

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA ELETTRONICA

ELABORATO FINALE

**SISTEMA DIGITALE PER IL RILIEVO DELLE
SCARICHE PARZIALI IN BANDA ULTRA LARGA
IN TRASFORMATORI ISOLATI
IN RESINA EPOSSIDICA**

RELATORE: Ch.mo Prof. Ing. Giancarlo Pesavento

CORRELATORE: Dott. Ing. Claudio Ceretta

LAUREANDO: Luca Bottega

ANNO ACCADEMICO 2009/2010

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

Sommario

L'elaborato è stato redatto allo scopo di valutare il sistema digitale Techimp PD Base 2 per il rilievo in banda ultra larga delle scariche parziali nei trasformatori isolati in resina epossidica.

Il fine ultimo è stata la verifica in laboratorio dell'acquisizione e dell'elaborazione dei dati da parte dell'apparecchiatura in questione.

I primi sei capitoli del presente lavoro costituiscono la base teorica necessaria per introdurre il lettore al tema "scariche parziali".

Gli ultimi quattro capitoli descrivono dettagliatamente le funzionalità e le potenzialità del sistema di misura delle scariche parziali Techimp PD Base 2.

L'ultimo capitolo fornisce alcune indicazioni sulle tecniche a banda ultra larga per il rilievo dell'ubicazione dei difetti costruttivi nei trasformatori isolati in resina epossidica.

Il lavoro ha richiesto l'utilizzo dello strumento in banda larga James G. Biddle per effettuare un'analisi comparata con il sistema digitale oggetto di valutazione.

Sono stati utilizzati per le prove di laboratorio diverse tipologie di trasformatori isolati in resina epossidica, sia monofasi che trifasi.

I dati raccolti sono stati elaborati con il software PDProcessing[®] fornito insieme al sistema Techimp PD Base 2 e tramite il linguaggio di programmazione Matlab[®].

Ringrazio il relatore della tesi Prof. Ing. Giancarlo Pesavento e il correlatore Dott. Ing. Claudio Ceretta per il supporto che mi è stato fornito.

Summary

The aim of the work was to analyze the performance of an Ultra Wide Band PD measuring digital system called Techimp PD Base 2 for the analysis survey of the partial discharges inside to the insulator of the cast resin transformers.

The ultimate aim has been checkout of the date's acquisition and elaboration into the laboratory about digital system mentioned.

The first six chapters of the present work review the theoretical base necessary to introduce the reader into the partial discharges theme.

The last four chapters describe in detail the instrument's functionality and capacity for measurement of the partial discharges.

The final chapter provides some informations about Ultra Wide Band techniques for survey of the constructive defects localization inside the insulation system of the cast resin transformers.

This work has required the utilization of the Wide Band instrument manufactured by G. Biddle to carry a comparative analysis with the digital system.

Several types of cast resin transformers both syngle-phase and three-phase- have been utilized for laboratory' tests; experimental data have been processed with PDProcessing[®] software supplied together with Techimp PD Base 2 system in addition with Matlab[®] programming language.

I thank the Prof. Ing. Giancarlo Pesavento and the co-supervisor Dott. Ing. Claudio Ceretta for the assistance.

2.2.2.4.	Effetto Corona in tensione continua	pag.046
2.2.2.5.	Effetto Corona in olio	pag.046
2.2.3.	Scariche parziali in tensione continua	pag.046
2.2.3.1.	Circuito analogico	pag.046
2.2.3.2.	Ricorrenza delle scariche parziali in tensione continua	pag.047
2.2.3.3.	Eventuali dipendenze	pag.048
2.2.3.4.	Tensione d'innesco	pag.048
2.2.3.5.	Tensione continua con una componente di ripple	pag.048
2.2.3.6.	Conclusioni	pag.049
2.2.4.	Scariche parziali a tensione d'impulso	pag.049
2.2.4.1.	Livelli di tensione nei test	pag.049
2.3.	Ampiezza delle scariche parziali	pag.050
2.3.1.	Lo scopo della misura delle scariche parziali	pag.050
2.3.1.1.	Rilevamento delle scariche parziali	pag.050
2.3.1.2.	Misura delle scariche parziali	pag.050
2.3.1.3.	Allocazione delle scariche parziali	pag.050
2.3.1.4.	Valutazione delle scariche parziali	pag.050
2.3.2.	Quantità relative all'ampiezza delle scariche parziali	pag.051
2.3.2.1.	Carica trasferita	pag.051
2.3.2.2.	Carica apparente trasferita	pag.051
2.3.2.3.	Energia di scarica	pag.051
2.3.2.4.	Perdite dielettriche dovute alle scariche parziali	pag.052
2.3.2.5.	Quantità integrate	pag.052
2.3.3.	Scelta di Q come misura di scariche parziali	pag.053
2.3.3.1.	Relazione energetica	pag.053
2.3.3.2.	Relazione con la dimensione del difetto	pag.054
2.3.3.3.	Esempi	pag.055
2.3.3.4.	Scelta di Q come misura di scariche parziali	pag.055
3.	Misura e rilievo delle scariche parziali	pag.058
3.1.	Rilevamento non elettrico delle scariche parziali	pag.058
3.1.1.	Introduzione	pag.058
3.1.2.	Rilevamento del rumore in aria	pag.058
3.1.2.1.	Rumore udibile	pag.058
3.1.2.2.	Rumore ultrasonico	pag.058
3.1.2.3.	Ricerca e correzione di un difetto	pag.059

3.1.3. Rilevamento del rumore nelle installazioni isolate in olio minerale	pag.059
3.1.3.1. Localizzazione	pag.060
3.1.3.2. Condensatori	pag.060
3.1.3.3. Isolamento solido	pag.061
3.1.3.4. Isolanti in gas compresso	pag.063
3.1.3.5. Conclusioni	pag.063
3.1.4. Rilevazione visiva	pag.063
3.1.4.1. Introduzione	pag.064
3.1.4.2. Fotografia	pag.064
3.1.4.3. Esempi	pag.065
3.1.4.4. Conclusioni	pag.065
3.1.4.5. Il fotomoltiplicatore	pag.065
3.1.4.6. Tabulati	pag.066
3.1.4.7. Fotomoltiplicatore in tensione continua	pag.067
3.1.4.8. Convertitore d'immagine	pag.067
3.1.4.9. Conclusioni	pag.067
3.2. Principi di rilevazione elettrica delle scariche parziali	pag.068
3.2.1. Diagramma di base	pag.068
3.2.1.1. Impedenza di rilevazione	pag.069
3.2.1.2. Circuito R-C	pag.069
3.2.1.3. Circuito L-C-R	pag.070
3.2.1.4. Conclusioni	pag.071
3.2.2. Amplificazione degli impulsi	pag.072
3.2.2.1. Caratteristiche del segnale	pag.072
3.2.2.2. Dopo il circuito R-C	pag.073
3.2.2.3. Dopo il circuito L-C-R	pag.073
3.2.3. Sensibilità	pag.074
3.2.3.1. Sorgenti di rumore	pag.074
3.2.3.2. Osservazioni generali	pag.074
3.2.4. Risoluzione	pag.075
3.2.4.1. Risoluzione dello schermo dell'oscilloscopio	pag.075
3.2.4.2. Risoluzione del circuito di rilevazione	pag.076
3.2.4.3. Risoluzione dell'amplificatore	pag.077
3.2.4.4. Risoluzione totale	pag.077
3.2.4.5. Banda stretta VS Banda larga	pag.077

3.2.5. Osservazione	pag.078
3.2.5.1. Oscilloscopio	pag.078
3.2.5.2. Ampiezza di scarica	pag.080
3.2.5.3. Voltmetro di cresta	pag.080
3.2.5.4. Registrazioni X-Y	pag.081
3.2.5.5. Contatore d'impulsi	pag.081
3.2.5.6. Elaborazione dei dati	pag.082
4. Misuratori di scariche parziali	pag.085
4.1. Rilevazione diretta	pag.085
4.1.1. Circuito di rilevazione diretta	pag.085
4.1.2. Caratteristiche	pag.087
4.1.3. Calibrazione	pag.088
4.1.4. Calibrazione non raccomandabile	pag.088
4.2. Rilevazione bilanciata	pag.089
4.2.1. Principi	pag.089
4.2.2. Grado di reiezione	pag.090
4.2.3. Vantaggi della rilevazione bilanciata	pag.091
4.2.4. Caratteristiche	pag.091
4.2.5. Calibrazione	pag.092
4.3. Calibratori	pag.092
4.3.1. Generatore di onde quadre	pag.093
4.3.2. Calibratore portatile	pag.094
4.4. Interferenza	pag.094
4.4.1. Alimentazione	pag.095
4.4.2. Circuito d'alta tensione	pag.095
4.4.2.1. Sorgente d'alta tensione	pag.095
4.4.2.2. Conduttori d'alta tensione	pag.095
4.4.2.3. Condensatori d'accoppiamento	pag.095
4.4.2.4. Terminali	pag.095
4.4.3. Rumore esterno rilevato	pag.095
4.4.3.1. Scariche parziali indotte	pag.096
4.4.3.2. Terre multiple	pag.096
4.4.4. Rumore di contatto	pag.097
4.4.4.1. Rumore di contatto nel circuito	pag.097
4.4.4.2. Rumore di contatto nell'oggetto in prova	pag.097

Indice

4.4.5. Checklist	pag.098
5. Normativa I.E.C. 60270	pag.101
5.1. Prefazione alla normativa I.E.C. 60270	pag.101
5.1.1. Contenuto e campo d'applicazione	pag.101
5.2. Definizioni	pag.101
5.2.1. Definizioni generali	pag.101
5.2.2. Grandezze relative agli impulsi di scariche parziali	pag.102
5.2.3. Tensioni di prova relative agli impulsi di scariche parziali	pag.106
5.3. Sistema di misura delle scariche parziali	pag.107
5.3.1. Caratteristiche del sistema di misura	pag.107
5.3.2. Strumenti digitali di misura delle scariche parziali	pag.109
5.4. Circuiti di prova	pag.110
5.4.1. Prescrizioni generali	pag.110
5.4.2. Circuiti di prova per tensioni alternate	pag.110
5.5. Strumenti di misura	pag.117
5.5.1. Generalità	pag.117
5.5.2. Dispositivi d'accoppiamento	pag.117
5.5.3. Risposta degli strumenti di misura di carica apparente ad un treno d'impulsi	pag.117
5.5.4. Strumenti di misura di scariche parziali a banda larga	pag.119
5.5.5. Strumenti di misura di scariche parziali a banda stretta	pag.122
5.6. Prescrizioni per le misure di scariche parziali con strumenti digitali	pag.123
5.7. Taratura di un sistema di misura nel circuito di prova completo	pag.124
5.8. Prove	pag.127
5.8.1. Prescrizioni generali	pag.127
5.8.2. Condizionamento dell'oggetto in prova	pag.127
5.8.3. Scelta della procedura di prova	pag.127
5.9. Linee guida per l'acquisizione digitale di grandezze relative alle scariche parziali	pag.129
5.9.1. Generalità	pag.129
5.9.2. Istruzione per l'elaborazione dei segnali analogici di carica apparente	pag.129
5.9.3. Raccomandazione per la registrazione della tensione di prova, dell'angolo di fase Φ_1 , e del tempo t_i di occorrenza di una impulso di scarica parziale	pag.130
5.10. Prove sui trasformatori	pag.131
5.10.1. Procedura di prova standard	pag.132
5.10.2. Procedura di prova speciale	pag.133

Indice

6. Diagnostica mediante le scariche parziali	pag.136
6.1. Aspetti generali sulla manutenzione e sulla diagnostica predittiva	pag.136
6.2. Scariche parziali per la diagnostica	pag.143
6.3. Tecniche U.W.B. nella misura delle scariche parziali	pag.144
6.3.1. Ulteriori vantaggi del metodo in banda ultra larga	pag.145
6.4. Misuratori in U.W.B. e circuiti di misura	pag.147
6.4.1. Struttura di un misuratore di scariche parziali in banda ultra larga	pag.148
6.5. Misura in banda ultra larga e carica associata agli impulsi di scarica parziale	pag.149
6.5.1. Integrazione numerica	pag.149
6.5.2. Pseudo-integrazione numerica	pag.150
6.6. Limiti dei circuiti di misura in U.W.B.	pag.150
7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base 2	pag.153
7.1. Presentazione del sistema Techimp PD Base 2	pag.153
7.2. Dati di targa del sistema Techimp PD Base 2	pag.154
7.3. Procedura per l'uso del sistema digitale in banda ultra larga del sistema Techimp PD Base 2	pag.156
7.3.1. Connessione all'unità di acquisizione	pag.156
7.3.2. Controllo dell'unità di acquisizione	pag.158
7.3.3. Calibrazione dell'unità di acquisizione	pag.159
7.3.4. Sincronizzazione dell'unità di acquisizione	pag.160
7.3.5. Uso dell'unità di acquisizione	pag.161
7.4. Uso del software PDProcessing®	pag.161
8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica	pag.144
8.1. Misura di scariche parziali su di un trasformatore monofase isolato in resina epossidica da 185 kVA	pag.166
8.1.1. Rilievo delle scariche parziali in banda larga	pag.168
8.2. Misura di scariche parziali su di un trasformatore monofase isolato in resina epossidica da 220 kVA	pag.171
8.2.1. Rilievo delle scariche parziali con il sistema in banda larga	pag.175
8.2.2. Rilievo delle scariche parziali con il sistema in banda ultra larga	pag.178
8.2.2.1. Primo report generato con il software PDProcessing®	pag.184
8.2.2.2. Secondo report generato con il software PDProcessing®	pag.187
8.3. Misura di scariche parziali su di un trasformatore trifase isolato in resina epossidica da 400 kVA	pag.192
8.3.1. Rilievo delle scariche parziali con il sistema in banda larga	pag.193

Indice

8.3.2. Rilievo delle scariche parziali con il sistema in banda ultra larga	pag.195
8.3.2.1. Primo report generato con il software PDProcessing®	pag.200
8.4. Misura di scariche parziali su di un trasformatore trifase isolato in resina epossidica da 315 kVA	pag.209
8.4.1. Primo report generato con il software PDProcessing®	pag.214
8.4.2. Secondo report generato con il software PDProcessing®	pag.216
8.4.3. Terzo report generato con il software PDProcessing®	pag.218
8.4.4. Quarto report generato con il software PDProcessing®	pag.221
8.4.5. Quinto report generato con il software PDProcessing®	pag.223
8.4.5.1. Primo gruppo di segnali acquisiti	pag.224
8.4.5.2. Secondo gruppo di segnali acquisiti	pag.225
8.4.5.3. Terzo gruppo di segnali acquisiti	pag.226
9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base 2	pag.231
9.1. Metodo tempo – frequenza	pag.231
9.2. Elaborazione delle misure di scariche parziali in banda ultra larga sui trasformatori mediante Matlab®	pag.235
9.2.1. Prove condotte su di un trasformatore monofase da 220 kVA	pag.235
9.2.2. Prove condotte su di un trasformatore trifase da 400 kVA	pag.241
9.2.3. Prove condotte su di un trasformatore trifase da 315 kVA	pag.253
9.3. Conclusioni sul sistema a banda ultra larga Techimp PD Base 2	pag.266
10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali	pag.279
10.1. Analisi della polarità degli impulsi	pag.279
10.2. Analisi a mappatura della funzione di trasferimento dell'avvolgimento di un trafo	pag.281
10.3. Rilievo della risposta in frequenza all'impulso di calibrazione di un trasformatore trifase campione	pag.285
10.3.1. Prova del 22/12/2008	pag.286
10.3.2. Prova del 02/04/2009	pag.302
10.3.3. Prova del 03/04/2009	pag.305
10.4. Conclusioni	pag.308
11. Bibliografia	pag.311

1. Introduction to electrical machines' diagnostic	pag.021
1.1. Generality on the diagnostic	pag.021
1.2. Principal definition	pag.023
1.3. Diagnostic's purpose	pag.024
1.4. Electrical apparatus' deterioration	pag.025
1.5. Principal diagnostic techniques	pag.027
2. Introduction to partial discharges	pag.031
2.1. Partial discharges	pag.031
2.1.1. Partial discharges	pag.031
2.1.1.1. Classification	pag.031
2.1.1.2. Terminology	pag.033
2.1.2. Internal partial discharges	pag.033
2.1.2.1. Internal partial discharges into gas-filled cavities	pag.033
2.1.2.2. Inclusions	pag.034
2.1.2.3. Internal partial discharges into oil-filled cavities	pag.035
2.1.3. Surface partial discharges	pag.035
2.1.3.1. Surface partial discharges in air	pag.035
2.1.3.2. Surface partial discharges in oil	pag.036
2.1.3.3. Surface partial discharges in SF ₆	pag.037
2.1.4. Corona partial discharges	pag.037
2.1.4.1. Corona partial discharges in air	pag.038
2.1.4.2. Corona partial discharges in SF ₆	pag.039
2.1.5. Branched partial discharges	pag.039
2.2. Recurrence of the partial discharges	pag.040
2.2.1. Partial discharges at A.C. voltage	pag.040
2.2.1.1. Analog circuit	pag.040
2.2.1.2. Recurrence of the partial discharges at A.C. voltage	pag.041
2.2.1.3. Terminology	pag.042
2.2.1.4. Partial discharges occurring below the inception voltage	pag.042
2.2.1.5. Irregular recurrence of the partial discharges	pag.043
2.2.2. Corona effect partial discharges	pag.044
2.2.2.1. Negative Corona effect	pag.044
2.2.2.2. Positive Corona effect	pag.045
2.2.2.3. Recurrence of the Corona partial discharges at A.C. voltage	pag.046
2.2.2.4. Corona effect at D.C. voltage	pag.046

2.2.2.5. Corona effect in oil	pag.046
2.2.3. Partial discharges at D.C. voltage	pag.046
2.2.3.1. Analog circuit	pag.046
2.2.3.2. Recurrence of the partial discharges at D.C. voltage	pag.047
2.2.3.3. Variables	pag.048
2.2.3.4. Inception voltage	pag.048
2.2.3.5. D.C. voltage with ripple component	pag.048
2.2.3.6. Conclusion	pag.049
2.2.4. Partial discharges at impulse voltage	pag.049
2.2.4.1. Test levels	pag.049
2.3. Magnitude of the partial discharges	pag.050
2.3.1. The aim of the partial discharges' measure	pag.050
2.3.1.1. Partial discharges' detection	pag.050
2.3.1.2. Partial discharges' measurement	pag.050
2.3.1.3. Partial discharges' location	pag.050
2.3.1.4. Partial discharges' evaluation	pag.050
2.3.2. Quantities related of the partial discharges' magnitude	pag.051
2.3.2.1. Charge transfer	pag.051
2.3.2.2. Apparent charge transfer	pag.051
2.3.2.3. Discharge energy	pag.051
2.3.2.4. Dielectric losses due to partial discharges	pag.052
2.3.2.5. Integrated quantities	pag.052
2.3.3. Choice of Q as a measure for partial discharges	pag.053
2.3.3.1. Energy relationship	pag.053
2.3.3.2. Relationship to size of defect	pag.054
2.3.3.3. Examples	pag.055
2.3.3.4. Choise of Q as a measure for partial discharges	pag.055
3. Partial discharges' measurement and detection	pag.058
3.1. Nonelectrical detection of partial discharges	pag.058
3.1.1. Introduction	pag.058
3.1.2. Noise detection in air	pag.058
3.1.2.1. Audible noise	pag.058
3.1.2.2. Ultrasonic noise	pag.058
3.1.2.3. Trouble-shooting	pag.059
3.1.3. Noise detection in oil-insulated installations	pag.059

Index

3.1.3.1. Location	pag.060
3.1.3.2. Capacitors	pag.060
3.1.3.3. Solid insulation	pag.061
3.1.3.4. Compressed-gas insulation	pag.063
3.1.3.5. Conclusion	pag.063
3.1.4. Light detection	pag.063
3.1.4.1. Introduction	pag.064
3.1.4.2. Fotografy	pag.064
3.1.4.3. Examples	pag.065
3.1.4.4. Conclusion	pag.065
3.1.4.5. Photomultiplier	pag.065
3.1.4.6. Printouts	pag.066
3.1.4.7. Photomultiplier at D.C. voltage	pag.067
3.1.4.8. Image converter	pag.067
3.1.4.9. Conclusion	pag.067
3.2. Principles of partial discharges' detection	pag.068
3.2.1. Basic diagram	pag.068
3.2.1.1. Detection impedance	pag.069
3.2.1.2. R-C circuit	pag.069
3.2.1.3. L-C-R circuit	pag.070
3.2.1.4. Conclusion	pag.071
3.2.2. Amplification of impulses	pag.072
3.2.2.1. Signal's characteristics	pag.072
3.2.2.2. After R-C circuit	pag.073
3.2.2.3. After L-C-R circuit	pag.073
3.2.3. Sensitivity	pag.074
3.2.3.1. Noise sources	pag.074
3.2.3.2. General remarks	pag.074
3.2.4. Resolution	pag.075
3.2.4.1. Resolution of the oscilloscope screen	pag.075
3.2.4.2. Resolution of detection circuit	pag.076
3.2.4.3. Amplifier's resolution	pag.077
3.2.4.4. Total resolution	pag.077
3.2.4.5. Narrow band VS Wide band	pag.077
3.2.5. Observation	pag.078

3.2.5.1. Oscilloscope	pag.078
3.2.5.2. Discharge magnitude	pag.080
3.2.5.3. Impulse crest voltmeter	pag.080
3.2.5.4. X-Y recorder	pag.081
3.2.5.5. Impulse counter	pag.081
3.2.5.6. Data processing	pag.082
4. Partial discharges detection circuits	pag.085
4.1. Straight detection	pag.085
4.1.1. Straight detection circuit	pag.085
4.1.2. Characteristics	pag.087
4.1.3. Calibration	pag.088
4.1.4. Nonrecommended calibration	pag.088
4.2. Balanced detection	pag.089
4.2.1. Principles	pag.089
4.2.2. Rejection ratio	pag.090
4.2.3. Advantages of balance detection	pag.091
4.2.4. Characteristics	pag.091
4.2.5. Calibration	pag.092
4.3. Calibrators	pag.093
4.3.1. Square wave generator	pag.093
4.3.2. Portable calibrator	pag.094
4.4. Interference	pag.094
4.4.1. Voltage source	pag.095
4.4.2. High-voltage circuit	pag.095
4.4.2.1. High-voltage source	pag.095
4.4.2.2. High-voltage conductors	pag.095
4.4.2.3. Coupling capacitors	pag.095
4.4.2.4. Terminals	pag.095
4.4.3. Detected external noise	pag.096
4.4.3.1. Induced partial discharges	pag.096
4.4.3.2. Multiple earthing	pag.096
4.4.4. Contact noise	pag.097
4.4.4.1. Contact noise in the circuit	pag.097
4.4.4.2. Contact noise in the sample	pag.097
4.4.5. Checklist	pag.098

Index

5. European Standard C.E.I. EN 60270	pag.101
5.1. Foreword on the european standard C.E.I. EN 60270	pag.101
5.1.1. Scope	pag.101
5.2. Definitions	pag.101
5.2.1. General definitions	pag.101
5.2.2. Quantities related to partial discharge pulses	pag.102
5.2.3. Test voltage related to partial discharge pulses	pag.106
5.3. Partial discharge measuring system	pag.107
5.3.1. Measuring system characteristics	pag.107
5.3.2. Digital partial discharge instruments	pag.109
5.4. Test circuits	pag.110
5.4.1. General requirements	pag.110
5.4.2. Test circuits for alternating voltages	pag.110
5.5. Measuring devices	pag.117
5.5.1. Information about measuring devices	pag.117
5.5.2. Coupling devices	pag.117
5.5.3. Answer of the apparent charge's measuring devices under pulse repetition rate	pag.117
5.5.4. Partial discharges' wide band instruments	pag.119
5.5.5. Partial discharges' narrow band instruments	pag.122
5.6. Requirements for partial discharges' measure with digital instruments	pag.123
5.7. Calibration of a measuring system in the complete test circuit	pag.124
5.8. Tests	pag.127
5.8.1. General requirements	pag.127
5.8.2. Conditioning of the test object	pag.127
5.8.3. Choice of test procedure	pag.127
5.9. Guidelines to digital acquisition of partial discharge quantities	pag.129
5.9.1. General	pag.129
5.9.2. Instructions for processing analogue apparent charge signals	pag.129
5.9.3. Recommendations for recording test voltage, phase angle Φ_i , and time t_i of occurrence of a partial discharge pulse	pag.130
5.10. Tests on transformers	pag.131
5.10.1. Standard tests	pag.132
5.10.2. Special tests	pag.133
6. Diagnostic by partial discharges	pag.136
6.1. General appearance on the predictive diagnostic and maintenance	pag.136

6.2. Partial discharges for diagnostic	pag.143
6.3. U.W.B techniques into partial discharges measurement	pag.144
6.3.1. Further advantages of wide band method	pag.145
6.4. U.W.B. measurement system and measurement circuits	pag.147
6.4.1. Partial discharges' U.W.B. measurement system structure	pag.148
6.5. Ultra wide band measure and partial discharges' associated charge	pag.149
6.5.1. Numerical integration	pag.149
6.5.2. Pseudo-numerical integration	pag.150
6.6. U.W.B. measurement circuits limits	pag.150
7. Techimp PD Base 2 U.W.B. digital system	pag.153
7.1. Presentation of the Techimp PD Base 2 system	pag.153
7.2. Data sheet of the Techimp PD Base 2 system	pag.154
7.3. Procedure to utilize Techimp PD Base 2 system	pag.156
7.3.1. Connecting to acquisition unit	pag.156
7.3.2. Controlling the acquisition unit	pag.158
7.3.3. Calibration the acquisition unit	pag.159
7.3.4. Synchronization the acquisition unit	pag.160
7.3.5. Use the acquisition unit	pag.161
7.4. Use the software PDProcessing®	pag.161
8. Partial discharges' measurements in cast resin transformers	pag.166
8.1. Partial discharges' measurement on the 185 kVA's single phase transformer	pag.166
8.1.1. W.B. partial discharges detection	pag.168
8.2. Partial discharges' measurement on the 220 kVA's single phase transformer	pag.171
8.2.1. W.B. partial discharges detection	pag.175
8.2.2. U.W.B. partial discharges detection	pag.178
8.2.2.1. First report generated with software PDProcessing®	pag.184
8.2.2.2. Second report generated with software PDProcessing®	pag.187
8.3. Partial discharges' measurement on the 400 kVA's three phase transformer	pag.192
8.3.1. W.B. partial discharges detection	pag.193
8.3.2. U.W.B. partial discharges detection	pag.195
8.3.2.1. First report generated with software PDProcessing®	pag.200
8.4. Partial discharges' measurement on the 315 kVA's three phase transformer	pag.209
8.4.1. First report generated with software PDProcessing®	pag.214
8.4.2. Second report generated with software PDProcessing®	pag.216
8.4.3. Third report generated with software PDProcessing®	pag.218

Index

8.4.4. Fourth report generated with software PDProcessing®	pag.221
8.4.5. Fifth report generated with software PDProcessing®	pag.223
8.4.5.1. First group of detected signals	pag.224
8.4.5.2. Second group of detected signals	pag.225
8.4.5.3. Third group of detected signals	pag.226
9. Analisis of the Techimp PD Base 2 U.W.B. digital system	pag.231
9.1. Time – Frequency method	pag.231
9.2. U.W.B. partial discharges measurements' processing on transformers by Matlab®	pag.235
9.2.1. Tests on the 220 kVA's single phase transformers	pag.235
9.2.2. Tests on the 400 kVA's three phase transformers	pag.241
9.2.3. Tests on the 315 kVA's three phase transformers	pag.253
9.3. Conclusions on the Techimp PD Base 2 U.W.B. digital system	pag.266
10. Conclusions on the partial discharges' U.W.B. detection	pag.279
10.1. Impulses polarity's analysis	pag.279
10.2. Map analisis of the transfer function inside transformer's windings	pag.281
10.3. Frequency answer's detection under calibration impulse of the example three phase transformer	pag.285
10.3.1. 22/12/2008's test	pag.286
10.3.2. 02/04/2009's test	pag.302
10.3.3. 03/04/2009's test	pag.305
10.4. Conclusions	pag.308
11. Bibliography	pag.311

1. Introduzione alla diagnostica delle macchine elettriche

1. Introduzione alla diagnostica delle macchine elettriche

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

1.1 GENERALITA' SULLA DIAGNOSTICA

L'energia elettrica è la forma d'energia più diffusa nel mondo industrializzato, tanto che essa viene distribuita capillarmente tramite la rete elettrica e rappresenta un bene primario di difficile sostituzione.

L'importanza vitale dell'energia elettrica non balza all'occhio nella vita quotidiana, ma solo nel caso essa venga a mancare, basti pensare che in sua assenza non avremo ospedali funzionanti, non avremo telecomunicazioni e trasporti, insomma il modo di vivere della società arretrerebbe di 200 anni.

In questo contesto è importante garantire la continuità del servizio oltre che la qualità della potenza elettrica distribuita e per fare questo è necessario monitorare ed intervenire sulle apparecchiature e sulle macchine elettriche tempestivamente, in modo da prevenire o almeno tentare di prevenire guasti inaspettati che in utenze industriali comportano disservizi e quindi perdite consistenti di danaro.

Due esigenze contrastanti sono emerse nel tempo: la "power quality" e la "riduzione dei costi", quest'ultima a causa della liberalizzazione del mercato elettrico.

In questa ottica di esigenze contrastanti è più che mai necessario per garantire entrambe saper 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.

Allo scopo di minimizzare i disservizi e le relative penali imposte dall'ente distributore è necessaria la sostituzione tempestiva dell'apparecchiatura elettrica che si stima sia in fase critica dal punto di vista della vita utile, tuttavia è altrettanto importante non procedere alla sostituzione di un bene, che in un secondo momento si rivela essere ancora adatto al servizio perché sarebbe uno spreco e quindi un' inutile esborso di danaro. La stima del degrado di un'apparecchiatura elettrica non è una valutazione semplice da eseguire, poiché 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 macchina elettrica in prova, come risulterà evidente dalla misura di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica di cui si tratta in questa tesi.

Si distinguono sin da subito due aspetti delle misure, cioè si definiscono due tipologie di osservazioni sulle macchine elettriche:

- Diagnostica significa la determinazione della natura o della sede di un mal funzionamento in una apparecchiatura sulla base della valutazione di alcuni parametri correlati al malfunzionamento;
- Monitoraggio significa invece verifica ed osservazione dell'andamento di determinati fenomeni nel tempo.

Il monitoraggio, infatti, è un'osservazione continua di un fenomeno legato ad un mal funzionamento di un'apparecchiatura elettrica, mentre la diagnostica è un'osservazione limitata nel tempo, che però deve poter fornire informazioni sufficienti per decidere.

1. Introduzione alla diagnostica delle macchine elettriche

Chiaramente nella pratica quotidiana il confine tra monitoraggio e diagnostica non è ben marcato in quanto possono esserci dei monitoraggi limitati nel tempo che però danno informazioni sufficienti a prendere delle decisioni sul da farsi, mentre possono esserci diagnostiche prolungate nel tempo ad intervalli regolari per speciali macchine elettriche. Bisogna tuttavia mettere in evidenza il fatto che monitoraggio e diagnostica non sono misure nel senso proprio del termine, poiché il misurando varia nel tempo e le serie di misure ricavate da queste procedure non sono dei valori numerici indipendenti dall'oggetto in prova, ma il più delle volte sono delle stime numeriche su dei parametri. I parametri utilizzati nell'analisi dell'apparecchiatura non fanno parte di un processo univoco, poiché comunque questo procedimento di monitoraggio e diagnostica sulla macchina elettrica in questione deve tenere conto dell'esperienza conseguita su tale tipologia di apparecchiatura e sulla conoscenza del suo progetto e della sua realizzazione costruttiva.

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 diversi oppure su valutazioni diverse del medesimo fenomeno e a queste pubblicazioni spesso si associano produzioni di strumentazione di varia natura, non sempre conformate ad hoc sulle esigenze del cliente, ma piuttosto atte a soddisfare le esigenze commerciali di chi le vende.

L'attività di ricerca sulle scariche parziali è un settore ancora aperto, nel quale i prodotti hardware e software sviluppati non sempre risultano affidabili oppure risultano attendibili per una determinata categoria di apparecchiature elettriche, mentre per altre categorie non risultano addestrati a riconoscere scariche parziali di diversa natura (come ad esempio il sistema che valuteremo in questo lavoro).

In ogni caso, allo stato attuale della ricerca, non esistono tecniche diagnostiche che riescano ad avere valenza generale di rilevazione delle scariche parziali per ogni tipologia d'apparecchiatura elettrica.

In questo lavoro si sono dapprima analizzate le tecniche di rilevazione di scariche parziali già affermate in passato e si è poi analizzato un sistema digitale di rilevazione delle scariche parziali in banda ultra larga su trasformatori monofase e trifase isolati in resina epossidica.

1.2 LE DEFINIZIONI PRINCIPALI

Il significato dei vari termini usati nelle misure diagnostiche è elencato in alcune definizioni principali.

Il malfunzionamento di un sistema elettrico o di un'apparecchiatura elettrica è un difetto nel normale funzionamento del medesimo, tale da non impedirne comunque l'utilizzo.

Il guasto di un sistema elettrico o di un'apparecchiatura elettrica è la condizione di inibizione al normale funzionamento degli stessi.

Esso può essere di tre tipi:

- catastrofico
- improvviso
- latente .

La degradazione di un sistema elettrico o di un'apparecchiatura elettrica è una deviazione di una o più proprietà degli stessi che non preclude il normale utilizzo del sistema o apparecchiatura, ma che a lungo termine potrebbe sfociare in un guasto improvviso.

Il componente guasto è la parte del sistema elettrico o apparecchiatura elettrica che è interessata da un guasto e quindi deve essere riparata o sostituita al fine di poter utilizzare il sistema o l'apparecchiatura in cui è inserito.

La rilevazione o identificazione del malfunzionamento/degrado è il processo attraverso il quale si determina la natura degli stessi; la rilevazione inoltre può essere eseguita anche con mezzi non diagnostici, poiché può risultare casuale o evidente ai sensi umani.

La localizzazione del malfunzionamento/degrado è l'identificazione spaziale del sito causa dei medesimi.

La quantificazione del malfunzionamento/degrado è la determinazione di un parametro numerico o letterale che renda conto della pericolosità del fenomeno all'interno del sistema elettrico o apparecchiatura elettrica in esame.

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

1.3 LO SCOPO DELLA DIAGNOSTICA

Il fine ultimo della diagnostica su di una apparecchiatura elettrica può essere riassunto brevemente in 4 punti:

- Identificazione dei malfunzionamenti del sistema;
- Prevenzione dei guasti distruttivi;
- Riduzione dei costi per fuori servizio dell'apparecchiatura;
- Programmazione degli interventi di manutenzione e sostituzione delle apparecchiature.

Allo scopo di scegliere la migliore tecnica diagnostica da adottare per l'apparecchiatura in esame con il fine ultimo di essere meno costosa possibile, è necessario seguire le seguenti regole:

- Individuazione delle principali cause di malfunzionamento/degrado e delle principali cause di guasto;
- Analisi accurata e minuziosa del progetto del sistema o apparecchiatura allo scopo di individuare i componenti maggiormente soggetti a malfunzionamenti/degrado e guasti;
- Analisi statistica dei guasti e delle cause di guasto in relazione alla installazione ed al particolare impiego;
- Individuazione degli effetti fisici conseguenti alla presenza di malfunzionamenti o degradi e della relazioni tra questi e l'intensità del fenomeno;
- Individuazione dei metodi di rilievo dei fenomeni fisici correlati alla presenza dei malfunzionamenti/degradi;
- Valutazione dell'affidabilità della misura e della incertezza derivante dall'influenza di sorgenti di segnale esterne all'oggetto in prova;
- Individuazione di metodi alternativi per effettuare misure sull'oggetto in prova, allo scopo di ridurre l'incertezza legata alla singola prova;
- Valutazione dei criteri attraverso i quali si andranno ad attribuire i vari malfunzionamenti/degradi a partire dai risultati delle misure e dall'affidabilità delle medesime;
- Valutazione della possibilità d'extrapolazione di quantità non direttamente rilevabili ma correlate alla natura ed all'intensità del malfunzionamento o degrado, a partire da grandezze osservabili e misurabili;
- Determinazione degli strumenti atti a ridurre il fattore umano nella stima dello stato di degrado dell'apparecchiatura elettrica analizzata;
- Analisi statistica dell'affidabilità dei criteri adottati nel calcolo della relazione che intercorre tra stima di vita e guasti registrati.

1. Introduzione alla diagnostica delle macchine elettriche

Una volta adottata la tecnica diagnostica che segue le direttive elencate, può allora essere deciso il tipo di misure diagnostiche da utilizzare, a seconda delle esigenze.

Esistono due tipi di diagnostica:

- ON-LINE
- OFF-LINE.

La diagnostica “ON-LINE” è il monitoraggio costante di alcune grandezze durante il funzionamento dell’oggetto in prova, mentre la diagnostica “OFF-LINE” è il monitoraggio di alcune grandezze caratteristiche dell’oggetto in prova ad intervalli di tempo prestabiliti e mettendo fuori servizio l’apparecchiatura in prova.

Chiaramente non esiste una soluzione univoca e la scelta è dipendente oltre che da fattori legati alle esigenze di diagnostica anche da esigenze di natura economica.

La diagnostica “ON-LINE” richiede una valutazione dei costi dell’apparecchiatura che deve rimanere collegata all’oggetto in prova per lungo tempo.

La diagnostica “OFF-LINE” richiede una valutazione dei costi del fuori servizio dell’apparecchiatura che deve essere disconnessa per effettuare le misure.

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 dell’apparecchiatura (per esempio i sensori di temperatura nei trasformatori).

1.4 IL DEGRADO DELLE APPARECCHIATURE ELETTRICHE

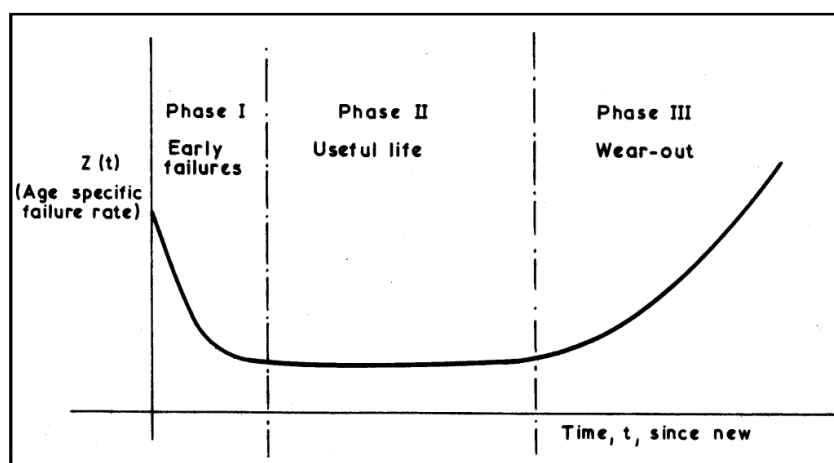


Figura 1.4(1): Probabilità di guasto di un’apparecchiatura elettrica in funzione del tempo in servizio
Fonte: A. Kelly, M. J. Harris, “Management of Industrial Maintenance”, London 1978

Osservando attentamente la curva a vasca da bagno riportata alla pagina precedente possiamo notare come la probabilità di scarica sia più elevata all’inizio ed alla fine della vita utile delle macchine elettriche.

1. Introduzione alla diagnostica delle macchine elettriche

Ciò è dovuto al fatto che inizialmente possono influire, sulla probabilità di guasto, gli errori nella progettazione e nella costruzione della macchina elettrica, mentre alla fine della vita utile, il fattore che più influenza la probabilità di guasto, è il degrado dell'apparecchiatura stessa. Nella parte centrale della curva la probabilità di guasto dell'apparecchiatura è legata generalmente a fenomeni casuali come ad esempio l'intervento di fattori esterni anomali, come possono essere ad esempio sovraccarichi, cortocircuiti, ecc. Chiaramente per ogni macchina elettrica esisterà una propria curva di probabilità di guasto a seconda delle caratteristiche intrinseche della stessa, inoltre non è sempre ben definito il tempo in cui i difetti di progettazione e costruzione dell'apparecchiatura, cominciano a non influire più sulla sua vita utile. Tanto meno noti sono i tempi con cui la degradazione dei componenti della macchina in esame cominciano a far sentire il loro peso nella probabilità di guasto della medesima. In generale la parte più critica di un'apparecchiatura elettrica è l'isolamento dielettrico, non solo per problemi legati alla tensione applicatagli, ma anche dal punto di vista termico (si pensi a come influisce la temperatura sulle scariche parziali). L'isolamento, infatti, in assenza di imperfezioni costruttive, peggiora le sue qualità di isolamento dielettrico e meccanico con legge esponenziale in funzione della temperatura. Il risultato che si ottiene è l'indebolimento meccanico della macchina elettrica e quindi una maggiore sensibilità alle sollecitazioni di natura elettrica, che in caso di eventi elettrici anomali, aumenta la probabilità di cedimento del dielettrico della stessa. L'apparecchiatura elettrica, qualora non sia affetta da zone di riscaldamento anomalo oppure non vi siano in corso fenomeni degradanti di altra natura, ha nel Grado di Carico o nel Fattore di Utilizzo dei buoni indici di previsione di guasto. In questo caso, dato un monitoraggio continuo dei parametri interessanti al fine di determinare il degrado dell'apparecchiatura e data l'esperienza fatta sulla medesima, cioè l'esperienza fatta sulle sue caratteristiche intrinseche, di progettazione e di realizzazione, è possibile stimare la vita residua dell'apparecchiatura anche in presenza di eventi elettrici anomali dei quali si può tenere conto. Un esempio concreto dell'applicazione di questo criterio è la misura di temperatura che viene fatta sui trasformatori in olio e a secco di grande potenza, nei quali viene effettuato un monitoraggio continuo attraverso apparecchiature dedicate che acquisiscono in modo continuo le temperature delle parti critiche dell'apparecchiatura in questione e che in conformità a modelli matematici standardizzati nelle normative internazionali stabiliscono la durata residua della apparecchiatura. In ogni caso, come anticipato, la temperatura è una causa di degrado degli isolamenti ma non è il solo fattore, infatti esistono cause legate alle sollecitazioni di tipo meccanico e di tipo elettrico. Queste ultime sollecitazioni sono più gravose per la macchina elettrica di quella termica e sono pure più difficili da rilevare. Bisognerebbe verificare periodicamente che non vi siano danni permanenti o non sull'apparecchiatura in esame dovuti alle sollecitazioni elettriche, meccaniche o termiche. Per quanto riguarda le misure di tipo diagnostico, queste dovrebbero essere svolte da metà vita utile dell'apparecchiatura in poi con frequenza variabile in funzione del risultato delle misure precedenti, della curva di carico e del grado di carico della macchina elettrica in questione.

