrescente e che si annulli al valore critico x_u .

La più semplice funzione che si possa pensare che soddisfi a quanto esposto è:

$$\left(\frac{x - x_0}{b} \right)^m \quad \text{Eq. 11-12}$$

Dunque la funzione di distribuzione diventa:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x - x_0}{b} \right)^m} \quad \text{Eq. 11-13}$$

Quanto esposto, come già rilevato dallo stesso WEIBULL non ha alcun fondamento teorico, ma rappresenta la funzione più semplice che si possa pensare che soddisfi le condizioni generali.

A discapito della mancanza di fondamento teorico si deve però precisare che la funzione di WEIBULL si adatta bene alle tipologie di fenomeni dove la probabilità complessiva è data da combinazione di probabilità elementari ed in molti casi è migliore di tutte le altre distribuzioni disponibili.

$$\begin{cases} P(x) = 1 - e^{-[(x-x_0)/b]^m} & x > x_0 \\ P(x) = 0 & x < x_0 \end{cases} \quad \text{Eq. 11-14}$$

L'equazione esposta prende il nome di distribuzione di WEIBULL a tre parametri tre parametri principali, x_0 , b ed m .

Considerando il caso delle sollecitazioni di trazione, x rappresenta la sollecitazione o il carico applicato, x_0 la sollecitazione critica al di sotto della quale la probabilità di osservare il fenomeno è nulla, b ed m invece rappresentano i fattori di scala della distribuzione, rispettivamente pendenza e modulo.

Nella figura 1 sono rappresentate diverse funzioni di Weibull in funzione dei parametri:

$$x_0 = 3$$

$$b = 10$$

$$m = 2, 5, 10, 20$$

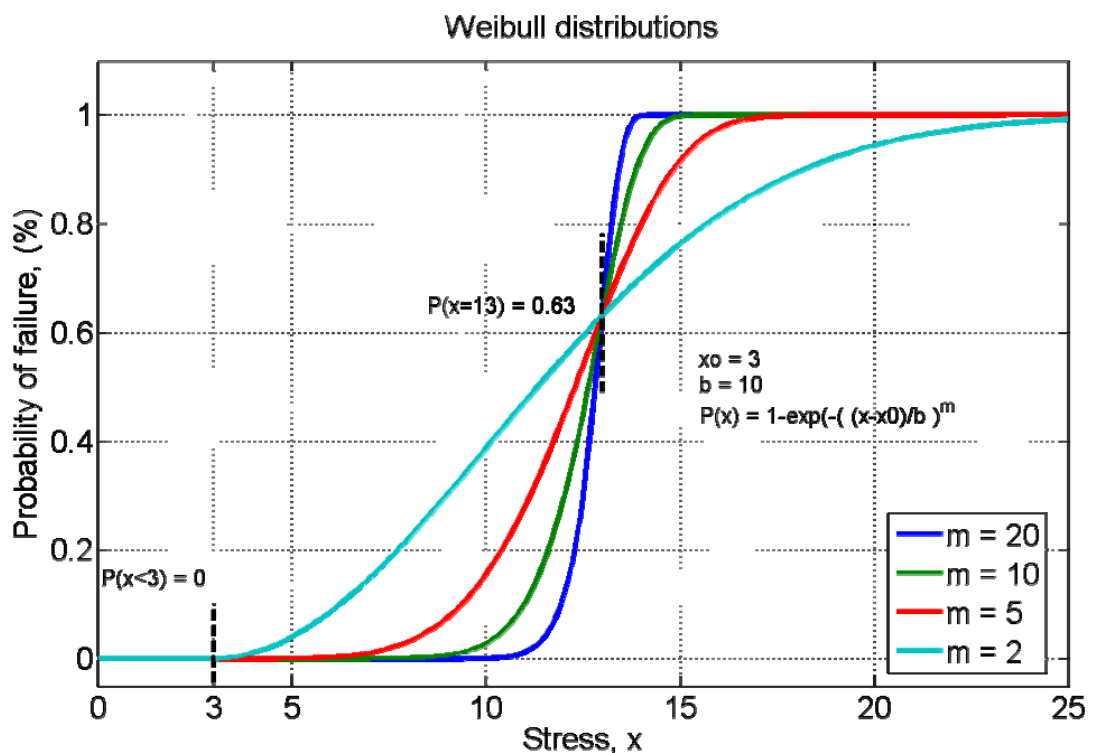


Figura 11-1: Funzione di distribuzione di WEIBULL in funzione dei parametri.

Stima dei parametri costituenti la distribuzione di WEIBULL

Data la distribuzione di WEIBULL (A.1 - 14) per ottenere i parametri x_0 , b ed m si procede tentando di linearizzare la funzione:

$$e^{-[(x-x_0)/b]^m} = \frac{1}{1-P(x)} \quad \text{Eq. 11-15}$$

Applicando il logaritmo naturale ad entrambi i termini:

$$[(x-x_0)/b]^m = \ln\left(\frac{1}{1-P(x)}\right) \quad \text{Eq. 11-16}$$

Applicando il logaritmo in base 10 si ottiene l'equazione:

$$m \cdot (\log_{10}(x-x_0) - \log_{10}(b)) = \log_{10}\left(\ln\left(\frac{1}{1-P(x)}\right)\right) \quad \text{Eq. 11-17}$$

Operando un cambio di variabile:

$$x = \log_{10}(x-x_0) \quad \text{Eq. 11-18}$$

$$y = \log_{10} \ln\left(\frac{1}{1-P(x)}\right) \quad \text{Eq. 11-19}$$

$$q = -m \log_{10}(b) \quad \text{Eq. 11-20}$$

Si ottiene la equazione di una retta del tipo $y = mx + q$, che può essere interpolata mediante una retta di regressione lineare, la cui approssimazione sarà migliore in funzione del valore di sollecitazione minima x_0 , utilizzato come parametro per minimizzare l'errore.