1.5 LE PRINCIPALI TECNICHE DIAGNOSTICHE

L'importanza oggi della diagnostica sulle macchine elettriche è testimoniata dall'innumerevole business che si è sviluppato attorno ad essa, data la sua condizione strategica nella manutenzione delle macchine elettriche e nella loro sostituzione preventiva allo scopo di evitare fuori servizio e quindi esborsi di danaro.

La diagnostica, infatti, non deve solo fornire informazioni su come stia funzionando la macchina elettrica in analisi, quindi un semplice monitoraggio, ma dovrà fornire pure una visione futura sul suo comportamento ed eventuale degrado.

La necessità, infatti, per industrie e laboratori è quella di capire se si debbano sostituire oppure no delle apparecchiature elettriche prese in esame e quando farlo, in modo da poterle sfruttare al massimo ed evitare che vengano meno nel momento del bisogno.

Ci sono tre tipi di approcci in questo senso e sono:

- manutenzione su guasto
- diagnostica "on condition"
- diagnostica preventiva.

Per quanto riguarda la manutenzione su guasto, possiamo dire che può non esserci la necessità di sostituire la macchina elettrica perché comunque da una sua fermata non avremmo dei disagi economici e quindi la lasciamo funzionare finché si guasta e poi la sostituiamo.

Per quanto concerne invece la diagnostica "on condition", pensiamo ad un monitoraggio continuo o a periodi prestabiliti di alcuni parametri significativi per il normale funzionamento dell'apparecchiatura in esame e delle valutazioni fatte sulla base di codesto monitoraggio.

La diagnostica preventiva o predittiva come generalmente viene chiamata, ha lo scopo di prevedere il funzionamento di una macchina elettrica in analisi sulla base di una serie di misure diagnostiche condotte tramite tecniche diagnostiche di varia natura, che ora andremmo ad elencare brevemente.

1. Introduzione alla diagnostica delle macchine elettriche

Le tecniche diagnostiche più in uso per la diagnostica predittiva sullo stato di degrado delle parti isolanti delle apparecchiature elettriche sono:

- fattore di perdita o $\tan(\delta)$

La misura del fattore di perdita è una misura finalizzata alla stima del contenuto di acqua all'interno di un dielettrico igroscopico e viene spesso richiesta nei trasformatori, cavi ad isolamento carta e olio e nelle macchine rotanti;

- indice di polarizzazione/depolarizzazione

Questa misura è volta alla stima del contenuto d'acqua all'interno di isolamenti in carta e olio. In base a codesto contenuto varia la resistività dei materiali in analisi e conseguentemente la costante di tempo di polarizzazione del dielettrico;

- misura delle vibrazioni

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

- misura della risposta in frequenza (FRA O SFRA)

La misura suddetta 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;

- 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.

2. Introduzione alle scariche parziali

2. Introduzione alle scariche parziali

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

2. Introduzione alle scariche parziali

2.1 LE SCARICHE PARZIALI

2.1.1 LE SCARICHE PARZIALI

Una scarica elettrica che non cortocircuiti completamente due elettrodi è chiamata **scarica parziale**.

2.1.1.1 CLASSIFICAZIONE

Esistono sostanzialmente quattro tipologie di scariche parziali:

- scariche interne

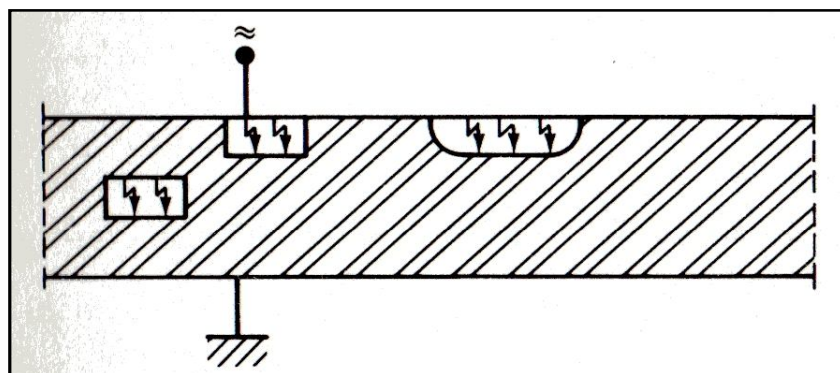


Figura 2.1.1.1(1): Scariche parziali interne

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

- scariche superficiali

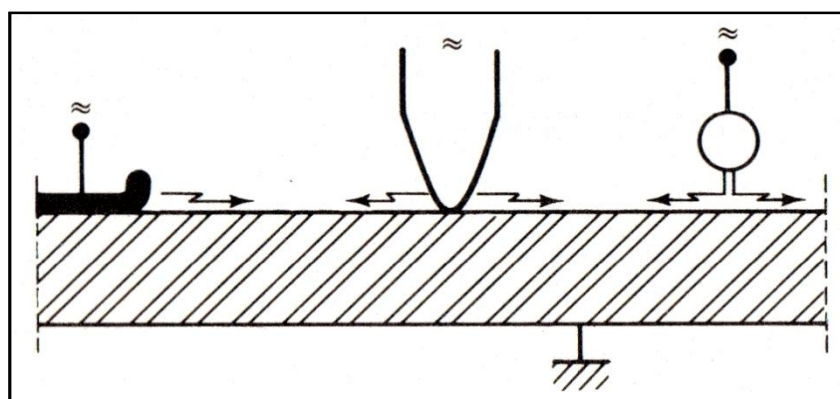


Figura 2.1.1.1(2): Scariche parziali superficiali

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

2. Introduzione alle scariche parziali

- scariche per effetto Corona

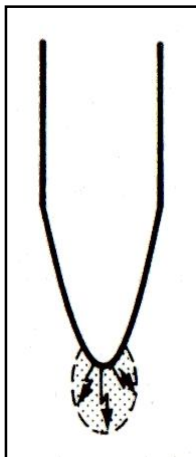


Figura 2.1.1.1(3): Scariche parziali per effetto Corona
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

- scariche ramificate ad albero

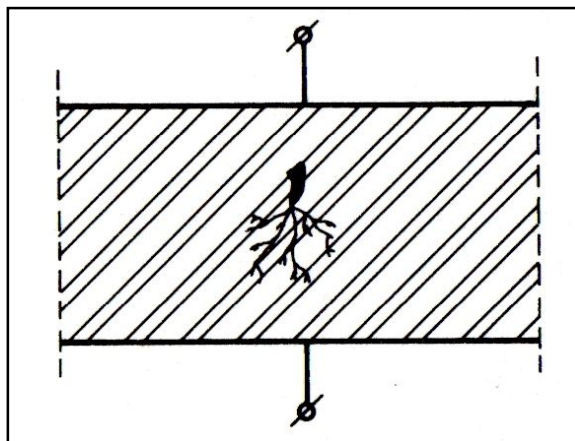


Figura 2.1.1.1(4): Scariche parziali ramificate ad albero
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

2. Introduzione alle scariche parziali

2.1.1.2 TERMINOLOGIA

I termini che spesso vengono usati in letteratura per indicare queste scariche elettriche sono:

- ionizzazione
- livello di ionizzazione
- punto di ionizzazione
- effetto corona (applicato a scariche interne)

non sono corretti e vanno evitati.

2.1.2 SCARICHE PARZIALI INTERNE

Esistono sostanzialmente due tipi di scariche parziali interne:

- in cavità con gas
- in cavità con liquidi.

2.1.2.1 SCARICHE PARZIALI INTERNE A CAVITA' CON GAS

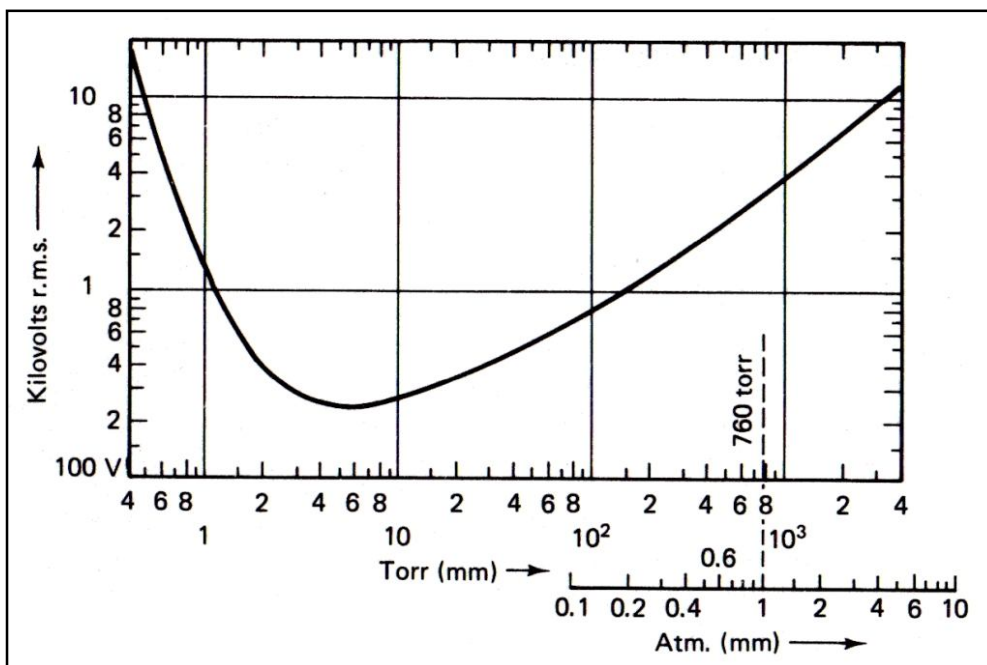


Figura 2.1.2.1(1): Curva di Paschen – Tensione di scarica in aria in funzione del prodotto pressione per distanza tra gli elettrodi

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

2. Introduzione alle scariche parziali

La tensione alla quale avvengono le scariche parziali all'interno di cavità con gas dipende dal campo elettrico nella cavità stessa e dalla tensione di scarica della medesima.

E' possibile calcolare il valore del campo per diverse configurazioni della cavità; se ad esempio la cavità è piana, esso sarà normale alle linee di campo elettrico \vec{E} varrà ϵ volte quello nel dielettrico sano, mentre se la cavità è sferica esso varrà all'incirca $\frac{3 \cdot \epsilon}{1 + 2 \cdot \epsilon}$ volte quello nel dielettrico.

Se la cavità è lunga e parallela al campo elettrico, \vec{E} tende ad essere quello del dielettrico sano.

La rigidità dielettrica della cavità dipende dalle sue dimensioni ed è governata dal tipo e dalla pressione del gas presente nella cavità.

La tensione a cui avvengono le scariche parziali in una cavità delimitata da superfici isolanti è la stessa che si avrebbe con elettrodi metallici equidistanti e si può ricavare dalla curva di Paschen, che visualizza la tensione di scarica in funzione del prodotto pressione del gas per distanza tra gli elettrodi.

Il tipo di gas e il valore iniziale della pressione nelle cavità non sono noti, tuttavia con il tempo si porteranno a coincidere con quelle dell'ambiente circostante.

Pertanto per isolamenti in resina epossidica immersi in SF_6 , si trovano cavità contenenti esafluoruro di zolfo, mentre per isolamenti in polietilene si trovano cavità contenenti aria alla pressione atmosferica.

Si ricorda che il polietilene ha una rigidità dielettrica pari a $3,5 \div 7$ [kV/mm].

Diversi fattori possono portare ad avere una rigidità dielettrica molto più bassa di quella preventivata.

Le pareti della cavità potrebbero essere ricoperte di cariche statiche, lì depositate al momento della formazione della cavità oppure in occasione di eventi di scarica parziale precedenti; queste cariche statiche depositate possono causare una variazione della rigidità dielettrica della cavità anche del 20 %.

Un lieve strato semiconduttivo può apparire sulle pareti delle cavità, cortocircuitandole più o meno fortemente e questo può causare un considerevole aumento del campo elettrico necessario a produrre la scarica.

2.1.2.2 INCLUSIONI

Le inclusioni sono corpi estranei che vengono a trovarsi nel dielettrico al momento della sua formazione oppure in un secondo momento e possono essere ad esempio carta, fibre tessili, ecc.

Queste inclusioni possono dare luogo a scariche parziali ad una tensione molto più bassa che nel caso di gas o liquidi presenti in cavità interne al medesimo materiale.

La rigidità dielettrica si abbassa sempre dopo la prima scarica parziale.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.1.2.3 SCARICHE PARZIALI INTERNE A CAVITA' CON OLIO

Le cavità con olio si trovano tipicamente negli avvolgimenti dei trasformatori in olio e nei cavi isolati in carta e olio oppure isolati in solo olio.

Per cavità che hanno direzione normale a quella di \vec{E} , il valore del campo sarà $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ volte

quello nel dielettrico, dove ε_1 è la costante dielettrica dell'olio, mentre ε_2 è la costante dielettrica del dielettrico solido sano.

Per cavità sferiche il rapporto vale $\frac{3 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_2}$ quella del dielettrico sano, mentre per

cavità parallele alle linee di campo elettrico \vec{E} , sarà la stessa del dielettrico.

2.1.3 SCARICHE PARZIALI SUPERFICIALI

2.1.3.1 SCARICHE PARZIALI SUPERFICIALI IN ARIA

Le scariche parziali superficiali si verificano nel caso di presenza di componenti di campo parallele alla superficie del dielettrico e sono presenti in regioni con elevato campo elettrico \vec{E} , come punte, curve ad angolo fortemente ottuso, saldature, sbavature metalliche, ecc.

Se si trascura la in omogeneità del campo elettrico, la tensione d'innescò delle scariche parziali superficiali seguirebbe questa legge:

$$V_i = (\Delta \cdot E_i) + d \cdot \left(\frac{E_i}{\varepsilon} \right) \quad (2.1)$$

dove Δ è la lunghezza del tratto in aria, E_i è la rigidità dielettrica del tratto in aria, d è lo spessore del dielettrico.

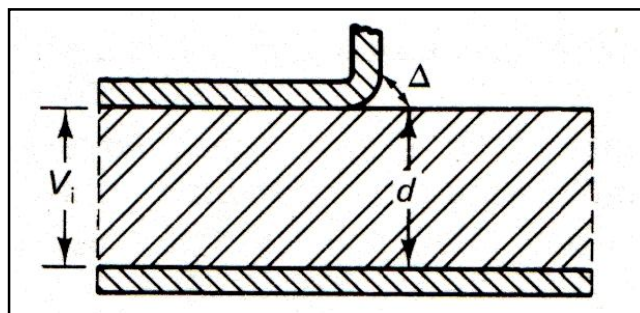


Figura 2.1.3.1(1): Schema di principio per eventuale scarica parziale superficiale in aria
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

2. Introduzione alle scariche parziali

Se si introduce la tensione di scarica, la formula empirica descritta precedentemente può anche essere riscritta in questo modo:

$$V_i = U_i \cdot \left(1 + \frac{d}{\varepsilon \cdot \Delta}\right) \quad (2.2)$$

In presenza di angoli appuntiti la tensione d'innescò delle scariche parziali potrebbe essere più piccola del 20÷50 %, e quindi le scariche parziali superficiali possono innescare ad un livello di campo elettrico relativamente basso.

2.1.3.2 SCARICHE PARZIALI SUPERFICIALI IN OLIO

La stessa relazione usata per la scarica parziale in aria può essere usata per quella in olio, solo che U_i in olio è meno conosciuta di quella in aria.

In olio la tensione U_i è influenzata dalla contaminazione dell'olio e dalle tracce di umidità.

Nel caso di elettrodi piani in olio, le scariche parziali superficiali sono, su scala logaritmica, lineari all'aumentare del rapporto $\frac{d}{\varepsilon}$.

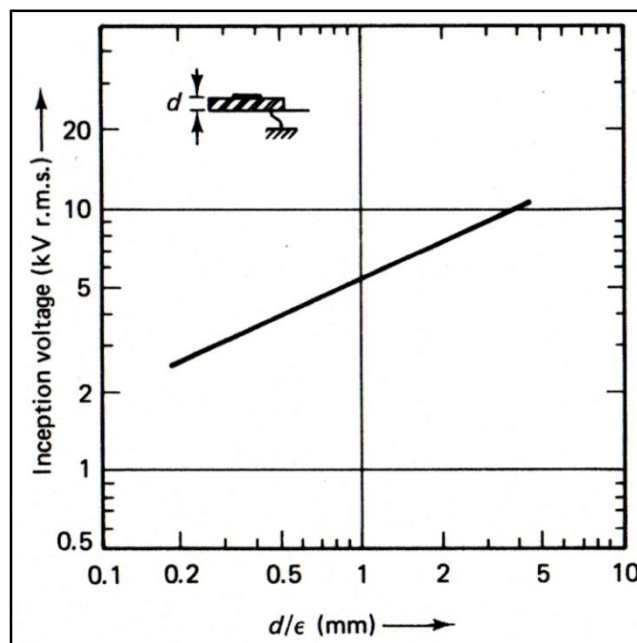


Figura 2.1.3.2(1): Tensione d'innescò delle scariche parziali sui bordi di un elemento di un condensatore in carta e olio

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

2. Introduzione alle scariche parziali

2.1.3.3 SCARICHE PARZIALI SUPERFICIALI IN SF6

Le scariche parziali superficiali possono manifestarsi non solo vicino agli elettrodi ma anche sulle superfici isolanti a metà strada tra gli elettrodi. Inoltre, a pressioni elevate, sono sensibili alle piccole particelle estranee. La contaminazione delle superfici del dielettrico causa elevati decrementi della tensione di scarica superficiale e sull'innesco delle scariche parziali.

Per le scariche parziali superficiali sono interessanti tre caratteristiche:

- rugosità della superficie
- aree semiconduttive
- particelle estranee.

Per quanto riguarda la rugosità della superficie si può dire che al di sotto dei 100 μm di profondità dei segni di lavorazione non si hanno scariche parziali superficiali e la tensione di scarica superficiale viene ridotta di poco. Per quanto riguarda la presenza di aree semiconduttive la tensione di scarica diminuisce drasticamente al diminuire della resistenza. È sufficiente la presenza sull'isolatore dell'impronta di un dito per avere effetti marcati. Le superfici pulite comportano l'uguaglianza tra la tensione di scarica superficiale e la tensione d'innesco delle scariche parziali. Le particelle presenti sulla superficie possono innescare delle scariche parziali superficiali, che dipendono dalla loro forma e dalla loro costante dielettrica relativa. Queste scariche parziali superficiali sono molto pericolose, specialmente per il fatto che si trovano facilmente nel materiale o si depositano su di esso all'atto dell'assemblaggio o della costruzione.

2.1.4 SCARICHE PARZIALI DA EFFETTO CORONA

Le scariche parziali dovute all'effetto Corona avvengono sugli elementi di forma appuntita quali ad esempio punte, curve, spigoli, ecc di dispositivi o apparati in alta o tensione; si solito si hanno sui punti in tensione ma possono avvenire anche su parti a potenziale di terra o intermedio.

Comunque sia la distanza tra due elettrodi può essere notevole, la concentrazione delle linee di campo su elementi appuntiti, causa in aria delle scariche parziali dovute all'effetto Corona.

Al di sopra dei 100 kV, le scariche parziali dovute all'effetto Corona s'innescano molto più facilmente verso terra specialmente se l'ambiente circostante è molto sporco, sia in ambienti con aria o in ambienti con presenza di gas diversi.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.1.4.1 SCARICHE PARZIALI DOVUTE AL CORONA IN ARIA

La tensione d'innesco delle scariche parziali in aria dovute al Corona si può ricavare dalla curva di Paschen, ipotizzando che un elemento appuntito venga trasformato in una sfera di raggio r , mentre che il piano di terra venga trasformato in una sfera di raggio R . Tenendo conto di tali ipotesi possiamo scrivere che la tensione d'innesco sia:

$$V = \frac{\text{capacità da } r \text{ a } r + \Delta}{\text{capacità da } r \text{ a } R} \cdot U_d \quad (2.3)$$

dove U_d è la tensione applicata alle due sfere, come si può vedere nella Figura 2.1.4.1(1).

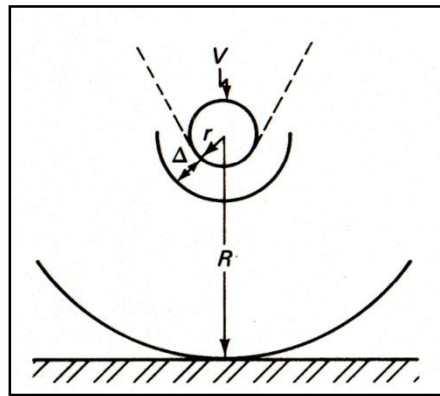


Figura 2.1.4.1(1): Schema esplicativo della formula (2.3)
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Un altro modo di scrivere la formula precedente è questo:

$$V = \frac{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right)}{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r + \Delta}\right)} \cdot U_d \quad (2.4)$$

Ora se $R \gg r$ allora $1/R$ è trascurabile rispetto ad $1/r$ quindi rimane:

$$V = \left(1 + \frac{r}{\Delta}\right) \cdot U_d \quad (2.5)$$

La scarica parziale avviene se V si avvicina al minimo di V_i , che può essere derivato da diversi valori di r e seguendo la relazione tra r e V_i (Corona)!

2. Introduzione alle scariche parziali

raggio dell'elemento appuntito [μm]	V_i tensione d'innesco del Corona [kV r.m.s.]
10	0.45
50	1.0
100	1.4
500	3.5
1000	5.5
5000	15.0

Tabella 2.1.4.1(2): Valori della tensione d'innesco delle scariche parziali dovute all'effetto Corona in funzione del raggio dell'elemento appuntito
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Da questa tabella e dal grafico si possono ricavare due conclusioni:

- l'innesco dell'effetto Corona non è funzione dell'intensità del campo elettrico, ma della tensione;
- l'effetto Corona può essere facilmente presente anche a basse tensioni.

2.1.4.2 SCARICHE PARZIALI PER EFFETTO CORONA IN SF6

L'effetto Corona potrebbe anche manifestarsi nell'esafluoruro di zolfo usato per l'isolamento e i prodotti della sua degradazione sono estremamente dannosi e aggressivi, per cui deve essere posta la massima attenzione nell'eliminare il più possibile punti angolosi ed elementi appuntiti presenti nel sistema.

2.1.5 SCARICHE PARZIALI RAMIFICATE

Gli alberi elettrici o scariche ramificate partono da difetti nell'isolamento. Dopo che l'albero di scarica è progredito per un certo tempo, il fusto e i rami più larghi aumentano la loro penetrazione nel dielettrico. Scariche considerevoli intervengono nello spazio allargato nel dielettrico e creano un luogo adatto al verificarsi di scariche parziali.

A differenza dei normali casi, queste scariche parziali sono veramente instabili, così che la ramificazione può aumentare rapidamente.

Molte scariche parziali non sono rilevabili per un lungo tempo di incubazione; ore, giorni e settimane possono trascorrere o anche anni, dipende dalla tensione applicata.

Quando cammina l'albero elettrico le scariche parziali diventano visibili e aumentano così rapidamente che possono causare un danno in breve tempo, ad esempio secondi o minuti; allo scopo di studiare le scariche lungo l'albero la tensione deve essere diminuita per prevenire un danno rapido.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.2 RICORRENZA DELLE SCARICHE PARZIALI

2.2.1 SCARICHE PARZIALI IN TENSIONE ALTERNATA

2.2.1.1 CIRCUITO ANALOGICO

Il comportamento delle scariche parziali interne alla tensione alternata può essere descritto nel caso ad esempio di un elemento di dielettrico con il circuito equivalente capacitivo di cui sotto:

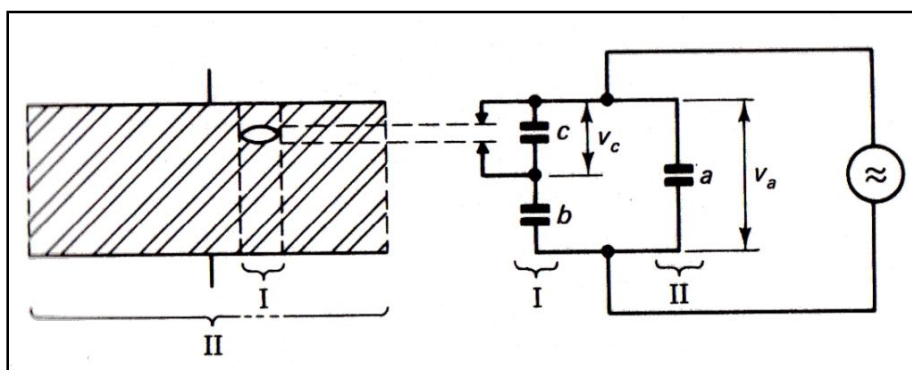


Figura 2.2.1.1(1): Schema esplicativo del circuito dielettrico per le scariche parziali interne
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Anche per le scariche parziali superficiali si può dare una rappresentazione grafica:

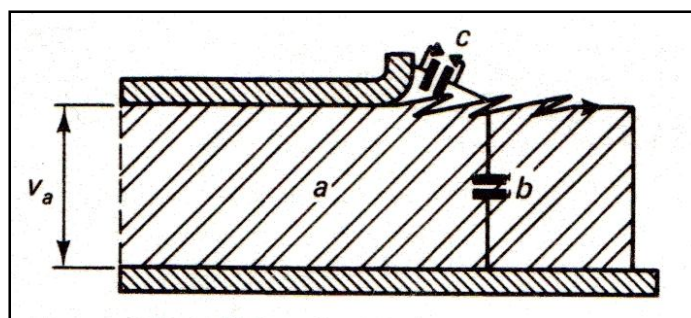


Figura 2.2.1.1(2): Schema esplicativo del circuito dielettrico per le scariche parziali superficiali
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Il circuito equivalente si può riprodurre tramite una capacità tra la superficie e l'elettrodo e una tra la superficie e attraverso l'isolante all'elettrodo opposto; per la scariche ad albero parziali interne la descrizione è simile a quella delle scariche interne parziali. Se il circuito viene alimentato con una tensione alternata vengono a crearsi delle scariche parziali ricorrenti.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.2.1.2 RICORRENZA DELLE SCARICHE PARZIALI

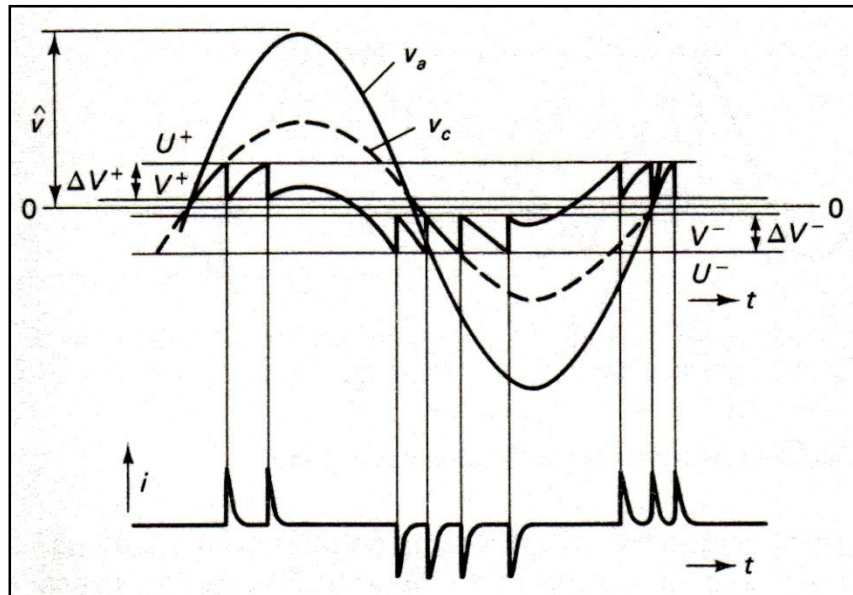


Figura 2.2.1.2(1): Diagramma temporale di ricorrenza delle scariche
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

La caduta di tensione $\Delta V^+ = U^+ - V^+$ compare in decine di μs e può essere stimata come una funzione a gradino; dopo che è avvenuta la scarica parziale, la tensione all'interno della cavità riprende a salire.

La tensione è data dalla sovrapposizione tra il campo elettrico principale e del campo elettrico delle scariche parziali superficiali nelle pareti della cavità subito dopo l'ultima scarica. I due campi elettrici agiscono uno contro l'altro e quando la tensione supera il valore U^+ avviene una nuova scarica. Questo succede diverse volte, dopo che l'alta tensione V_a decresce e la tensione V_c raggiunge U^- prima che avvenga una nuova scarica parziale. In questo modo possiamo vedere gruppi regolari ricorrenti di scariche parziali, che creano impulsi di corrente. Si può notare che le scariche parziali avvengono in quei posti dove la tensione cresce o decresce rapidamente.

Se succede che:

$$\Delta = \Delta$$

allora in ogni semiperiodo ho la stessa caduta di tensione, mentre se succede che:

$$\Delta \neq \Delta$$

allora gli impulsi di corrente di scariche parziali si muovono lungo l'asse temporale, come si può vedere nella Figura 2.2.1.2(1) sopra riportata.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.2.1.3 TERMINOLOGIA

La tensione alternata applicata al provino per cui le scariche cominciano è chiamata tensione di innesco e quella per cui si estinguono tensione di estinzione.

$U+$ e $U-$ sono talvolta chiamate tensioni di innesco ed estinzione della cavità.

2.2.1.4 SCARICHE PARZIALI A VALORI DI TENSIONE SOTTO QUELLA D'INNESCO

Una scarica parziale può permanere anche con tensioni più basse di quella d'innesco (teoricamente fino a metà di essa); una volta che la scarica sia stata innescata da una sovratensione, la tensione V_c della cavità originariamente più piccola della tensione d'innesco U^+ o U^- raggiunge nell'altro semiperiodo per effetto delle cariche superficiali lasciate dalla precedente scarica parziale.

Tutto ciò si può vedere nella seguente Figura 2.2.1.4(1).

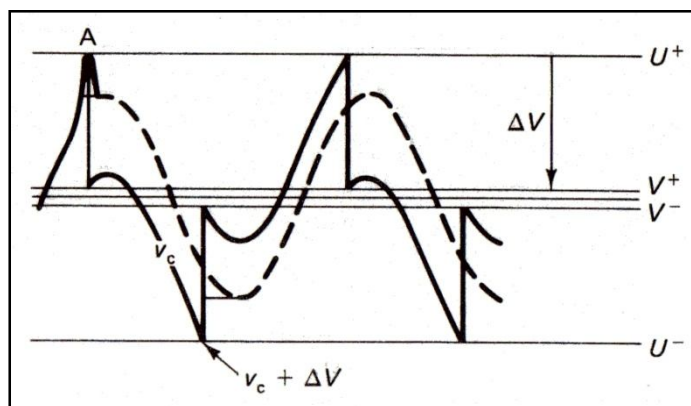


Figura 2.2.1.4(1): Eventi di scarica parziale sotto la tensione d'innesco
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Ora la tensione V_c e la carica residua nella cavità cooperano e la scarica parziale può persistere anche oltre la tensione d'ignizione.

La tensione d'estinzione delle scariche parziali è spesso più piccola della tensione d'innesco delle medesime di circa il 10÷30 % della tensione d'innesco.

Questa è la ragione per cui si fa una prova di scariche parziali con pre - stress del dielettrico a 1.5÷2 volte la tensione nominale.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.2.1.5 RICORRENZA IRREGOLARE DELLE SCARICHE PARZIALI

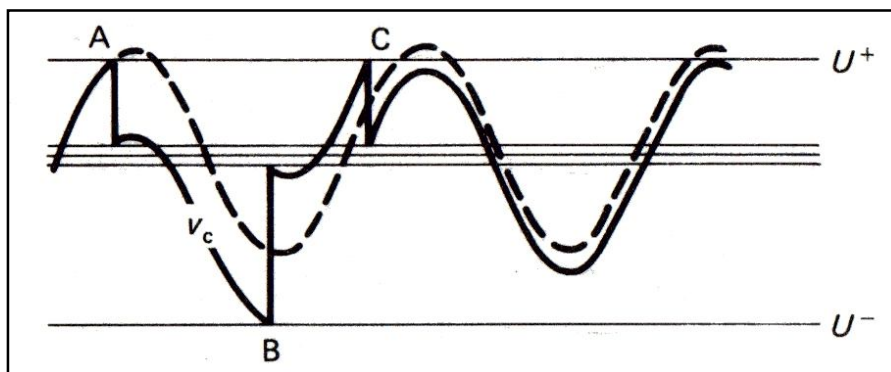


Figura 2.2.1.5(1): Eventi di scarica parziale sotto la tensione d'innescamento
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Le scariche parziali possono divenire intermittenti se la cavità è asimmetrica con tensioni di innescamento U^+ e U^- diverse.

La carica superficiale e la tensione V_c causano l'annullamento della tensione nella cavità attorno al punto B, mentre nel punto C avremo la stessa scarica di A ma più facilmente.

Dopo di che nel successivo mezzo ciclo la tensione della cavità passa per un minimo senza toccare U^- , così che non avviene alcuna scarica parziale.

Queste cariche superficiali nella cavità rimangono per qualche ciclo e finché sono presenti, nessuna scarica parziale avviene; ci sono poi sequenze intermittenti di scariche parziali non prevedibili e altre in alta tensione più regolari.

In una cavità che superi certe dimensioni le scariche parziali possono avvenire in differenti luoghi causando campi tangenziali sulle pareti della cavità e un sito di scarica potrebbe essere ricaricato da altri adiacenti.

La sequenza delle scariche parziali è influenzata da questa perdita sequenziale di carica elettrica trasversale e questo provoca una successione irregolare di scariche parziali di differente ampiezza e fase.

Nei casi reali, pertanto, non solo ci saranno scariche parziali di differente ampiezza e fase, ma queste saranno anche separate ed eventualmente sovrapposte.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.2.2 SCARICHE PARZIALI PER EFFETTO CORONA

La differenza sostanziale tra le scariche parziali Corona e le altre tipologie di scariche parziali, quindi interne, superficiali e ad albero è la ricorrenza delle medesime.

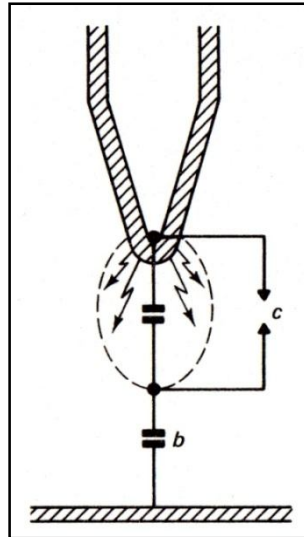


Figura 2.2.2(1): Circuito analogico per scariche parziali dovute all'effetto Corona
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

La scarica parziale in c spinterometro fittizio è limitata dalla sola distribuzione di carica spaziale che scompare velocemente in [ms] e determinando un treno ripetitivo di scariche parziali per effetto Corona.

2.2.2.1 EFFETTO CORONA NEGATIVO

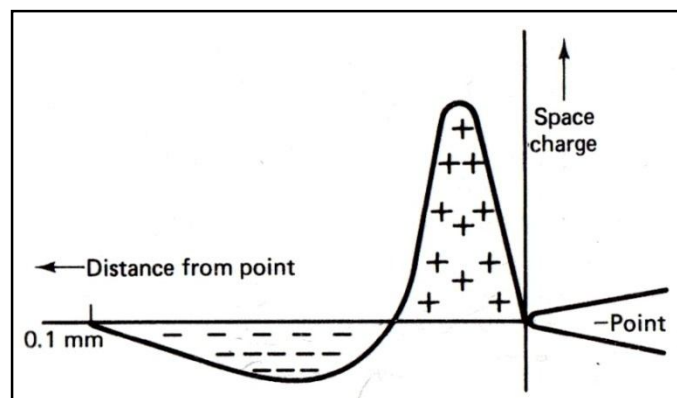


Figura 2.2.2.1(1): Distribuzione di carica spaziale dovuta all'effetto Corona negativo
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

2. Introduzione alle scariche parziali

Lo schema sopra riportato mostra che se uno ione positivo appare nelle vicinanze di una punta caricata da una tensione negativa succederà che esso viene attratto e accelerato dal campo elettrico \vec{E} verso la punta.

Lo ione positivo urtando l'elettrodo, estrae un elettrone superficiale del medesimo che verrà respinto verso l'esterno; così facendo si accumuleranno molte cariche positive vicino all'elettrodo negativo e molte cariche negative ad una certa distanza dall'elettrodo.

Si formano quindi due zone di carica spaziale di segno opposto, in un tempo di decine di ns a distanze massime di frazioni del millimetro dall'elettrodo.

La carica spaziale negativa scherma il campo elettrico \vec{E} dal punto di estrazione degli elettroni, gli ioni positivi si muovono nell'elettrodo senza produrre ulteriore ionizzazione, cosicché l'intensità del campo elettrico \vec{E} è veramente bassa e le scariche parziali si estinguono.

Ricomincia poi tutto daccapo quando la carica spaziale negativa s'allontana dall'anodo, il campo elettrico aumenta e avviene una nuova scarica parziale.

2.2.2.2 EFFETTO CORONA POSITIVO

Se l'elettrodo è posto a tensione positiva, la valanga di elettroni causa una distribuzione di cariche spaziali del tipo:

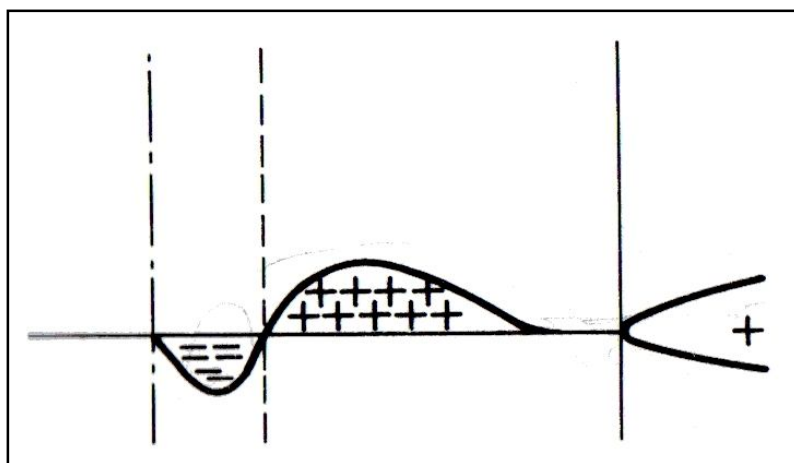


Figura 2.2.2.2(1): Distribuzione di carica spaziale dovuta all'effetto Corona positivo
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Gli elettroni scompaiono ad elevata velocità e i più lenti ioni positivi riducono il campo elettrico \vec{E} sull'elettrodo.

La scarica parziale per effetto Corona positivo termina fino a che gli ioni positivi hanno migrato lontano e una nuova scarica parziale per effetto Corona positivo s'innesca; questo automatismo si ripete regolarmente.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.2.2.3 RICORRENZA DELLE SCARICHE PARZIALI PER EFFETTO CORONA IN TENSIONE ALTERNATA

Se la tensione alternata viene aumentata lentamente, le scariche parziali per effetto Corona avvengono prima sul massimo del semiperiodo negativo dell'onda sinusoidale. Il numero di impulsi di corrente di scarica parziale aumenta linearmente con la tensione applicata e alle alte tensioni gli impulsi di corrente di scariche parziali appaiono anche sul semiperiodo positivo. Questi impulsi di corrente di scariche parziali sono di solito molto irregolari e di elevata ampiezza.

2.2.2.4 EFFETTO CORONA CON TENSIONE CONTINUA

La frequenza di ripetizione degli impulsi negativi di corrente di scariche parziali in tensione continua aumenta più che proporzionalmente con il livello della stessa. Se abbiamo un effetto Corona negativo allora tale ricorrenza è regolare, altrimenti se avessimo un effetto Corona positivo le scariche parziali non ricorrerebbero regolarmente e quando avvenissero sarebbero ampie e in piccole detonazioni.

2.2.2.5 EFFETTO CORONA IN OLIO

Elementi appuntiti e punti angolosi in olio presentano caratteristiche simili e provocano scariche parziali meno stabili e meno riproducibili che in aria.

2.2.3 SCARICHE PARZIALI IN TENSIONE CONTINUA

2.2.3.1 CIRCUITO ANALOGICO

Quando viene applicata una tensione continua, le scariche parziali avvengono durante la fase di crescita della medesima. Dopo che la tensione si è stabilizzata, le scariche parziali avvengono con frequenza molto bassa. In corrente continua ci sono pure resistenze in parallelo ai condensatori. La capacità della cavità C è continuamente caricata dalla resistenza in serie G del dielettrico; la scarica parziale in C avviene quando la tensione ha raggiunto la tensione d'innescò nella cavità.

2. Introduzione alle scariche parziali

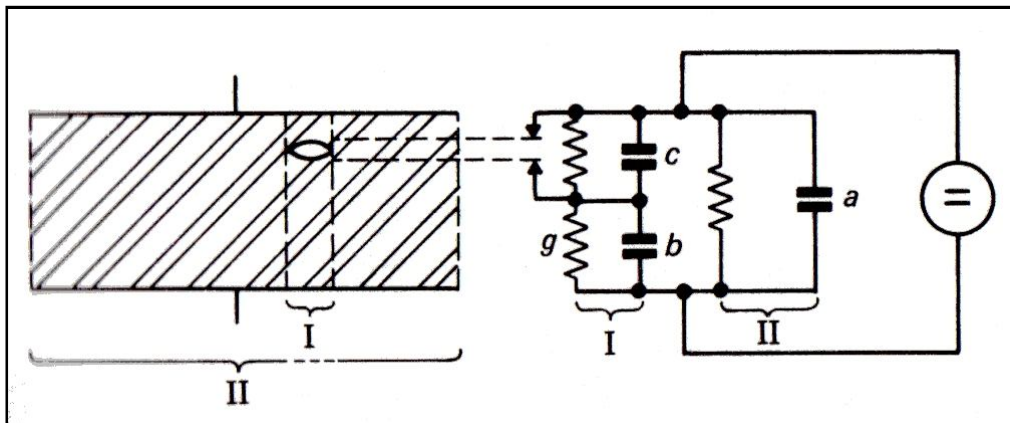


Figura 2.2.3.1(1): Schema equivalente per scariche parziali interne in tensione continua
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

2.2.3.2 RICORRENZA DELLE SCARICHE PARZIALI IN TENSIONE CONTINUA

Il tasso di ripetizione degli impulsi di corrente delle scariche parziali in tensione continua è diversi ordini di grandezza inferiore a quello in tensione alternata.

Per questo motivo le scariche parziali in tensione continua sono considerate meno dannose delle scariche parziali in tensione alternata.

Il tasso di ripetizione degli impulsi di scarica parziale in tensione continua aumenta con il campo elettrico \bar{E} nel dielettrico e con la conduttività specifica δ .

Per cavità laminari con conduttività nulla sulle pareti la frequenza di ripetizione degli impulsi di corrente delle scariche parziali:

$$f = 1.13 \cdot 10^{11} \cdot \delta \cdot \left(\frac{E}{E_i} \right) \quad (2.6)$$

in Hertz, dove E_i è il campo d'innesco delle cavità piane.

In pratica il tasso di ripetizione degli impulsi di corrente delle scariche parziali trovato è molto più piccolo di quello ipotizzato e questo è causato dalla presenza di molti siti di scariche parziali nella singola cavità; pertanto più grande è la cavità e più il tasso di ripetizione degli impulsi di corrente di scariche parziali è elevato.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.2.3.3 EVENTUALI DIPENDENZE

Se il campo elettrico d'esercizio in tensione continua, viene aumentato, la frequenza aumenta considerevolmente, dal momento che la conducibilità di solito aumenta con il campo elettrico applicato e questo amplifica l'effetto del campo elettrico \vec{E} .

Se la temperatura è aumentata, il tasso di ripetizione degli impulsi di corrente delle scariche parziali incrementerà considerevolmente come la conducibilità.

Il tasso di ripetizione varia nel tempo seguendo il decremento della resistività volumetrica.

Le scariche parziali in tensione continua avvengono ad intervalli che vanno da poche ore a diverse settimane.

Solo con campi elettrici di lavoro molto elevati, cioè sopra i 100 kV/mm in tensione continua e a temperature d'esercizio elevate, tipicamente 90°C o sopra, il tasso di ripetizione degli impulsi può arrivare all'ordine di grandezza di quello in alternata.

2.2.3.4 TENSIONE D'INNESCO

La tensione d'innescò in condizioni di tensione continua è difficile da accertare perché l'intervallo tra le scariche parziali potrebbe essere dell'ordine delle settimane alla tensione d'innescò teorica.

Per la Società Americana dei Test e Standard sui materiali la tensione d'innescò è raggiunta se il tasso di ripetizione degli impulsi di corrente delle scariche parziali eccede una scarica al minuto.

La tensione d'estinzione non può essere definita, poiché le scariche parziali continuano a presentarsi per un considerevole tempo dopo che è stata tolta la tensione continua.

2.2.3.5 TENSIONE CONTINUA CON UNA COMPONENTE DI RIPPLE

Se la componente di ripple della tensione supera la tensione d'innescò delle scariche parziali, queste ultime si presenteranno ricorrenti ogni mezzo ciclo della componente di ripple come in tensione alternata.

Comunque, anche se la tensione di ripple fosse insufficiente per causare le scariche parziali ricorrenti, aumenterebbe la frequenza di ripetizione delle scariche parziali in tensione continua. Se E_r è il picco del campo di ripple nel dielettrico, il corrispondente stress in una cavità laminare sarà $\varepsilon \cdot E_r$.

Il tasso di ripetizione degli impulsi di corrente delle scariche parziali dovrà allora essere incrementato di un fattore $E_i / (E_i - \varepsilon \cdot E_r)$.

Se la forma d'onda della tensione di ripple non è simmetrica, E_r dovrebbe essere preso come valore di picco del campo di ripple corrispondente a metà ciclo alla stessa polarità come il campo in tensione continua.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.2.3.6 CONCLUSIONI

Sebbene il tasso di ripetizione degli impulsi in tensione continua sia più basso di quello in tensione alternata, da 10^4 a 10^5 volte, gli impulsi ricavati sono gli stessi che in tensione alternata.

La durata, l'ampiezza, la forma d'onda e l'onda stessa delle scariche parziali in tensione continua sono uguali a quelle in tensione alternata.

Conseguentemente, simili tecniche di rilevamento, metodi di calibrazione, di osservazione possono essere usati anche in tensione alternata.

2.2.4 SCARICHE PARZIALI CON TENSIONI IMPULSIVE

Un fronte di salito ripido e una coda lenta di una tensione impulsiva applicata all'oggetto in prova provocano scariche parziali come un semiperiodo dell'alternata.

La prima scarica parziale avviene quando la tensione è molto più elevata della tensione d'innescò della cavità e questo perché c'è una probabilità bassa di avere un elettrone libero nella cavità. La scarica parziale rimane attiva dopo l'innescò fino a che l'impulso raggiunge la cresta.

Sulla coda gli impulsi di corrente sono contrari; e si hanno scariche molto più piccole parziali in diverse direzioni. Diversi siti di scarica per cavità sono di solito attivi qualora avvengono scariche di diversa ampiezza sulla coda dell'impulso di tensione.

2.2.4.1 LIVELLI DI TENSIONE NELLE PROVE

Le prove con elevate tensioni impulsive hanno poco a che vedere col deterioramento e l'aspettativa di vita alla tensione nominale, dove il rilevamento gioca un ruolo determinante.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.3 AMPIEZZA DELLE SCARICHE PARZIALI

2.3.1 LO SCOPO DELLA MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI

Lo scopo di tale rilevamento è quello di accertare con un test non distruttivo se la costruzione dell'isolante ha una sufficiente durata di vita.

Esistono quattro passi per effettuare questo giudizio:

- RILEVAMENTO
- MISURA
- LOCALIZZAZIONE
- VALUTAZIONE.

2.3.1.1 RILEVAMENTO DELLE SCARICHE PARZIALI

Il rilevamento mi dice se ci sono oppure no scariche parziali.

2.3.1.2 MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI

Se le scariche parziali sono presenti, dovrebbe essere accertata la loro ampiezza.

Un quantità fisica deve perciò essere presa e deve essere rilevante sia per la dannosità delle scariche parziali, sia per poter misurarne l'ampiezza.

Dopo che la quantità è stata scelta, un metodo di calibrazione affidabile deve essere scelto allo scopo di ottenere risultati ripetibili.

2.3.1.3 LOCALIZZAZIONE DELLE SCARICHE PARZIALI

E' importante localizzare le scariche parziali, che avvengono all'interno del materiale isolante, allo scopo finale di mettersi nelle condizioni di intervenire direttamente o no.

2.3.1.4 VALUTAZIONE DELLE SCARICHE PARZIALI

La valutazione delle scariche parziali deve essere fatta sul tipo e sulla dannosità delle medesime.

Un parere sulla vita elettrica dell'isolante deve essere espresso in modo chiaro, cioè tramite un range di tempo.

Deve essere inoltre possibile ottenere un'informazione valutabile sull'isolante sulla base dei grafici caratteristici del medesimo che abbiamo disposizione.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.3.2 QUANTITA' RELATIVE ALL'AMPIEZZA DELLE SCARICHE PARZIALI

2.3.2.1 CARICA TRASFERITA

La carica trasferita q_1 nella cavità, se abbiamo a che fare con scariche parziali interne, oppure sulla superficie se superficiali, sarà:

$$q_1 \cong (b + c) \cdot \Delta V \quad (2.7)$$

dove b è la capacità serie alla cavità dell'isolante sano, c è la capacità della cavità, mentre $\Delta V = U^+ - V^+$.

Il deterioramento del dielettrico è certamente correlato alla carica trasferita nel dielettrico; essa non può essere misurata e non è una scelta pratica.

2.3.2.2 CARICA APPARENTE TRASFERITA

La carica apparente trasferita sarà pari a $q = b \cdot \Delta V$ ed essa causa una caduta di tensione

$$\text{pari a } \left(\frac{b}{b+a} \right) \cdot \Delta V.$$

Molti rilevatori di scariche rilevano tale caduta di tensione e sono così capaci di determinare la scarica q .

Comunque la capacità b in serie al difetto non interagisce con esso e quindi la carica apparente q , può apparire come una scelta non buona tuttavia è usata come misura di scariche parziali.

2.3.2.3 ENERGIA DI SCARICA

L'energia dissipata attraverso la scarica può essere presa come misura ed è certamente relativa al deterioramento del dielettrico.

Quando la tensione ai capi della cavità cade (da U a V) ed ($a \gg b$) allora l'energia ammonta a:

$$p = \frac{1}{2} \cdot c \cdot [(U^+) - (V^+)] \quad (2.8)$$

dove c è la capacità della cavità.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.3.2.4 PERDITE DIELETTRICHE DOVUTE ALLE SCARICHE PARZIALI

L'energia totale persa durante un intero ciclo attraverso tutte le scariche parziali in un esperimento può essere espressa come:

$$W \cong \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2} \cdot (b + c) \cdot \Delta V^2 \right] \quad (2.9)$$

La misura di W può essere effettuata con un ponte di Schering o con un rilevatore speciale. Negli esperimenti in cui un grosso numero di scariche avviene simultaneamente, queste perdite sono spesso misurate per valutare la qualità dell'isolamento. Comunque questa misura non è generalmente raccomandata, poiché non riesce a distinguere poche scariche parziali di grande ampiezza rispetto ad altre più frequenti ma innocue.

2.3.2.5 QUANTITÀ INTEGRATE

Le quantità integrate devono esserlo tramite vari circuiti più o meno complessi in funzione della totale energia di scarica trasferita.

Alternativamente, possiamo integrare separatamente i vari impulsi di corrente di scariche parziali.

Anche questo metodo delle quantità integrate ha il difetto di non distinguere scariche parziali di bassa entità e quelle di elevata entità.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.3.3 SCELTA DI Q COME MISURA DI SCARICHE PARZIALI

2.3.3.1 RELAZIONE ENERGETICA

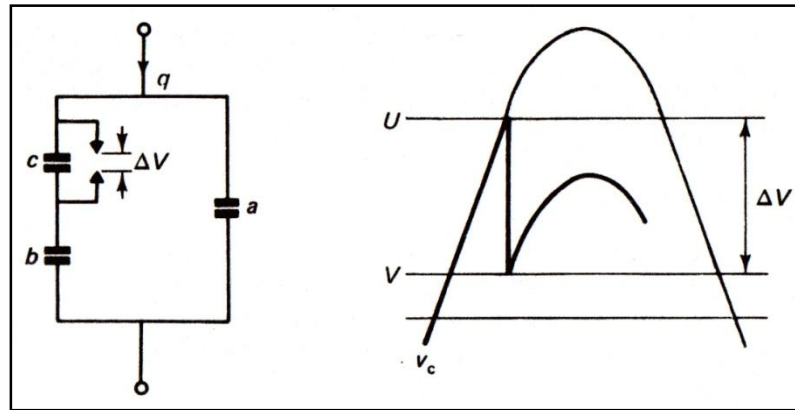


Figura 2.3.3.1(1): Diagrammi sulla relazione tra la carica apparente e l'energia della scarica
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

La carica apparente q che fluisce attraverso il dielettrico come nell'esempio può essere collegata all'energia p della scarica come segue:

$$p = \frac{1}{2} \cdot c \cdot (U^2 - V^2) = \frac{1}{2} \cdot c \cdot (U + V) \cdot (U - V) = \frac{1}{2} \cdot c \cdot (U + V) \cdot \Delta V \quad (2.10)$$

pertanto quest'ultima è l'energia trasferita alle cavità del materiale, che poi viene restituita nella scarica parziale.

Se trascuriamo V cioè la tensione a cui si porta la cavità nella scarica parziale allora l'energia si può approssimare:

$$p \cong \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta V \cdot U \quad (2.11)$$

dove $U = \left(\frac{b}{b+c} \right) \cdot \hat{V}_i$, dove \hat{V}_i è la tensione d'innesco delle scariche parziali.

Pertanto:

$$p \cong \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta V \cdot \left(\frac{b}{b+c} \right) \cdot \hat{V}_i \quad (2.12)$$

trascurando b rispetto a c , così che la risposta sia di qualche percento più elevata e allora riesco a recuperare il 10 % che avevo trascurato prima sul valore di V .

2. Introduzione alle scariche parziali

Dopo di che, essendo la carica uguale sia su b che su c, allora:

$$p \cong \frac{1}{2} \cdot b \cdot \Delta V \cdot \hat{V}_i \cong \frac{1}{2} \cdot q \cdot \hat{V}_i \quad (2.13)$$

La tensione d'innescò di solito è espressa in valore efficace:

$$p \approx 0.7 \cdot q \cdot \hat{V}_i \quad (2.14)$$

L'ampiezza della scarica q è così ragionevolmente una buona misura dell'energia p della medesima.

2.3.3.2 RELAZIONE CON LA DIMENSIONE DEL DIFETTO

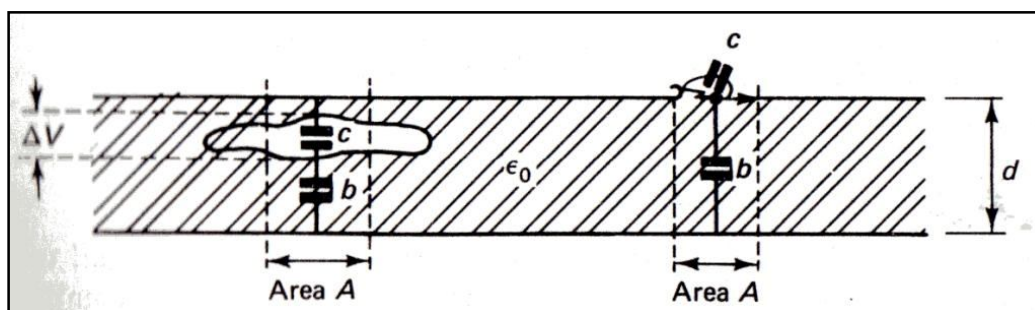


Figura 2.3.3.2(1): Schema equivalente per scariche parziali interne in tensione continua
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

L'area del sito di scarica è A, mentre d è lo spessore del dielettrico, qualora lo spessore della cavità fosse piccolo se comparato con d allora possiamo ragionevolmente assumere il campo elettrico omogeneo e quindi:

$$b = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \left(\frac{A}{d} \right) \quad (2.15)$$

e di conseguenza:

$$q = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A \cdot \Delta V \cdot \left(\frac{1}{d} \right) \quad (2.16)$$

Pertanto l'ampiezza della scarica aumenta con il volume del sito di scarica parziale interna, questo fa sì che q sia una quantità attraente per misurare le scariche parziali. Attenzione che però l'ampiezza della scarica parziale diminuisce all'aumentare dello spessore dell'isolante.

2. Introduzione alle scariche parziali

2.3.3.3 ESEMPI

Se $\varepsilon_0 \approx 9 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$ allora $q \approx \frac{9 \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \Delta V}{d} [pC]$, dove ε è la costante dielettrica assoluta dell'isolante, A è l'area del sito di scarica in $[mm^2]$, V è la tensione d'innesco delle scariche parziali in $[kV]$ e d è lo spessore del medesimo.

EX1 → la più piccola carica apparente rilevabile con un moderno rilevatore di scariche parziali è 0.01 pC, prendendo come esempio una cavità di $(100 \cdot 100 \cdot 50) \mu m$;

EX2 → la più piccola carica apparente rilevabile con un moderno rilevatore di scariche parziali in ambiente industriale è di 1 pC, prendendo come esempio una cavità o un volume in aria di $(1 \cdot 1 \cdot 60) \mu m$;

EX3 → per una cavità di $(10 \cdot 10 \cdot 1) \mu m$, la più piccola carica apparente rilevabile con un moderno rilevatore di scariche parziali è di 100 pC.

2.3.3.4 SCELTA DI Q COME MISURA DI SCARICHE PARZIALI

Le caratteristiche di trasferimento della carica q fanno sì che essa sia una quantità attraente per la misura delle scariche parziali e sono:

- q è direttamente relativa all'energia della scarica;
- q è direttamente relativa alle dimensioni del difetto;
- q è misurabile da un rilevatore elettronico;
- q può essere messa in relazione alla dannosità delle scariche parziali tramite le potenze di 10.

Bisogna dire comunque che l'ampiezza della scarica parziale non è uguale alla carica trasferita nella cavità, poiché è di solito diverse decine di volte q carica apparente.

L'unico svantaggio nell'uso della carica apparente q come misura di scariche parziali è che q è inversamente proporzionale allo spessore del dielettrico d .

Il più grosso isolante sarà così misurato con una sensibilità più bassa rispetto a quello meno spesso.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.1 RILEVAMENTO NON ELETTRICO DELLE SCARICHE PARZIALI

3.1.1 INTRODUZIONE

I metodi non elettrici per il rilevamento delle scariche parziali non possono essere usati per misurare l'ampiezza delle medesime, tuttavia possono individuarne la posizione.

I metodi non elettrici sono, in ordine di importanza crescente:

- trasformazioni chimiche
- pressione di un gas
- calore
- suono
- luce

e solamente gli ultimi due hanno rilevanza pratica.

3.1.2 RILEVAMENTO DEL RUMORE IN ARIA

Le scariche parziali in aria, come il Corona o le scariche parziali superficiali, si possono rilevare e localizzare facilmente tramite metodi acustici.

3.1.2.1 RUMORE UDIBILE

Scariche parziali di alcune centinaia di pC possono essere udite, tuttavia una parte modesta del rumore di sottofondo può comprometterne la sensibilità all'orecchio.

3.1.2.2 RUMORE ULTRASONICO

Di solito viene scelta una banda ristretta da 30 a 50 kHz, poiché in essa il rumore ambientale è poco importante, mentre a frequenze più elevate l'attenuazione del segnale acustico è molto più consistente.

Un sistema di rilevamento delle scariche parziali ultrasonico usa un riflettore parabolico e un microfono ultrasonico sintonizzato sui 30 kHz.

Il segnale è convertito in un suono udibile e la sua ampiezza può essere letta su un display tarato in decibel.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

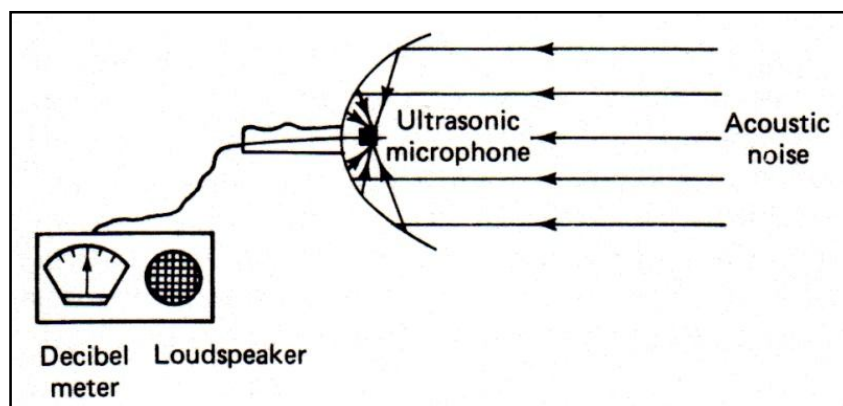


Figura 3.1.2.2(1): Localizzazione in aria con microfono ultrasonico
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Le scariche parziali di diversi pC possono essere rilevate con questo equipaggiamento e localizzate all'interno di un raggio angolo di circa 10°.

Per localizzare invece le scariche parziali superficiali si usa un tubo lungo da uno a due metri e qualche centimetro di diametro, che si appoggia alla superficie esterna dell'oggetto in prova; all'estremità opposta è posto un rilevatore di ultrasuoni che converte questi ultimi in suono udibile. Il tubo funge da guida d'onda per gli ultrasuoni, i quali vanno a stimolare il microfono ad ultrasuoni senza alcuna attenuazione.

Le scariche parziali possono essere localizzate con un precisione di pochi centimetri.

3.1.2.3 RICERCA E CORREZIONE DI UN DIFETTO

Il metodo acustico è un eccellente aiuto per la ricerca e la correzione di un difetto, quando si usano metodi elettrici.

3.1.3 RILEVAMENTO DEL RUMORE NELLE INSTALLAZIONI ISOLATE IN OLIO MINERALE

In questo tipo d'installazioni, come trasformatori, un rilevatore di ultrasuoni viene immerso nell'olio minerale isolante per poter rilevare le scariche parziali. Di solito, l'ampiezza di banda è amplificata fino ai 300 kHz, non sopra poiché l'attenuazione diventerebbe prevalente. I segnali sono osservati in un oscilloscopio con tempo base di 50 o 60 Hz, in questo modo possono essere rilevati gli impulsi acustici ed osservare se sono sincroni con la tensione del test e conseguentemente se sono causati da scariche parziali. La sensibilità di questo strumento è limitata, infatti se le scariche parziali avvengono nell'olio allora la sensibilità è intorno ai 10 pC, altrimenti i segnali acustici provenienti da parti del dielettrico profonde sono attenuati grandemente, cosicché il range minimo rilevabile va dai 500 ai 1000 pC.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

Resta fermo il fatto che con tutti i metodi non-elettrici l'ampiezza delle scariche non può essere rilevata, tuttavia questi stessi metodi hanno il grosso vantaggio di non essere affetti da disturbi esterni, cosicché possono essere ottenuti ottimi risultati nell'escludere il rumore elettrico sottostante. Per questa ragione, il rilevamento acustico è usato per monitorare l'andamento delle scariche parziali durante il servizio. I segnali elettrici prodotti da commutazioni, effetto Corona, sovratensioni di varia origine, ecc , non interferiscono con questo tipo di test, cosicché si ottiene una rilevazione attendibile sebbene non sensibile.

3.1.3.1 LOCALIZZAZIONE

Il rilevamento acustico può essere usato per localizzare le scariche parziali in dispositivi usati in alta tensione. Si usano diversi trasduttori per volta e il sito di scarica è calcolato facendo una triangolazione. Chiaramente data la complessità dei dispositivi in prova non c'è sempre attendibilità sulla reale localizzazione delle scariche parziali.

3.1.3.2 CONDENSATORI

I condensatori isolati in olio con capacità di diversi μF possono essere testati usando dei trasduttori ultrasonici appoggiati alla cassa d'acciaio dei medesimi, usando olio siliconico o glicerina per fare un accoppiamento acustico. La sensibilità della rilevazione è sui 20 pC. Il vantaggio di rilevazione del rumore, comunque, non è sempre chiaro e così pure la sensibilità del trasduttore acustico, che ad esempio per capacità sui 100 μF può essere più piccola di 10 pC. Il metodo acustico può essere usato assieme alla rilevazione del segnale elettrico, che, se sono entrambi nella stessa direzione, mi daranno la sicurezza della presenza in quella direzione di scariche parziali e quindi di siti di scarica.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.1.3.3 ISOLAMENTO SOLIDO

La relativa breve distanza tra la superficie del cavo e il conduttore centrale può aiutare nella localizzazione delle scariche parziali con il metodo acustico. Verranno posti dei microfoni ultrasonici sulla superficie del cavo, accoppiati alla medesima con uno strato di glicerina in modo da attenuare eventuali oscillazioni acustiche dovute alle scariche parziali e all'elasticità del dielettrico frapposto.

Lo spettro di frequenza del segnale ha un massimo alla frequenza:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m/s}} \quad (3.1)$$

dove m è la massa del microfono ed $\frac{l}{s}$ è l'elasticità della colonna di materiale isolante sotto il microfono.

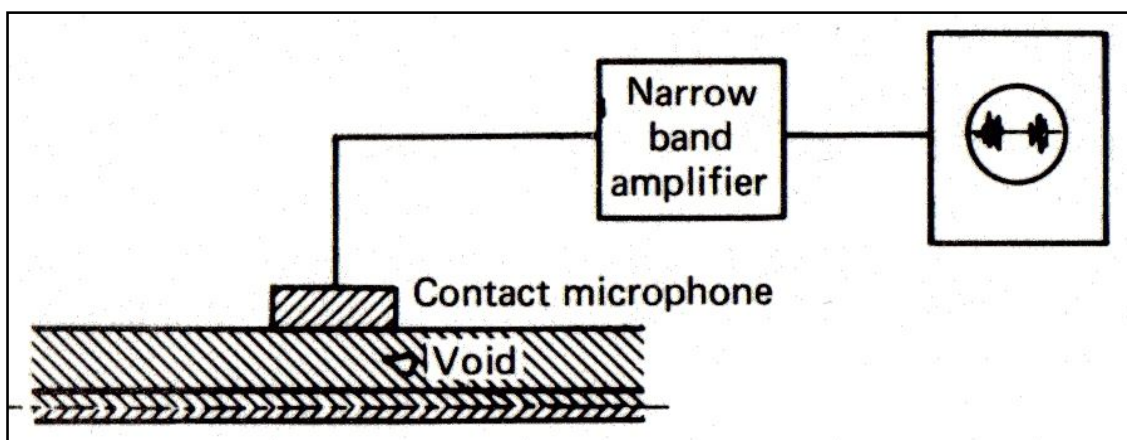


Figura 3.1.3.3(1): Circuito di rilevazione del rumore con amplificatore a banda stretta con frequenza centrale variabile

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

In pratica la frequenza caratteristica è dell'ordine dei 2 kHz; è stato verificato che, variando il peso del microfono ultrasonico di un fattore 4, a parità di taratura del microfono ultrasonico, si è presentata una frequenza del segnale acustico dovuto alle scariche parziali di due volte più bassa rispetto a quella originale, in accordo con quanto ci si aspetta solitamente.

La figura 3.1.3.3(1) mostra uno schema di principio su come si conduce una misura o rilevazione acustica di scariche parziali su di un cavo per energia.

Un microfono ultrasonico viene accoppiato alla superficie del cavo con l'ausilio di glicerina od olio silconico, in modo da favorire la trasmissione dell'onda sonora, poi il segnale acustico viene trasdotto in un segnale elettrico ed inviato ad un amplificatore a banda stretta sintonizzato sulla frequenza caratteristica del sistema.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

Le oscillazioni smorzate causate dalle scariche parziali sono successivamente visualizzate su di un oscilloscopio analogico o digitale se si vogliono memorizzare ed elaborare in seguito.

Chiaramente muovendo lungo il cavo il microfono ultrasonico avremmo, in corrispondenza del difetto, un picco massimo.

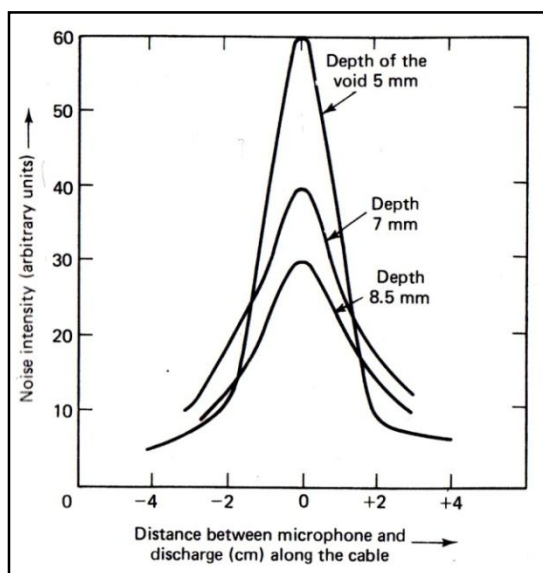


Figura 3.1.3.3(2): Diagramma di variazione del segnale di rumore lungo un cavo
Fonte: Partial Discharge Detection in High - Voltage Equipment - F.H. Kreuger 1989

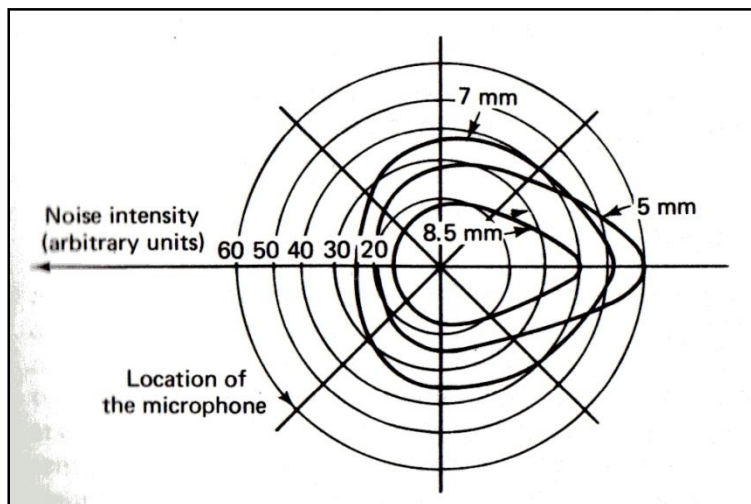


Figura 3.1.3.3(3): Diagramma di variazione del segnale di rumore lungo un cavo
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

Questo diagramma disegnato in figura 3.1.3.3(2), ci mostra l'andamento del segnale acustico dovuto alle scariche parziali muovendo il microfono ultrasonico attorno al cavo. Se il microfono ultrasonico è posizionato direttamente sul conduttore, il segnale acustico minimo rilevabile è di 5 pC, comunque gli strati di materiale conduttore attenuano grandemente il segnale acustico.

Ad esempio uno strato conduttivo di carta carbone attenua il segnale 2 volte, mentre uno strato di piombo di 1 mm lo può attenuare 10 volte.

Conseguentemente una sensibilità di circa 100 pC sul terminale di un cavo è il meglio che si può ottenere.

Pertanto i disturbi creati dal movimento del microfono lungo e attorno al cavo sulla sua superficie provocano numerosi svantaggi, quindi il metodo non si presta bene ad un uso quotidiano.

Lo stesso metodo può essere usato per rilevare e localizzare le scariche parziali in avvolgimenti di macchine elettriche con una sensibilità di 50 pC circa; è anche un buon metodo per localizzare scariche parziali sugli accessori per i cavi per energia.

3.1.3.4 ISOLANTI IN GAS COMPRESSO

Nelle sottostazioni elettriche isolate in gas compresso, le scariche parziali potrebbero avvenire come effetto Corona sulle punte non volute, come scariche parziali superficiali lungo gli isolatori o come scariche parziali interne agli isolatori stessi.

Le scariche parziali interne sono però difficili da misurare, ma König ha dimostrato che stimolando artificialmente delle scariche parziali superficiali sulla superficie dell'isolante, la sensibilità di una misura si aggira sui 25 pC e il sito di scarica viene localizzato in un'area di 300 mm.

3.1.3.5 CONCLUSIONI

Il vantaggio del rilevamento acustico delle scariche parziali è quello per cui queste osservazioni possono essere fatte in presenza di un ampio rumore elettrico sottostante; inoltre un ragionevole grado di siti di scarica può essere ottenuto muovendo il trasduttore ultrasonico attorno all'oggetto in prova.

Lo svantaggio è la non possibilità di misurare l'ampiezza delle scariche parziali e una sensibilità sufficiente, di solito 100 pC o superiore.

3.1.4 RILEVAZIONE VISIVA

Chiaramente la rilevazione visiva può essere fatta solo con l'effetto Corona e le scariche parziali superficiali.

Altrettanto chiaro è il fatto che, se viene effettuata la misura di scariche parziali in A.T. in una camera oscura, allora si possono vedere, rilevare e localizzare pure siti di scarica ultravioletti.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.1.4.1 INTRODUZIONE

L'occhio umano è veramente sensibile alla luce ancora per un quarto d'ora dopo che è cominciato il buio. Tuttavia, la scarica parziale più piccola rilevabile è molto più facile da rilevare nel campo dai 500 ai 1000 pC che ai 10 pC.

3.1.4.2 FOTOGRAFIA

Le scariche parziali superficiali possono essere rilevate molto bene dalla fotografia.

L'oggetto in prova viene posto in una camera oscura e l'obiettivo della fotocamera viene aperto nel tempo di applicazione della tensione elevata.

In aggiunta l'oggetto in prova viene illuminato per un piccolo tempo cosicché verrà ottenuta una figura delle scariche parziali sovrapposta all'oggetto in prova stesso.

All'aumentare dell'alta tensione applicata, la prima scarica parziale che appare è più piccola di 3 pC.

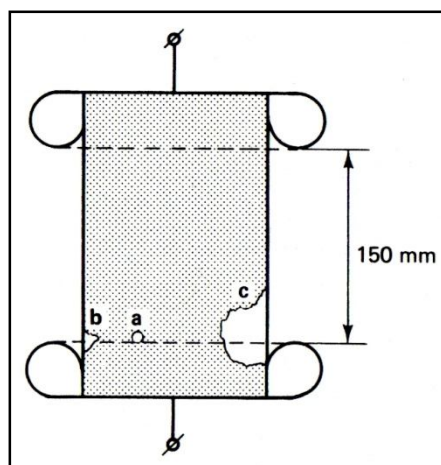


Figura 3.1.4.2(1): Scariche parziali superficiali

- a → 3pC
- b → 25pC
- c → 100pC

Fonte: Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Eseguendo questi test è possibile ottenere una sensibilità di rilevazione di scariche parziali superficiali di 1 pC. Il tempo di esposizione richiesto varia con l'ampiezza delle scariche parziali superficiali, mentre un tempo di esposizione di alcune ore è richiesto allo scopo di rilevare scariche parziali più piccole di 10 pC.

Il tempo di esposizione dipende anche dalla concentrazione delle scariche parziali; ad esempio scariche parziali dovute all'effetto Corona in uno spigolo dell'ordine dei 20 pC possono essere registrate in pochi minuti.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

La relazione tra l'ampiezza della scarica parziale e la dimensione della figura non è stabilita, poiché tra l'altro è afflitta o meglio dipende dalla concentrazione delle scariche parziali, dalla loro frequenza di ripetizione e dal loro moto.

La localizzazione delle scariche parziali superficiali e per effetto Corona è ottima, molto migliore rispetto a quello che si può ottenere con altri metodi.

3.1.4.3 ESEMPI

La rilevazione luminosa delle scariche parziali può essere fatta solo su quelle visibili. Un esperimento classico, eseguito da Mason, coinvolge un film fotografico inserito in un film di materiale isolante nel quale è stato ricavato un difetto artificiale. Egli dimostrò che sulla pellicola fotografica si impressero delle figure di LICHTENBERG.

Un secondo esperimento classico è quello che viene fatto sul terminale di un cavo fotografando le scariche parziali superficiali che possono presentarsi.

3.1.4.4 CONCLUSIONI

E' necessario e fruttifero suddividere i vari metodi di rilevazione e localizzazione delle scariche parziali che possono essere fotografate.

3.1.4.5 IL FOTOMOLTIPLICATORE

La sensibilità di rilevazione luminosa delle scariche parziali può essere apprezzata usando il fotomoltiplicatore. Siccome la radiazione elettromagnetica emessa dalle scariche parziali è principalmente centrata sulla finestra dell'ultravioletto allora il fotomoltiplicatore è un ottimo rilevatore poiché presenta un elevato guadagno e una elevata sensibilità proprio sulle radiazioni ultraviolette.

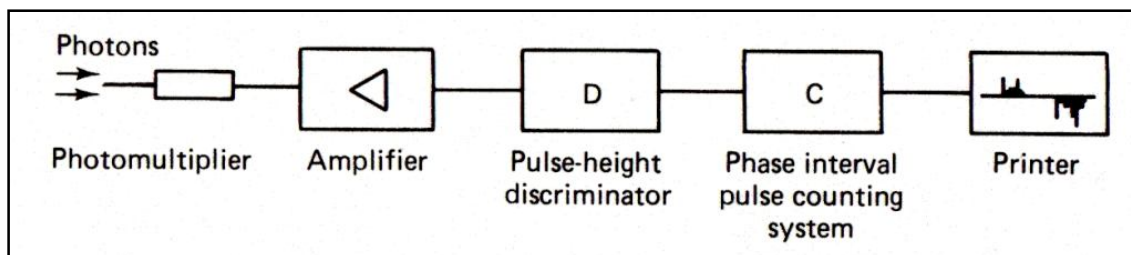


Figura 3.1.4.5(1): Foto rilevatore con sistema di acquisizione impulso
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Subito dopo il fotomoltiplicatore, abbiamo un amplificatore di segnale, dopo di che abbiamo un discriminatore d'impulsi, che distingue quelli voluti e quelli non voluti ed elimina quest'ultimi.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

Esistono due tipologie d'impulsi non voluti:

- impulsi di rumore provenienti dal foto-catodo;
- impulsi di rumore provenienti dai dinodi.

Gli impulsi di rumore generati dai dinodi sono più piccoli di quelli causati dalle scariche parziali per cui sono facilmente discriminabili e separabili, mentre gli impulsi di rumore generati dal fotocatodo non hanno alcuna correlazione con la fase della tensione di alimentazione. In altre parole esistono distinte correlazioni tra la fase dei foto impulsi voluti e la fase della tensione di alimentazione, sebbene il fattore di correlazione sia più piccolo dell'unità.

3.1.4.6 TABULATI

Dopo aver soppresso il rumore di fondo luminoso, verranno stampati un certo numero di impulsi come fossero piccole scariche parziali superficiali.

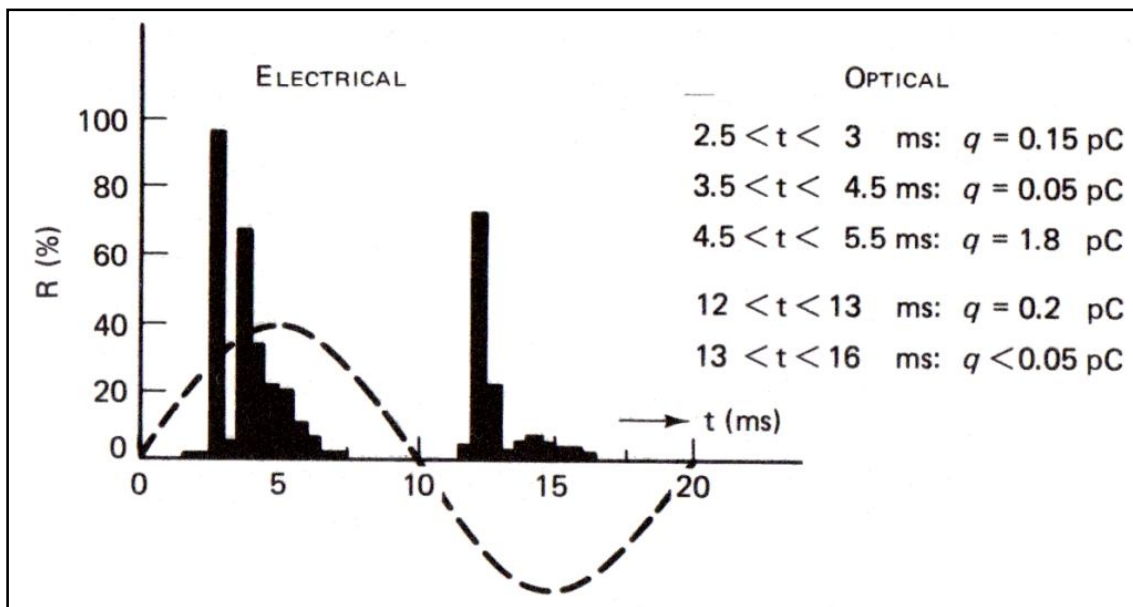


Figura 3.1.4.6(1): Diagramma dei foto impulsi di una piccola scarica parziale superficiale confrontati con i relativi impulsi di corrente di scarica parziale rilevati

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

Comparando queste letture con la rilevazione elettrica delle scariche parziali allo stesso tempo, possiamo capire che:

- esiste una stretta relazione tra rilevazione elettrica ed ottica che riguarda la localizzazione delle scariche parziali con tensione applicata sinusoidale;
- esiste una relazione lineare tra il numero di foto impulsi luminosi e l'ampiezza delle scariche parziali; questa può essere usata in casi specifici per calibrare il rilevatore ottico in pC;
- la sensibilità del sistema di rilevazione ottico aumenta con il tasso di ripetizione delle scariche parziali, dove possono essere raggiunte sensibilità da 0.05 pC a 0.005 pC;

la rilevazione ottica non è sempre praticabile poiché è richiesta oscurità durante e dopo i test, inoltre, il fotomoltiplicatore si satura facilmente con la luce e necessita di essere lasciato a riposo per alcune ore dopo i test.

3.1.4.7 FOTOMOLTIPLICATORE IN TENSIONE CONTINUA

Funziona molto bene per riconoscere scariche parziali nel polietilene in tensione continua, poiché il polietilene è sufficientemente traslucido perché passi una parte importante della radiazione luminosa. In questo caso, siccome le scariche parziali avvengono in tensione continua poche volte all'ora, cioè sono molto rade, allora questo è metodo si presta bene per eliminare i disturbi provenienti dall'esterno.

3.1.4.8 CONVERTITORE D'IMMAGINE

I convertitori d'immagine non solo amplificano la luce, ma rilevano anche la forma d'onda delle scariche parziali. Per questo motivo essi sono ottimi rilevatori e localizzatori di scariche parziali anche piccole sulla superficie di dielettrici trasparenti o traslucidi.

3.1.4.9 CONCLUSIONI

La rilevazione ottica o luminosa delle scariche parziali è un'eccellente metodo ausiliario per la rilevazione delle scariche parziali e per la loro localizzazione con una buona sensibilità senza effetti indesiderati dovuti ai disturbi elettrici.

La sensibilità può arrivare ad 1 pC. Molte altre parti più sofisticate come il fotomoltiplicatore e il convertitore d'immagini vengono usate in ricerca e raggiungono sensibilità di 0.01 pC.

I difetti principali sono:

- non misurano l'ampiezza delle scariche;
- vedono solo scariche superficiali o Corona.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.2 PRINCIPI DI RILEVAZIONE ELETTRICA DELLE SCARICHE PARZIALI

3.2.1 DIAGRAMMI DI BASE

Le scariche parziali sono impulsi di corrente che si possono visualizzare in determinati diagrammi.

Molti circuiti in uso per la misura delle scariche parziali, danno come risultato dei diagrammi riconducibili ad un unico diagramma di base.