Dalla interpolazione si ottengono dunque i parametri m , q ed x_0 mentre il valore di b è dato da:

$$b = 10^{-\frac{q}{m}} \quad \text{Eq. 11-21}$$

Esempio

Il seguente esempio riporta l'applicazione della distribuzione di WEIBULL per la stima della probabilità di cedimento di un fibra di cotone sottoposta a sollecitazione di trazione¹⁶.

Sono stati provati, per ogni intensità di sollecitazione 3000 campioni. Per tali campioni si è calcolata la probabilità di cedimento e, attraverso la procedure precedentemente esposte si sono calcolati i parametri della distribuzione di WEIBULL.

I risultati sono in seguito riportati.

Numero totale di provini per serie di prove NT = 3000						
x	n	P	x	y	PW	nW
(Sollecitazione in grammi)	(Numero di cedimenti)	(Probabilità (n/NT+1))	$\log_{10}(x-x_0)$	$\text{Log}_{10}\{\text{Ln}[1/(1-P)]\}$	(Probabilità secondo WEIBULL)	(Numero di cedimenti secondo WEIBULL)
1	117	0,03899	-0,387	-1,400	0,039	118
2	667	0,22226	0,149	-0,600	0,215	645
3	1219	0,40620	0,382	-0,283	0,410	1232
4	1729	0,57614	0,533	-0,066	0,584	1751
5	2153	0,71743	0,644	0,102	0,720	2162
6	2465	0,82139	0,733	0,236	0,820	2461
7	2664	0,88770	0,807	0,340	0,889	2667
8	2813	0,93735	0,870	0,443	0,934	2802
9	2887	0,96201	0,925	0,515	0,962	2886
10	2933	0,97734	0,974	0,578	0,979	2937
11	2962	0,98700	1,017	0,638	0,988	2966
12	2985	0,99467	1,057	0,719	0,994	2982
13	2991	0,99667	1,094	0,756	0,997	2991
14	2995	0,99800	1,127	0,793	0,998	2996
15	2999	0,99933	1,159	0,864	0,999	2999
16	3000	0,99967	1,188	0,903	1,000	3000

Regressione	
m	1,46
q	-0,83
errore	99,98

Parametri WEIBULL	
x0	0,59
m	1,46
b	3,73

Tabella 13: Calcolo dei coefficienti della distribuzione di Weibull

¹⁶ Esempio citato nell'articolo originale

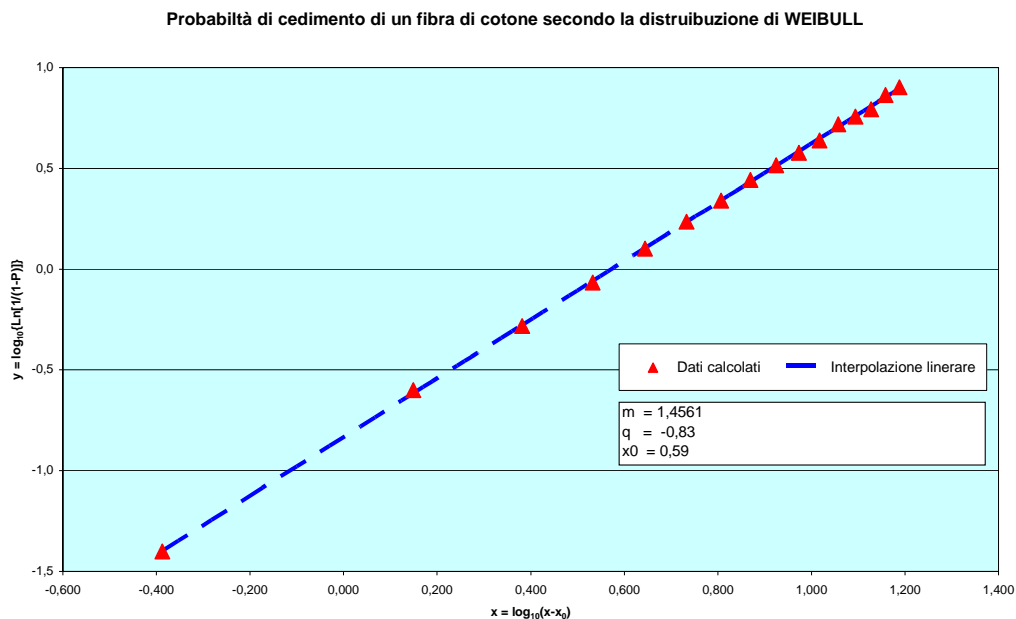


Figura 11-2: Retta per ottenere la stima dei parametri della funzione di WEIBULL

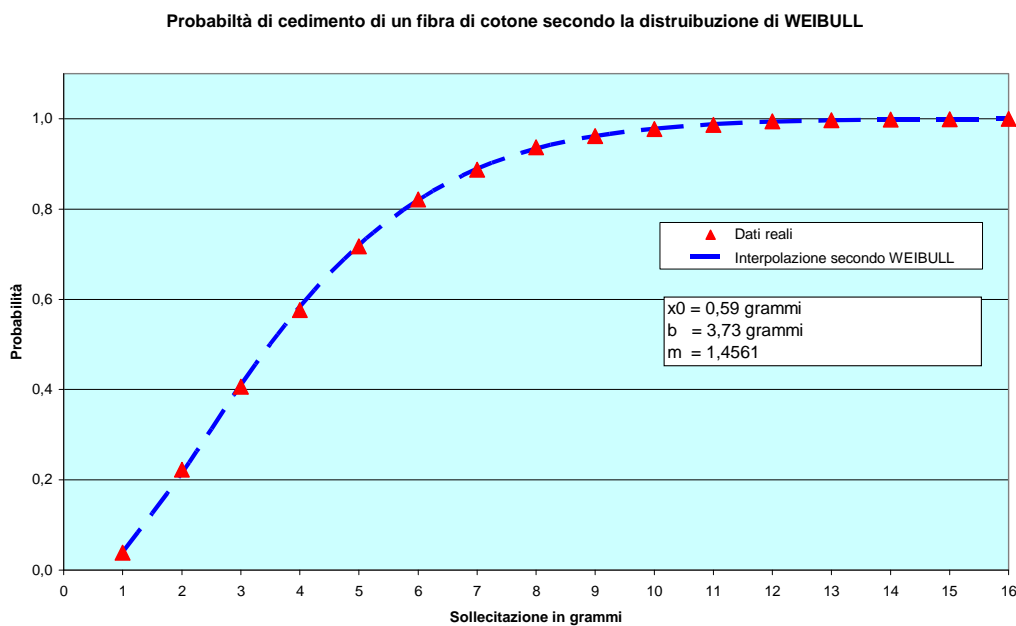


Figura 11-3: Interpolazione della probabilità mediante distribuzione di WEIBULL

12 Bibliografia

Libri:

- [1] J.H. Mason, "The deterioration and breakdown of dielectrics resulting fro internal discharges" Proc. Inst. Elect. Eng. Pt. I, 98, 44, 1951.
- [2] Raether, H.: Electron Avalanches and Breakdown in Gases. Butterworths, London (1964)
- [3] CEI EN 60060-2 "Tecniche di prova ad alta tensione - Parte 2 - Sistemi di misura", 1998-3. G. Zingales, "Metodi per la misura delle scariche parziali negli isolanti ad alta tensione", L'Elettrotecnica, n. 2 vol. LIV – 1967.
- [4] G. Zingales: "Misure elettriche, metodi e strumenti", UTET 1992.
- [5] L. Cohen, "Time-Frequency Analysis" Prentice Hall Signal Processing Series, Alan V. Oppenheim, Series editor 1995.
- [6] M.S. Naidu, W.Kamaraju "High Voltage Engineering", 2nd edition, Tata - McGraw Hill, 1995.
- [7] D. Kind, K. Feser: "High Voltage Test Techniques", 2nd edition Newnes, Oxford, 2001.
- [8] F. H. Kreuger "Partial discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths, 1989.CEI EN 60270 "Tecniche di prova ad alta tensione - Misura delle scariche parziali", Terza Edizione 2002-6.
- [9] G. Baldo, G. Pesavento, "Tecnica delle Alte Tensioni", Cleup 2004
- [10] E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel: "High Voltage Engineering: Fundamentals", 2nd edition Newnes, Oxford, 2005.

Normative:

- [11] CEI EN 60270: Tecniche di prova in alta tensione - Misure di scariche parziali
- [12] CEI EN 60076 – 11: Trasformatori di potenza – Parte 11: Trasformatori di tipo a secco
- [13] CEI EN 60216 – 5: Materiali isolanti elettrici - Proprietà di resistenza alla sollecitazione termica Parte 5: Determinazione dell'indice relativo di resistenza alla sollecitazione termica (RTE) di un materiale isolante. (norma corredata di un programma di calcolo)
- [14] Recognition of Discharges. Proceedings of CIGRE, Electra 11 (1969) p.61
- [15] IEC 62478: High-voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods

Tesi:

- [16] Morshuis, P.H.F., “Partial Discharge Mechanisms”. Ph.D. Thesis TU Delft (1993)
- [17] Scroccaro, A. “Metrologia delle scariche parziali” Tesi di dottorato Padova, 2003.

Articoli:

- [18] Ceretta C., Gobbo R., Pesavento G., “Analisi Delle Scariche Parziali In Modalita’ Tempo Frequenza”, XXII Congresso Nazionale GMEE 2005, A2/9.
- [19] Ceretta C., Gobbo R., Pesavento G., “Valutazione Dell’influenza Del Rumore Nelle Analisi Tempo frequenza”, XXIII Congresso Nazionale GMEE 2006 pag. 131
- [20] Ceretta C., Gobbo R., Pesavento G., “Valutazione Dei Sistemi Di Acquisizione Delle Scariche Parziali In Modalità UWB (Ultra Wide Band)”, XXIV Congresso Nazionale GMEE 2007 pag. 239
- [21] Ceretta C., Gobbo R., Pesavento G., “Application Of Ultra Wide Band Partial Discharge Measuring Systems For Diagnostic Purposes” 15th International Symposium on High Voltage Engineering, T7-701.