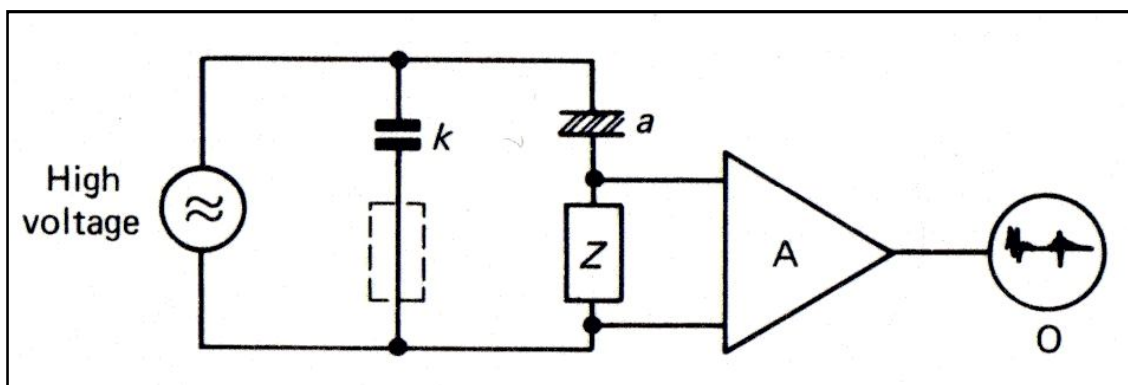


Figura 3.2.1(1): Schema di principio per la rilevazione elettrica delle scariche parziali
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Gli elementi del circuito sono:

- una sorgente di elevata tensione, preferibilmente esente da scariche parziali;
- un oggetto di prova affetto da scariche parziali, di capacità a ;
- un'impedenza Z , attraverso la quale si producono degli impulsi di tensione, provocati dagli impulsi di scarica;
- una capacità di accoppiamento k la quale facilita il passaggio degli impulsi di corrente in alta frequenza, e dovrebbero essere dello stesso ordine di grandezza del campione;
- un amplificatore A ;
- un'unità di osservazione O , la quale potrebbe essere un voltmetro di cresta o un oscilloscopio oppure un apparecchio campionatore di impulsi.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.2.1.1 IMPEDENZA DI RILEVAZIONE

L'impedenza Z può essere connessa all'oggetto in prova in due modi differenti:

- essa può essere posta in serie all'oggetto in prova;
- essa può essere posta in serie alla capacità di accoppiamento k .

Entrambi i metodi sono elettricamente uguali: la stessa tensione si presenta sulla impedenza Z , assumendo elevata l'impedenza della sorgente di alta tensione.

In pratica la connessione dell'impedenza Z è importante, infatti se l'oggetto in prova è molto grande, di solito essa non viene posta in serie a quest'ultimo, poiché un'elevata corrente potrebbe attraversarla.

Come impedenza di misura si usano due tipi:

- resistenza R
- circuito LCR .

Gli impulsi di tensione che si presentano ai capi di codeste impedenze vengono elaborati grazie all'uso delle trasformate di Laplace.

3.2.1.2 CIRCUITO RC

Nel circuito RC l'impulso appare essere unidirezionale come si può vedere dalla figura 3.2.1.2(1) di cui sotto.

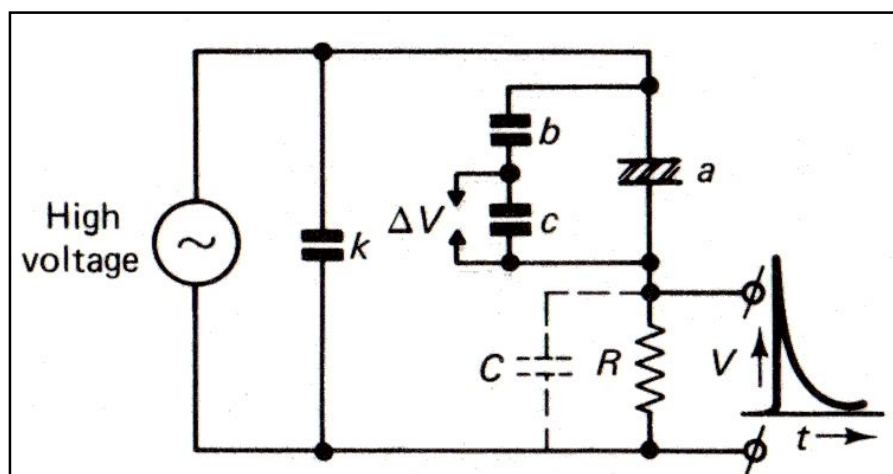


Figura 3.2.1.2(1): Schema di principio della misura e risposta dell'impedenza di misura RC
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

L'impulso sarà:

$$V = \left[\frac{q}{a + C \cdot \left(1 + \frac{a}{k}\right)} \right] \cdot e^{-(t/R \cdot m)} \quad (3.2)$$

dove q è l'ampiezza della scarica che causa l'impulso di corrente:

$$q = b \cdot \Delta V \quad (3.3)$$

e a, C, k sono in figura 3.2.1.2(1) . Inoltre:

$$m = \left(\frac{a \cdot k}{a + k} \right) + C \quad (3.4)$$

3.2.1.3 CIRCUITO LCR

Nel caso di un circuito oscillatore LCR, come si può vedere in figura 3.2.1.3(1),

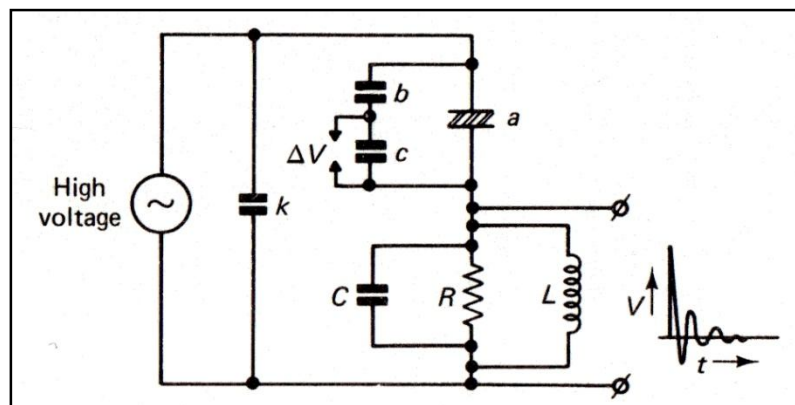


Figura 3.2.1.3(1): Schema di principio della misura e risposta dell'impedenza di misura RLC
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

L'impulso è un'oscillazione attenuata con la stessa tensione di cresta come nel caso RC:

$$V = \left[\frac{q}{a + C \cdot \left(1 + \frac{a}{k}\right)} \right] \cdot e^{-(t/2 \cdot R \cdot m)} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3.5)$$

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

dove

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{L \cdot m} - \frac{1}{4 \cdot R^2 \cdot m^2}\right)} \quad (3.6)$$

ed m è sempre il coefficiente già descritto prima.

3.2.1.4 CONCLUSIONI

I circuiti descritti in precedenza:

- sono circuiti di misura dell'ampiezza delle scariche parziali, in cui quest'ultima è proporzionale a q ;
- l'ampiezza degli impulsi è indipendente da R , comunque, se R è piccola, la costante di tempo R per m è piccola e così l'impulso è rapido; l'impulso rapido non dovrebbe essere totalmente amplificato in diversi amplificatori e l'impulso risultante come mostrato per esempio nell'oscilloscopio, diventa più piccolo se R diminuisce. Un buon rilevatore di scariche parziali ha perciò un'impedenza variabile che può essere settata sulla capacità dell'oggetto in prova; di solito il settaggio è costituito di 5 o 6 gradini.
- seguendo le equazioni che richiedono la capacità k , vediamo che essa è necessaria, altrimenti, $\frac{c}{k}$ a denominatore è più elevato e gli impulsi diventano più piccoli.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.2.2 AMPLIFICAZIONE DEGLI IMPULSI

3.2.2.1 CARATTERISTICHE DEL SEGNALE

Il circuito di base della figura 3.2.1.3(1) genera un segnale caratteristico, cioè una serie di impulsi corti con una costante di tempo di qualche μs , i quali appaiono raggruppati in gruppi.

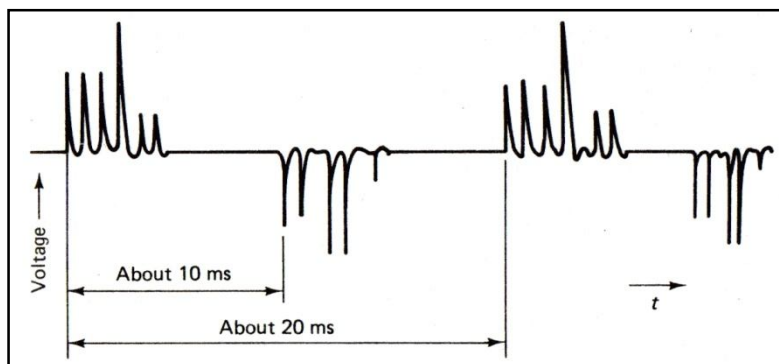


Figura 3.2.2.1(1): Normale rappresentazione degli impulsi di corrente di scarica parziale a tensione di prova a 50 o 60 Hz

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

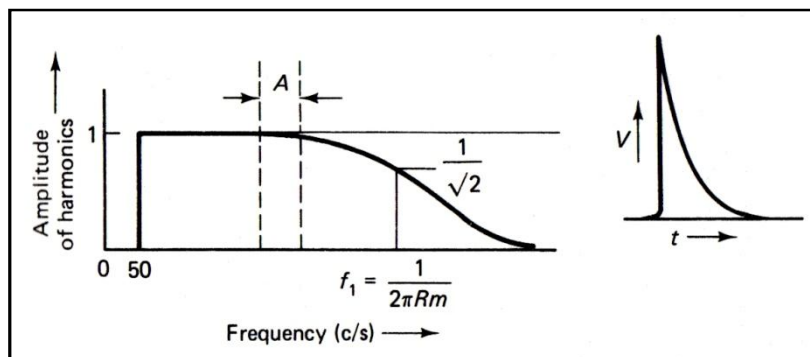


Figura 3.2.2.1(2): Normale rappresentazione degli impulsi di corrente di scarica parziale a tensione di prova a 50 o 60 Hz

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Questi impulsi hanno un frequenza di ripetizione di 100÷120 Hz. Non è richiesto mantenere la forma del singolo impulso per ulteriore trattamento del segnale.

Serve solo la posizione relativa dell'impulso e la sua profondità nel gruppo acquisito.

Questa richiesta semplificata da un grado di libertà nella scelta dell'amplificatore e in ulteriori trattamenti del segnale. Questa libertà può essere usata per raggiungere la sensibilità ottimale di un rilevatore di scariche parziali.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.2.2.2 DOPO IL CIRCUITO RC

Gli impulsi unipolari prodotti oltre l'impedenza di rilevamento RC hanno uno spettro in frequenza che è costante fino a quasi $f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot m}$ come mostrato in figura 3.2.2.1(2) .

L'ampiezza di banda dell'amplificatore dovrà chiaramente posizionarsi tra 50 Hz ed f_1 , ma dovrebbe essere scelta come banda stretta come in figura 3.2.2.1(2) o come banda larga o sopra f_1 .

L'ampiezza del segnale ottenuto in entrambi i casi è proporzionale a quella del segnale d'impulso.

Un valore pratico va dai 10 ai 150 kHz; la tensione di test e le sue più elevate armoniche vengono tagliate a 10 e 150 kHz.

Il limite superiore dell'amplificatore è 150 kHz e permette una buona amplificazione degli impulsi di corrente delle scariche parziali.

3.2.2.3 DOPO IL CIRCUITO LCR

Gli impulsi oscillanti che appaiono dopo la rete LCR hanno uno spettro di frequenza mostrato in figura 3.2.2.3(1).

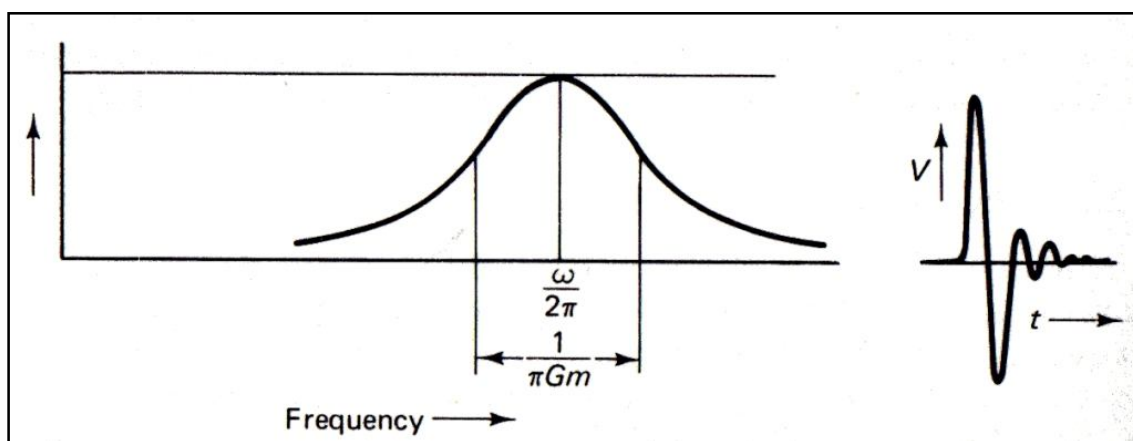


Figura 3.2.2.3(1): Spettro in frequenza degli impulsi di corrente di scarica parziale provenienti dall'impedenza di misura RLC

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

L'amplificatore deve avere una larghezza di banda che sia uguale o superiore a quella del segnale.

In pratica è necessario uno strumento a banda larga esempio fino a 250 kHz.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.2.3 SENSIBILITA'

La sensibilità di un circuito di rilevazione delle scariche parziali è definito tramite la più piccola scarica parziale che può essere osservata in presenza di rumore. L'ampiezza di queste più piccole scariche parziali rilevabili è espressa in pC.

3.2.3.1 SORGENTI DI RUMORE

Ci sono due sorgenti di rumore che possono nascondere gli impulsi di scarica:

- l'amplificatore;
- il circuito di rilevazione.

Il rumore proveniente dall'amplificatore predomina se non ci sono misure speciali da fare. Questo è svantaggioso, poiché la sensibilità allora deteriora linearmente con la capacità dell'oggetto in prova, come mostrato dopo.

Il rumore del circuito di rilevazione può essere portato oltre il livello di quello dell'amplificatore tramite passi successivi con un trasformatore.

La sensibilità può essere provata apprezzabilmente in questa via ed è allora proporzionale alla \sqrt{a} solamente.

3.2.3.2 OSSERVAZIONI GENERALI

La sensibilità ricavata teoricamente in codesta sezione è difficile da ottenere nella realtà. L'accoppiamento con interferenze elettromagnetiche, i disturbi nei conduttori e di terra e le scariche nei componenti del circuito che non siano l'oggetto in prova, spesso determinano la sensibilità.

Le scariche esterne sono difficili da prevedere, specialmente alle elevate tensioni, sarà dunque difficile ottenere una sensibilità più bassa di 1 pC a tensioni di 100 kV o superiori.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.2.4 RISOLUZIONE

Le scariche intervengono di solito in entrambi i semiperiodi delle elevate tensioni applicate sinusoidali a 50 o 60 Hz, come si può vedere per esempio nella figura 5.4 .

Se sono presenti alcuni siti di scarica, le scariche avvengono casualmente in entrambi i semiperiodi e l'intervallo di tempo tra due scariche successive è determinato statisticamente.

Allo scopo di ottenere una chiara traccia degli impulsi di scarica sull'oscilloscopio, il rilevatore deve essere in grado di separare la maggior parte degli impulsi.

Se gli impulsi non sono sufficientemente separati, una traccia luminosa confusa appare sullo schermo nel quale non si riescono a distinguere nettamente le singole scariche.

Alternativamente, gli impulsi sono sovrapposti cosicché s'ottiene un'ampiezza delle scariche parziali non corretta.

In accordo con Mole, il grado al quale gli impulsi possono essere separati è dato dalla risoluzione, la quale è definita come numero di impulsi che possono essere distinti in un quadrante da un'onda sinusoidale a 50 cicli al secondo, assumendo in ugual tempo di separazione degli impulsi.

La risoluzione dipende da:

- la risoluzione dello schermo dell'oscilloscopio;
- la risoluzione del circuito rilevatore;
- la risoluzione dell'amplificatore.

3.2.4.1 RISOLUZIONE DELLO SCHERMO DELL'OSCILLOSCOPIO

Gli impulsi di solito hanno durata così breve che appaiono come una linea sottile perpendicolare alla linea dello zero.

Il minimo spessore visualizzabile sullo schermo di un oscilloscopio è di 0,2 mm.

Se lo schermo ha una larghezza di 100 mm, al massimo si potranno vedere 500 linee verticali o impulsi.

Di solito sullo schermo dell'oscilloscopio si riescono a vedere 2 quadranti dell'onda sinusoidale a 50 cicli al secondo, conseguentemente, al massimo di 250 impulsi per quadrante possono essere visualizzati.

Se la base dei tempi viene amplificata, l'immagine si può allargare per visualizzare una sola parte dello schermo.

Se l'ingrandimento è 10 volte, si può ottenere una risoluzione di 2500 impulsi per quadrante. Di solito comunque l'amplificazione della base dei tempi non viene usata, cosicché ci sarà un limite superiore di risoluzione di 250 impulsi per quadrante, che viene settato come risoluzione ottica dello schermo dell'oscilloscopio.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.2.4.2 RISOLUZIONE DEL CIRCUITO DI RILEVAZIONE

Se alcune scariche nell'oggetto in prova avvengono vicine simultaneamente, gli impulsi di corrente sullo schermo si sovrappongono. Gli impulsi di tensione attraverso l'impedenza d'accoppiamento appaiono conseguentemente come impulsi sovrapposti.

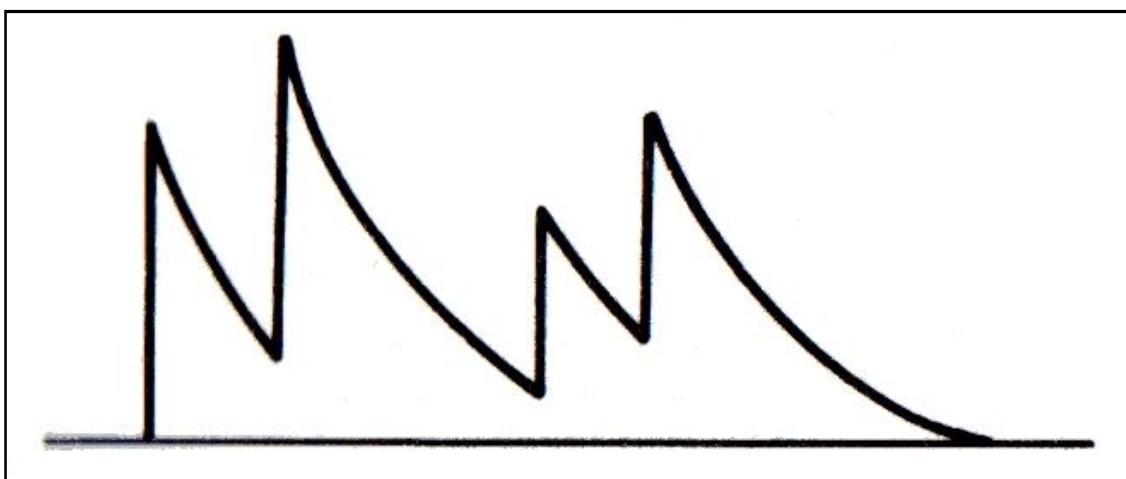


Figura 3.2.4.2(1): Impulsi parzialmente risolti

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Gli impulsi unipolari del circuito RC si sommano, mentre gli impulsi oscillanti di un circuito LCR possono essere sovrapposti, aggiunti o tagliati. In entrambi i casi appaiono degli impulsi sullo schermo dell'oscilloscopio i quali non sono della giusta ampiezza e comunque non possono essere separati e neppure distinti. Per poter essere separati devono avere una ricorrenza temporale di $1,5 \div 3$ volte la costante di tempo degli stessi. Conseguentemente, la risoluzione r come precedentemente definita è:

$$r = \left(\frac{1}{300 \cdot \tau} \right) \text{ fino ad } r = \left(\frac{1}{600 \cdot \tau} \right) \text{ impulsi per quadrante, dove } \tau \text{ è la costante di tempo}$$

del circuito di rilevazione.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

3.2.4.3 RISOLUZIONE DELL'AMPLIFICATORE

Se l'ampiezza di banda dell'amplificatore è più piccola di quella che corrisponde al segnale, l'amplificatore determina la risoluzione.

Con la relazione tra l'ampiezza e la costante di tempo, la risoluzione diventa:

$$r \approx \frac{B}{100} \quad (3.7)$$

impulsi per quadrante, dove B è l'ampiezza di banda dell'amplificatore.

3.2.4.4 RISOLUZIONE TOTALE

In conclusione si può dire che la risoluzione del rilevatore di scariche parziali è uguale al più piccolo valore di r, il quale è determinato, scegliendo il più piccolo dei seguenti tre valori:

- la risoluzione ottica dello schermo dell'amplificatore; questa di solito è 250 impulsi per quadrante; se viene registrato un transitorio la risoluzione è elevata;
- la costante di tempo τ del segnale, $r \approx 1/500 \cdot \tau$
- l'ampiezza di banda B dell'amplificatore, $r \approx B/100$.

Allo scopo di dare un'impressione del valore di r, il quale potrebbe essere dedotto in pratica, dal primo circuito rilevatore di Mole, il quale aveva una risoluzione di 35 impulsi per quadrante ed erano insufficienti poiché le scariche erano amalgamate nell'intorno del valore della tensione d'innescio e la loro visualizzazione sullo schermo dell'oscilloscopio è offuscata. L'esperienza tratta con risoluzioni maggiori di 250 impulsi per quadrante, quindi generalmente soddisfacente.

3.2.4.5 BANDA STRETTA VS BANDA LARGA

Molta confusione deriva dal concetto di "banda stretta" e di "banda larga" per i rilevatori. Il rilevatore a banda stretta originariamente era un rilevatore con un'impedenza di rilevazione sintonizzata.

L'ampiezza di banda di questo circuito d'ingresso era dell'ordine di 3 kHz, mentre quello derivato dall'amplificatore è circa 10 kHz. La risoluzione come determinata dal circuito d'ingresso era dell'ordine di 30÷40 impulsi per quadrante e quindi insufficiente. Comunque, la scarica oscillatoria risponde causando errori di sovrapposizione negli oggetti in prova complessi, come nei lunghi cavi, trasformatori e macchine rotanti.

Un rilevatore a banda larga ha un filtro passa-banda o un'unità resistiva come circuito d'ingresso. Le ampiezze di banda da 80 a 150 kHz sono in uso. L'ampiezza di banda degli amplificatori derivati va da 150 a 400 kHz.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

La risoluzione varia da 500 a 1500 impulsi per quadrante, la quale è pienamente soddisfacente. Comunque, la risposta è molto meglio aderente all'oggetto in prova come prima riferito. Le ampiezze di banda degli amplificatori in diversi rilevatori possono essere scelte a passi, per esempio 10, 30, 360 kHz, cosicché si possono usare entrambe le ampiezze di banda.

Questo non appare, a prima vista, essere veramente pratico, ma in alcuni casi di particolare disturbo, esso può venir attenuato moltissimo (comunque bisogna ricalibrare sempre dopo che l'ampiezza di banda è stata cambiata). Finalmente, un lavoro di ricerca è stato fatto nella regione dei nanosecondi con bande ultra larghe sopra anche il GHz. In quel caso, l'attuale decorso del fenomeno di scarica viene studiato nel tempo.

Questi studi sono principalmente condotti per cercare una correlazione tra la tipologia e l'aggressività delle une e le caratteristiche nella regione dei ns delle altre.

Questa banda ultra larga è la stessa usata nella localizzazione delle scariche parziali nei cavi corti, ecc.

3.2.5 OSSERVAZIONE

3.2.5.1 OSCILLOSCOPIO

La strada classica per osservare gli impulsi di scarica parziale è quella visualizzata sull'oscilloscopio. Gli impulsi di scarica sono di solito visualizzati su base temporale della stessa frequenza della tensione applicata di test.

Scariche parziali ricorrenti nei cicli successivi coprono ogni altro e si ottiene una figura stazionaria.

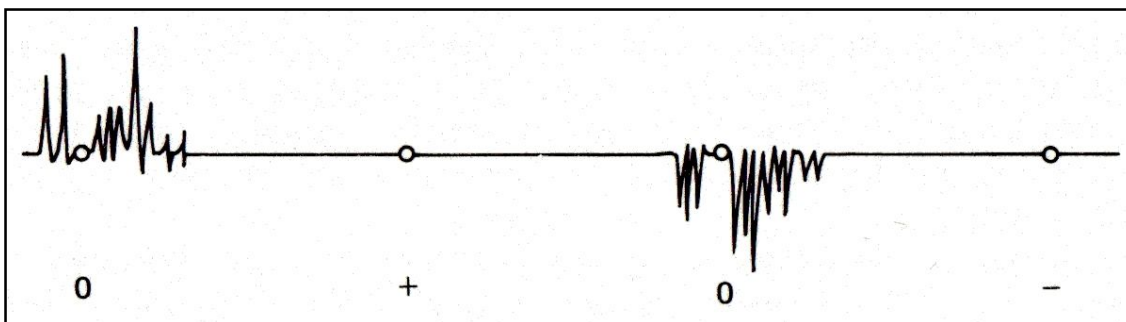


Figura 3.2.5.1(1): Visualizzazione degli impulsi di scarica parziale
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

Allo scopo di comparare, la sincronizzazione degli impulsi all'angolo di fase della tensione di test.

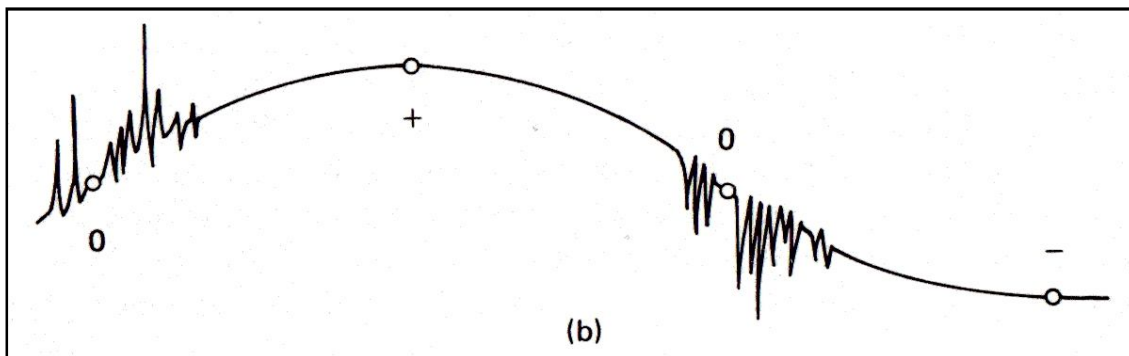


Figura 3.2.5.1(2): Visualizzazione degli impulsi di scarica parziale
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Questa figura su una base di tempo ellittica è anche più chiara.

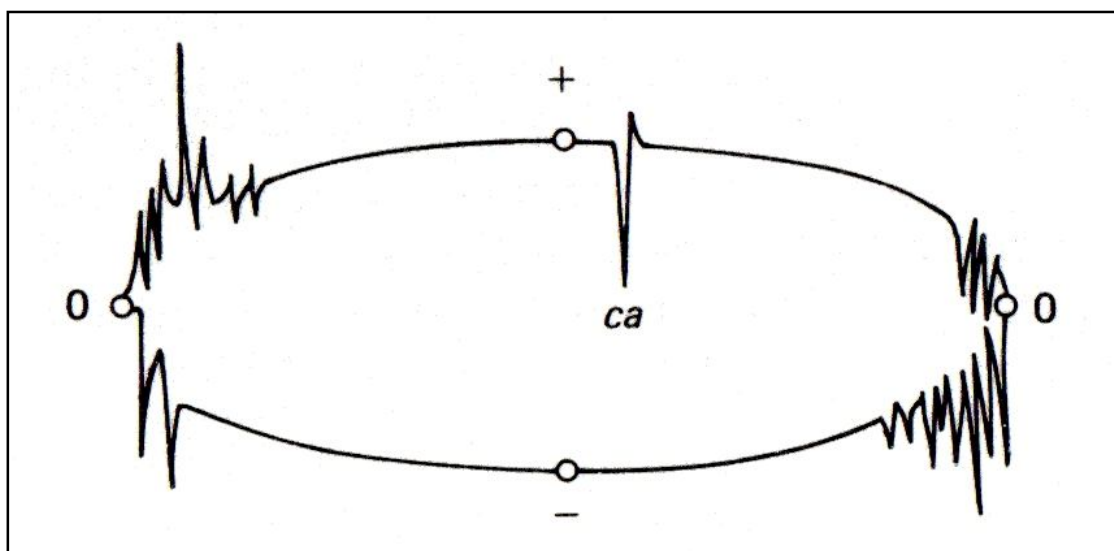


Figura 3.2.5.1(3): Visualizzazione degli impulsi di scarica parziale
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

L'ellisse è situato tra il massimo e il minimo del valore della carica apparente delle scariche parziali, che non sempre coincide con le creste positiva e negativa dell'alta tensione sinusoidale e la fine coincide con gli incroci degli zeri.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

Nella figura 3.2.5.1(4) qui sotto riportata, si può notare come vi siano presenti degli impulsi di scarica parziale molto caratteristici.

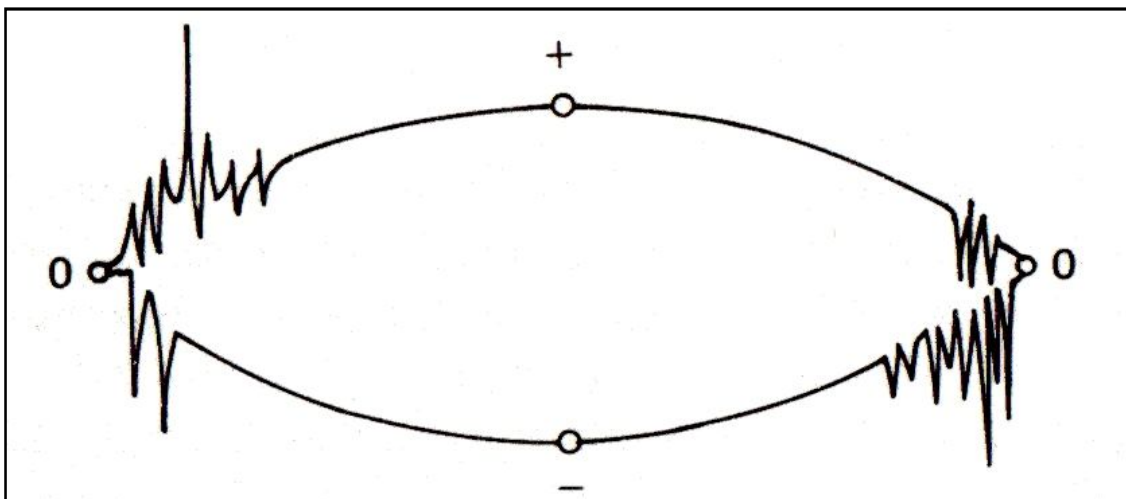


Figura 3.2.5.1(4): Visualizzazione degli impulsi di scarica parziale
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Le scariche parziali campionate visualizzate in questo modo danno una buona indicazione sulla loro tipologia e sulle loro sorgenti.

3.2.5.2 AMPIEZZA DI SCARICA

L'ampiezza della scarica può essere determinata attraverso l'aggiunta di un impulso di calibrazione sulla base di tempo. L'ampiezza dell'impulso di calibrazione è espressa in [pC] ed è comparata con l'ampiezza dell'impulso di corrente di scarica parziale.

3.2.5.3 VOLTMETRO DI CRESTA

Le osservazioni fatte tramite l'oscilloscopio potrebbero essere troppo complicate da usare in test industriali. In questo caso si può usare un voltmetro di cresta.

Questo strumento legge il picco del più elevato impulso di corrente di scarica parziale. E' buona pratica fare un diagramma x-y delle scariche osservate in funzione della tensione applicata. Le scariche sono visualizzate su di una scala logaritmica dove l'ampiezza delle medesime può variare di diverse decadi; inoltre la dannosità delle scariche parziali è più legata all'ordine di grandezza dell'ampiezza delle stesse più che al valore preciso. Chiaramente potrebbero entrare nel diagramma dati caratteristici come rumore, scariche instabili, ecc.

Troppo spesso nella pratica si associa all'ampiezza di scarica una tensione di prova alle caratteristiche di scarica dell'oggetto in prova.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

Se, per esempio, la comparazione viene fatta tra il comportamento delle scariche prima e dopo i cicli di carico o le caratteristiche delle scariche parziali necessitano di essere studiate, dopo un cambiamento nella tecnologia di produzione, solo diagrammi completi con tutte le caratteristiche aggiunte possono dare sufficienti informazioni.

3.2.5.4 REGISTRAZIONI X-Y

Un diagramma x-y può essere plottato automaticamente con l'ausilio di una registrazione x-y. Un segnale proviene dal divisore di tensione e va all'asse x, mentre il segnale proveniente dal voltmetro di cresta va all'asse y.

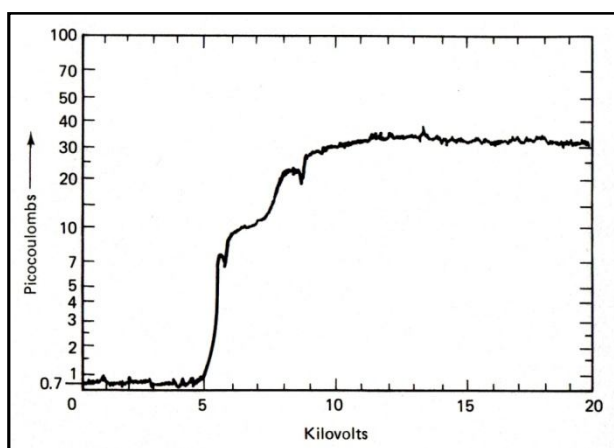


Figura 3.2.5.4(1): Diagramma x-y eseguito con plotter
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Attenzione va posta nell'osservare che tutte le scariche visualizzate nell'oscilloscopio siano verificate contemporaneamente, altrimenti potrebbero essere registrati senza essere discriminati, cosicché il diagramma x-y diverrebbe poco significativo.

3.2.5.5 CONTATORE D'IMPULSI

Un metodo avanzato d'osservazione è ottenuto attraverso l'uso di contatori d'impulso. Gli impulsi vengono classificati elettronicamente in base alla loro ampiezza e contati. Su questa strada sono ottenuti diagrammi che presentano in ascissa l'ampiezza delle scariche parziali in [pC], mentre in ordinata il numero delle scariche parziali nell'unità di tempo.

3. Misura e rilievo delle scariche parziali

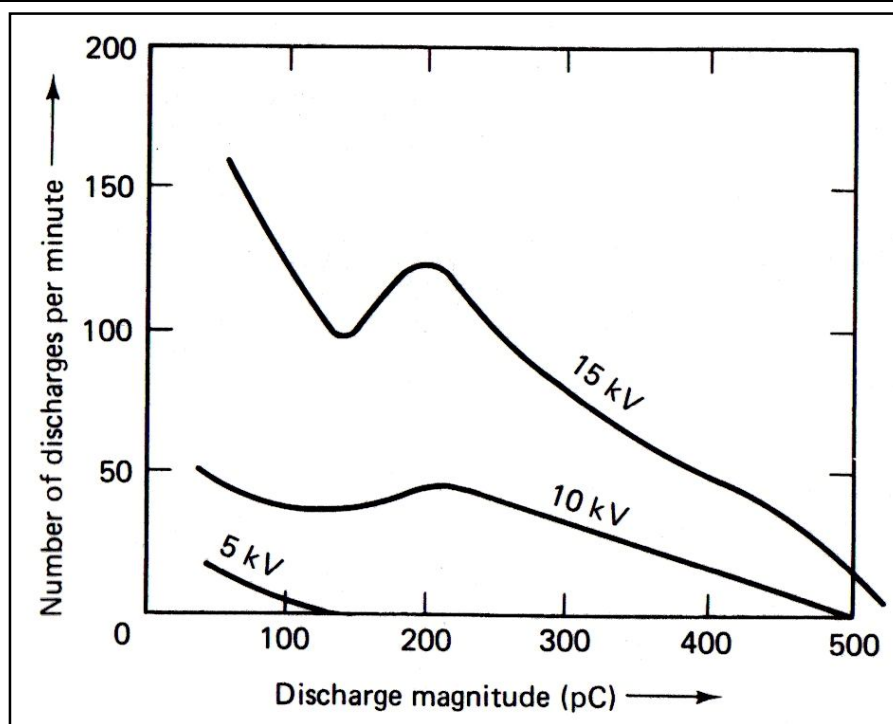


Figura 3.2.5.5(1): Diagramma costruito a partire dai risultati del contatore d'impulsi
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Sebbene questi diagrammi fatti tramite il contatore d'impulsi contengano molte informazioni, essi hanno lo svantaggio che le caratteristiche dei vari impulsi non possono essere separate e sono sovrapposte se ci sono molti siti di scarica presenti nel materiale. Il metodo è usato principalmente per ricerche in test con provini che contengono ben definiti siti di scarica. Il conteggio degli impulsi è eccellente e altresì indispensabile come metodo per la rilevazione delle scariche parziali alla tensione continua, dove solo poche scariche per minuto, o anche per ora, avvengono.

3.2.5.6 ELABORAZIONE DEI DATI

L'informazione contenuta nella sequenza di impulsi di corrente di scarica parziale può essere elaborata in diversi modi. Molti lavori sono stati fatti ed altri sono in corso sull'elaborazione e sull'analisi digitale degli impulsi di corrente di scarica parziale. In questo modo si possono classificare diversi gruppi di scariche. Lo scopo è quello di cercare una relazione o più relazioni tra questi gruppi di scariche e la tipologia delle medesime. Molto di questo lavoro di ricerca è fatto su provini dove uno specifico difetto è studiato in condizioni di laboratorio. La differenza tra le cavità nel dielettrico e quelle studiate sull'elettrodo può essere accentuata in questa via.

4. Misuratori di scariche parziali

4. Misuratori di scariche parziali

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

4. Misuratori di scariche parziali

4.1 RILEVAZIONE DIRETTA

Il circuito di rilevazione di base, come discusso nei capitoli precedenti, può essere usato in due differenti modi:

- rilevazione diretta
- rilevazione bilanciata o a ponte.

4.1.1 CIRCUITO DI RILEVAZIONE DIRETTA

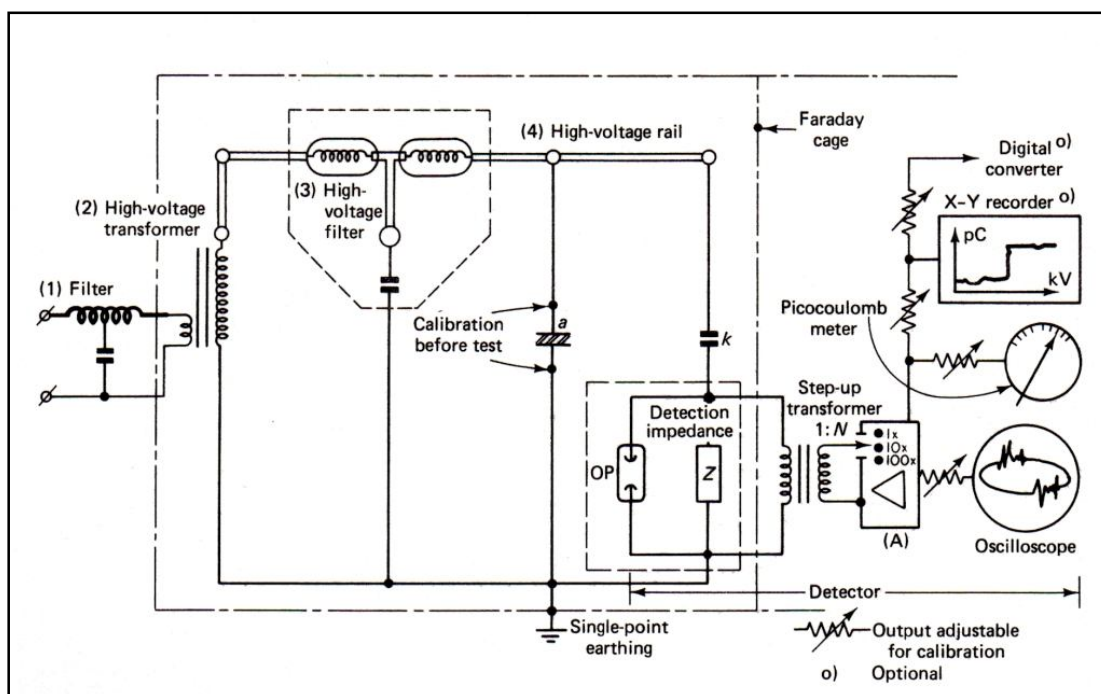


Figura 4.1.1(1): Circuito per la rilevazione diretta delle scariche parziali
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Il circuito di rilevazione mostrato in figura è composto di varie parti:

1. Un filtro nell'alimentazione è necessario per sopprimere le interferenze provenienti dalla rete; i segnali di disturbo nel range di frequenza da 10 a 250 kHz dovrebbero essere soggetti ad un'attenuazione di 80 dB. Siccome la corrente richiesta per il trasformatore ad alta tensione è leggermente elevata, così il filtro dell'alimentazione è una parte costosa dell'equipaggiamento. Lo stesso può essere detto degli altri elementi di soppressione dell'interferenza cosicché i costi totali dell'equipaggiamento aumentano ulteriormente.
2. Il trasformatore di alta tensione deve essere privo di scariche parziali.

4. Misuratori di scariche parziali

3. Il filtro di alta tensione oltre che sopprimere le interferenze deve anche sopprimere possibili piccole scariche parziali provenienti dal trasformatore stesso.
4. La sbarra di connessione tra la sorgente di alimentazione in alta tensione e l'oggetto in prova deve essere priva di scariche parziali per effetto Corona.
5. L'oggetto in prova (a) nella figura 4.1.1(1) di solito viene connesso tra l'alta tensione e la terra.
6. La capacità d'accoppiamento (k) deve assolutamente essere priva di scariche parziali; essa di solito è collegata all'impedenza di misura come mostrato in figura 4.1.1(1) oppure se in configurazione diretta, può essere posta ai capi della serie tra (a) e l'impedenza di misura.
7. L'impedenza di misura \dot{Z} è connessa in parallelo ad uno scaricatore per prevenire le sovratensioni che si possono presentare ai suoi capi; può essere provvista inoltre di un trasformatore elevatore 1:N o di un misuratore di alta tensione; l'impedenza può essere resistiva o un circuito risonante attenuato o anche un filtro passa - basso, in ogni caso con una banda passante elevata. Una larghezza di banda da 50 a 100 kHz è sufficiente per avere una risoluzione decente, tuttavia può anche andare oltre i 500 kHz.
8. Il trasformatore elevatore 1:N separa il rumore del circuito da quello dell'amplificatore.
9. L'amplificatore A ha una larghezza di banda molto più elevata di quella dell'impedenza di misura; qualche volta la larghezza di banda può essere scelta in modo tale da poter scegliere le ampiezze di banda adeguate.
10. Gli impulsi possono essere visualizzati tramite un oscilloscopio nella modalità preferita; il valore di picco della più elevata scarica parziale ripetitiva è indicato dal voltmetro di picco, il quale viene preventivamente calibrato in picocoulomb. Solitamente il misuratore di picocoulomb è costruito in scala logaritmica cosicché si possono visualizzare meglio 3 decadi di ampiezza di scarica in una misura. Un registratore x-y è connesso all'uscita logaritmica di quest'ultimo misuratore di picocoulomb e produce un segnale proporzionale alla alta tensione di prova.
11. Il circuito di prova o lo stesso laboratorio di prova è inserito in una gabbia di Faraday ed entrambi hanno un medesimo collettore di terra. L'alimentazione del rilevatore può essere filtrata tanto quanto l'equipaggiamento supplementare.