Anno 1951:

- [22] Mason, J.H., “The Deterioration and Breakdown of Dielectrics Resulting from Internal Discharges”. Proceedings IEE 98 (1951) pp. 44-59
- [23] Bartnikas, R., D’ombrain, G.L., “A Study of Corona Discharge Rate and Energy Loss in Spark Gaps. IEEE Transactions Power Systems and Apparatus”, PAS-84 (1965) 9, pp. 770-779
- [24] Weibull, W. (1951) "A statistical distribution function of wide applicability" J. Appl. Mech.-Trans. ASME 18(3), 293-297

Anno 1978:

- [25] Mason, J.H., “Discharges. IEEE Transactions on Electrical Insulation”, EI-13 (1978) 4, pp. 211-238

Anno 1986:

- [26] Zaengl, W.S., Osvath, P., “Correlation between the Bandwidth of PD Detectors and its Inherent Integration Errors.” ISEI Washington DC (1986)

Anno 1987:

- [27] Bartnikas R., “A Commentary On Partial Discharge Measurement And Detection”, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-22 No,5, October 1987.

Anno 1988:

- [28] Mazzetti C, Pompili M., Schifani R., “A comparative evaluation of partial discharge inception voltage of power transformer liquids”, Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference, 1988

Anno 1989:

- [29] Gulski E., Kreuger F.H., “Digital computer system for measurement of partial discharges in insulation structures”, Proceedings of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1989.

Anno 1990:

- [30] Steiner J.P., Weeks W.L., "A new method for locating partial discharges in transformers", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1990. Annual Report., 1990

Anno 1991:

- [31] Gulski E., Kreuger F.H., "Recognition of partial discharge sources using statistical tools", International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo 8-12 July 1991.
- [32] Hozumi N., Okamoto T., Imajo T., "Discrimination of Partial Patterns Using a Neural Network", International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo 8-12 July 1991.
- [33] Morshuis P.H.F., Kreuger F.H., "The evolution of the discharge mechanism in a dielectric bounded cavity due to surface effects", International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo 8-12 July 1991.

Anno 1992:

- [34] Gulski E., Kreuger F.H., "Computer-aided recognition of Discharge Sources", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 27 No. 1, February 1992.
- [35] Gulski E., Kreuger F.H., "Diagnostics of insulating systems using statistical tools", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, MD USA, June 7-10, 1992.
- [36] Hozumi N., Okamoto T., Imajo T., "Discrimination of Partial Patterns Using a Neural Network", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 27 No. 3, June 1992.
- [37] Morshuis P.H.F., Kreuger F.H., "A relation between time-resolved discharge parameters and ageing", Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, 1992.

Anno 1993:

- [38] Amira A., Mazroua, Salama M. M. A., Bartnikas R. , "PD Pattern Recognition with Neural Networks Using the Multilayer Perception Technique", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28 No. 6, December 1993.
- [39] Gulski E., "Computer-aided measurement of partial discharges in HV equipment", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28 No. 6, December 1993
- [40] Gulski E., "Discharge pattern recognition in high voltage equipments", International Conference on Partial Discharge, 1993
- [41] Gulski E., Krivda A., "Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28 No. 6, December 1993.
- [42] Kreuger F. H., Gulski E., Krivda A., "Classification of Partial Discharges", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28 No. 6, December 1993.
- [43] Krivda A., Gulski E., "Neural networks as a tool for recognition of partial discharges", International Conference on Partial Discharge, 1993.

Anno 1994:

- [44] Contin A., Cacciari M., Montanari G. C., “Estimation of weibull distribution parameters for partial discharge inference”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1994. IEEE 1994 Annual Report.
- [45] Gulski E., Morshuis P.H.F., Kreuger F.H., “Conventional and Time-Resolved Measurements of Partial Discharges as a Tool for Diagnosis of Insulating Materials”, International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 34,1994, Brisbane Australia.
- [46] June-Ho Lee, Naohiro Hozumi, Tatsuki Okamoto, “Discrimination of phase-shifted partial discharge patterns by neural network using standardization method”, Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, June 5-8, 1994.
- [47] Wenzel D., Borsi H., Gockenbach E., “Partial Discharge Recognition and Localization on Transformers via Fuzzy Logic”, Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, June 5-8, 1994.

Anno 1995:

- [48] Contin A., Gulski E., Cacciari M., Montanari G. C., ”Applications of the Weibull Function to Partial Discharge Data Coming from Different Sources Typologies”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report 1995. 22-25 Oct 1995.
- [49] Bozzo R., Contin A., Cacciari M., Gustavino F., Gemme C., Montanari G. C., “Stochastic analysis of partial discharge patterns deriving from electrical tree measurements”, IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1995.
- [50] Cacciari M., Contin A., Rabach G., G.C. Montanari, “An approach to partial-discharge investigation by height-distribution analysis”, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 142, No. 1 , January 1995.
- [51] Gulski E., “Diagnosis of HV Components by Digital PD Analyzer”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 4, August 1995.
- [52] Gulski E., “Digital Analysis of Partial Discharges”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 5, October 1995.
- [53] Gulski E., “Discharge pattern recognition in high voltage equipment”, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 142, No. I , January 1995.
- [54] Krivda A., Gulski E., “Classification of discharge patterns during ageing of insulation”, IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown m Solid Dielectrics, 1995.
- [55] Krivda A., Gulski E., Satish L., Zaengl W. S., “The Use of Fractal Features for Recognition of 3-D Discharge Patterns”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 5, October 1995.
- [56] Morshuis P., Gulski E., “Diagnostic Tools for Condition Monitoring of Insulating Materials”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995. Annual Report.
- [57] Osvath P., “Comment and Discussion on Digital Processing of PD Pulses”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 4, August 1995.

Anno 1996:

- [58] C. Moreau, Charpewtier X., "On-Line Partial Discharge Detection System for Instrument transformer", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19,1996.
- [59] Cacciari M., Contin A., Mazzanti G., Montanari G. C., "Identification and Separation of Two Concurrent Partial Discharge Phenomena", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996.
- [60] Contin A., Gulski E., Cacciari M., Montanari G. C., "A Weibull Approach to the Investigation of Partial Discharges in Aged Insulation Systems", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19,1996.
- [61] Gulski E., Zielonka A., "Application of Digital Partial Discharge Measuring Techniques for the Diagnosis of High Voltage Generator Insulation", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19,1996.
- [62] Pompili M., Mazzetti C., Bartnikas R. , "Simultaneous measurements of pd in oil using conventional narrow band and ultra wide band detection systems", 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Roma, Italy, July 15 - 19,1996.
- [63] Syed M. Islam, Gerard Ledwich, "Locating Transformer Faults Through Sensitivity Analysis of High Frequency Modeling Using Transfer Function Approach", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19,1996.
- [64] Yong-Iian Yoon, Jae-Chul Kim, Jong-Keun Park, "A neural network approach for on-line estimation of partial discharge location in power transformer using advanced correlation technique", International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, 1996. Proceedings, ISAP '96., 1996

Anno 1998:

- [65] Wang Z. D., Zhu D. H, "Simulation on propagation of partial discharge pulses in transformer windings", International Symposium on Electrical Insulating Materials, in conjunction with 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation and the 30th Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan, Sept. 27-30, 1998.

Anno1999:

- [66] Cavallini A., Ghinello I., Mazzanti G., Montanari G. C., "Considerations on the Life Performance and Installation Practice of Shunt Capacitors in the Presence of Harmonics Generated by AC/DC Converter", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999.
- [67] Gulski E., Smit J.J., Brooks R., Turner M., "Experiences with Digital Analysis of Discharges in High Voltage Components", IEEE Electrical Insulation Magazine May June 1999 -Vol. 15, No. 3, 1999.
- [68] Mirelli G., Schifani R., "A Novel Method for the Recognition of PD Patterns by Neural Network", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999.

- [69] Morshuis P.H.F., Cavallini A., G.C Montanari, Puletti F., Contin A., “Theoretical and experimental derivation of partial discharge height distribution models”, Conference on Electrical insulation and Dielectric Phenomena 1999.
- [70] Schifani R., Candela R., “A New Algorithm for Mixed Weibull Analysis of Partial Discharge Amplitude Distributions”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 6 No. 2, April 1999.
- [71] Wang Z. D., Crossley P. A., , “Partial discharge location in power transformers using the spectra of the terminal current signals”, High Voltage Engineering Symposium. 22-27 August 1999 Conference Publication No. 467, IEE, 1999.
- [72] Zondervan J.P., Gulski E., Smit J.J., Grun T., Turner M., “A new multi-purpose partial discharge analyzer for on-site and on-line diagnosis of high voltage components”, High Voltage Engineering Symposium. 22-27 August 1999 Conference Publication No. 467, IEE, 1999.

Anno 2000:

- [73] Candela R., Mirelli G. , Schifani R., “PD Recognition by Means of Statistical and Fractal Parameters and a Neural Network”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Installation Vol. 7 No. 1, February 2000.
- [74] Contin A., Cavallini A., Montanari G. C., Pasini G., Puletti F., “Artificial Intelligence Methodology for Separation and Classification of Partial Discharge Signals”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000.
- [75] Contin A., Montanari G. C., Cavallini A., Pasini G., Puletti F., “Stochastic Analysis of Partial Discharges Signals for Diagnosis of Insulation Systems of AC Rotating Machine Stator Windings”, IEEE IAS, pp. 359-366, Roma, Italia, October 2000.
- [76] Di Lorenzo del Casale M., Schifani R., “Investigation of temperature effect on an epoxy resin: aging due to partial discharges”, Dielectric Materials, Measurements and Applications Conference Publication No. 473,O IEE 2000.
- [77] Di Lorenzo del Casale M., Schifani R., “Partial Discharge Tests Using CIGRE Method II”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Installation Vol. 7 No. 1, February 2000.
- [78] Gao Wensheng, Tan Kexiong, “Study on the influence of pulse propagation in transformer winding on partial discharge pattern recognition”, 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 21-26,2000, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, 2000.
- [79] Gulski E., Burger H. P., Vaillancourt G. H., Brooks R., “PD Pattern Analysis During Induced Test of Large Power Transformers”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, Feb. 2000.
- [80] Montanari G. C., Contin A., Cavallini A., “Random Sampling and Data Processing for PD-pulse Height and Shape Analysis”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 7, No. 1, February 2000.
- [81] Morshuis P.H.F., Cavallini A., G.C Montanari, Puletti F., Contin A., “The Behavior of Physical and Stochastic Parameters from Partial Discharges in Spherical Voids”, Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 21-26,2000, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, 2000.

- [82] Olivieri M.M. de A., Mannheimer W. A., Ripper-Neto A.P., “On the Use of Acoustic Signals for Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, April 2-5, 2000.
- [83] Shields A.J., Kemp I.J., “Degradation and breakdown of mica under partial discharge stressing: transverse discharges”, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol. Vol. 147, No. 5. Sept. 2000.
- [84] Shields A.J., Kemp I.J., “Degradation and breakdown of mica under partial discharge stressing”, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol. Vol. 147, No. 3. May 2000.
- [85] Wang Z.D., Crossley P. A., Comick K. J., D.H. Zhu, “An Algorithm for Partial Discharge Location in Distribution Power Transformers”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000.
- [86] Werle P., Borsi H., Gockenbach E., “A New Method for Partial Discharge Location on Power Transformers Based on a System Theoretical Approach”, 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 21-26,2000, Xi’an Jiaotong University, Xi’an, China, 2000.