4. Misuratori di scariche parziali

4.1.2 CARATTERISTICHE

Le caratteristiche che determinano le abilità della rilevazione diretta (non bilanciata) delle scariche parziali sono riassumibili in tre idee:

- La risposta alla scarica q è determinata tramite l'ampiezza e la forma degli impulsi dall'impedenza di rilevazione. La risposta è data dai circuiti riportati nel capitolo 3 alle figure 3.2.1.2(1) e 3.2.1.3(1), dove l'ampiezza della risposta per entrambe è:

$$\hat{v} = \left(\frac{q}{a + (1+n) \cdot C'} \right) \cdot n = \frac{a}{k} \quad (4.1)$$

dove \hat{v} varia da pochi millivolts al microvolt.

- La sensibilità, iniziando dalla più piccola scarica rilevabile, è data da:

$$q_{sens} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\sqrt{(1+n)}}{\zeta} \cdot \sqrt{[a + (1+n) \cdot C]} \quad (4.2)$$

dove ζ è la risposta dell'amplificatore e (a) e (C) sono dati in picofarad.

Un tipico esempio di sensibilità nella rilevazione delle scariche parziali può essere dato dalla tabella riportata qui sotto.

capacità in prova	grado di elevazione	sensibilità
100 pF	2	0.01 pC
10 nF	5	0.1 pC
1 μF	45	1 pC

Figura 4.1.2(1): Tabella esempio della relazione tra capacità dell'oggetto in prova e sensibilità della misura di scariche parziali

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

- La risoluzione è il numero di scariche parziali che possono essere risolte in un quadrante. Essa è determinata dall'oscilloscopio, dall'impedenza di accoppiamento e dall'amplificatore. Un diagramma ragionevole dovrebbe avere 250 impulsi rappresentati per quadrante, corrispondenti a 20 μs tra due impulsi consecutivi.

4. Misuratori di scariche parziali

4.1.3 CALIBRAZIONE

La calibrazione dell'oggetto in prova è semplice, infatti si tratta di immettere nel medesimo una carica come taratura per il rilevatore di scariche parziali e quindi come riscontro.

La carica trasferita può essere generata da un generatore di onde quadre, che genera una tensione di diversi volts picco-picco in serie ad una capacità di alcuni picofarads.

Il calibratore deve essere connesso ai terminali dell'oggetto in prova direttamente, senza tensione applicata e avendo già connesso tutte le terre insieme.

Si può calibrare pure con un calibratore flottante, cioè con nessun terminale connesso a terra, in questo caso la relazione tra le scariche parziali misurate in picocoulombs e l'uscita del rilevatore è stabilita, indipendentemente dall'impedenza di accoppiamento, dal grado di trasformazione e dall'ampiezza di banda.

L'attenuazione dell'amplificatore e la sensibilità dell'oscilloscopio sono aggiustate in modo tale che ci sia un numero fissato di picocoulombs per millimetro sullo schermo dell'oscilloscopio. In questa via, il misuratore di picocoulombs e l'asse delle ordinate del registratore sono calibrati.

4.1.4 CALIBRAZIONE NON RACCOMANDABILE

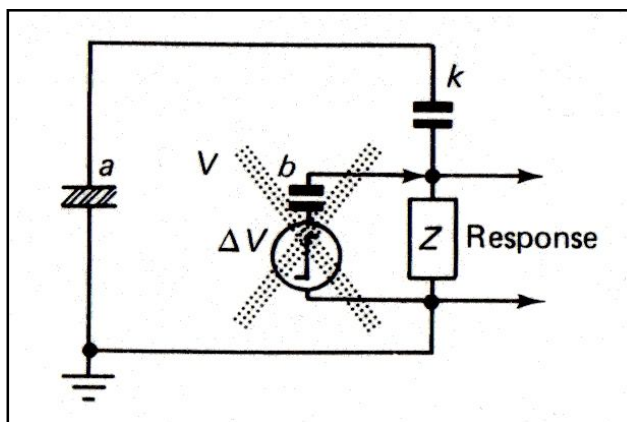


Figura 4.1.4(1): Modalità di calibrazione errata

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

La figura 4.1.4(1) rappresenta un metodo di calibrazione usato in molti rilevatori commerciali di scariche parziali.

La carica conosciuta come:

$$q = b \cdot \Delta V \quad (4.3)$$

è iniettata nell'impedenza di rilevazione. Se ora il rilevatore è calibrato con il calibratore interno, la lettura dello strumento è erronea.

4. Misuratori di scariche parziali

Si può calcolare la relazione tra la carica reale q letta e la carica iniettata q_{cal} , cioè:

$$q = \left(1 + \frac{a}{k}\right) \cdot q_{cal} \quad (4.4)$$

se entrambe danno la stessa lettura sullo strumento.

La reale scarica è così sempre maggiore di quella indicata. L'errore è piccolo, se l'oggetto in prova è piccolo, ma se la capacità dell'oggetto in prova è uguale a quella del condensatore d'accoppiamento allora l'errore è del 100 %, mentre per grandi oggetti in prova, l'errore può diventare diverse volte la lettura dello strumento.

Questo errore può essere prevenuto tramite l'applicazione dell'appena menzionata correzione, ma in molti casi la capacità dell'oggetto in prova o anche quella d'accoppiamento non si conoscono, quindi sono da determinare separatamente.

In ogni caso l'oggetto in prova non è una capacità pura, ma è un'impedenza anche complicata, ad esempio i trasformatori e i lunghi cavi per l'energia, dove giocano un ruolo determinante la capacità parassite verso terra.

In questi casi la correzione di cui alla formula 4.4 non è sempre applicabile.

4.2 RILEVAZIONE BILANCIATA

4.2.1 PRINCIPI

Il circuito di base 3.2.1(1) al capitolo 3 può essere duplicato e usato come circuito bilanciato mostrato nella figura 4.2.1(1) riportata qui sotto:

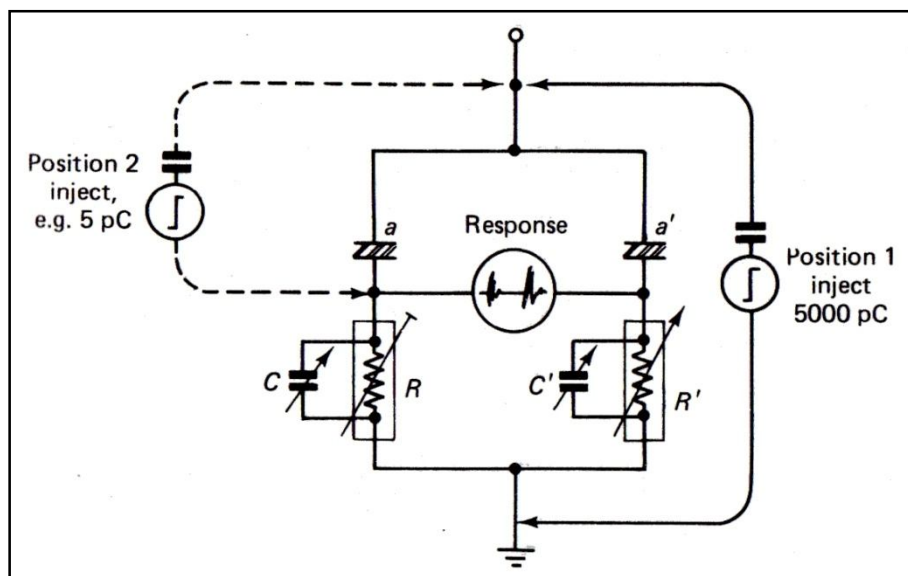


Figura 4.2.1(1): Circuito per la rilevazione bilanciata delle scariche parziali
Fonte: Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

4. Misuratori di scariche parziali

La rilevazione delle scariche parziali rimane sempre la stessa fatta con la rilevazione diretta, ma gli impulsi di corrente di scarica parziale dall'esterno degli oggetti in prova, cioè i disturbi ed il rumore possono essere soppressi.

Questo significa che le scariche parziali nella capacità d'accoppiamento o nel trasformatore sono eliminate e l'interferenza può essere soppressa apprezzabilmente.

Le impedenze Z_1 e Z_2 nella figura 4.1.4(1) sono variabili per ottenere il bilanciamento; le capacità d'accoppiamento (a) ed (a') sono preferibilmente identiche, ma s'ottengono buoni risultati anche con un oggetto di capacità (a) contro una capacità d'accoppiamento (a'). La procedura di bilanciamento è semplice, vedi la figura 4.2.1(2) qui sotto.

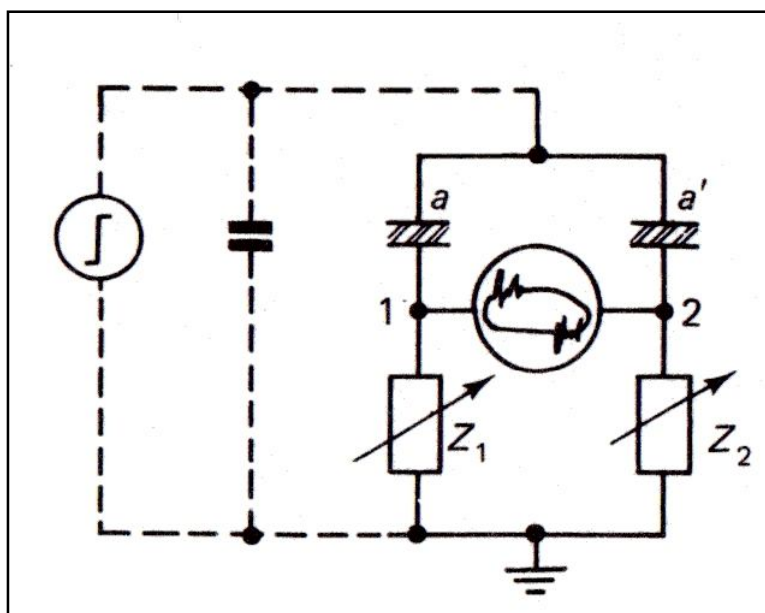


Figura 4.2.1(2): Procedura bilanciata per la rilevazione delle scariche parziali
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Un scarica di valore elevato è iniettata nel circuito a ponte. Le impedenze Z_1 e Z_2 sono realizzate come resistenze aventi capacità variabili in parallelo per la convenienza del fatto e sono aggiustate per ottenere la minima risposta del rivelatore.

4.2.2 GRADO DI REIEZIONE

La risposta a scariche esterne (posizione 1 figura 4.2.1(2)) è comparata con la risposta alle scariche interne, cioè (posizione 2 figura 4.2.1(2)) calibratore in posizione classica.

La relazione tra questi due valori è chiamato "grado di reiezione (m)":

$$m = \frac{\text{visualizzazione scarica esterna [pC/mm]}}{\text{visualizzazione scarica interna [pC/mm]}} \quad (4.5)$$

4. Misuratori di scariche parziali

La calibrazione è valida solo dopo aver calibrato entrambi i rami, consecutivamente, cioè, prima con una calibrazione classica in posizione 1 ai capi dell'oggetto in prova, dopo con una calibrazione ai capi del ponte di misura e infine determinare la risposta di nuovo in posizione 1.

Gli attuali gradi di reiezione sono affetti dalla differenza degli oggetti in prova, ad esempio:

- per m pari a 5000 per 2 oggetti identici
- per m da 100 a 500 per 2 oggetti non uguali ma dello stesso materiale
- per m da 3 a 30 per un oggetto in prova bilanciato con una capacità d'accoppiamento.

4.2.3 VANTAGGI DELLA RILEVAZIONE BILANCIATA

Sebbene la rilevazione bilanciata sia più laboriosa della rilevazione diretta, essa ha vantaggi inerenti alla soppressione di scariche esterne.

Questi vantaggi possono essere usati in differenti modi:

- La rilevazione della scarica può essere aggiustata in presenza di scariche esterne o altre interferenze;
- Quando appare la prima scarica è possibile stabilire di quale origine essa sia; attraverso la variazione del bilanciamento, le scariche di origine esterna variano in un'ampia estensione, mentre non succede per le scariche di origine interna. Questo è il miglior vantaggio rispetto alla rilevazione diretta;
- La rilevazione bilanciata può essere usata per localizzare le scariche parziali.

4.2.4 CARATTERISTICHE

Le caratteristiche della rilevazione bilanciata, a parte quelle relative al bilanciamento del ponte di misura, sono le stesse della rilevazione diretta.

Le caratteristiche che ne determinano le prestazioni sono:

- L'ampiezza e la forma dell'impulso di corrente di scarica parziale;
- La sensibilità di misura in un oggetto di capacità (a) è simile a quella che si ha nella rilevazione diretta e proporzionale alla radice di (a) per (a) elevati;
- La risoluzione della rilevazione bilanciata è espressa come numero di impulsi di corrente di scarica parziale che possono essere risolti in un quadrante dell'ellisse sullo schermo;
- Un elevato grado di reiezione può crearsi facilmente se (a) ed (a') sono identiche.

4. Misuratori di scariche parziali

4.2.5 CALIBRAZIONE

L'unico modo attendibile di eseguire una corretta calibrazione in una rilevazione bilanciata è iniettare la carica nota nell'oggetto in prova, come mostra la posizione 1 della figura 4.2.1(2) e aggiustare i settaggi variabili del ponte di misura.

La doppia calibrazione è necessaria se le due capacità, quella dell'oggetto in prova e quella della capacità d'accoppiamento sono diverse.

La rilevazione interna è meno rischiosa rispetto a quella con la rilevazione diretta dove la carica di calibrazione viene iniettata ora in serie ai due oggetti in prova, come si può vedere nella posizione 2 della figura 4.2.1(2).

Se la carica di calibrazione è iniettata da un punto del ponte di misura questo corrisponde alla scarica q nell'oggetto in prova:

$$q = (1 + n) \cdot q_{cal} \quad (4.6)$$

Nel caso di capacità uguali $\left(n = \frac{a}{a'} = 1 \right)$ essa diviene:

$$q = 2 \cdot q_{cal} \quad (4.7)$$

e la calibrazione può essere fatta internamente.

4.3 CALIBRATORI

Descriviamo quattro tipologie di calibratori:

- generatore di onde quadre;
- calibratore portatile;
- spinterometro a punta;
- cavità artificiale.

4. Misuratori di scariche parziali

4.3.1 GENERATORE DI ONDE QUADRE

Gli impulsi di tensione potrebbero essere generati con un generatore di onde quadre che si trova disponibile commercialmente.

Un'onda quadra di tensione "e" rappresentata come in figura 4.3.1(1) è costruita per causare un trasferimento di carica pari a:

$$q = e \cdot b \quad (4.8)$$

nella capacità "b" in serie al generatore di onde quadre.

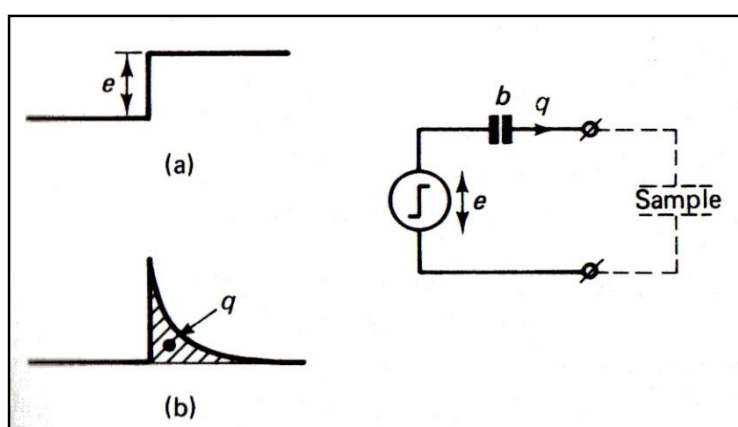


Figura 4.3.1(1): a) impulso quadro di tensione

b) carica associata all'impulso quadro di tensione

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Questa carica trasferita è iniettata nell'oggetto in prova e causa in esso una risposta data da un impulso di tensione che viene rilevato dall'impedenza di accoppiamento.

Le scariche di ampiezza nota sono fornite e una calibrazione diretta in picocoulombs è ottenuta in questa via.

4. Misuratori di scariche parziali

4.3.2 CALIBRATORE PORTATILE

Il classico calibratore è portatile e le sue caratteristiche sono:

- piccolo e poco ingombrante;
- provvisto di batteria;
- provvisto di capacità interne di alcuni picofarads;
- provvisto di due frequenze di funzionamento a 50 e 60 Hz;
- sincronizzabile con la frequenza della tensione di alimentazione, di solito tramite un foto diodo con la luce dell'ambiente di lavoro, vedi figura 4.3.2(1) qui sotto;
- provvisto di diverse capacità in serie, ad esempio (5,50,500,5000 [pC]);
- talvolta può generare doppio impulso con controllo della risoluzione.

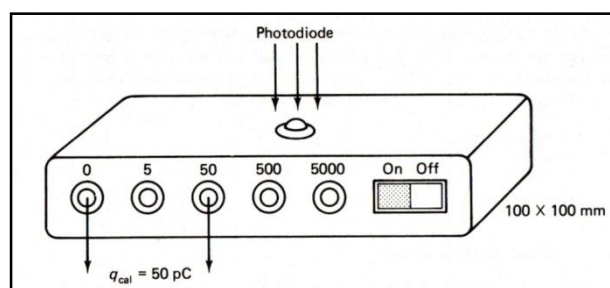


Figura 4.3.2(1): Calibratore portatile con foto diodo

Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

4.4 INTERFERENZA

L'attendibilità e la sensibilità dei circuiti di rilevazione sono seriamente compromesse dalle interferenze, per due motivazioni diverse:

- **SENSIBILITA'**: sensibilità minime possono essere spesso non attendibili se segnali estranei creano una banda di rumore che è più larga del rumore termico del circuito;
- **ATTENDIBILITA'**: segnali estranei spesso appaiono quando la tensione di prova è aumentata e potrebbe essere presa come segnale di scarica dall'oggetto.

Le cause dell'interferenza sono:

- alimentazione;
- circuito di alta tensione;
- rumore esterno rilevato;
- rumore di contatto.

4. Misuratori di scariche parziali

4.4.1 ALIMENTAZIONE

L'interferenza causata dall'alimentazione può essere filtrata con un filtro serie all'alimentazione ed è molto necessario nelle misure di scarica parziale condotte in ambiente industriale.

4.4.2 CIRCUITO D'ALTA TENSIONE

4.4.2.1 SORGENTE D'ALTA TENSIONE

Le scariche parziali che avvengono nel trasformatore di alta tensione sono rilevabili direttamente e quindi è necessario un trasformatore esente da scariche parziali.

4.4.2.2 CONDUTTORI D'ALTA TENSIONE

Allo scopo di non far comparire fenomeni di effetto Corona sui punti a campo elevato dei conduttori d'alta tensione, questi ultimi debbono essere dimensionati adeguatamente. I conduttori dovrebbero perciò consistere di cilindri o sfere di diametro sufficiente per prevenire l'effetto Corona alla tensione di prova.

4.4.2.3 CONDENSATORE D'ACCOPIAMENTO

Il condensatore d'accoppiamento deve essere privo di scariche parziali. Nel caso di solo circuito differenziale dove vengono testati due oggetti nel medesimo tempo, non è necessario un condensatore d'accoppiamento.

4.4.2.4 TERMINALI

In molte strutture sottoposte ad elevate tensioni i terminali non sono parti essenziali, tuttavia le scariche parziali che nascono da essi si mascherano bene sotto a quelle dell'oggetto in prova.

Debbono quindi essere eliminate o separate tramite una rilevazione bilanciata.

4.4.3 RUMORE ESTERNO RILEVATO

Le radiazioni elettromagnetiche prodotte dall'ambiente esterno potrebbero essere rilevate tramite il circuito.

Le maglie molto estese formate dalle connessioni a tensione elevata agiscono come antenna ricevente per le radiazioni elettromagnetiche.

Al fine di attenuare in modo consistente questi disturbi indotti è necessario operare la misura in una gabbia di Faraday.

4. Misuratori di scariche parziali

4.4.3.1 SCARICHE PARZIALI INDOTTE

Disturbi preoccupanti e fastidiosi sono provocati da imperfetti collegamenti di terra dei vari componenti i circuiti di rilevazione o piccole parti a tensione flottante.

In questi oggetti a tensione flottante, la tensione è indotta dalla tensione di alimentazione del test, la quale è periodicamente scaricata tramite guasti o contatti non corretti, vedi figura 4.4.3.1(1), qui sotto riportata.

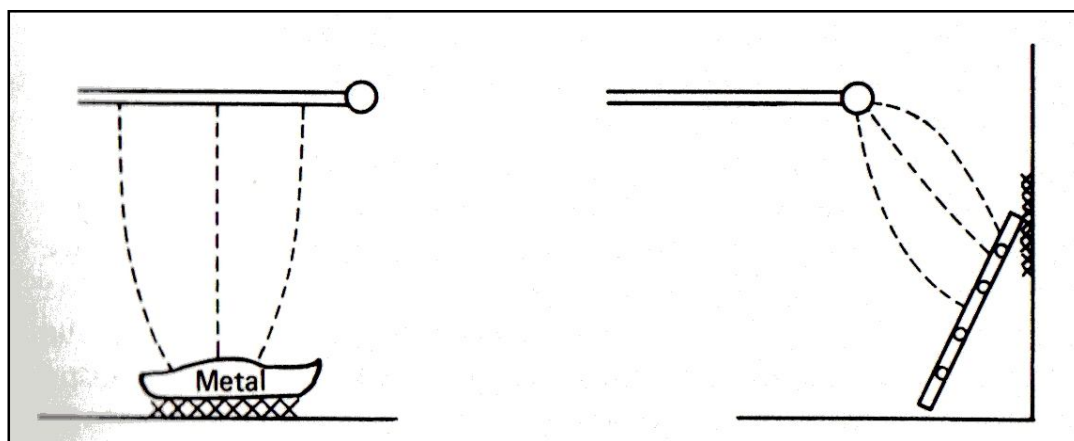


Figura 4.4.3.1(1): Configurazioni possibili delle interferenze indotte da parti flottanti
Fonti: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

Le parti a potenziale flottante possono causare disturbi i quali sono difficilmente distinguibili dalle reali scariche parziali nell'oggetto in prova.

4.4.3.2 TERRE MULTIPLE

Una causa seria di disturbi sovrapposti sono le terre multiple; infatti se il circuito di rilevazione e i suoi componenti sono posti a terra in diversi punti, possono venire prodotti disturbi dovuti alle diverse maglie del circuito che si vengono involontariamente a creare, anche perché non è detto che il potenziale dei diversi punti sia identico. E' necessario avere un unico punto di messa a terra, senza creare maglie sulle quali si possono indurre disturbi trasmessi.

4. Misuratori di scariche parziali

4.4.4 RUMORE DI CONTATTO

4.4.4.1 RUMORE DI CONTATTO NEL CIRCUITO

Cattivi contatti o messe a terra non corrette potrebbero generare segnali di disturbo, i quali tendono a concentrarsi intorno allo zero rispetto alla sinusoide della tensione di alimentazione a 50 Hz, cosicché diventano difficili da distinguere dalle scariche parziali.

4.4.4.2 RUMORE DI CONTATTO NELL'OGGETTO IN PROVA

Nei trasformatori, che costituiscono l'oggetto di prova in questa dissertazione, il commutatore, cattive connessioni di terra oppure isolatori costruiti male, potrebbero causare scariche parziali che non sono dannose per l'isolante ma sono più elevate che nelle altre parti dell'oggetto in prova.

4. Misuratori di scariche parziali

4.4.5 CHECKLIST

Proponiamo ora una lista di controlli da effettuare per attenuare o eliminare le varie tipologie d'interferenza.

	<i>Interference</i>	<i>Examples</i>	<i>Control</i>
<i>Disturbances or discharges in the circuit</i>	Mains interference	Steep pulses from power electronics	Filter in feeding leads and/or in high-voltage line
	Discharges in high-voltage source		Discharge-free high-voltage transformer. Filter in high-voltage line
	Discharges in coupling capacitor		Coupling capacitor should be discharge-free, or two samples should be tested in a balanced circuit
	Discharges in terminals	Discharges in cable terminals, bushings, etc.	Terminals, bushings, etc. should be discharge-free All preceding disturbances can be suppressed by using a balanced detector
<i>Pick up</i>	Other high-voltage tests		Screening and eliminating the cause
	Electromagnetic waves	Radio signals. Power electronics. Switching in vicinity	Screening. For preventing radio signals a detector below about 100 kc/s can be chosen
	Induced discharges	Badly earthed or floating parts in the vicinity	Eliminating the cause. Screening
	Multiple earthing	Different sample- and trafo-earth. Power supply of instruments	Screening is effective in all three preceding cases Strict single-point earthing
<i>Contact noise</i>	Contact noise in the circuit		Making good connections and earthings, also in variable components in the input circuit
	Contact noise in the circuit	Contacts between foils and terminals in capacitors	Applying current impulses by short-circuiting
		Contact noise in bushings, tap changers, or earthing of the core in transformers	Checking contacts before mounting
		Contact between semiconducting layer and metallic sheath of cable	Choosing smaller time constant (= higher resolution) of input circuit

Figura 4.4.5(1): Lista di controlli da eseguire per attenuare o eliminare le interferenze nella misura
Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment – F.H. Kreuger 1989

5. Normativa I.E.C. 60270

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

5.1 PREAMBOLA ALLA NORMATIVA CEI EN 60270

La misura delle scariche parziali, attualmente, in ambito industriale, è regolata dalla normativa IEC 60270, divenuta poi anche CEI EN 60270 e dalle relative norme di prodotto che, per i particolari oggetti, definiscono i limiti d'intensità ed i criteri di prova. La normativa in questione 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 fra le parti.

5.1.1 CONTENUTO E CAMPO D'APPLICAZIONE

La norma internazionale IEC 60270, nelle sue varie edizioni, si applica alle misure di scariche parziali che si verificano nelle apparecchiature, nei componenti o nei sistemi elettrici sottoposti a prove con tensioni alternate, fino a 400 Hz, o con tensione continua. La norma in questione definisce: i termini impiegati, le grandezze da misurare, i circuiti di prova e di misura che possono essere utilizzati, i metodi di misura analogici e digitali richiesti per le applicazioni comuni, i metodi di taratura e prescrizioni per gli strumenti utilizzati per la taratura ed in fine fornisce una guida sulle procedure di prova e offre alcuni suggerimenti relativi alla discriminazione delle scariche parziali dalle interferenze esterne. La norma contempla le misurazioni elettriche di scariche parziali impulsive (di breve durata), ma contiene anche riferimenti a metodi non elettrici, principalmente utilizzati nella localizzazione e nella diagnostica delle scariche parziali, tuttavia ribadiamo il fatto che essa tratta esclusivamente i metodi elettrici per la misura dell'ampiezza delle scariche parziali allo scopo di poter dare un'indicazione numerica e quindi al fine ultimo di segnalare un oggetto in norma oppure fuori norma.

5.2 DEFINIZIONI

La normativa IEC 60270 in questo capitolo vuole mettere in evidenza le grandezze di riferimento per la misura delle scariche parziali e farne l'analisi approfondita.

5.2.1 DEFINIZIONI GENERALI

Scarica parziale (PD)

Scarica elettrica localizzata che attraversa solo parzialmente l'isolamento tra conduttori e che può essere o non adiacente ad un conduttore.

5. Normativa I.E.C. 60270

Sono fenomeni di scarica che non coinvolgono direttamente entrambi gli elettrodi fra cui è applicata la tensione, bensì interessano eventualmente solo un elettrodo e il materiale dielettrico circostante, oppure sono localizzate all'interno dello stesso dielettrico. Questo fenomeno è solo uno degli aspetti delle scariche cosiddette incomplete, ossia tali da non interessare l'intero spazio fra i terminali cui è applicata la tensione. Le scariche parziali si verificano per livelli di campo elettrico superiore ad un certo valore, all'interno di un dielettrico, nelle sue cavità gassose, alla sua superficie, nelle zone di transizione con gli elettrodi. Avvengono cioè in zone limitate, per effetto di caratteristiche locali del materiale o di particolari livelli di campo elettrico, in situazioni generalmente lontane da quelle che possono portare ad una scarica totale.

Impulso di scarica parziale (impulso PD)

Impulso di corrente o di tensione da una scarica parziale che si verifica all'interno dell'oggetto in prova. L'impulso viene misurato utilizzando idonei circuiti di rilevazione, che sono stati introdotti nel circuito di prova per tale scopo.

5.2.2 GRANDEZZE RELATIVE AGLI IMPULSI DI SCARICHE PARZIALI

Carica apparente q

Di un impulso di scarica parziale è quella carica che, iniettata in brevissimo tempo tra i terminali dell'oggetto in prova, in un circuito di prova specificato, darebbe luogo alla stessa lettura sullo strumento di misura dell'impulso di corrente di scarica parziale stesso. La carica apparente è generalmente espressa in picocoulomb (pC).

La definizione sostanzialmente dice che la carica apparente, espressa generalmente in picocoulomb (pC) almeno nei sistemi di misura analogici, è definita per confronto con una carica campione iniettata ai capi del circuito di prova definita di calibrazione. Nei sistemi di misura digitali essa può essere espressa anche in millivolts (mV) oppure in milliamperes (mA).

E' necessario ribadire l'importanza di tale parametro dicendo che a causa dell'impossibilità di misura diretta degli impulsi di corrente di scarica parziale, è più che mai utile un processo di confronto tra una grandezza nota e l'impulso rilevato per poter capire almeno l'ampiezza di quest'ultimo. E' necessaria dunque la calibrazione in ogni caso del sistema di misura degli impulsi di corrente di scarica parziale, sia esso analogico che digitale.

Tasso di ripetizione degli impulsi n

Rapporto tra il numero totale di impulsi di scariche parziali registrato in un intervallo di tempo definito e la durata di tale intervallo.

5. Normativa I.E.C. 60270

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

Numero di impulsi di scariche parziali al secondo, nel caso di impulsi equidistanti.

Bisogna porre l'attenzione sul fatto che quasi mai gli impulsi di corrente di scarica parziale sono equidistanti fra loro, data la natura aleatoria del fenomeno, pertanto questo parametro è valido solo nel caso di taratura e calibrazione. Nella pratica questo parametro rappresenta il numero medio al secondo di impulsi di corrente di scarica parziale, superiori ad una determinata soglia, misurati in un intervallo temporale definito.

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

$$\phi_i = 360 \cdot \left(\frac{t_i}{T} \right) \quad (5.1)$$

dove t_i è il tempo 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. L'angolo di fase è espresso in gradi sessagesimali.

Questa definizione pone le basi per la costruzione dei diagrammi di distribuzione degli impulsi di corrente di scarica parziale detti anche "Pattern" o diagrammi $\Phi - q - n$, nei quali vengono riportate le ampiezze degli impulsi di corrente o di tensione di scarica parziale in funzione dell'angolo di fase ϕ_i sopra riportato, visualizzando pure un'onda sinusoidale perfetta che rappresenta una tensione di prova fittizia. In base alla concentrazione di questi punti attorno a determinati angoli di fase riusciamo a capire a grandi linee di che natura possono essere le scariche parziali che abbiamo rilevato.

5. Normativa I.E.C. 60270

Corrente media di scarica I

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:

$$I = \left(\frac{1}{T_{ref}} \right) \cdot (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|) \quad (5.2)$$

La corrente media di scarica è espressa generalmente in coulomb al secondo (C/s) oppure in ampere (A).

Essa rappresenta dunque la corrente continua il cui integrale nel tempo T_{ref} sarebbe equivalente alla carica associata alle scariche parziali.

Potenza di scarica P

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} :

$$P = \left(\frac{1}{T_{ref}} \right) \cdot (q_1 \cdot u_1 + q_2 \cdot u_2 + \dots + q_i \cdot u_i) \quad (5.3)$$

dove u_1, u_2, \dots, u_i sono i valori istantanei della tensione di prova negli istanti t_i in cui si verificano le ampiezze individuali di carica apparente q_i . Deve essere considerato il segno dei valori individuali. La potenza di scarica è generalmente espressa in watt (W).

Essa deve essere calcolata come potenza media nel tempo T_{ref} , tenendo presente che gli impulsi di corrente o di tensione di scarica parziale hanno segno.

5. Normativa I.E.C. 60270

Valore quadratico D

Grandezza derivata, 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:

$$D = \left(\frac{1}{T_{ref}} \right) \cdot (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_m^2) \quad (5.4)$$

Il valore quadratico è generalmente espresso in (coulomb)² al secondo (C²/s).

Misuratore di radiodisturbi

Ricevitore di misura di quasi-cresta per la banda di frequenza B, in conformità alle prescrizioni della CISPR 16-1: 1993. Questo tipo di strumento era precedentemente noto con il nome di misuratore di interferenze (o di influenze) radioelettriche.

Tensione di radiodisturbo U_{rdv}

Quantità derivata pari alla lettura fornita da un misuratore di radiodisturbi quando è utilizzato per indicare la carica apparente q delle scariche parziali. La tensione di radiodisturbo U_{rdv} è generalmente espressa in μV .

$$U_{riv} = q \cdot k_{riv} \cdot f(N) \quad (5.5)$$

dove q è la carica apparente rilevata, k_{riv} è un fattore di proporzionalità mentre $f(N)$ è una funzione della frequenza di ripetizione degli impulsi di corrente di scarica parziale.

La tensione di radio interferenza può anche essere direttamente misurata con apposita strumentazione prevista dalle norme NEMA o CISPR.

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 della normativa stessa. Il concetto di ampiezza della maggiore scarica parziale ripetitiva non si applica alle prove con tensione continua.

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.

5. Normativa I.E.C. 60270

Per le prove in tensione alternata, l'ampiezza specificata della carica apparente q , è l'ampiezza della maggiore scarica parziale ripetitiva.

L'ampiezza di qualsiasi grandezza relativa a un impulso di scariche parziali può variare in modo stocastico in cicli successivi e, inoltre, mostrare un aumento o una diminuzione generalizzata nel tempo di applicazione della tensione. L'ampiezza della scarica parziale specificata, la procedura di prova e anche il circuito di prova e la strumentazione dovrebbero pertanto essere definiti in modo appropriato dai relativi comitati tecnici.

Rumore di fondo

Segnali rivelati durante prove di scariche parziali non provenienti dall'oggetto in prova. Il rumore di fondo può essere costituito da un rumore bianco all'interno del sistema di misura, da trasmissioni radio, o da altri segnali continui o impulsivi.

5.2.3 TENSIONI DI PROVA RELATIVE AGLI IMPULSI DI SCARICHE PARZIALI

Tensione d'innescò della 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 innescò 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. Per le prove in tensione continua, la determinazione di U_i richiede considerazioni particolari.

Attenzione che il basso valore dell'impulso di scarica parziale specificato è proprio l'ampiezza dell'impulso di corrente di scarica parziale usato nella calibrazione del circuito di misura e rilevazione delle stesse.

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. Per le prove in tensione continua, la determinazione di U_e richiede considerazioni particolari.

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.

5.3 SISTEMA DI MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI

5.3.1 CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI MISURA

Impedenza di trasferimento $Z(f)$

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

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 da:

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (5.6)$$

mentre l'ampiezza di banda è definita da:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (5.7)$$

Errore di sovrapposizione

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.

5. Normativa I.E.C. 60270

Gli errori di sovrapposizione possono raggiungere livelli del 100% o superiori, a seconda del tasso di ripetizione degli impulsi e delle caratteristiche del sistema di misura.

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.

Si raccomanda che il tempo di risoluzione degli impulsi sia misurato per l'intero circuito di prova, nonché per il sistema di misura, in quanto errori di sovrapposizione possono essere causati dall'oggetto in prova, per esempio, riflessioni provenienti dalle estremità dei cavi. I competenti comitati tecnici dovrebbero specificare la procedura di gestione degli errori di sovrapposizione e, in particolare, le tolleranze ammissibili, compresi i relativi segni.

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 frequenza centrale di un sistema di misura a banda stretta.

Se richiesto per un tipo particolare di apparecchiatura, i comitati tecnici competenti sono invitati a specificare valori più restrittivi per f_1 e f_2 , allo scopo di minimizzare l'errore di integrazione.

L'errore d'integrazione nella misura della carica apparente si verifica quando il modulo della densità spettrale di ampiezza dell'impulso di corrente, associato alla scarica parziale, non è costante all'interno della banda di frequenze del sistema di misura. La sua valutazione non è prevista esplicitamente dalla norma che si limita a presumere che esso rimanga nei limiti a condizione che lo spettro sia uniforme nel campo di frequenze d'interesse (cioè all'interno della banda di frequenze di misura, definita a -6 dB).

5. Normativa I.E.C. 60270

Tale errore può essere verificato a condizione di poter generare impulsi di carica nota e durata variabile per mezzo di un calibratore programmabile e meglio sarebbe disporre anche della possibilità di variarne la forma, quindi avere un vero e proprio alimentatore per calibrazione. Il problema è normalmente legato agli impulsi di lunga durata, che quindi hanno uno spettro limitato e non uniforme anche a frequenze dell'ordine del MHz. Esistono diversi fattori, oltre la banda dello strumento, che concorrono ad aumentare in modo significativo ed imprevisto, la durata degli impulsi, e sono: il valore della capacità di calibrazione ed il valore dell'impedenza di misura.

Naturalmente, l'errore d'integrazione può essere preso in considerazione in fase di taratura, ma le implicazioni di ordine pratico, quando venga effettuata una misura, sono difficili da valutare, perché normalmente non si conoscono le forme d'onda degli impulsi di corrente.

Il problema potrebbe avere grande rilevanza per misuratori a banda stretta, quando la frequenza centrale venga scelta sopra i 500 kHz, oppure nei sistemi di misura a banda larga con frequenza di taglio superiore ai 500 kHz previsti dalla norma.

5.3.2 STRUMENTI DIGITALI DI MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI

Gli strumenti considerati nella presente norma sono generalmente basati su sistemi o strumenti di misura analogici, per la misura della carica apparente q , seguiti da un sistema digitale di acquisizione e di elaborazione. La parte digitale di uno strumento digitale di misura di scariche parziali è utilizzata per l'elaborazione dei segnali analogici per ulteriori valutazioni, per memorizzare le grandezze significative e per presentare i risultati delle prove.

Uno strumento digitale di misura delle scariche parziali può anche essere basato su un dispositivo di accoppiamento e su un sistema digitale di acquisizione, senza lo stadio di ingresso per il trattamento analogico del segnale. La presente norma non fornisce informazioni specifiche applicabili a tale tipo di strumenti.

5.4 CIRCUITI DI PROVA

5.4.1 PRESCRIZIONI GENERALI

In questo articolo vengono descritti i circuiti fondamentali di prova e gli strumenti di misura delle grandezze relative alle scariche parziali, e vengono fornite informazioni relative al principio di funzionamento di tali circuiti e sistemi. Il comitato tecnico può raccomandare l'uso di un particolare circuito di prova per specifici oggetti in prova. Si raccomanda che i comitati tecnici utilizzino la carica apparente come grandezza da misurare ovunque possibile, ma possono essere utilizzate altre grandezze in situazioni specifiche particolari. Se non altrimenti specificato dal competente comitato tecnico, sono accettabili un qualsiasi circuito di prova, tra quelli indicati in 5.4.2, e un qualsiasi sistema di misura, tra quelli specificati in 5.4.3. In ogni caso, devono essere registrate le caratteristiche più significative del sistema di misura utilizzato (f_1 , f_2 , T_r , ecc.).

5.4.2 CIRCUITI DI PROVA PER TENSIONI ALTERNATE

La maggior parte dei circuiti utilizzati per le misurazioni di scariche parziali può essere derivata da uno qualsiasi dei circuiti di base riportati nelle figure da 5.4.2(1) a 5.4.2(4). Alcune varianti di tali circuiti sono indicate nelle figure 5.4.2(5) e 5.4.2(6). Ognuno di questi circuiti si compone principalmente di:

- un oggetto in prova che, generalmente, può essere considerato come una capacità C_a ;
- un condensatore d'accoppiamento C_k che deve essere progettato con bassa induttanza, o un secondo oggetto in prova C_{a1} che deve essere simile all'oggetto in prova C_a . C_k o C_{a1} dovrebbero presentare un livello sufficientemente basso di scariche parziali alla tensione di prova specificata, per consentire la misura dell'ampiezza specificata di scariche parziali. Un livello più elevato di scariche parziali può essere tollerato se il sistema di misura è in grado di distinguere le scariche dall'oggetto in prova e dal condensatore di accoppiamento e di misurarle separatamente;
- un sistema di misura con la sua impedenza di ingresso (e talvolta una seconda impedenza di ingresso per le configurazioni circuitali bilanciate);
- una sorgente di alimentazione ad alta tensione, con un livello di rumore di fondo sufficientemente basso per consentire la misura dell'ampiezza specificata di scariche parziali alla tensione di prova specificata;
- connessioni ad alta tensione, con un livello di rumore di fondo sufficientemente basso per consentire la misura dell'ampiezza specificata di scariche parziali alla tensione di prova specificata;
- un'impedenza o un filtro che può essere introdotto sul lato alta tensione, allo scopo di ridurre il rumore di fondo proveniente dalla sorgente di alimentazione.

5. Normativa I.E.C. 60270

Per ognuno dei circuiti di prova fondamentali per la misura delle scariche parziali, indicati nelle figura 5.4.2(1) e figura 5.4.2(3), il dispositivo di accoppiamento del sistema di misura può anche essere posto sul lato del terminale ad alta tensione, cosicché le posizioni del dispositivo di accoppiamento con C_a oppure C_k risultano scambiate, in questo caso sono utilizzati accoppiatori ottici per collegare il dispositivo di accoppiamento con lo strumento, come indicato in figura 5.4.2(1).