Anno 2001:

- [87] Candela R., Schifani R., “Diagnosis Of HV Capacitive Insulators By Partial Discharge Measurements”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001 Annual Report.
- [88] Candela R., Schifani R., Romano P., “Optimization of a Numerical Model for Analysis of Partial Discharge Phenomena in a Flat Cavity”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001 Annual Report.
- [89] Cavallini A., Conti M., Contin A., Montanari G. C., Pasini G., “An integrated diagnostic tool Based on PD measurement,” EIC 2001, pp 219-224, Cincinnati, USA, October 2001.
- [90] H. Tatizawa, G. F. Burani, “Analysis and location of partial discharges in power transformers by means of electrical methods”, CIRED2001. 18-21 June 2001, Conference Publication No. 482 IEE 2001.

Anno 2002:

- [91] Cavallini A., Conti M., Contin A., Montanari G. C., “Inferring Partial Discharge Identification Through Fuzzy Tools”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002.
- [92] Akumu A. O., Adachi F. , Kawaguchi N., Ozaki R., Ihuri H., Fujii M., Arii K., “A 3-0 Numerical Simulation of Partial Discharge Acoustic Wave Propagation in a Model Transformer”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10,2002.
- [93] Bartnikas R. , “Partial Discharges Their Mechanism, Detection and Measurement”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 9 No. 5,October 2002.
- [94] Cavallini A., Conti M., Montanari G. C., Contin A., Candela R., Romano P., Schifani R., “Searching for PD-Based Indexes able to infer the location of internal defects in insulation”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002.
- [95] Contin A., Cavallini A., Montanari G. C., Pasini G., Puletti F., “Digital Detection and Fuzzy Classification of Partial Discharge Signals”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 9, No. 3, June 2002.

- [96] Hettiwatte S. N., Crossley P. A., Wang Z. D., Darwin A., Edwards G., "Simulation of a Transformer Winding for Partial Discharge Propagation Studies", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002.
- [97] Hettiwatte S. N., Wang Z. D., Crossley P. A., Darwin A., Edwards G., "Experimental Investigation into the Propagation of Partial Discharge Pulses in Transformers", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002.
- [98] Judd M.D., Cleary G.P., Bennoch C.J., "Applying UHF Partial Discharge Detection to Power Transformers", IEEE Power Engineering Review, August 2002.
- [99] Li Yanqing, Lu Fangcheng, Xin Baoan, Chen Zhiye, "A New Method Using Ultrasonic for Partial Discharge Pattern Recognition", International Conference on Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002.
- [100] Qin Shaozhen, Birlasekaran S., "The study of propagation characteristics of partial discharge in transformer", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002.
- [101] Werle P., Borsi H., Gockenbach E., "Diagnosing the Insulation Condition of Dry Type Transformers using a Multiple Sensor Partial Discharge Localization Technique", Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2002.

Anno 2003:

- [102] Akbari, A., Borsi, H., Gockenbach, E., Werle, P., "An Enhanced System for Partial Discharge Diagnosis on Power Transformers." 13th ISH Delft (2003) paper P.11.09
- [103] Borsi, H., Gockenbach, E., "Partial Discharge Measurement and Evaluation Techniques for Transformers." 13th ISH Delft (2003) paper O.24.05
- [104] Cavallini A., Conti M., Contin A., Montanari G. C., Puletti F., "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part 2: Identification of Defects in Solid Insulation Systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 3; June 2003.
- [105] Cavallini A., Conti M., Montanari G. C., Contin A., Puletti F., "Partial Discharge Cross-Talk Recognition in Rotating Machines by Pulse Shape Analysis: Preliminary Results", IEEE EIC 2001, pp 33-38, Indianapolis, USA, September 2003.
- [106] Cavallini A., Contin A., Montanari G. C., Puletti F., "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part I: Noise Rejection", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 2; April 2003.
- [107] Cavallini A., Montanari G. C., Contin A., Puletti F., "A New Approach to the Diagnosis of Solid Insulation Systems Based on PD Signal Inference", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 19, No. 2, pp. 23-30, April 2003.
- [108] Cavallini A., Montanari G. C., Contin A., Qinxue Y., "Techniques for off-line measurement and analysis of PD pulses in inverter-fed induction motors", 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 1-5 2003 Nagoya, 2003
- [109] Cavallini A., R. Ciani, Conti M., P. F. H. Morshuis, Montanari G. C., "Modeling memory phenomena for partial discharge processes in insulation cavities", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report 2003.
- [110] Hettiwatte S. N., Wang Z. D., Crossley P. A., P. Jarman, Edwards G., Darwin A., "An Electrical PD Location Method Applied to a Continuous Disc Type Transformer Winding", 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 1-5 2003 Nagoya, 2003.

- [111] Kbwaja R. H., Ariastina W. G., Blackburn T. R., "Partial Discharge Behavior in Oil-Impregnated Insulation", 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 1-5 2003 Nagoya.
- [112] Macia-Sanahuja C., Lamela-Rivera H., "Wavelet Analysis of Partial Discharges Acoustic Waves obtained using an Optical Fiber Interferometric Sensor for Transformer Applications", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2003. ISIE '03. 2003.
- [113] Montanari G. C., Conti M., R. Ciani, Cavallini A., Mazzanti G., Serra S., "First electron availability and PD generation in insulation cavities", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report 2003.
- [114] Yazici B., "Statistical Pattern Analysis of Partial Discharge Measurements for Quality in High Assessment of Insulation Systems Voltage Electrical Machinery", Symposium on Diagnostic for Electric Machines, Power Electronics and Drives Atlanta, Georgia, GA USA 24-26, August 2003.

Anno 2004:

- [115] Abdel-Galil T. K., Hegazy Y. G., Salama M. M. A., Bartnikas R. , "Partial Discharge Pulse Pattern Recognition Using Hidden Markov Models", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 4; August 2004.
- [116] Borghetto J., Cavallini A., Contin A., Montanari G. C., De Nigris M., Pasini G., Passaglia R., "Partial Discharge Inference by an Advanced System. Analysis of Online Measurements Performed on Hydrogenerator", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 19, NO. 2, JUNE 2004.
- [117] Cavallini A., Ciani F., Montanari G. C., "Improved identification level for defects generating partial discharges in solid insulation systems", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report 2004.
- [118] Cavallini A., Conti M., Contin A., Montanari G. C., Puletti F., "A New Algorithm for the Identification of Defects Generating Partial Discharges in Rotating Machines", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis. IN USA, 19-22 September 2004.
- [119] Cavallini A., Conti M., Montanari G. C., Arlotti C., Contin A., "PD Inference for the Early Detection of Electrical Treeing in Insulation Systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 4; August 2004.
- [120] Cavallini A., Montanari G. C., Olivieri M., Puletti F., "Diagnostic evaluations of electrical apparatus by a novel partial discharge measurement system", International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004 Singapore, 21-24 November 2004.
- [121] Fabiani D., Cavallini A., Mazzanti G., Montanari G. C., "The Effect of Charge Mobility on Partial Discharge Characteristics of Enamelled Wires for PWM-Controlled Motors", International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, July 5-9, 2004.
- [122] Fabiani D., Cavallini A., Montanari G. C., Caprara A., "A Technique for Defect Investigation in Pulse-Controlled Motors through Partial Discharge Measurements", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis. IN USA, 19-22 September 2004.
- [123] Fabiani D., Montanari G. C., Cavallini A., Mazzanti G., "Relation Between Space Charge Accumulation and Partial Discharge Activity in Enamelled Wires Under PWM-like Voltage

- Waveforms”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 3; June 2004.
- [124] Gross D. W., Soller M., “Partial Discharge Diagnosis on Large Power Transformers”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN USA, 19-22 September 2004.
- [125] Qinxue Y., Cavallini A., Montanari G. C., “Frequency and Time-Domain Analysis of Partial Discharge Measurements in PWM Inverter-fed Induction Motors”, IEEE IPEMC, Volume 2, pp. 661-663, August 2004.
- [126] Vellucci E., Cavallini A., Montanari G. C., Fabiani D., “Experience on partial discharge monitoring of power transformers”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis. IN USA, 19-22 September 2004.
- [127] Yang L., Judd M. D., Bennoch C.J., “Time Delay Estimation for UHF Signals in PD location of Transformers”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004 Annual Report.
- [128] Yang L., Judd M. D., Costa G., “Simulating Propagation of UHF Signals for PD Monitoring in Transformers Using the Finite Difference Time Domain Technique”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004 Annual Report.
- [129] Yazici B., “Statistical Pattern Analysis of Partial Discharge Measurements for Quality Assessment of Insulation Systems in High-Voltage Electrical Machinery”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 40, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2004.

Anno 2005:

- [130] Cavallini A., Ciani F., Mazzanti G., Montanari G. C., “First Electron Availability and Partial Discharge Generation in Insulation Cavities: Effect of Light Irradiation”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2; April 2005.
- [131] Abdel-Galil T. K., Hegazy Y. G., Salama M. M. A., Bartnikas R. , “Fast Match-Based Vector Quantization Partial Discharge Pulse Pattern Recognition”, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 54, NO. 1, FEBRUARY 2005.
- [132] Abdel-Galil T. K., Sharkawy R. M., Salama M. M. A., Bartnikas R. , “Partial Discharge Pulse Pattern Recognition using an Inductive Inference Algorithm”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2; April 2005.
- [133] Abdel-Galil T. K., Sharkawy R. M., Salama M. M. A., Bartnikas R. , ”Partial Discharge Pattern Classification Using the Fuzzy Decision Tree Approach,” IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 54, NO. 6, DECEMBER 2005, 2005.
- [134] Cavallini A., Montanari G. C., “A New Methodology for the Identification of PD in Electrical Apparatus: Properties and Applications”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2; April 2005.
- [135] Cavallini A., Montanari G. C., Ciani F., Folesani M., “Artificial Intelligence Algorithms for the Recognition of PD-Generating Defects in Rotating Machines”, International Symposium on Electrical Insulating Materials, June 5-9, 2005, Kitakyushu, Japan, 2005.
- [136] Cavallini A., Montanari G. C., Puletti F., “A Fuzzy Logic Algorithm to Detect Electrical Trees in Polymeric Insulation Systems”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 6; December 2005.