Dispositivo di accoppiamento CD in serie con il condensatore di accoppiamento

COMPONENTI

- U~ Alimentazione ad alta tensione
- Z_{mi} Impedenza di ingresso del sistema di misura
- CC Cavo di collegamento
- OL Collegamento ottico
- C_a Oggetto in prova
- C_k Condensatore di accoppiamento
- CD Dispositivo di accoppiamento
- MI Strumento di misura
- Z Filtro

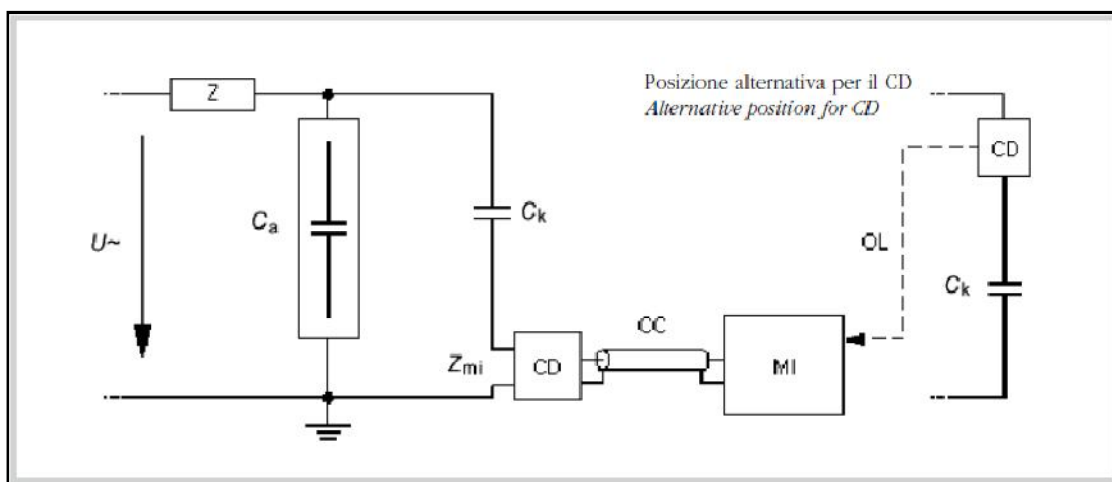


Figura 5.4.2(1): Circuito di misura delle scariche parziali classico.

L'impedenza d'accoppiamento è posta in serie al condensatore d'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.

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

Dispositivo di accoppiamento CD in serie con l'oggetto in prova

COMPONENTI

- U~ Alimentazione ad alta tensione
- Z_{mi} Impedenza di ingresso del sistema di misura
- CC Cavo di collegamento
- OL Collegamento ottico
- Ca Oggetto in prova
- C_k Condensatore di accoppiamento
- CD Dispositivo di accoppiamento
- MI Strumento di misura
- Z Filtro

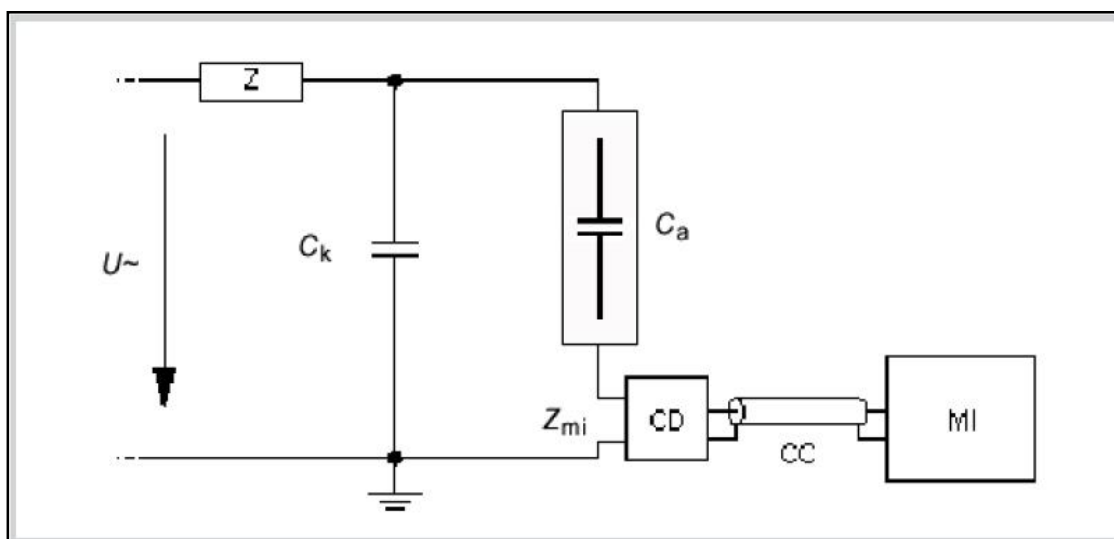


Figura 5.4.2(2): Circuito di misura delle scariche parziali variante con impedenza di misura in serie all'oggetto in prova.

Tale circuito è poco utilizzato anche se formalmente identico al circuito di figura 5.4.2.1(1), in quanto il cedimento dell'oggetto in prova comporterebbe la comparsa della tensione di alimentazione ai capi dell'impedenza di misura con conseguenti rischi per la sicurezza degli operatori e delle apparecchiature impiegate.

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

Disposizione di un circuito bilanciato

COMPONENTI

- U~ Alimentazione ad alta tensione
- Z_{mi} Impedenza di ingresso del sistema di misura
- CC Cavo di collegamento
- OL Collegamento ottico
- Ca Oggetto in prova
- C_k Condensatore di accoppiamento
- CD Dispositivo di accoppiamento
- MI Strumento di misura
- Z Filtro

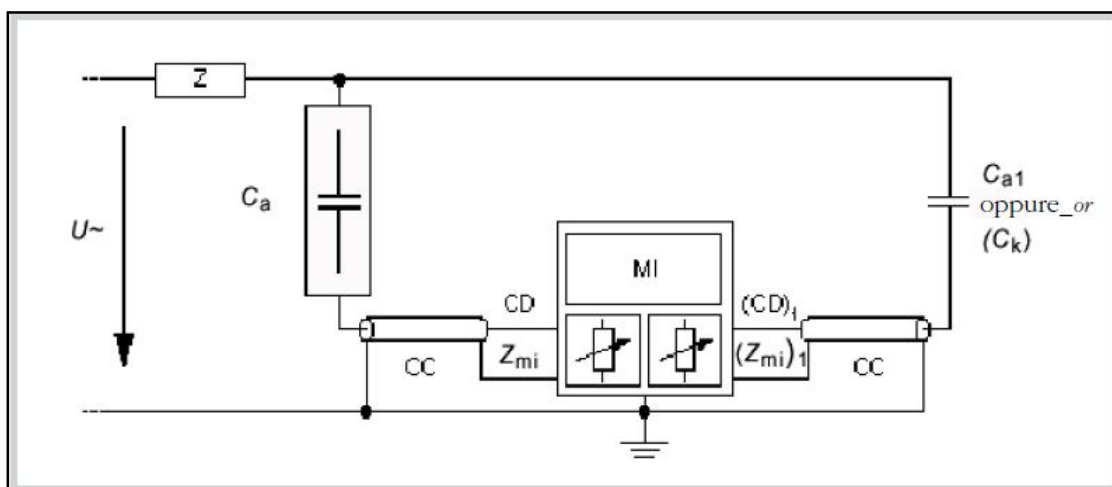


Figura 5.4.2(3): Circuito di misura delle scariche parziali bilanciato.

Tale circuito è costruito in modo tale che lo strumento di misura MI sia posto tra due dispositivi d'accoppiamento. I lati a bassa tensione dell'oggetto in prova e del condensatore di accoppiamento devono essere isolati da terra. Non è necessario che le loro capacità siano uguali, ma dovrebbero, preferibilmente, essere dello stesso ordine di grandezza e i fattori di perdita dielettrica, in particolare in rapporto alla loro variazione in funzione della frequenza, dovrebbero essere simili per ottenere i migliori risultati. Il circuito che è basato sulla reiezione di modo comune attraverso Ca e Ca1 e sull'amplificazione delle correnti di scariche parziali derivanti dall'oggetto in prova, ha il merito di eliminare parzialmente i disturbi esterni. Per regolare questa reiezione si può accoppiare una sorgente artificiale di scarica tra il terminale ad alta tensione e la terra. Le impedenze di ingresso variabili dei dispositivi equilibrati di accoppiamento sono quindi regolate fino a ottenere una lettura minima sullo strumento. Sono possibili rapporti di reiezione di circa 3 (per oggetti in prova totalmente diversi) a 1000 o anche più elevati (per oggetti in prova identici e ben schermati).

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

Disposizione di un circuito di discriminazione della polarità

COMPONENTI

- U~ Alimentazione ad alta tensione
- Z_{mi} Impedenza di ingresso del sistema di misura
- CC Cavo di collegamento
- OL Collegamento ottico
- Ca Oggetto in prova
- C_k Condensatore di accoppiamento
- CD Dispositivo di accoppiamento
- MI Strumento di misura
- Z Filtro

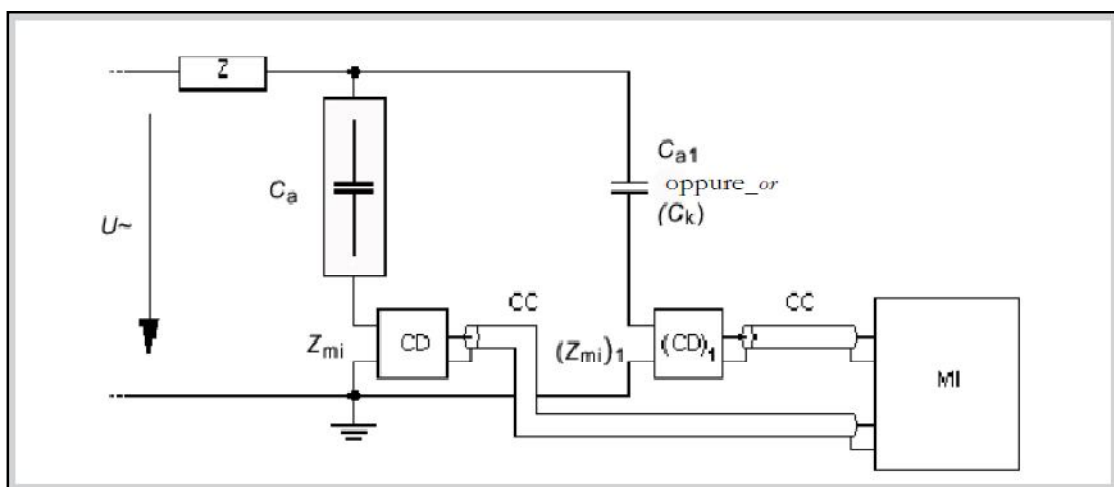


Figura 5.4.2(4): Circuito di misura delle scariche parziali con discriminazione della polarità degli impulsi.

La configurazione mostrata nella figura 5.4.2.1(4) è costituita da una combinazione dei due circuiti fondamentali di figura 5.4.2.1(1) e 5.4.2.1(2) . Essa comprende due capacità, una o entrambe delle quali può essere costituita dall'oggetto in prova. Esse sono collegate a due dispositivi di accoppiamento. Nel collegamento indicato, il lato a bassa tensione di entrambi i componenti è isolato da terra . Non è necessario che le due capacità siano uguali, ma dovrebbero essere, preferibilmente, dello stesso ordine. Il principio non si basa su un circuito equilibrato, ma esegue un confronto della direzione di flusso dei segnali di impulso rilevati nei due dispositivi di accoppiamento. (I segnali di modo comune vengono rilevati come aventi identica polarità; i segnali di scariche parziali da ciascuno dei componenti vengono rilevati come aventi polarità opposte.) Un sistema di abilitazione può quindi essere utilizzato per discriminare gli impulsi di scariche parziali provenienti dall'oggetto in prova dai disturbi provenienti da altre parti del circuito di prova.

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

Circuito di prova per misura alla presa di un passante

COMPONENTI

- U~ Alimentazione a bassa o ad alta tensione
- Zmi Impedenza di ingresso del sistema di misura
- CC Cavo di collegamento
- Ck Condensatore di accoppiamento
- Cm Capacità in parallelo con Zmi
- CD Dispositivo di accoppiamento
- Ca Oggetto in prova
- MI Strumento di misura
- Z Filtro

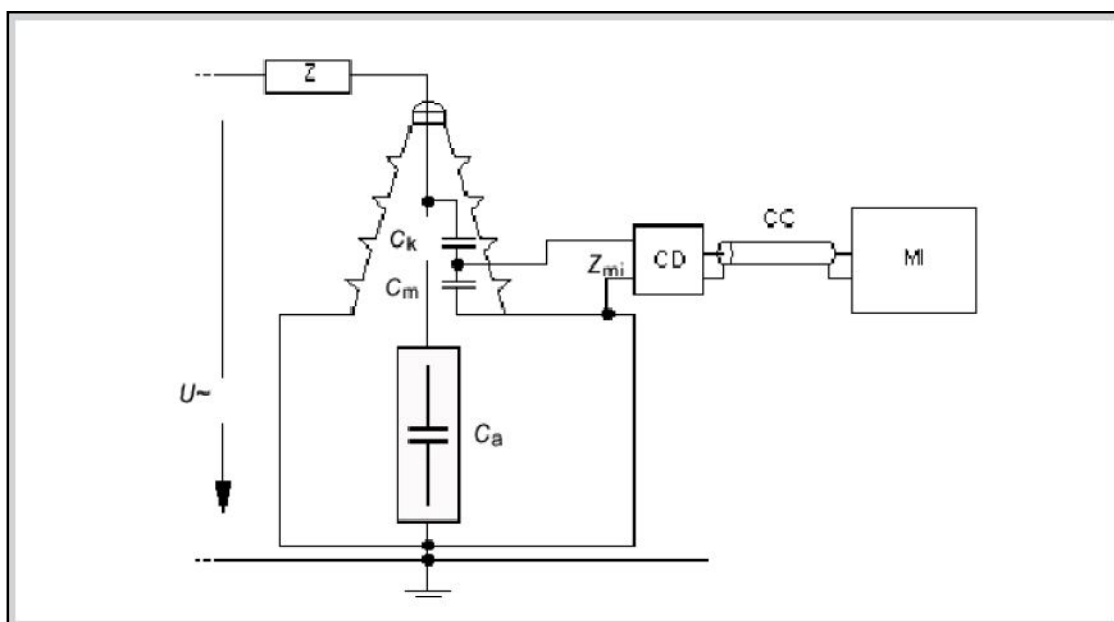


Figura 5.4.2(5): Circuito di misura delle scariche parziali per trasformatori isolati in olio.

La configurazione indicata in figura 5.4.2.1(5), applicabile a oggetti in prova dotati di passanti con ripartizione capacitiva, è equivalente a quella della figura 5.4.2.1(1), con l'eccezione che la capacità del passante è utilizzata al posto del condensatore di accoppiamento Ck. Se il passante ha una presa, il dispositivo di accoppiamento è collegato a tale terminale; in questo caso appare, attraverso l'impedenza di ingresso del disturbo di accoppiamento, un capacità Cm relativamente grande, in grado di influenzare la sensibilità della misura.

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

Circuito di prova per misura di oggetti in prova autoeccitati

COMPONENTI

- U_{\sim} Alimentazione a bassa o ad alta tensione
- Z_{mi} Impedenza di ingresso del sistema di misura
- CC Cavo di collegamento
- C_k Condensatore di accoppiamento
- CD Dispositivo di accoppiamento
 C_a Oggetto in prova- MI Strumento di misura
- Z Filtro

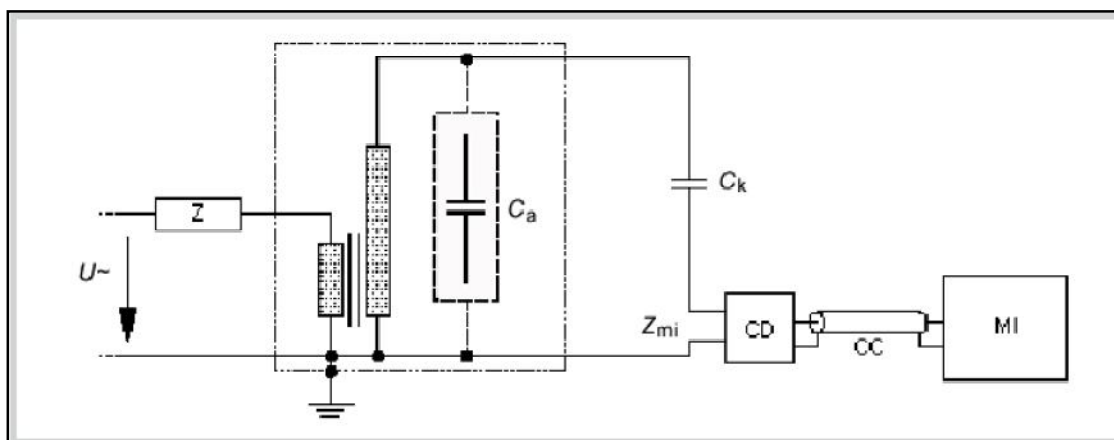


Figura 5.4.2(6): Circuito di misura delle scariche parziali per oggetti in prova autoeccitati.

La figura 5.4.2.1(6) mostra un circuito di prova nel quale la tensione di prova è indotta nell'oggetto in prova, per esempio un trasformatore di potenza o un trasformatore di misura. In linea di principio, essa è equivalente alla configurazione indicata nella figura 5.4.2.1(1) .

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

5.5 STRUMENTI DI MISURA

5.5.1 GENERALITA'

I sistemi di misura di scariche parziali possono essere suddivisi in vari sottosistemi: dispositivo di accoppiamento, sistema di trasmissione (per esempio, cavo di connessione o collegamento ottico) e strumento di misura.

In generale, il sistema di trasmissione non contribuisce alle caratteristiche del circuito e, pertanto, non viene preso in considerazione.

5.5.2 DISPOSITIVO D'ACCOPPIAMENTO

Il dispositivo di accoppiamento è generalmente costituito da una rete attiva o passiva a quattro terminali (quadripolo) e converte le correnti di ingresso in segnali di tensione di uscita. Tali segnali sono trasmessi allo strumento di misura per mezzo di un sistema di trasmissione. La risposta in frequenza del dispositivo di accoppiamento, definita per mezzo del rapporto tra tensione di uscita e corrente di ingresso, è generalmente scelta in modo da impedire efficacemente alla frequenza della tensione di prova e alla sue armoniche di raggiungere lo strumento.

5.5.3 RISPOSTA DEGLI STRUMENTI DI MISURA DI CARICA APPARENTE AD UN TRENO D'IMPULSI

La risposta dello strumento è un impulso di tensione con un valore di cresta proporzionale alla carica (unipolare) dell'impulso di ingresso, a condizione che l'ampiezza dello spettro in frequenza degli impulsi di ingresso sia costante almeno entro l'ampiezza di banda Δf del sistema di misura (vedere figura 5.5.3(1)).

Rapporto corretto tra ampiezza e frequenza per minimizzare gli errori di integrazione per un sistema a banda larga

LEGENDA

- 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
- f_1 Frequenza limite inferiore
- f_2 Frequenza limite superiore

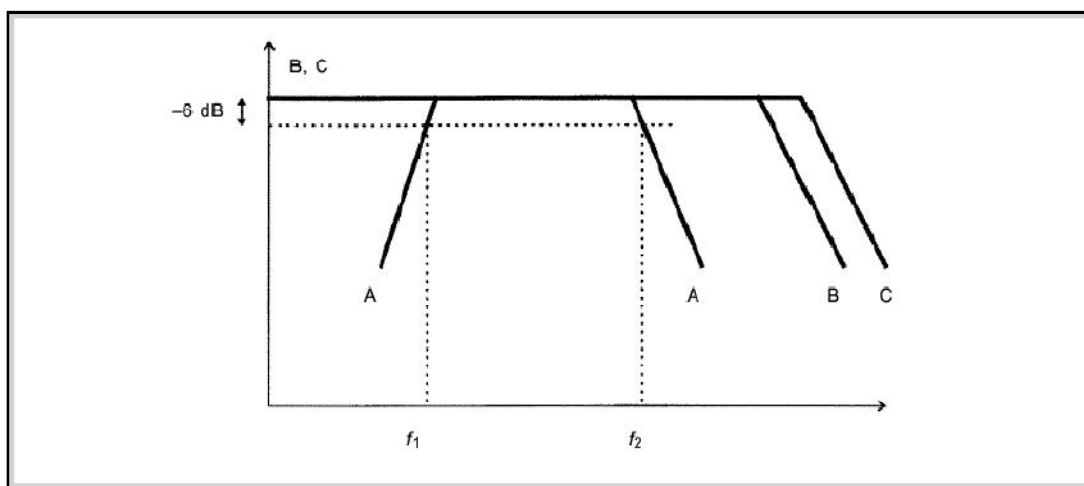


Figura 5.5.3(1): Ampiezze di banda del sistema di misura, dell'impulso di taratura e del segnale di PD
Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

La forma, la durata e il valore di cresta di tale impulso di uscita sono determinati dall'impedenza di trasferimento $Z(f)$ del sistema di misura. Pertanto, la forma e la durata dell'impulso di uscita possono essere completamente diversi da quelli del segnale di ingresso. La visualizzazione dei singoli impulsi di tensione di uscita sullo schermo di un oscilloscopio può contribuire al riconoscimento dell'origine delle scariche parziali e alla loro distinzione dai disturbi.

Inoltre, si raccomanda, particolarmente l'uso di uno strumento indicatore o registratore per quantificare l'ampiezza della maggiore scarica parziale ripetitiva.

5. Normativa I.E.C. 60270

La risposta del sistema a un treno di impulsi costituito da impulsi equidistanti della stessa ampiezza q_0 , con una frequenza di ripetizione di impulsi N nota, deve essere tale che la lettura R dello strumento indichi ampiezze conformi alla tabella seguente. Si assume che la gamma e il guadagno dello strumento siano regolati per leggere a fondo scala o il 100% per $N = 100$.

Risposta a un treno di impulsi degli strumenti di misura di scariche parziali

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

Tabella 5.5.3(2): 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 impulso in funzione della frequenza di ripetizione N , cioè man mano aumenta la frequenza di ripetizione degli impulsi di scarica parziale e man mano aumenta pure la percentuale di lettura R dello strumento da tenere in considerazione; ciò fa pensare al fatto che maggiore è la frequenza di ripetizione degli impulsi di scarica parziale e maggiore è l'affidabilità della misura stessa.

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

5.5.4 STRUMENTI DI MISURA DI SCARICHE PARZIALI A BANDA LARGA

Questo tipo di strumenti costituisce, insieme al dispositivo di accoppiamento, un sistema di misura di scariche parziali a banda larga, caratterizzato da un'impedenza di trasferimento $Z(f)$ con valori fissi delle frequenze limite inferiore e superiore f_1 e f_2 , e un'adeguata attenuazione al di sotto di f_1 e al di sopra di f_2 . I valori raccomandati per f_1 , f_2 e Δf sono:

- $30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$;
- $f_2 \leq 500 \text{ kHz}$;
- $100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$;

La combinazione di diversi dispositivi di accoppiamento con lo strumento di misura può modificare l'impedenza di trasferimento.

Tuttavia, la risposta globale dovrebbe sempre rispettare i valori raccomandati.

La risposta di tali strumenti a un impulso di corrente (non oscillante) dovuto a una scarica parziale è, in genere, un'oscillazione molto smorzata. La carica apparente q e la polarità dell'impulso di corrente di scariche parziali, possono essere determinate da tale risposta. Il tempo di risoluzione dell'impulso T_r è piccolo e tipicamente compreso tra $5 \mu\text{s}$ e $20 \mu\text{s}$.

5. Normativa I.E.C. 60270

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 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, cioè alimentato. Tale strumentazione, di natura elettronica consente d'integrare il segnale 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 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 μs ed il tempo di risoluzione tra impulsi successivi è generalmente inferiore ai 10 μs .

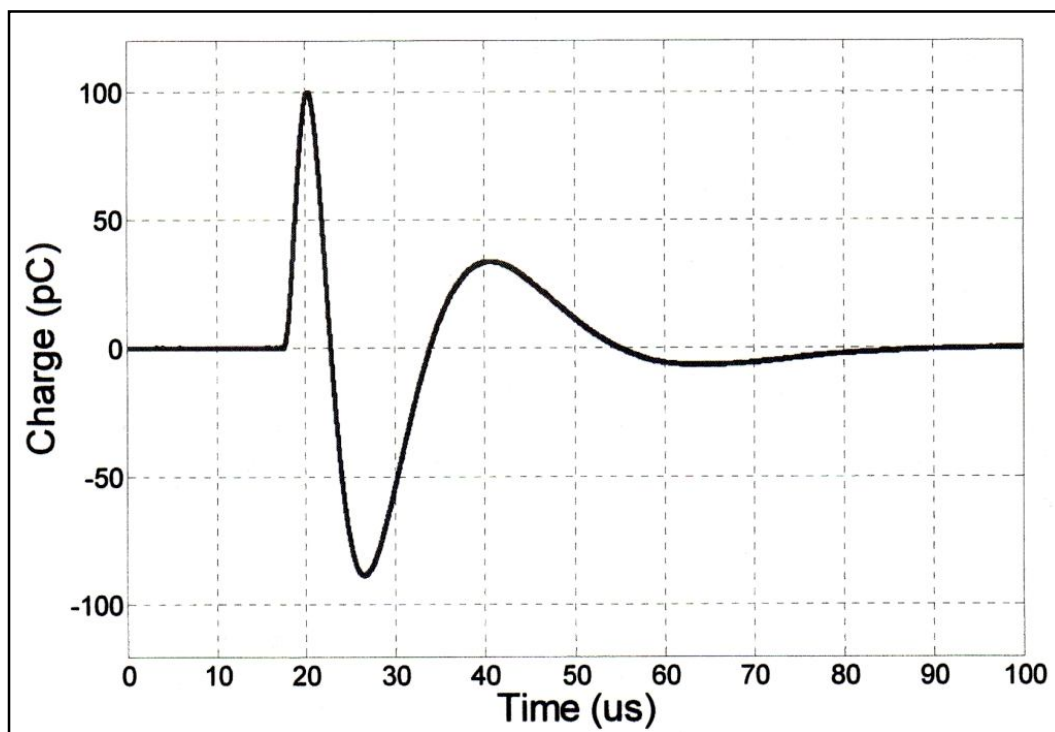


Figura 5.5.4(1): Tipica risposta impulsiva di uno strumento a banda larga con forme alla normativa IEC 60270 (Instrumentation James G. Biddle cat. 665702 ser. 088102).

Fonte: Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica

“Analisi delle scariche parziali per la diagnostica delle macchine elettriche”

Dott. Ing. Ceretta Claudio – 31 gennaio 2008

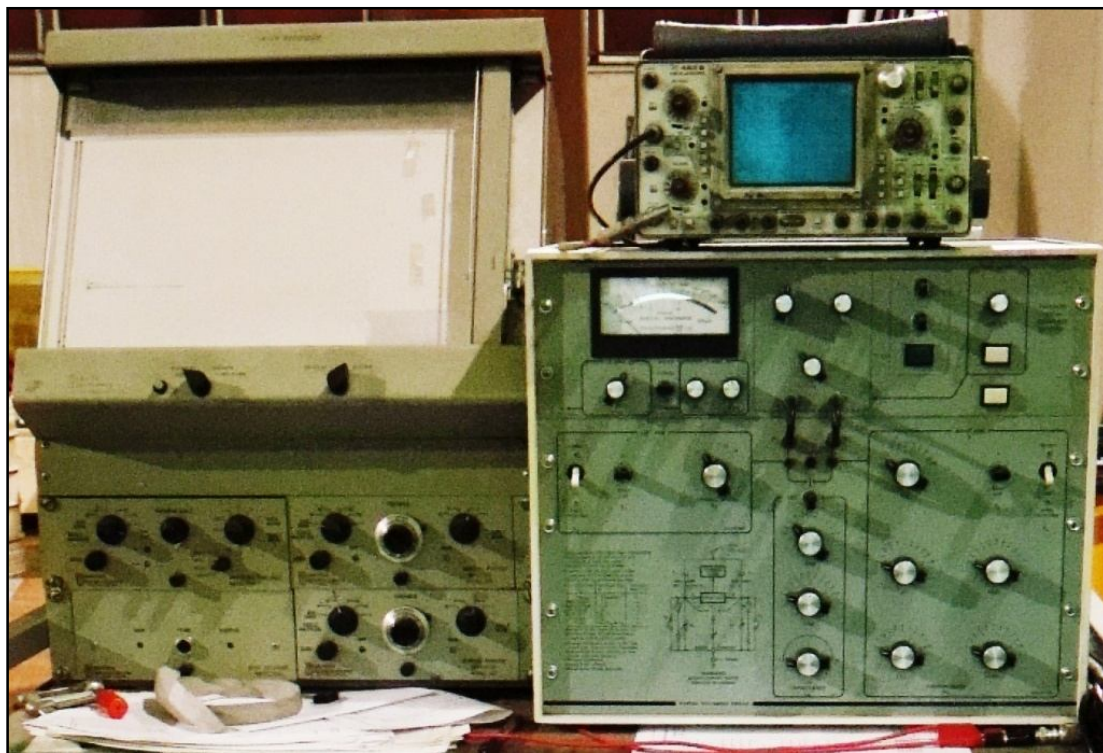


Figura 5.5.4(2): Sistema di misura per scariche parziali di tipo tradizionale a pseudo-integrazione, provvisto di circuito di misura a ponte, modello Biddle 66-2J, completo di registratore X-Y ed oscilloscopio(Instrumentation James G. Biddle cat. 665702 ser. 088102) .

Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

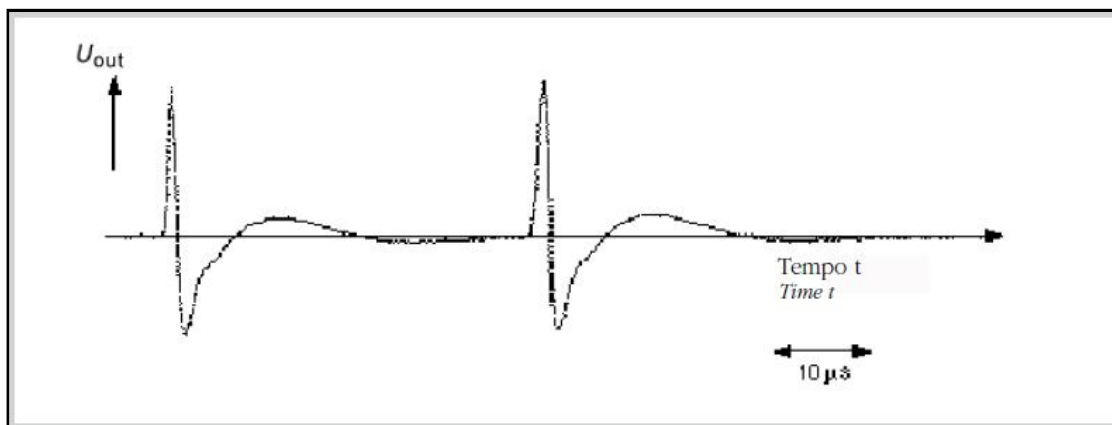


Figura 5.5.4(3): Esempio di una coppia di risposte impulsive di un sistema con $f_1=45$ kHz ed $f_2=440$ kHz ad una coppia d'impulsi ideali (spettro uniforme nella banda di misura).

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

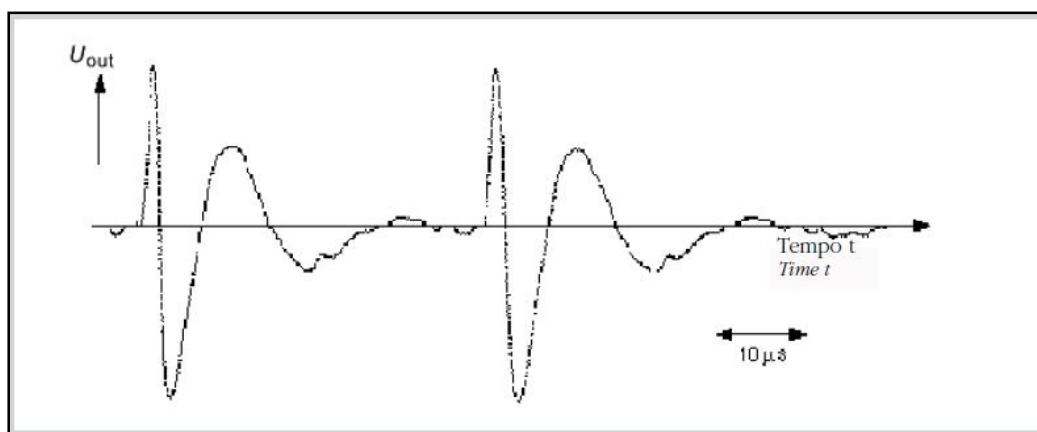


Figura 5.5.4(4): Esempio di una coppia di risposte impulsive di un sistema con $f_1=45$ kHz ed $f_2=440$ kHz ad una coppia d'impulsi ideali (spettro non uniforme nella banda di misura).

Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

5.5.5 STRUMENTI DI MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI A BANDA STRETTA

Questi strumenti sono caratterizzati da un'ampiezza di banda stretta 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 per Δf e f_m sono:

- $9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$;
- $50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$.

Inoltre, si raccomanda che l'impedenza di trasferimento $Z(f)$ a frequenze di $f_m \pm \Delta f$ sia di 20 dB al di sotto del valore di cresta della banda passante.

La risposta di tali strumenti a un impulso di corrente dovuto a una scarica parziale è un'oscillazione transitoria i cui involuppi dei valori di cresta, positivi e negativi, sono proporzionali alla carica apparente, indipendentemente dalla polarità di tale carica. Il tempo di risoluzione dell'impulso T_r 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, infatti tali frequenze possono essere accettate solo qualora le letture fatte per tali valori più elevati di frequenza non differiscano da quelle che sarebbero state 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.

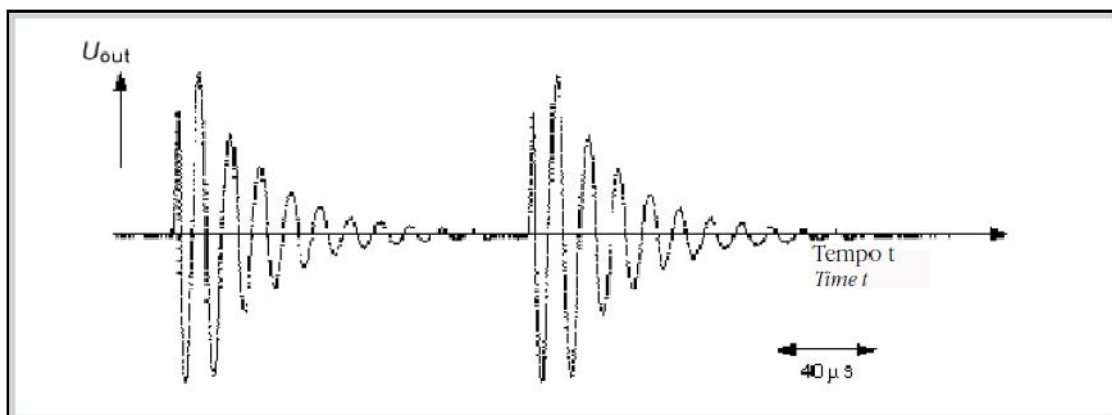


Figura 5.5.5(1): Esempio di una coppia di risposte impulsive di un sistema con $f_m=75$ kHz e $\Delta f=440$ kHz ad una coppia d'impulsi ideali.
Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

5.6 PRESCRIZIONI PER LE MISURE DI SCARICHE PARZIALI CON STRUMENTI DIGITALI

La prescrizione minima per uno strumento digitale di scariche parziali è di indicare il valore dell'ampiezza della maggiore scarica parziale ripetitiva. Inoltre, possono essere valutate e registrate una o più delle seguenti grandezze:

- la carica apparente q_i , che si verifica nell'istante t_i ;
- il valore istantaneo della tensione di prova u_i misurato nell'istante t_i in cui si verifica la singola carica apparente q_i ;
- l'angolo di fase φ_i nell'istante t_i in cui si verifica l'impulso di scarica parziale.

Prescrizioni per la misura di carica apparente q

Il periodo tra 2 aggiornamenti successivi dell'indicatore digitale, non deve superare 1 s. La risposta dello strumento comprende generalmente un certo livello di rumore continuo o della linea di base. Tale rumore può essere provocato da un rumore di fondo o da un numero elevato di impulsi di scariche parziali, la cui ampiezza è piccola in confronto al livello più elevato da misurare. Pertanto, può essere introdotta una soglia bipolare di sensibilità allo scopo di evitare la registrazione di tali segnali. Se viene utilizzato un livello di soglia esso deve essere registrato. L'Allegato E fornisce alcune linee guida relative all'acquisizione digitale dei segnali analogici di risposta.

Prescrizioni per la misura dell'ampiezza e della fase della tensione di prova

Se lo strumento digitale è dichiarato in grado di registrare il livello di tensione della tensione di prova a frequenza industriale, esso deve essere conforme alle prescrizioni della IEC 60060-2, 1994.

Se si dichiara che lo strumento è in grado di misurare l'angolo di fase della tensione di prova, è necessario dimostrare adeguatamente che lo sfasamento della lettura è compreso entro 5 gradi dal valore reale.

5.7 TARATURA DI UN SISTEMA DI MISURA NEL CIRCUITO DI PROVA COMPLETO

Generalità

Lo scopo della taratura è la verifica che il sistema di misura è in grado di misurare correttamente l'ampiezza specificata di scarica parziale.

La taratura di un sistema di misura nel circuito di prova completo è eseguita per determinare il coefficiente di conversione k per la misura della carica apparente. Poiché la capacità C_a dell'oggetto in prova influenza le caratteristiche del circuito, la taratura deve essere condotta con ogni nuovo oggetto in prova, salvo quando le prove sono eseguite su una serie di oggetti simili, le cui capacità non si scostano di oltre $\pm 10\%$ dai valori medi. La taratura di un sistema di misura nel circuito di prova completo è condotta iniettando impulsi di corrente di breve durata di ampiezza di carica nota q_0 ai terminali dell'oggetto in prova (vedere figura 5.5.7(1)). Il valore di q_0 deve essere preso dal risultato della prova di prestazione sul calibratore .

Procedura di taratura

La taratura dei sistemi di misura, destinati alla misura della carica apparente q , dovrebbe essere eseguita iniettando impulsi di corrente per mezzo di un calibratore ai terminali dell'oggetto in prova, come indicato in figura 5.5.7(1). La taratura dovrebbe essere eseguita per un'ampiezza all'interno della gamma utile delle ampiezze previste, per garantire una buona precisione per l'ampiezza specificata di scarica parziale.

La gamma utile delle ampiezze dovrebbe, in assenza di altre specifiche, essere compresa tra 50% e 200% dell'ampiezza specificata di scarica parziale. Poiché la capacità C_0 di un dispositivo di taratura è spesso costituita da un condensatore di bassa tensione, la taratura della configurazione completa di prova deve essere eseguita con l'oggetto in prova non alimentato.

Perché la taratura rimanga valida, il condensatore di taratura C_0 non dovrebbe essere superiore a $0,1 C_a$. Se le prescrizioni per il calibratore sono rispettate, l'impulso di taratura equivale quindi a una scarica singola di ampiezza $q_0 = U_0 C_0$.

5. Normativa I.E.C. 60270

Conseguentemente, C_0 deve essere rimosso prima di alimentare il circuito di prova. Se, tuttavia, C_0 è del tipo ad alta tensione e presenta un livello sufficientemente basso di rumore di fondo, per permettere di misurare il livello di scarica parziale specificato alla tensione di prova specificata, esso può rimanere collegato nel circuito di prova.

La prescrizione che il condensatore C_0 sia inferiore a $0,1 C_a$ non è richiesta se C_0 è del tipo ad alta tensione e se viene lasciato nel circuito di prova.

Nel caso di oggetti di vari metri di altezza, il condensatore di iniezione C_0 dovrebbe essere posto vicino al terminale di alta tensione dell'oggetto in prova, in quanto la capacità parassita C_s (indicata nelle figura 5.5.7(1) e 5.5.7(2)) potrebbe provocare errori inaccettabili. Il cavo di collegamento, tra il generatore di tensione a gradino e il condensatore C_0 dovrebbe essere schermato e dotato di terminali appropriati per evitare distorsioni del gradino della tensione.

Collegamenti per la taratura della configurazione di prova completa

COMPONENTI

$U\sim$	Alimentazione ad alta tensione
G	Generatore di tensione a gradino
C_0	Condensatore di taratura
Z_{mi}	Impedenza di ingresso del sistema di misura
CC	Cavo di collegamento
C_a	Oggetto in prova
C_k	Condensatore di accoppiamento
CD	Dispositivo di accoppiamento
C_s	Capacità parassita
MI	Strumento di misura
Z	Filtro

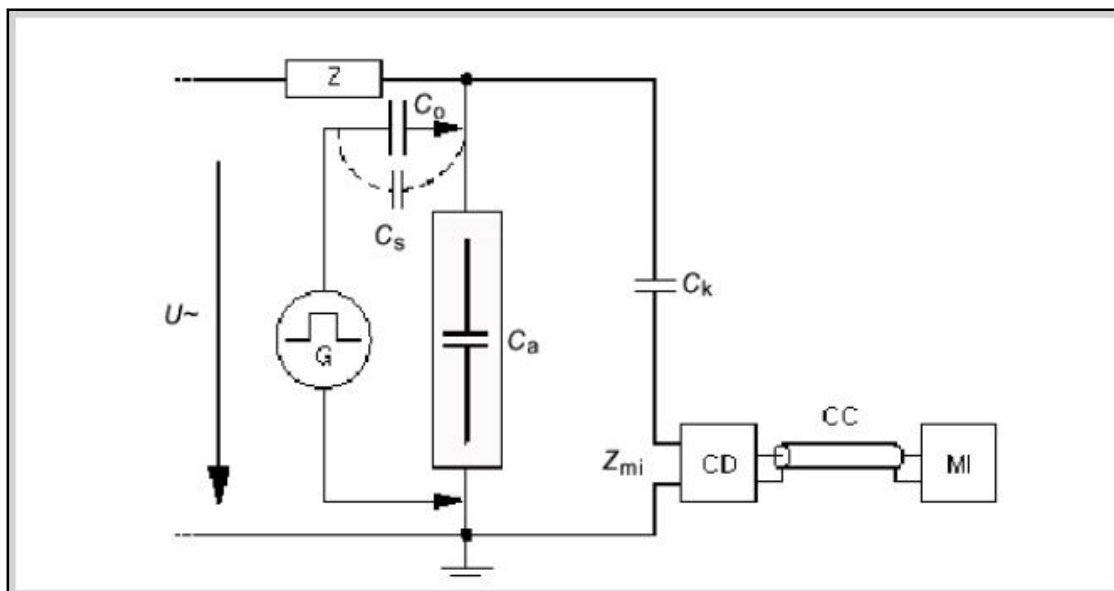


Figura 5.5.7(1): Dispositivo di accoppiamento CD in serie con il condensatore di accoppiamento
Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

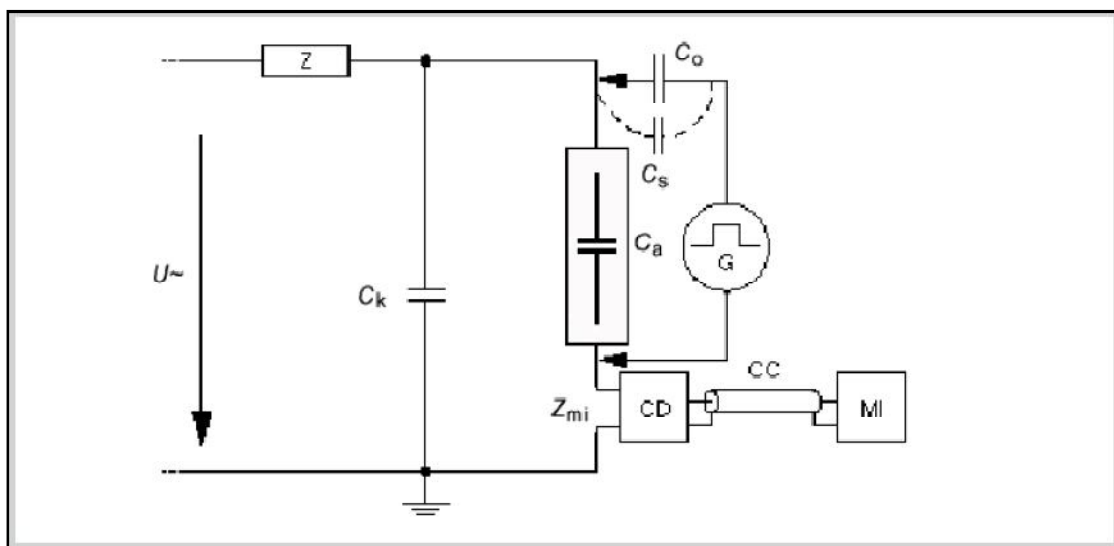


Figura 5.5.7(2): Dispositivo di accoppiamento CD in serie con l'oggetto in prova
Fonte: NORMA TECNICA CEI EN 60270:2002:06

5.8 PROVE

5.8.1 PRESCRIZIONI GENERALI

Per ottenere risultati riproducibili nelle prove delle scariche parziali, è necessario un controllo accurato di tutti i fattori attinenti. Il sistema di misura delle scariche parziali deve essere tarato in conformità alle prescrizioni della presente norma.

5.8.2 CONDIZIONAMENTO DELL'OGGETTO IN PROVA

Prima di essere sottoposto alle prove, un oggetto in prova dovrebbe essere sottoposto a una procedura di condizionamento, specificata dal comitato tecnico competente.

Salvo diversamente specificato:

- la superficie dell'isolamento esterno dell'oggetto in prova deve essere pulita e asciutta, in quanto l'umidità o la contaminazione delle superfici isolanti possono provocare scariche parziali;
- l'oggetto in prova dovrebbe essere a temperatura ambiente durante la prova.

Le sollecitazioni meccaniche, termiche ed elettriche, subito prima della prova, possono influenzare il risultato delle prove di scariche parziali. Per garantire una buona riproducibilità può essere necessario un intervallo di riposo tra l'applicazione di tali sollecitazioni e l'esecuzione delle prove di scariche parziali.

5.8.3 SCELTA DELLA PROCEDURA DI PROVA

La specifica delle procedure da utilizzare per tipi particolari di prove e di oggetti in prova ricade sotto la responsabilità del competente comitato tecnico. È suo compito la definizione di tutti i processi preliminari di condizionamento, i livelli della tensione di prova e la frequenza, la velocità di salita e di discesa della tensione applicata, la sequenza e la durata dell'applicazione della tensione e il rapporto tra le prove di misura delle scariche parziali e le altre prove dielettriche.

Determinazione delle tensioni di innesco e di estinzione di scariche parziali

All'oggetto in prova deve essere applicata una tensione ben al di sotto della tensione di innesco prevista; essa deve essere gradualmente aumentata fino a quando le scariche raggiungono o superano una bassa ampiezza specificata. La tensione di prova a tale ampiezza specificata è la tensione di innesco di scariche parziali U_i . La tensione viene quindi aumentata a un livello di tensione specificato e successivamente gradualmente ridotta a un valore al quale le scariche diventano inferiori della stessa ampiezza specificata. La tensione di prova a tale limite di scarica è la tensione di estinzione di scariche parziali U_e . È necessario notare che il valore di U_i può essere influenzato dal

5. Normativa I.E.C. 60270

tasso di crescita della tensione, e U_e può essere influenzato dall'ampiezza e dal tempo di applicazione della tensione, nonché dal tasso di diminuzione della stessa. Tuttavia, in nessun caso la tensione applicata deve superare la tensione nominale di tenuta di breve durata a frequenza industriale, applicabile all'apparecchiatura in prova.

Determinazione dell'ampiezza delle scariche parziali a una tensione di prova specificata

Misura senza pre-sollecitazioni

L'ampiezza delle scariche parziali, in termini della loro grandezza specificata, è misurata a una tensione specificata, che può essere ben al di sopra della tensione di innesco delle scariche parziali. La tensione viene gradualmente aumentata da un valore basso al valore specificato e ivi mantenuta per il tempo specificato. Poiché le ampiezze possono variare nel tempo, la grandezza specificata deve essere misurata al termine di tale periodo. L'ampiezza delle scariche parziali può, inoltre, essere misurata e registrata durante l'aumento o la diminuzione della tensione, oppure durante l'intero periodo di prova.

Misura con pre-sollecitazioni

La prova viene condotta aumentando la tensione di prova da un valore al di sotto della tensione di prova della scarica parziale fino a una tensione specificata superiore a tale tensione. La tensione viene quindi mantenuta per il periodo specificato e successivamente ridotta gradualmente fino alla tensione di prova della scarica parziale specificata. A tale livello di tensione, la tensione viene mantenuta per un periodo specificato e, al termine di tale periodo, viene misurata la grandezza specificata di scarica parziale in un intervallo di tempo dato, oppure per tutto il periodo specificato.

5.9 LINEE GUIDA PER L'ACQUISIZIONE DIGITALE DI GRANDEZZE RELATIVE ALLE SCARICHE PARZIALI

5.9.1 GENERALITA'

L'obiettivo principale dell'applicazione delle tecniche digitali alle misure di scariche parziali è basato sulla registrazione di un impulso di scarica parziale, quantificato almeno dalla sua carica apparente q_i e dal suo valore istantaneo della tensione di prova u_i che si verifica nell'istante t_i oppure, per le tensioni alternate, dall'angolo di fase φ_i corrispondente all'interno di un periodo della tensione di prova.

L'obiettivo principale può essere suddiviso in due obiettivi secondari:

- registrazione, immagazzinamento e valutazione di almeno una o più grandezze relative agli impulsi di scarica parziale;
- post-elaborazione dei dati registrati, allo scopo di valutare e indicare parametri e dipendenze supplementari (per esempio, dati statistici sull'attività delle scariche parziali all'interno di finestre temporali o nel corso del tempo; applicazione di tecniche numeriche per ridurre il livello di disturbo; presentazione dei risultati per mezzo di indicazioni grafiche; valutazione di parametri che possono essere utilizzati per analisi approfondite della qualità dell'isolamento dell'oggetto in prova, ecc.).

Nel caso dell'analisi del comportamento temporale delle grandezze relative alle scariche parziali, può essere applicata una compressione dei dati registrati. A tale scopo possono essere utilizzati vari metodi di riduzione dei dati. I costruttori di sistemi digitali dovrebbero, tuttavia, indicare i principi utilizzati per la compressione dei dati.

5.9.2 ISTRUZIONE PER L'ELABORAZIONE DEI SEGNALI ANALOGICI DI CARICA APPARENTE

La caratteristica principale di uno strumento digitale di misura di scariche parziali è costituita dalla sua capacità di elaborare i segnali individuali di risposta degli strumenti di misura analogici di carica apparente. In generale si può assumere che il valore di cresta di tali segnali di risposta sia proporzionale alla carica individuale q_i di un impulso di corrente di scarica parziale. Mentre negli strumenti analogici tali valori di cresta sono indicati da oscilloscopi o da voltmetri di cresta, lo strumento digitale deve quantizzare e immagazzinare con precisione adeguata i singoli valori di cresta q_i (e le loro polarità, se possibile) insieme al tempo t_i o all'angolo di fase φ_i a cui si verificano. Poiché la forma del segnale di risposta è strettamente dipendente dalle caratteristiche del sistema di misura e dipende in qualche modo dalla forma del singolo impulso di scarica parziale, la procedura di elaborazione deve essere adeguata alla forma dei segnali di risposta, in modo da poter indicare il valore di cresta (positivo o negativo) che può essere assunto proporzionale alla carica individuale q_i dell'evento di scarica parziale.

5.9.3 RACCOMANDAZIONE PER LA REGISTRAZIONE DELLA TENSIONE DI PROVA, DELL'ANGOLO DI FASE Φ_i E DEL TEMPO t_i DI OCCORENZA DI UN IMPULSO DI SCARICA PARZIALE

Per identificare la forma di una tensione di prova a frequenza industriale $u(t)$, lo strumento digitale dovrebbe acquisire la tensione di prova almeno durante i periodi di tempo, durante i quali sono registrati i valori di q_i . È tuttavia raccomandata l'acquisizione continua di ogni periodo della tensione di prova. Poiché la fase ϕ_i , o l'istante di tempo t_i , dei sistemi a tensione alternata deve essere valutata con riferimento al passaggio dallo zero del fronte in salita della tensione di prova $u(t)$, è necessario che il sistema di misura fornisca una rappresentazione vera della fase della tensione di prova. Se la deviazione del valore istantaneo della tensione di prova, letta dallo strumento digitale di misura delle scariche parziali dal valore istantaneo letto da un sistema di misura di riferimento, è inferiore al 5% del valore di cresta della tensione, si considera che lo strumento digitale sia anche in grado di registrare la fase della tensione di prova. Devono essere applicati i coefficienti di conversione appropriati per i due sistemi di misura della tensione. Il sistema di misura di riferimento deve essere costituito da uno strumento idoneo, collegato al lato bassa tensione di un divisore di tensione, approvato in conformità alla IEC 60060-2 per tensione alternata. È opportuno dimostrare in modo indipendente che il sistema di misura di riferimento ha un errore di fase inferiore a 5 gradi. Per la quantizzazione della tensione di prova si raccomanda una risoluzione nominale di almeno 8 bit. La velocità di campionamento della quantizzazione deve essere di almeno 100 campioni per periodo della tensione di prova a frequenza industriale, oppure 4000 campioni al secondo per le tensioni di prova continue. Poiché si raccomanda il campionamento periodico, può essere usata l'interpolazione per determinare i valori della tensione di prova u_i che si verificano in istanti specifici di tempo t_i tra due campioni.

5.10 PROVE SUI 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 d'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 5.10(1) per i trasformatori di tipo monofase, mentre in figura 5.10(2) per i trasformatori di tipo trifase.

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 tenere conto della corrente magnetizzante del nucleo ferromagnetico 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.

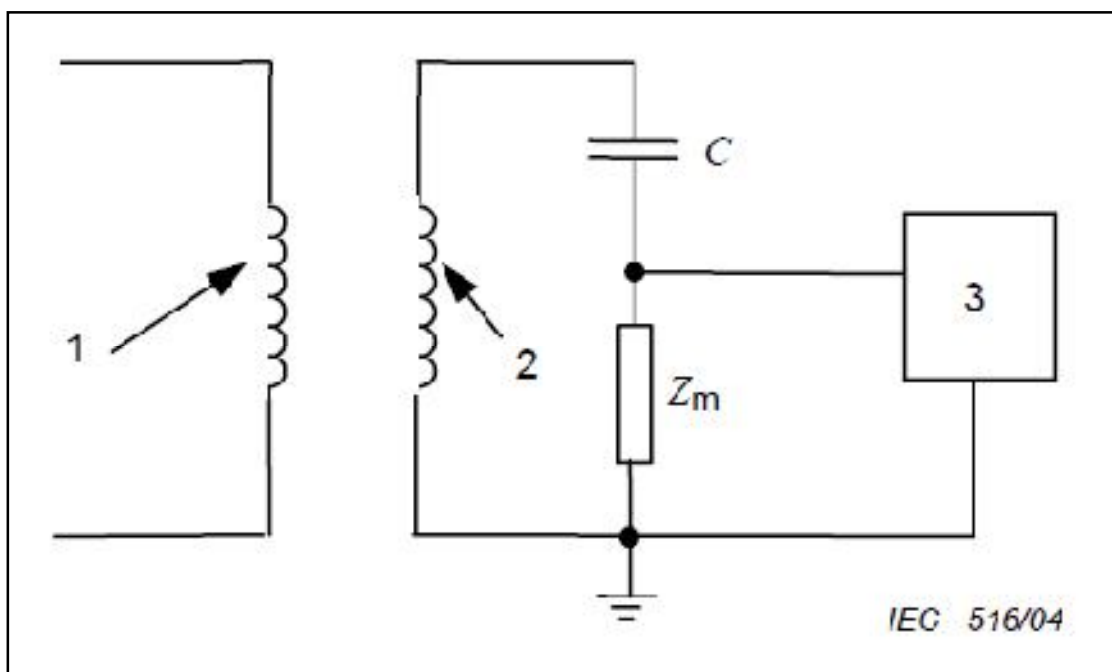


Figura 5.10(1): Schema di prova per la misura di scariche parziali per trasformatori monofase

- 1 → avvolgimento di bassa tensione
- 2 → avvolgimento di alta tensione
- 3 → misuratore di scariche parziali

Fonte: NORMATIVA TECNICA CEI EN 60076-11:2004

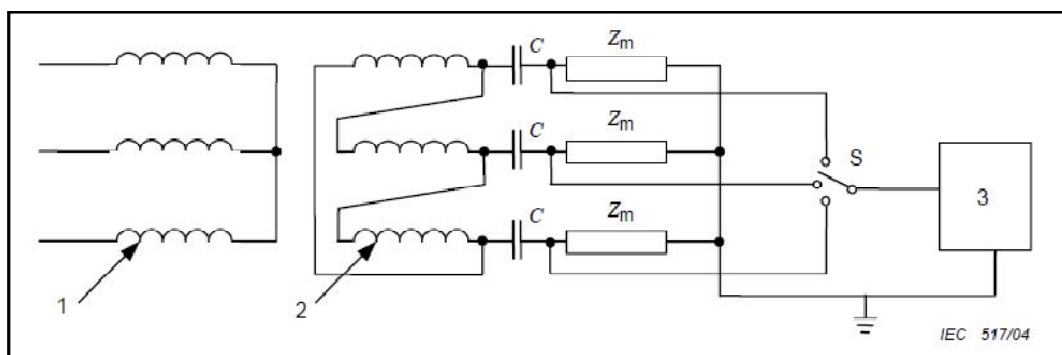


Figura 5.10(2): Schema di prova per la misura di scariche parziali per trasformatori monofase

- 1 → avvolgimento di bassa tensione
- 2 → avvolgimento di alta tensione
- 3 → misuratore di scariche parziali
- 4 → commutatore

Fonte: NORMATIVA TECNICA CEI EN 60076-11:2004

5.10.1 PROCEDURA DI PROVA STANDARD

Tale processo 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 5.10(2) al fine di controllare i potenziali degli avvolgimenti rispetto al potenziale di terra, sapendo che la sollecitazione dei punti in tensione verso terra rimane pari al valore nominale di progetto. Il ciclo di applicazione della tensione deve prevedere un periodo di pre-stress almeno pari a 30 secondi con un valore di tensione indotta pari a 1.8 volte la tensione nominale ed un ciclo di misura pari a 1.3 volte la tensione nominale di durata pari a 3 minuti.

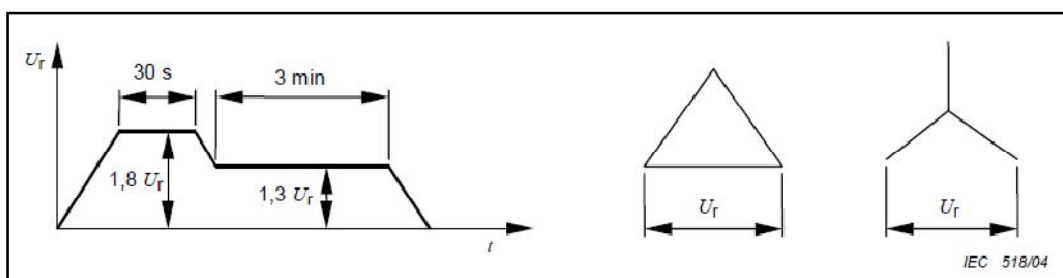


Figura 5.10.1(1): Andamento della tensione di prova nel corso della misura delle scariche parziali nei trasformatori a secco in accordo alla normativa

Fonte: NORMATIVA TECNICA CEI EN 60076-11:2004

5.10.2 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 5.10(1) e 5.10(2), sapendo che ora la prova porta il potenziale degli avvolgimenti verso terra al potenziale concatenato. 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.

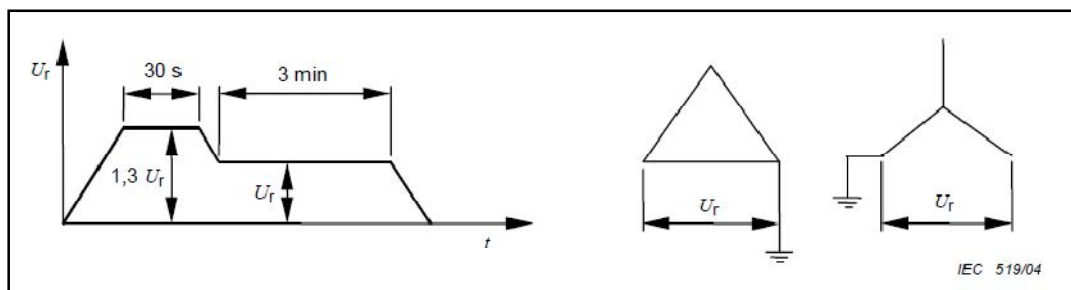


Figura 5.10.2(1): Andamento della tensione di prova nel corso della misura delle scariche parziali nei trasformatori a secco in accordo alla normativa
Fonte: NORMATIVA TECNICA CEI EN 60076-11:2004

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

6.1 ASPETTI GENERALI SULLA MANUTENZIONE E SULLA DIAGNOSTICA PREDITTIVA

La normativa UNI definisce la manutenzione come:

“La combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o riportare un’entità in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta”.

La definizione evidenzia come l’azione manutentiva sia fondamentale non solo per assicurare i livelli produttivi prestabiliti, ma anche per mantenere prestazioni adeguate durante l’intero ciclo di vita.

L’effettiva capacità di anticipare il verificarsi di malfunzionamenti o guasti si scontra però con la disponibilità limitata di informazioni utili per la prevenzione e la pianificazione degli interventi nelle diverse fasi del ciclo di vita:

- Progettazione;
- Costruzione;
- Installazione / Avviamento;
- Gestione operativa (Manutenzione).

La normativa attualmente in essere stabilisce che i criteri manutentivi devono essere definiti nella fase di progettazione delle macchine e degli impianti.

Il progettista, infatti, deve accompagnare il progetto con il piano di manutenzione garantendo così la vita utile progettata, con l’applicazione di politiche di manutenzione definite fin dalla fase di concezione del bene.

Ovviamente il tutto deve essere definito garantendo che il piano incida per una corretta percentuale del valore del bene, poiché è inevitabile che le politiche manutentive rispondano a criteri di economicità in funzione del comportamento effettivo al guasto delle macchine e dei singoli componenti.

L’approccio alla definizione delle politiche manutentive nelle fasi successive alla progettazione parte invece dalla conoscenza di due parametri fondamentali:

- Il tasso di guasto inteso sia come modalità di guasto sia come frequenza di eventi di guasto nell’unità di tempo;
- Il costo globale dell’intervento manutentivo e ispettivo riferito all’unità di tempo.

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

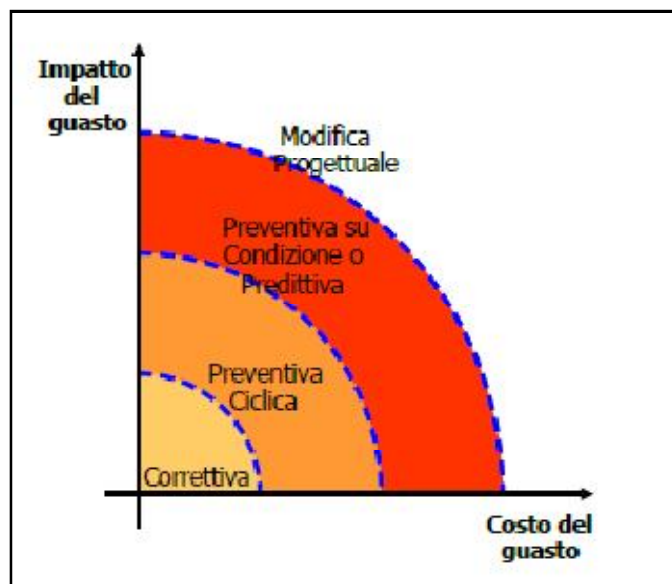


Figura 6.1(1): Diagramma impatto-costo del guasto per azione di manutenzione
Fonte: La prevenzione in manutenzione e la diagnostica - L. Furnaletto - Segesta Srl Milano

Con questi elementi è possibile progettare una corretta manutenzione; ciò comporta la disponibilità di informazioni sui guasti e sui costi.

E' possibile affermare, dai comportamenti delle macchine complesse, ormai assunti a standard in letteratura, che l'andamento del tasso di guasto è secondo la curva a vasca da bagno.

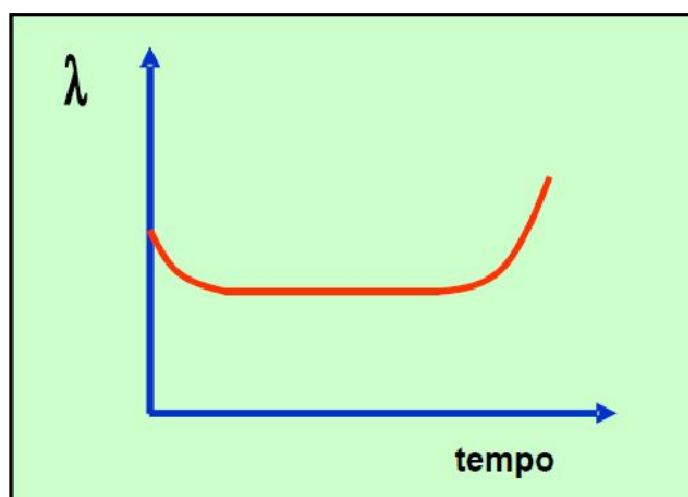


Figura 6.1(2): Diagramma tasso di guasto - tempo di un'apparecchiatura elettrica
Fonte: La prevenzione in manutenzione e la diagnostica - L. Furnaletto - Segesta Srl Milano

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

Si individuano in questa curva tre fasi:

- Rodaggio (o mortalità infantile): tasso di guasto decrescente
- Vita utile: tasso di guasto costante
- Usura: tasso di guasto crescente.

Nelle fasi in cui il tasso di guasto non è crescente, il modo economicamente utile di fare prevenzione è monitorare i singoli componenti critici della macchina e intervenire, con interventi preventivi mirati, su quei componenti in cui è in atto un fenomeno di degrado, il quale, nel caso di trasformatori, può essere rilevato tramite una misura di scariche parziali e una successiva elaborazione U.W.B. dei segnali rilevati.

In generale è possibile affermare:

- Rodaggio: la politica più opportuna è quella di manutenzione su guasto;
- Vita utile: se la macchina è ispezionabile la politica più opportuna è la manutenzione a seguito di ispezione, nel caso che il costo globale di manutenzione a seguito di ispezione è inferiore al medesimo costo a guasto. In caso contrario la politica da applicare è quella di manutenzione su guasto;
- Usura: le politiche più opportune sono la manutenzione ciclica oppure a seguito ispezione, se il costo globale di manutenzione preventiva è inferiore al costo globale a guasto. In caso contrario la politica da applicare è quella di manutenzione su guasto.

Le logiche per la definizione delle politiche di manutenzione inoltre devono essere arricchite dalla considerazione dell'esistenza o meno di segnali deboli, cioè dalla possibilità che il progredire del potenziale guasto mostri o meno dei "segnali" in qualche modo percepibili o misurabili.

In caso affermativo, verificata la fattibilità del controllo, si attiva il monitoraggio del segnale debole per conoscerne l'andamento temporale ed eseguire l'intervento manutentivo nel momento più opportuno, realizzando la situazione tipica della manutenzione su condizione e predittiva.

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

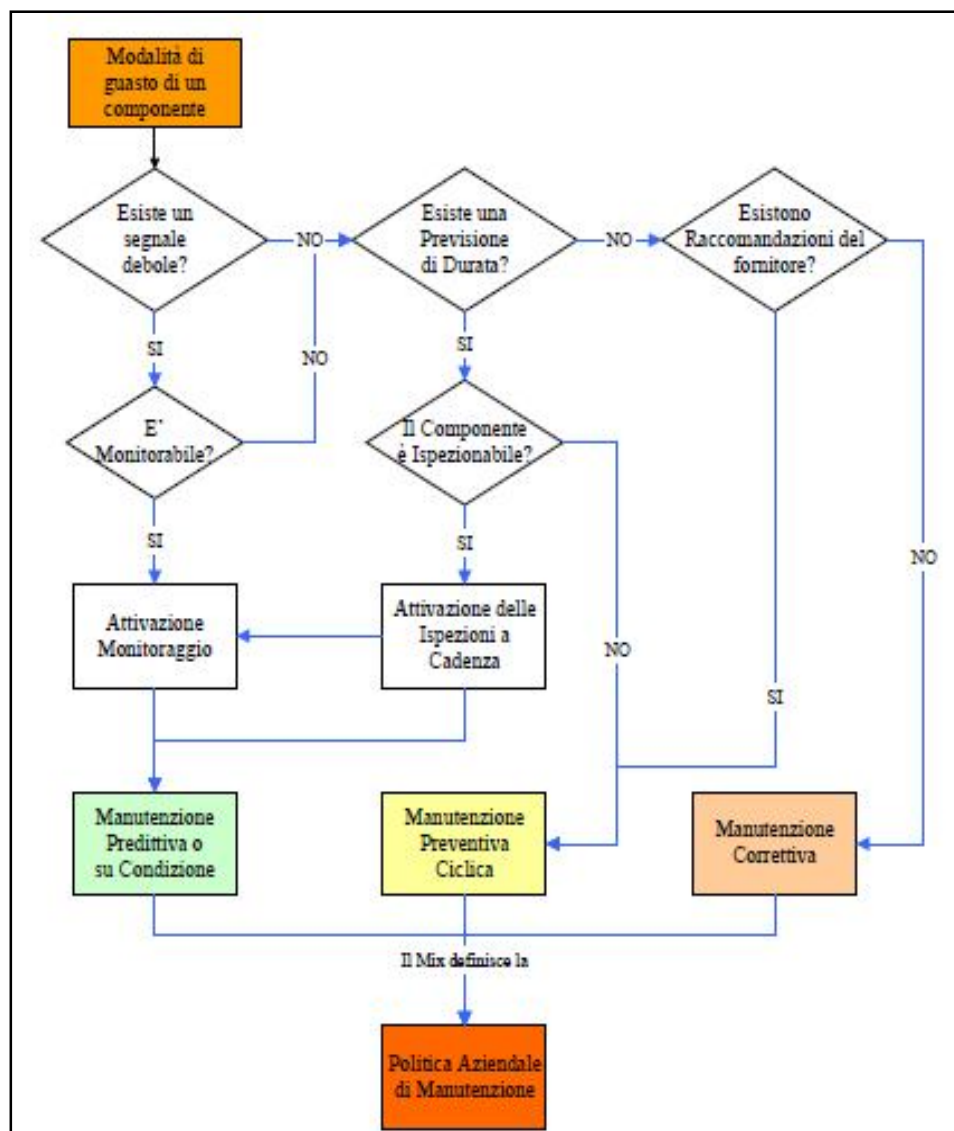


Figura 6.1(3): Diagramma di flusso sugli interventi di manutenzione

Fonte: La prevenzione in manutenzione e la diagnostica - L. Furnaletto - Segesta Srl Milano

Non sempre la macchina presenta segnali deboli monitorabili, per cui il mix ottimale di politiche di manutenzione sono la conseguenza di un approccio dinamico al problema, con retroazioni e miglioramento continuo.

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

	prevedibile	non prevedibile	prevedibile	non prevedibile
alto impatto	<p>Manutenzione su condizione / predittiva con taratura della frequenza di monitoraggio, dopo (soprattutto) il livello di allerta</p> <p>Manutenzione preventiva ciclica, con ottimizzazione della frequenza di sostituzione programmata</p>	<p>Introduzione ed uso di beni (macchine, etc.) in ridondanza e/o beni ausiliari</p>	<p>Manutenzione su condizione / predittiva con attività di monitoraggio continuo (se possibile)</p> <p>Manutenzione preventiva ciclica, con ottimizzazione della frequenza di sostituzione programmata</p> <p>Monitoraggio continuo della frequenza tra i guasti</p>	<p>Introduzione ed uso di beni (macchine, etc.) in ridondanza e/o beni ausiliari</p> <p>Programmazione di standard di riparazione</p>
basso impatto	<p>Manutenzione preventiva o correttiva in funzione di analisi costo/beneficio</p>	<p>Continuare ad operare fino al guasto (manutenzione correttiva)</p>	<p>Manutenzione preventiva o correttiva in funzione di analisi costo/beneficio</p>	<p>Continuare ad operare fino al guasto (manutenzione correttiva)</p>
	bassa frequenza		alta frequenza	

Figura 6.1(4): Tabella riassuntiva impatto-frequenza degli interventi di manutenzione
 Fonte: La prevenzione in manutenzione e la diagnostica - L. Furnaletto - Segesta Srl Milano

Il monitoraggio può essere sviluppato con diverse modalità:

- Il segnale debole viene percepito dal conduttore;
- L'osservazione visiva sistematica viene fatta da specialisti di manutenzione;
- Le misure o osservazioni vengono eseguite con il supporto di strumentazioni e della diagnostica tecnica.

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

La diagnostica tecnica è quindi lo strumento più evoluto a disposizione della manutenzione per la prevenzione dei guasti, è la madre della moderna prevenzione e permette di innescare tutti quei processi virtuosi che sono alla base della manutenzione ingegnerizzata e quindi di:

- Intervenire preventivamente ma solo se necessario;
- Programmare l'intervento secondo logiche di pianificazione o di opportunità (cioè in concomitanza con altre fermate della macchina);
- Approvvigionare a fabbisogno se il tempo di approvvigionamento è inferiore al tempo residuo di buon funzionamento, solo il componente o i componenti necessari.

Dal 50% all'80% della manutenzione, a seconda delle tipologie impiantistiche, viene fatta, in un processo ingegnerizzato, secondo politiche di manutenzione a condizione o predittive.

Attraverso i sistemi di monitoraggio e diagnostica non invasivi (come la rilevazione delle scariche parziali) è possibile eseguire controlli in esercizio e, in alcuni casi, anche rilevare in maniera continua elementi utili relativi all'evolversi della vita del componente sotto esame; informazioni che permettono di elaborare la vita residua del bene o dei suoi componenti e di intervenire per la sua riparazione o sostituzione qualora si manifestino segni di degradamento critico.

L'intervento può essere pianificato in occasioni propizie di disponibilità della macchina o impianto con l'obiettivo di fare un'azione opportunistica e aumentare la vita utile del componente.

Accoppiare dunque una pianificazione rigorosa delle ispezioni e della manutenzione ciclica con interventi secondo condizione induce il perseguimento di tre fondamentali obiettivi:

- Aumento della sicurezza;
- Riduzione dei costi di fuori servizio;
- Riduzione dei costi globali di manutenzione.

Ripercorrendo il ciclo di vita di un'apparecchiatura e analizzando il flusso di informazioni trattate nel processo di manutenzione si possono distinguere due differenti tipologie di dati:

- Informazioni "statiche" (di lungo periodo e costanti nel tempo):
 - Piani di Manutenzione;
 - Dati di progettazione;
 - Analisi dell'affidabilità;
 - Modifiche e migliorie (Miglioramento continuo);

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

- Informazioni “dinamiche” (istantanee e mutevoli nel tempo):
 - Guasti;
 - Risultati diagnostica tecnica;
 - Ispezioni.

Ottimizzare la prevenzione significa riuscire ad integrare costantemente dati “statici” con dati “dinamici” al fine di fornire rapporti aggiornati atti a supportare quotidianamente le politiche di manutenzione nella definizione delle scelte da intraprendere in maniera più efficace ed efficiente con eventuali azioni correttive, nel rispetto dei vincoli di sicurezza, della disponibilità delle macchine e degli obiettivi di spesa e al tempo stesso garantendo la valorizzazione della vita utile delle apparecchiature stesse.

6.2 SCARICHE PARZIALI PER LA DIAGNOSTICA

La misura delle scariche parziali, intesa come quantificazione della carica apparente ai capi dell'oggetto in prova e quindi conforme alla normativa IEC 60270, non ha nulla a che vedere con la diagnostica di fenomeni degradanti all'interno dell'apparecchiatura elettrica in prova.

Le misure di scariche parziali a 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 auto ripristinante e dunque meno interessanti dal punto di vista della vita utile dell'apparecchiatura stessa.

Le misure di scariche parziali a fini diagnostici, cioè in banda ultra larga, si pongono invece come obiettivo, dato un oggetto noto, di valutare la tipologia del fenomeno impulsivo in corso e di fornire, sempre data la conoscenza dell'oggetto, indicazioni in merito all'ubicazione delle scariche all'interno dello stesso.

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

Lo scopo finale della diagnostica tecnica su apparecchiature elettriche, infatti, quali i trasformatori isolati in resina epossidica, è quello di discriminare le differenti famiglie di scarica parziale e successivamente localizzarne, se possibile, la posizione spaziale all'interno degli avvolgimenti del trasformatore isolato in resina epossidica oppure all'esterno del medesimo.

Il fine ultimo della diagnostica predittiva, invece, sarebbe quello di prevedere in termini temporali accettabili, un possibile guasto o rottura di una parte o dell'intero sistema elettrico in analisi. Per la diagnostica tecnica, negli ultimi anni, sono stati messi a punto dei sistemi di rilevazione delle scariche parziali in banda ultra larga, come il sistema Techimp PDBase 2, oggetto in analisi in questa trattazione. I sistemi di rilevazione delle scariche parziali in banda ultra larga presentano un'ampiezza di banda molto ampia che va dalle decine di kHz a circa 50 MHz, a seconda della casa produttrice.

Un'ampiezza di banda così elevata permette di rilevare la forma d'onda degli impulsi di corrente di scarica parziale passati attraverso la funzione di trasferimento del circuito di misura e quindi poter determinare la natura e l'ubicazione delle sorgenti degli stessi.

Per la diagnostica predittiva, invece, non ci sono attualmente sistemi di elaborazione in grado di definire in orizzonti temporali brevi, la possibilità di guasto o malfunzionamento di un'apparecchiatura elettrica.

Il passo avanti fondamentale sarebbe dunque quello di poter localizzare spazialmente le sorgenti di scarica parziale all'interno di un avvolgimento di un trasformatore isolato in resina epossidica e in secondo luogo di accertare con un certo margine d'errore temporale un evento di guasto o di malfunzionamento legato alle sorgenti di scarica parziale rilevate.

In questo ultimo ambito esistono comunque diverse tecniche di trattamento dei dati, quali la logica fuzzy, le reti neurali, ecc , che dovrebbero poter proporre dei scenari riguardanti la vita utile della macchina elettrica in prova, ma che sinora si sono rivelate poco attendibili.

6.3 TECNICHE U.W.B. NELLA MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI

Una scarica parziale è un impulso di corrente originato da un fenomeno di scarica incompleta, del quale ci interessa sia la carica apparente che mette in gioco, sia, in un secondo momento pure la forma d'onda.

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.

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

Le scariche parziali, infatti, possono anche essere rilevate da oscilloscopi con elevata ampiezza di banda, o da strumenti selettivi in frequenza, come ad esempio analizzatori di spettro, insieme a dispositivi d'accoppiamento appropriati.

Lo scopo dell'applicazione è la misura e la quantificazione della forma o dello spettro in frequenza degli impulsi di corrente o di tensione della scarica parziale in apparecchiature con parametri distribuiti o che si possono analizzare a parametri distribuiti dato l'ampio spettro in frequenza dei fenomeni appena citati.

La normativa IEC 60270 non contiene alcuna raccomandazione per i metodi di misura o per le ampiezze di banda degli strumenti da utilizzare in tali indagini, in quanto tali metodi o strumenti, non quantificano direttamente la carica apparente degli impulsi di corrente di scariche parziali.

La strumentazione per la misura delle scariche parziali in banda ultra larga dispone di una banda sufficiente all'acquisizione della forma d'onda dell'impulso della corrente relativa alla scarica parziale con minima distorsione e può anche farne l'integrazione diretta allo scopo di poter valutare comunque la carica associata a tali segnali.

E' importante sapere quale è la forma d'onda dei segnali provenienti dai siti di scarica parziale, poiché in questo modo, in base ad analisi successive, si è in grado di valutarne lo spettro in frequenza, i parametri delle distribuzioni statistiche associategli e quindi riuscire a suddividerli in famiglie diverse e quindi in tipologie diverse.

Generalmente questi dispositivi di acquisizione degli impulsi di corrente di scarica parziale in modalità a banda ultra larga sono costituiti da un campionario (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 raccolti.

A dire il vero, dispositivi del genere in commercio, non si limitano a fornire un'unità di acquisizione con relativo quadripolo d'accoppiamento, più o meno integrato nello stesso case, ma offrono pure tutto il software necessario per l'acquisizione dei segnali e per la successiva elaborazione e visualizzazione, come nel nostro caso fa il Techimp PDBase 2 in analisi in codesta trattazione.

6.3.1 ULTERIORI VANTAGGI DEL METODO IN BANDA ULTRA LARGA

Partendo dalla strumentazione a banda stretta, che può misurare solamente la carica apparente associata agli impulsi di corrente di scarica parziale, passando attraverso la strumentazione in banda larga che ne può individuare pure la polarità, si arriva alla strumentazione in banda ultra larga che oltre a fare tutto ciò che fanno le altre, riesce pure a rilevare la forma d'onda degli impulsi stessi. Non è solo questo però il suo vantaggio.

Ulteriori vantaggi sono:

- 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;
- 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 impulsi 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.

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

La figura 6.3.1(1) e la figura 6.3.1(2) mette in evidenza 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.

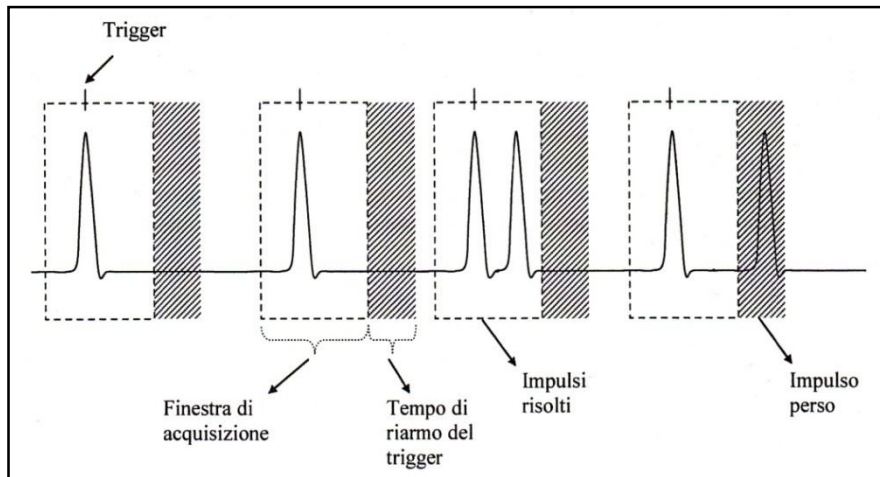


Figura 6.3.1(1): Schematizzazione di una acquisizione in modalità a banda ultra larga con tecnica di frammentazione della memoria.
Fonte: Tesi di Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica – Ceretta Claudio - 2008

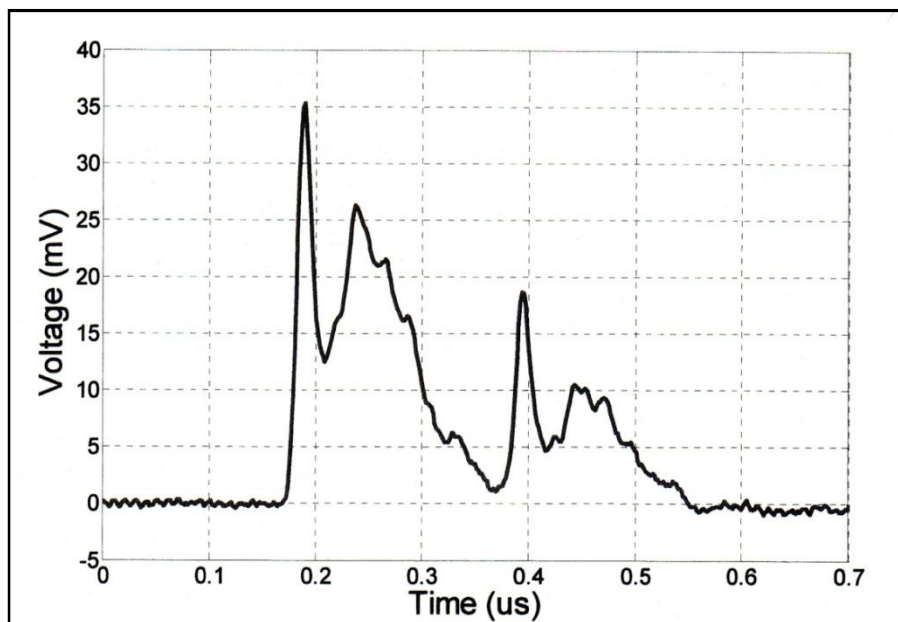


Figura 6.3.1(2): Risoluzione di un impulso doppio da parte di un sistema di acquisizione a banda ultra larga.

Fonte: Tesi di Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica – Ceretta Claudio - 2008

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

- Riduzione dell'errore di integrazione: essendo l'errore in questione dovuto all'incapacità del sistema di eseguire una corretta pseudo integrazione 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.