- [137] Cavallini A., Montanari G. C., Puletti F., Calonico A., Perich A, "Improvement of Rotating Machine Production Standards by In-factory Partial Discharge Testing", Conference on Electrical Insulation and Electrical Manufacturing Expo, 2005. Proceedings, 2005.
- [138] Cavallini A., Montanari G. C., Puletti F., Franchi Bononi S., Ombrello F., Butt I., "EXPERIENCE OF TESTING POLYMERIC HV CABLE SYSTEMS BY AN INNOVATIVE PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT APPROACH", International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004 Singapore, 21-24 November 2004.
- [139] Chen Q., Wang Y., Wei X., "The UHF Method for Measurement of Partial Discharge and Interference Suppression", International Symposium on Electrical Insulating Materials, June 5-9,2005, Kitakyushu, Japan, 2005.
- [140] Dong-Jin Kweon, Sang-Bum Chin, Hee-Ro Kwak, Jae-Chul Kim, Kyung-Bin Song, "The Analysis of Ultrasonic Signals by Partial Discharge and Noise From the Transformer", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 3, JULY 2005.
- [141] Fabiani D., Cavallini A., Montanari G. C., "Aging Investigation of Motor Winding Insulation Subjected to PWM-Supply Through PD Measurements", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Annual Report 2005.
- [142] Hettiwatte S. N., Wang Z. D., Crossley P. A., "Investigation of propagation of partial discharges in power transformers and techniques for locating the discharge", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 152, No. 1, January 2005.
- [143] N. C. Sahoo, Salama M. M. A., Bartnikas R. , "Trends in Partial Discharge Pattern Classification: A Survey", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2; April 2005.
- [144] Naderi M. S., Vakilian M., Blackburn T.R., Phung B.T., "A Method for Studying Partial Discharges Location and Propagation within Power Transformer Winding based on the Structural Data", International Symposium on Electrical Insulating Materials, June 5-9,2005, Kitakyushu, Japan, 2005.
- [145] Pompili M., Mazzetti C., Bartnikas R. , "Testing, Evaluation and Standardization of Transformer Oils", IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005.

Anno 2006:

- [146] Abdel-Galil T. K., A. H. El-Hag, Salama M. M. A., Bartnikas R. , "Enhanced Partial Discharge De-Noising Technique Using Eigen-Decomposition," IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference Record of the 2006.
- [147] Cavallini A., Montanari G. C., "Effect of Supply Voltage Frequency on Testing of Insulation System", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, No. 1; February 2006.
- [148] Cavallini A., Montanari G. C., Chandrasekar S., Puletti F., "A Novel Approach for the Inference of Insulator Pollution Severity", IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference Record of the 2006.
- [149] Cavallini A., Montanari G. C., Codet B., P. Vetu, "Condition assessment of Instrument Transformer by Partial Discharge Analysis: a Comprehensive Approach", IEEE T&D, pp. 1-8, Dallas, USA, May 2006.
- [150] Cavallini A., Montanari G. C., Puletti F., "Partial Discharge Analysis and Asset Management: Experiences on Monitoring of Power Apparatus", IEEE PES T&D, pp. 1-5, Caracas, Venezuela, August 2006; Best Paper Award, 2006.

- [151] Contin A., Cavallini A., Montanari G. C., Hudon C., Bélec M., Nguyen D.N., “Searching for Indexes Suitable for Rotating Machines Diagnosis”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference Record of the 2006.
- [152] Contin A., Pastore S., “Classification of Partial Discharge Signals by Means of Auto-Correlation Function Evaluation”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference Record of the 2006.
- [153] Eldery M. A., Abdel-Galil T. K., El-Saadany E. F., Salama M. M. A., “Identification of Partial Discharge Locations in Transformer Winding Using PSD Estimation”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 2, APRIL 2006.
- [154] Jayalalitha S., Jayashankar V., “A Correlation Method for Detection of Partial Discharges in Transformers”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 1, JANUARY 2006.
- [155] Montanari G. C., “Insulation Diagnosis of High Voltage Apparatus by Partial Discharge Investigation”, IEEE ICPADM, pp 1-11, Bali, Indonesia, July 2006; Award Ziu-Yeda Memorial Lecture, 2006.
- [156] Montanari G. C., “Partial discharge measurements: becoming a fundamental tool for quality control and risk assessment of electrical systems”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference Record of the 2006.
- [157] Montanari G. C., Cavallini A., “Effect of Supply Voltage Frequency on Testing of Insulation System”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, No. 5; October 2006.
- [158] Montanari G. C., Cavallini A., Puletti F., “A New Approach to Partial Discharge Testing of HV Cable Systems”, IEEE Electrical Insulation Magazine January/February 2006 — Vol. 22, No. 1 pp. 14-23, 2006.
- [159] Pompili M., Mazzetti C., Bartnikas R. , “PD Pulse Burst Characteristics of Transformer Oils”, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 21, No. 2, April 2006.
- [160] Puletti F., Olivieri M., Cavallini A., Montanari G. C., “Localization of Partial Discharge Sources along HV and MV Cable Routes”, IPEC, pp. 1-6, Sigapur, November 2005.
- [161] Puletti F., Olivieri M., Cavallini A., Montanari G. C., “Risk Management of HV Polymeric Cables Based on Partial Discharge Assessment”, IEEE T&D, pp. 1-8, Dallas, USA, May 2006.

Anno 2007:

- [162] Cavallini A., S. Chandrasekar, Montanari G. C., Puletti F., “Inferring Ceramic Insulator Pollution by an Innovative Approach Resorting to PD Detection”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 1; February 2007.

Info: claudio.ceretta@gmail.com

klaus1978@msn.com