6.4 MISURATORI IN U.W.B. E CIRCUITI DI MISURA

Gli unici strumenti in commercio che sono in grado di ottenere la forma d'onda, la polarità e la carica apparente associata agli impulsi di corrente di scarica parziale, sono gli strumenti in banda ultra larga.

La strumentazione in commercio, che offre questi servizi, è di norma composta da una parte hardware e da una parte software, che in ogni caso si rivelano essere chiuse e quindi non modificabili, dall'operatore esterno, sia dal punto di vista fisico che dal punto di vista del software.

Ci sono tuttavia esempi di apparecchiature elettriche costruite per misure diverse rispetto alla misura delle scariche parziali, che tuttavia possono essere riadattate a tale scopo, con risultati anche migliori rispetto all'attrezzatura commerciale.

Si possono altresì realizzare apparecchiature per la misura di scariche parziali, auto costruendosi le stesse in laboratorio a partire dall'impedenza di misura, il filtro, l'amplificatore di tensione, ecc.

La strumentazione in banda ultra larga per la misura delle scariche parziali è dunque un fondamentale passo avanti per la comprensione vera dei fenomeni degradanti associati alle scariche omonime.

In particolare la misura in banda ultra larga permette di analizzare scariche parziali di ampiezza anche minore di 10 pC con tutti i benefici che da questo ne derivano.

In aggiunta si può affermare che usando le proprietà di propagazione delle onde elettromagnetiche associate alla durata degli impulsi in ns, è possibile discriminare meglio il rumore dai segnali di scarica parziale.

Infine è possibile dire che la rilevazione in banda ultra larga delle scariche parziali risulta essere attualmente il miglior metodo per comprendere i fenomeni di degrado e la fisica stessa degli isolati solidi usati nella costruzione delle apparecchiature elettriche e in modo speciale nei trasformatori isolati in resina epossidica.

6.4.1 STRUTTURA DI UN MISURATORE DI SCARICHE PARZIALI A BANDA ULTRA LARGA

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

- Parte di accoppiamento/acquisizione del segnale: la parte di accoppiamento rappresenta il punto di prelievo del segnale del 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.
- 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.
- 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 all'analisi diagnostica delle scariche parziali. L'acquisizione del segnale deve essere digitale per poter, in un secondo momento, rielaborare i segnali campionati. 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 i requisiti legati al campionamento. I valori tipici delle 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, cioè la segmentazione della memoria.

6.5 MISURA IN BANDA ULTRA LARGA E CARICA ASSOCIATA AGLI IMPULSI DI SCARICA PARZIALE

Abbiamo detto che la strumentazione in banda ultra larga per la misura delle scariche parziali ha la possibilità di rilevare e visualizzare la forma d'onda degli impulsi di corrente di scarica parziale.

Abbiamo pure detto che essa può e deve svolgere anche le stesse funzioni dell'apparecchiatura in banda larga e in banda stretta, cioè conoscere la carica messa in gioco dagli impulsi e la loro polarità.

E' necessario che la strumentazione in banda ultra larga faccia tutto ciò allo scopo di essere competitiva con le forme precedenti di misura delle scariche parziali e comunque perché la carica e la polarità degli impulsi sono due informazioni necessarie per determinare la pericolosità di tali fenomeni e in qualche modo anche la loro ubicazione.

6.5.1 INTEGRAZIONE NUMERICA

In forza delle proprie caratteristiche, la strumentazione in banda ultra larga è in grado, tramite un'integrazione numerica, di pervenire al valore della carica associata agli impulsi di corrente di scarica parziale.

L'operazione chiaramente essendo delicata presenta sempre inconvenienti, quali ad esempio la presenza di offset sovrapposti al segnale originale o la presenza consistente di rumore esterno, conseguentemente l'informazione che si può ricavare attraverso l'integrazione diretta non sempre risulta essere accurata.

L'offset, che eventualmente dovesse essere presente, perdura per tutta la registrazione del segnale e se integrato, può produrre errori considerevoli.

Allo scopo di ridurre il peso dell'offset sulle registrazioni del segnale è necessario considerarlo costante per ipotesi su tutta la registrazione.

Tale ipotesi, nel caso pratico della misura delle scariche parziali, è abbastanza veritiera in quanto data la modesta durata delle registrazioni, le componenti a bassa frequenza indotte nel segnale possono essere ritenute costanti.

Un secondo problema dell'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.

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

6. Diagnostica mediante le scariche parziali

6.5.2 PSEUDOINTEGRAZIONE NUMERICA

E' stato sviluppato un secondo metodo per ricavare l'integrale del segnale e consiste nel fare numericamente, ciò che viene fatto dalla strumentazione analogica ossia una pseudo integrazione per via numerica. 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 kHz. Il vantaggio del metodo consiste nel ridurre i problemi dell'integrazione numerica ed in particolare quelli legati all'oscillazione e alla deriva della funzione integrale. E' 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 ai sistemi di calcolo e dall'elevato tempo di elaborazione.

6.6 LIMITI NEI CIRCUITI DI MISURA IN U.W.B.

Il contenuto armonico dei segnali rilevati costituisce una informazione importante in merito all'origine e all'ubicazione delle sorgenti dei fenomeni di scarica parziale.

La strumentazione in banda ultra larga utilizzata per effettuare le misure di scarica parziale oggetto di questa trattazione presenta una banda di ampiezza non superiore ai 48 MHz e quindi sufficiente per rilevare anche segnali impulsivi molto veloci. L'indagine condotta ha portato alla luce una limitazione severa nei circuiti di misura in banda ultra larga, peraltro presente anche nei circuiti di misura in bande più ristrette, cioè l'estensione non trascurabile di questi ultimi.

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

Risulta altresì inapplicabile una misura di scariche parziali di routine all'interno di una gabbia di Faraday per abbattere il rumore proveniente dall'esterno, non solo dal punto di vista logistico, fisico e dimensionale, ma anche dal punto di vista economico e temporale. Bisogna dunque, anche nel caso di misure di scarica parziale in banda ultra larga, accettare un compromesso sui risultati di tale rilevazione, infatti per i motivi prima esposti, l'informazione ricavata in banda ultra larga sulla forma d'onda dell'impulso di corrente differisce dall'informazione sulla forma d'onda originaria a causa dell'influenza della funzione di trasferimento del circuito di misura e dello stesso oggetto in prova qualora abbia dimensioni fisiche considerevoli.

In ogni caso siccome la forma d'onda della corrente dell'impulso di scarica parziale viene utilizzata solamente per separare impulsi di natura diversa tale limite sopraesposto, se controllato adeguatamente, non è tale da invalidare il metodo di misura. L'informazione necessaria è quella del contenuto armonico dei segnali, che devono essere distinti in impulsi aventi le medesime caratteristiche per poter in seguito, con tecniche note, riconoscerne la natura.

7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

7.1 PRESENTAZIONE DEL SISTEMA TECHIMP PD BASE 2

L'innovativa tecnologia Techimp Pd Base 2 permette di classificare i differenti fenomeni di scarica parziale sulla base della loro forma d'onda e di suddividerli in differenti gruppi, cosicché si possa con successive analisi, lavorare sul singolo gruppo di segnali e poterne salvare poi i risultati separatamente.

Queste caratteristiche fanno dell'apparecchiatura in questione uno strumento versatile, che può essere usato anche da operatori non qualificati nell'ambito delle misure in alta tensione, chiaramente solo per la parte di acquisizione dei segnali alla postazione PC.

La filosofia di acquisizione Techimp è stata concepita in modo tale da avere un'efficiente reiezione del rumore in molti casi pratici senza l'aggiunta di altri dispositivi di soppressione del medesimo.

Le sorgenti di rumore possono essere molteplici come pure diverse sono le sorgenti di disturbo, perciò la tecnologia Techimp riesce ad identificare e separare le sorgenti di tali fenomeni, nonché a distinguerli dagli impulsi di corrente di scarica parziale.

Ogni impulso di corrente di scarica parziale viene campionato e salvato in memoria; in un secondo momento verranno collocati tali impulsi acquisiti in un diagramma ampiezza-tempo, in un diagramma ampiezza-frequenza e infine in un diagramma tempo-frequenza che è proprio quello che ci interessa maggiormente allo scopo di individuare le diverse famiglie di scariche parziali.

Il diagramma tempo-frequenza è importante poiché ci permette di raggruppare i vari segnali acquisiti in gruppi detti "clusters", i quali presentano analoghe caratteristiche per quanto riguarda il tempo e la frequenza con cui essi si manifestano.

Sempre problematico rimane il problema della separazione del rumore di fondo proveniente dal circuito di misura dagli impulsi di corrente di scarica parziale almeno per ampiezze ridotte di questi ultimi.

Le principali funzioni del sistema digitale Techimp PD Base 2 sono dunque:

- Monitoraggio digitale delle scariche parziali;
- Analisi degli impulsi di scarica parziale;
- Identificazione automatica delle famiglie di scariche parziali con processi statistici o in logica fuzzy;
- Database diagnostico dei dati raccolti;
- Rilevazione e visualizzazione dei parametri caratteristici degli impulsi acquisiti;
- Controllo remoto e uso in loco dell'apparecchiatura.

7.2 DATI DI TARGA DEL SISTEMA TECHIMP PD BASE 2

Wide Bandwidth Acquisition PD Channel

1 x 200 MS/s channel (4/6 multiplexed inputs)
Bandwidth: 16 kHz ÷ 48 MHz
2.5 MHz ÷ 48 MHz
115 ÷ 440 kHz (IEC60270 compliant)
Input range: 1mVpp÷5.0 Vpp
Input sensitivity: < 1.0 mVpp
Vertical Resolution: 12 bits
Dynamic range: 75 dB
Input Impedance: 50 Ohm
Recording time length : 40 us maximum
Pre-Trigger Recording time : 0÷100 % of time length
Dead time min: about half acquisition time length.

Synchronization features

Frequency Range : 0.1Hz÷1kHz
Phase accuracy: <1°
Synchronization Voltage: 0.1 mVrms – 200 Vrms

Line Synchronization internal-channel

1 x 100 kS/s 16 bit analog channel.

Narrow Bandwidth Analog Channels

5 x 100 kS/s 16 bit simultaneous sampling channels to be used for analog signal monitoring and/or synchronization purposes. All channels externally available by means of BNC connectors can be individually set via software. Selectable options are:
Input attenuations: 20, 40 dB
Full-scales values : 0.25 V ; 0.5 V ; 2.5 V ; 5.0 V ; 25.0V ; 50V ; >50 V
1st order Low Pass Filter Bandwidth: ~ 10, 20, 50, 100, 200, 1000 Hz

Digital Channel

1 x high speed TTL input channel user selectable
external synchronization
acquisition gating (under development)
external trigger (under development)

Fiber Optic Input and Options

One fiber optic input is provided for long distance insulated analog signal acquisition. Once connected to a special transmitter1 (option), 2 extra electrically insulated analog channels become available to the user.

7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Communication system

Full control via Ethernet TBase-100FX

GPS option

The system can be equipped with an optional GPS processor for precise absolute time acquisition over all channels.

PD Channels and Synchronization front-end

Analog signal front-end processing board easily replaceable in case of input overloads occurrence.

PC platform minimum recommended performances

Pentium Core 2 Duo 2,0 GHz, 2GB RAM, HDD 100GB, 1024x68 screen resolution, Ethernet 10/100, USB port.

Software

OS: Win XP Professional, (Windows Vista: under test). Acquisition and processing programs provided by **TechImp**.

Firmware

DSP and FPGA internal firmware updating via internet connection to **TechImp** web-site.

Self Diagnostic capability

Built-in test signal generator allows wide band channels to be checked automatically before PD acquisition campaign (under development).

Recommended periodical functionality full check at **TechImp** premises: once per year.

General

Operating Conditions:	Temperature $-5\div 50^{\circ}\text{C}$; humidity 90% non-condensing; altitude ≤ 2000 meters
Power Requirements:	85-250 V AC; 47-440 Hz; maximum power dissipation: 40 W;
Certifications:	IEC 60270 hardware and software
Box Dimensions :	230mm x 280mm x 110mm
Overall Dimensions:	230mm x 300mm x 110mm
Weight:	6 kg
Warranty:	one year.

7.3 PROCEDURA PER L'USO DEL SISTEMA DIGITALE IN BANDA ULTRA LARGA TECHIMP PD BASE 2

Questa procedura sommaria per l'utilizzo dei due software PD Base 2[®] e PD Processing[®] è stata redatta come pro memoria durante il tirocinio svolto dal sottoscritto nell'ambito della valutazione del sistema digitale a banda ultra larga Techimp Pd Base 2 della ditta Techimp s.r.l. di Zola Pedrosa (BO) e non costituisce di per sé un testo sostitutivo del manuale d'utente fornito dalla Techimp s.r.l. .

Il manuale d'utente non fornisce alcuna indicazione sull'utilizzo del software di elaborazione dei dati PD Processing[®] , che invece in questa procedura viene tenuto in considerazione e viene descritto nei suoi contenuti essenziali.

7.3.1 CONNESSIONE ALL'UNITA' D'ACQUISIZIONE

Dopo aver fisicamente realizzato il circuito di misura, connettendo pure l'unità di acquisizione Techimp PD Base 2 in base al manuale d'utente, bisogna verificare che il PC nel quale è stato installato preventivamente il software Techimp, sia in comunicazione con l'unità di acquisizione; se dovessero esserci degli errori verrà visualizzata la seguente finestra:

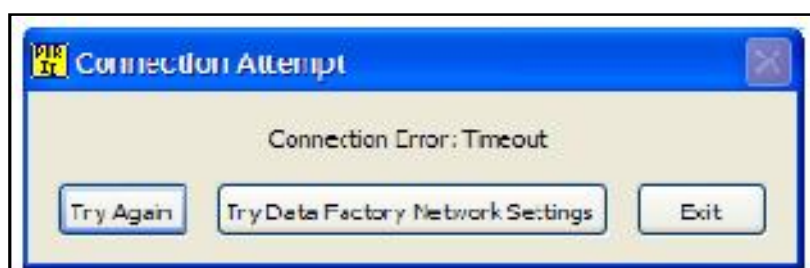


Figura 7.3.1(1): Finestra d'avviso errori di connessione
Fonte: Manuale d'utente del sistema U.W.B. Techimp s.r.l.

7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

I problemi di connessione che si possono presentare sono molteplici:

Connection error	Solution
The TCP/IP protocol is not correct.	Set the TCP/IP protocol (IP address and subnet mask) of laptop as indicated in section 4.1.3
The control unit has a firewall activated.	Disable the firewall or exclude the <i>PDBaseII Control software</i> by the list of the firewall blocked software.
The Techimp PDBaseII acquisition unit is switched off.	Check the Techimp PDBaseII acquisition unit power supply (PS connector, AC/DC converter, power on the LV network, etc)
The Ethernet media converter is not supplied or failed.	Check the media converter power supply and verify that all the LEDs are switched on.
The physical connection between the laptop and the acquisition unit is bad.	Check the LAN cable is rightly connected from the laptop to the media converter; check also the right connection of fiber optic between the media converter and the acquisition unit (see Fig. 4.12).

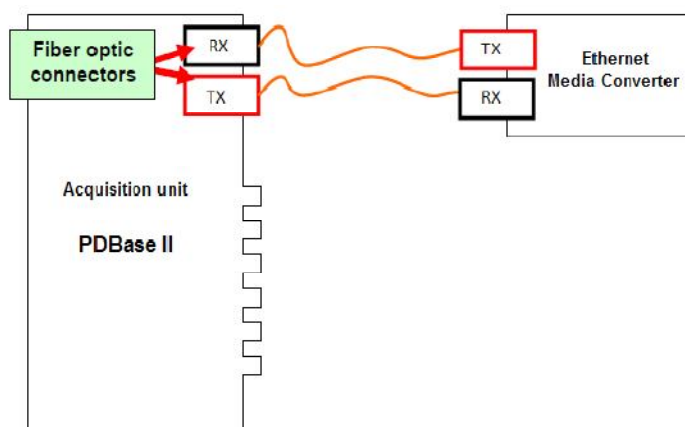


Fig. 4.12: Fiber optic connection

Figura 7.3.1(2): Specchietto errori di connessione e soluzioni
Fonte: Manuale d'utente del sistema U.W.B. Techimp s.r.l.

7.3.2 CONTROLLO DELL'UNITA' D'ACQUISIZIONE

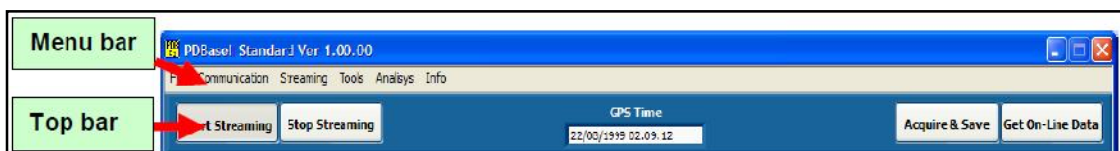


Figura 7.3.2(1): Testa della schermata del software PD Base2®
Fonte: Manuale d'utente del sistema U.W.B. Techimp s.r.l.

Realizzata e controllata la connessione all'unità di acquisizione è necessario far partire la lettura e la visualizzazione dei segnali in ingresso premendo con il mouse su Start Streaming nella Top Bar come visualizzato sopra.

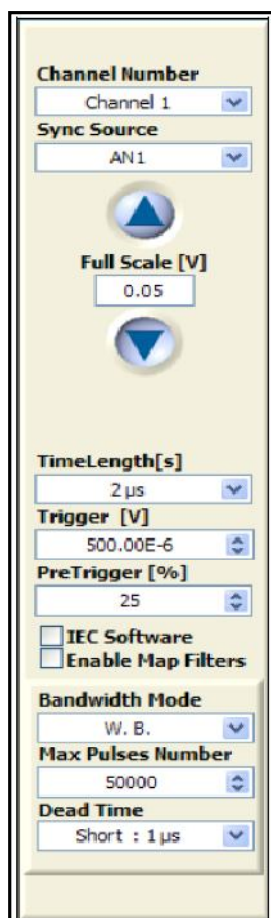


Figura 7.3.2(2): Finestra dei parametri d'acquisizione del software PD Base2®
Fonte: Manuale d'utente del sistema U.W.B. Techimp s.r.l.

7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Per poter visualizzare correttamente il segnale bisogna sintonizzarsi sul canale al quale è connessa l'impedenza di misura e sulla sorgente di sincronizzazione connessa alla medesima impedenza, come si vede nella figura 7.3.2(2).

Il pannello dei parametri d'acquisizione nella figura 7.3.2(2) presenta pure la possibilità di variare il guadagno dell'amplificatore interno all'unità di acquisizione in modo da visualizzare meglio il segnale letto.

E' inoltre possibile impostare la scala dell'asse delle ascisse (TimeLength[s]) e quella delle ordinate con le due frecce per poter meglio osservare il segnale letto dalla medesima unità di acquisizione.

Usando il Pre-Trigger ed il Trigger andiamo a selezionare l'ampiezza dei segnali che vogliamo visualizzare e ad escludere quelli che stanno al di sotto di tale livello, sia positivo che negativo.

Il pannello dei parametri d'acquisizione nella figura 7.3.2(2) riporta inoltre una piccola finestra sulla parte bassa in sovrapposizione nella quale è possibile impostare la modalità di acquisizione dei segnali:

- W.B. modalità a banda ultra larga
- W.B. + HPF modalità a banda ultra larga con filtro passa alto
- IEC 60270 modalità seconda normativa

E' possibile inoltre impostare il numero massimo di impulsi acquisiti e il tempo di riarmo del trigger detto appunto tempo morto o dead time.

7.3.3 CALIBRAZIONE DELL'UNITA' D'ACQUISIZIONE

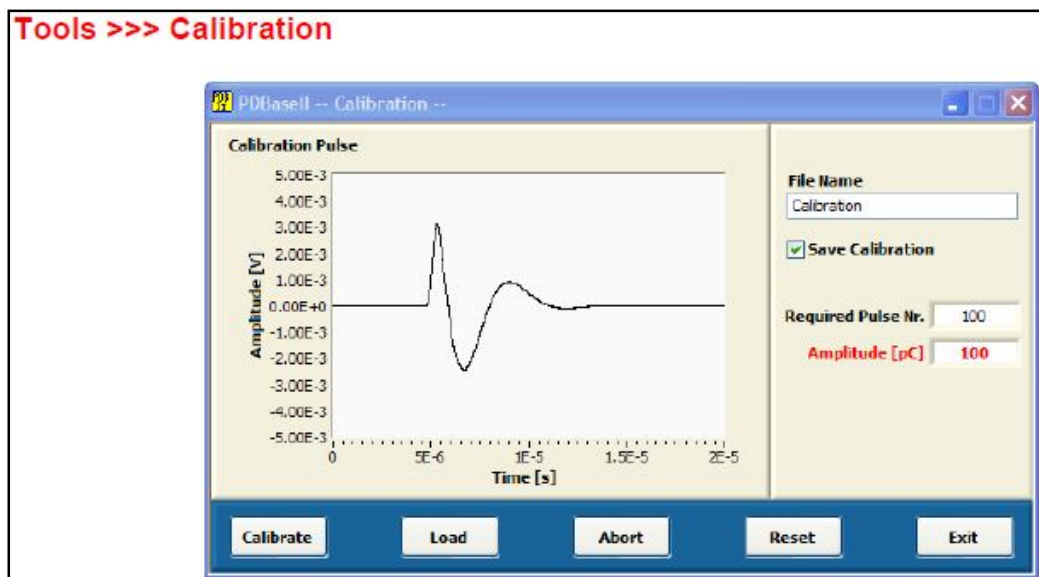


Figura 7.3.3(1): Finestra dei parametri di calibrazione del software PD Base2®
Fonte: Manuale d'utente del sistema U.W.B. Techimp s.r.l.

7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Allo scopo di poter misurare l'ampiezza delle scariche parziali tramite questo software bisogna prima di tutto effettuare la calibrazione ogni volta che si accede al programma di acquisizione, inoltre prima di effettuare una acquisizione diretta è necessario pure sincronizzare il software e fornirgli la tensione che in quel momento sta leggendo effettuando gli opportuni calcoli sul circuito di misura.

Per calibrare il software e quindi l'unità di acquisizione dobbiamo accedere nella Menù Bar, quindi a Tools e infine Calibrate; ci verrà visualizzata allora la finestra di cui sopra. E' necessario dunque fornire al circuito di misura un impulso di calibrazione usando un calibratore esterno, dopo di che si va sulla casella qui sopra Amplitude [pC] e si digita il valore della calibrazione effettuata; si preme allora Calibrate e si conclude la procedura con Exit.

Vediamo che la finestra di dialogo ci da pure la possibilità di abortire la calibrazione mentre è attivata, così come ci da la possibilità di resettare la calibrazione ed inoltre possiamo, tramite il pulsante Load, come si può vedere sopra nella figura, caricare il file di calibrazione che viene salvato nella directory pre impostata, ogni qualvolta si effettua una calibrazione.

7.3.4 SINCRONIZZAZIONE DELL'UNITA' D'ACQUISIZIONE

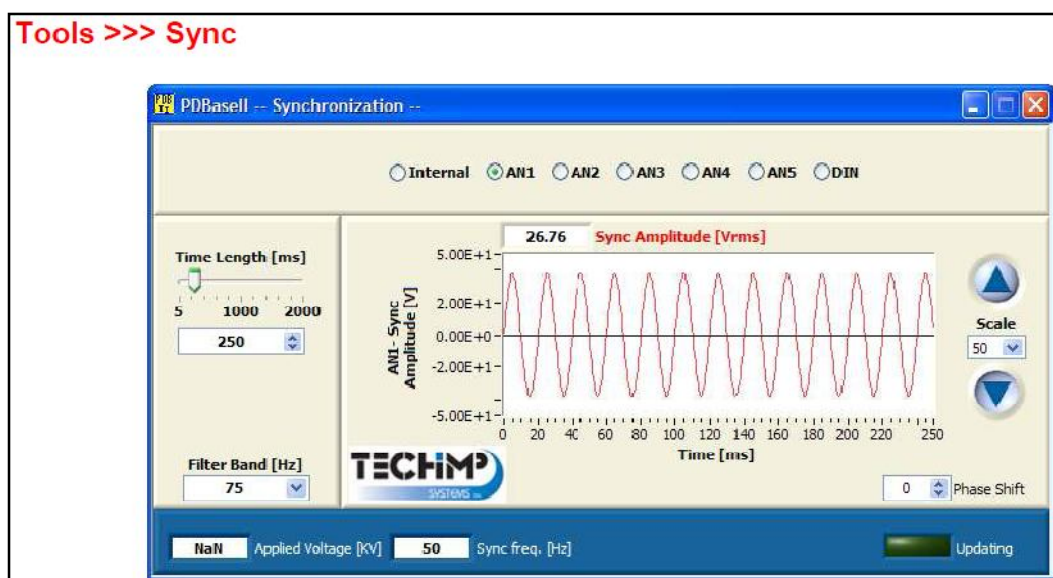


Figura 7.3.4(1): Finestra dei parametri di sincronizzazione del software PD Base2®
Fonte: Manuale d'utente del sistema U.W.B. Techimp s.r.l.

Per sincronizzare il software e quindi l'unità di acquisizione dobbiamo accedere nella Menù Bar, quindi a Tools e infine Sync; ci verrà visualizzata allora la finestra di cui sopra. Bisogna innanzitutto scegliere a quale canale far riferimento per la sincronizzazione indicandolo tra le opzioni sopra riportate, dopo di che bisogna indicare la lunghezza d'onda in [ms] con il cursore Time Length del segnale di sincronizzazione

7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

e poi impostare la frequenza di taglio del filtro passa basso in Filter Band [Hz] come sopra riportato in figura. Infine è necessario calcolare la tensione che viene letta ai capi dell'impedenza di misura del Techimp PD Base 2 e scrivere il valore nella casella Applied Voltage [kV], poi dare Invio.

7.3.5 USO DELL'UNITA' D'ACQUISIZIONE

Dopo aver effettuato tutti gli step precedenti è necessario acquisire gruppi di segnali e per fare ciò basterà cliccare su Acquire and Save avendo preventivamente compilato e segnalato quale sia il circuito di misura usato, il nome e la cartella dei file, ecc.. , usando la finestra Acquisition Setting.

Acquisiti dunque gruppi di segnali e salvati nell'apposita directory pre definita, per poter effettuare un'elaborazione degli stessi è necessario convertire i file salvati dal formato *.pd2 al formato *.pdbw o *. pdb , che fa capo al secondo software PD Processing[®] , il quale ha come unico scopo quello di elaborare i segnali per capire a quale famiglia appartengono e fornire ove possibile una probabile classificazione degli stessi.

7.4 USO DEL SOFTWARE PD PROCESSING[®]

Dopo aver convertito con il software d'acquisizione iniziale PDBase 2 i propri files in quelli PDProcessing, aprendo il medesimo programma è possibile da subito selezionare la cartella e quindi i files che si vogliono analizzare. Selezionando il file da analizzare e confermato, il PDProcessing provvederà a visualizzarne il contenuto in tre sezioni:

- acquisition pattern & processing controls
- pulse section
- acquisition parameters.

Nella prima sezione Acquisition Pattern & Processing Controls vengono messi in evidenza due diagrammi, uno PDPattern in cui vengono posizionati gli impulsi di corrente di scarica parziale in base alla fase che essi hanno se confrontati con una sinusoide fittizia disegnata sullo sfondo del diagramma; l'altro diagramma Classified Input Map visualizza ugualmente gli impulsi di scarica parziale come punti, stavolta però classificandoli in base alla teoria del tempo-frequenza. Le altre due sezioni sono di immediata conoscenza e quindi non ce ne curiamo.

Andiamo dunque nella sezione Acquisition Pattern & Processing Controls, in basso a sinistra troviamo due pulsanti:

- Run Classification
- Processing and Identification.

7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Prima di tutto dobbiamo cliccare sul primo pulsante e ci apparirà una finestra con tre opzioni da scegliere:

- Fuzzy
- Manual
- Map Zoom.

Sono tre metodi di classificazione degli impulsi di corrente di scarica parziale. Il primo metodo di classificazione usa degli algoritmi in logica fuzzy e in automatico suddivide il pattern tempo-frequenza in classi. Il secondo metodo prevede che l'operatore abbia sensibilità della teoria tempo-frequenza e che quindi riesca ad addestrare il software sulla suddivisione in classi degli impulsi acquisiti. Il terzo metodo è semplicemente il secondo con un'opzione di zoom.

Scegliendo dunque il secondo metodo che prevede appunto come già accennato una certa sensibilità nel classificare gli impulsi in base alla loro frequenza e al tempo di scarica, la schermata che ci appare prevede che con l'ausilio del mouse andiamo a selezionare le varie aree alle quali pensiamo siano associati impulsi di natura simile.

Per ogni area selezionata (sempre che osservando ne vediamo più d'una) dobbiamo salvarle una dopo l'altra altrimenti potremmo analizzarne soltanto una e questo lo si fa selezionando appunto tale area e cliccando poi su select e ok.

Fatto ciò possiamo cliccando ok tornare sulla schermata principale iniziale e abbiamo due opzioni:

- possiamo cliccando su entire acquisition analizzare tutta l'acquisizione senza le singole aree selezionate;
- possiamo cliccando su single classes analizzare le singole classi.

Dopo di che sarà necessario in ogni caso tornare in basso a sinistra e cliccare sul pulsante Processing and Identification, in questo modo attiviamo il riconoscimento automatico della tipologia di scarica parziale.

In questa sezione verrà visualizzata appena vi si accede una schermata nella quale ci sono sei diagrammi, una colonna di parametri e una sezione OPZIONI.

La colonna centrale della schermata visualizza i parametri statistici degli impulsi di corrente di scarica parziale suddividendoli secondo le due polarità.

I diagrammi che vengono visualizzati verranno redatti appunto con l'ausilio di questi parametri e delle acquisizioni fatte precedentemente.

La parte interessante è la sezione OPZIONI nella quale sono visualizzati quattro pulsanti:

- identification
- report
- view all parameters
- manual filter.

7. Sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

La sottosezione “identification” cerca, in base alla teoria tempo-frequenza, di dare un primo livello di classificazione alle scariche parziali.

Questo primo livello “First Identification Level” è costruito in modo tale da poterci dire se gli impulsi di corrente di scarica parziale sono di cinque tipologie:

- Corona Discharges
- Surface Discharges
- Internal Discharges
- Invalid Data
- Noise.

Esiste dunque un secondo livello “Second Identification Level” di identificazione della tipologia delle scariche parziali, nel quale esistono vari tipi di classificazione:

- Treeing Alert
- ID Invalid – Noise
- ID Likelihood
- PD from voltage source.

Questa sottosezione di seconda identificazione cerca di dirci, senza quantificare il fenomeno, da dove proviene il problema nel caso di dati acquisiti invalidi o presenza di rumore; inoltre essa ci mette in allerta tramite un indicatore in per unità sulla possibile presenza in percentuale di scariche parziali interne ad albero.

Viene pure specificato se gli impulsi di corrente di scarica parziale provengono dall'alimentazione.

La sottosezione “Identification” viene correlata infine con due sottosezioni nelle quali vengono riassunti in una i dati in ingresso , mentre nell'altra i risultati in uscita.

La sottosezione “Report” serve esclusivamente a generare un file Word nel quale vengono riassunti i dati di input ed output correlati da grafici e calcoli effettuati dal software, nonché i parametri rilevati e le relative identificazioni, sempre se ce ne sono.

La sottosezione “View All Parameters” è retoricamente chiara e non serve dare delle delucidazioni, mentre un'ultima sottosezione importante è “Manual Filter”.

Quest'ultima sottosezione è importante poiché consente tramite un filtro manuale di escludere parti del pattern in cui io ritengo ci siano impulsi di corrente di scarica parziale non validi o comunque che identifico come rumore. Lo sbaglio è quello di usare il filtro manuale per cercar di identificare la natura delle scariche parziali, escludendo o includendo più o meno parti del pattern stesso, infatti come abbiamo visto questo “Manual Filter”, deve servire unicamente ad escludere sezioni di pattern in cui si ritiene non ci siano segnali impulsivi interessanti allo scopo della discriminazione dei fenomeni impulsivi suddetti.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

PRESENTAZIONE DELLE MISURE IN LABORATORIO A.T.

Il lavoro svolto in questo capitolo descrive le misure di scariche parziali effettuate su quattro trasformatori, di cui due monofasi e due trifasi con un sistema di rilevazione a banda larga (James G. Biddle cat. 665702 ser. 088102) ed un sistema di misura a banda ultra larga (TECHIMP PD BASE 2 ser. 091-009-08).

La doppia misura di scariche parziali, oltre a permettere un confronto diretto sul campo tra la strumentazione a banda larga ed ultra larga, si è rilevata utile a definire le differenze tra le due strumentazioni utilizzate nel caso di misure sui trasformatori.

In merito alla misura delle scariche parziali con strumentazione a banda larga è noto, infatti, che la strumentazione comunemente utilizzata per la misura sui trasformatori può essere affetta da un errore di integrazione non trascurabile dovuto alle risonanze presenti all'interno delle bobine di media tensione dei trasformatori.

In merito alla strumentazione a banda ultra larga è invece noto che vi sono dei problemi dovuti al rumore dei convertitori utilizzati ed alla scarsa risoluzione per impulsi di corrente aventi modesta intensità.

Tutte le elencate sono state effettuate alimentando i trasformatori con una tensione di frequenza pari a 100 Hz, allo scopo di poter alimentare le macchine con una tensione superiore alla nominale (secondo IEC 60076-11) senza superare il valore di induzione di progetto dei pacchi ferromagnetici.

8.1 MISURA DI SCARICHE PARZIALI SU DI UN TRASFORMATORE MONOFASE ISOLATO IN RESINA EPOSSIDICA DA 185 kVA

E' stato provato un trasformatore monofase destinato a funzionare con un punto a terra all'interno di un sistema di conversione statica dell'energia elettrica destinato alla alimentazione di un sistema di eccitazione per gruppi sincroni.

I dati di targa principali sono:

- POTENZA NOMINALE 185 kVA
- TENSIONE PRIMARIA $6060 \pm 2 \times 2,5 \%$ V
- TENSIONE SECONDARIA 215 V

Il trasformatore è stato provato nelle strutture dell'università in quanto il costruttore, avendo rilevato in fase di collaudo un livello sostenuto di scariche parziali, aveva deciso di ripetere la prova presso un altro laboratorio maggiormente attrezzato al fine di avere una conferma dei dati rilevati e, se possibile avere informazioni in merito al difetto origine dei fenomeni.

Le prove sono state svolte mediante la strumentazione a banda larga James G. Biddle con annesso oscilloscopio analogico per la visualizzazione degli impulsi di corrente di scariche parziali.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

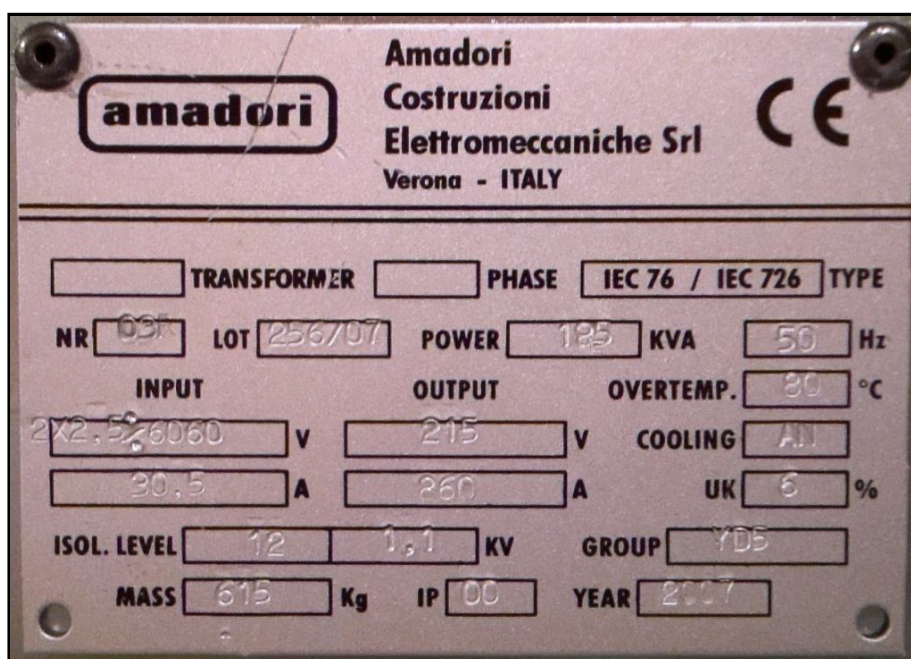


Figura 8.1(1): Targa del trasformatore

Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.1.1 RILIEVO DELLE SCARICHE PARZIALI CON IL SISTEMA IN BANDA LARGA

Rapporto di prova

OGGETTO: Trasformatore Monofase in resina 185 kVA
V. 6060 +/- 2X2,5% / V. 215
LOTTO NR 256/07-NR 2R – LOTTO NR 256/07-NR 4R
data inizio trasporto 06/02/09

PROVA: test scariche parziali con circuito indiretto secondo norma IEC 60270 e IEC 60076
calibrazione effettuata a 10 pC
pre - stress effettuato a 1,8 Vnom per 30" e misura PD effettuata a 1,3 Vnom per 3'
data prova 09/02/09

RISULTATO: trasformatore LOTTO NR 256/07-NR 2R

V alimentazione	Livello PD
280 V	<10 pC

misurando in testa ad una fase e mettendo a terra la testa dell'altra, tuttavia scambiando le connessioni:

V alimentazione	Livello PD
280 V	10+20 pC

e si spengono a 250 V come tensione di disinnesco in discesa, cioè tensione in diminuzione.
Misurando le scariche parziali mettendo a terra il fondo della bobina e rilevando in testa alla medesima abbiamo ottenuto:

V alimentazione	Livello PD
280 V	<3 pC

pertanto il problema potrebbero essere le zeppe di sostegno e distanziamento delle bobine.

RISULTATO: trasformatore LOTTO NR 256/07-NR 4R

V alimentazione	Livello PD
280 V	<2 pC

Figura 8.1.1(1): Rapporto di prova ad uso pro memoria della rilevazione delle scariche parziali sul trasformatore monofase Amadori isolato in resina epossidica da 185 kVA
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Il rapporto di prova redatto come pro-memoria, riporta i dati raccolti nel corso della misura di scariche parziali del trasformatore monofase citato.

La prova è stata effettuata mediante un circuito di misura indiretto (vedi capitolo 3) in conformità alla normativa IEC 60270 ed IEC 60076-11 (vedi capitolo 5) rispettando un periodo di acclimatazione pre - prova di alcune ore.

E' stato eseguito un pre-stress iniziale, aumentando gradualmente la tensione dal lato secondario tramite un trasformatore trifase elevatore, fino al livello di 1,8 volte la tensione nominale secondaria della macchina alla frequenza di 100 Hz per 30 secondi.

Al termine dei 30 secondi, gradualmente si è ridotta la tensione fino a 1,3 volte la tensione nominale secondaria, tale valore è stato mantenuto per 3 minuti.

Nel corso di tutto il ciclo di alimentazione del trasformatore è stato rilevata l'intensità delle scariche parziali.

Il ciclo suddetto è stato ripetuto tre volte con diversa connessione degli avvolgimenti al fine di identificare la origine dei fenomeno di scarica.

I collegamenti utilizzati nelle tre fasi sono a seguito descritti:

- collegamento in serie delle bobine primarie con misura in testa alla bobina A e collegamento a terra della testa della bobina B;
- collegamento in serie delle bobine primarie con misura in testa alla bobina B e collegamento a terra della testa della bobina A;
- misura delle scariche parziali sulle singole bobine, una alla volta.

In conclusione alla misura, analizzando il rapporto di prova, è stato messo in luce il fatto che, invertendo il collegamento di terra con quello di misura, dopo il relativo pre-stress di 30 secondi, alla tensione di prova di 280 V pari ad 1,3 volte la tensione nominale, dopo altri 3 minuti, il livello di scariche parziali risultava essere ancora maggiore del limite normativo di 10 pC.

Provando le singole bobine, cioè togliendo la sbarra che le collega, a 280 V, il livello di scariche parziali risultava nella norma.

Analizzando con l'oscilloscopio analogico collegato al sistema di rilevazione a larga banda, la forma d'onda della risposta del sistema di misura si è evidenziata la presenza di leggere oscillazioni della forma d'onda degli impulsi.

Da tale osservazione si è concluso che la sorgente di scariche parziali fosse lontana dal terminale di misura ed i segnali trasferiti dalla sorgente al sistema di rilevazione tramite le bobine del trasformatore.

Analizzando in dettaglio le caratteristiche costruttive e le geometrie del trasformatore, in base alla esperienza del laboratorio di alte tensioni su macchine simili si è ipotizzato che la sorgente dovesse essere o il canale d'aria tra gli avvolgimenti primario e secondario, oppure le zeppe di sostegno e bloccaggio delle bobine primarie.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Rapporto di prova

OGGETTO: Trasformatore Monofase in resina 185 kVA
V. 6060 +/- 2X2,5% / V. 215
LOTTO NR 0256/07 NR 01R
data inizio trasporto 10/02/09

PROVA: test scariche parziali con circuito indiretto secondo norma IEC 60270 e IEC 60076
calibrazione effettuata a 10 pC
pre - stress effettuato a 1,8 Vnom per 30" e misura PD effettuata a 1,3 Vnom per 3'
data prova 13/02/09

RISULTATO: trasformatore LOTTO NR 0256/07 NR 01R

V alimentazione	Livello PD
280 V	<2 pC

Questo trasformatore era stato provato il giorno 09/02/2009 e presentava i seguenti risultati:

V alimentazione	Livello PD
280 V	<10 pC

tuttavia invertendo le connessioni, cioè la messa a terra della testa della bobina e il punto di misura il risultato della prova diventava:

V alimentazione	Livello PD
280 V	20 pC
250 V	disinnesco

allorché misurando ai capi delle singole bobine non venivano più registrate scariche parziali. Il problema dunque era sulle zeppe che presentavano scariche superficiali di lieve entità, dovute molto probabilmente alla testa delle viti di fissaggio delle medesime al corpo delle bobine a 6060 V e alla loro vicina con queste ultime. Tolle le zeppe e le viti di fissaggio e rifatta la misura delle scariche parziali, il risultato è stato soddisfacente, pertanto la conclusione è che le zeppe con le relative viti di fissaggio siano effettivamente sede di scariche parziali superficiali, come peraltro confermato dalla rilevazione fatta con il sistema digitale Techimp PD Base 2, il quale ha confermato l'esistenza di scariche parziali completamente superficiali. In un secondo momento, il giorno 13/02/2009 è stata rifatta la rilevazione delle scariche parziali sul medesimo trasformatore monofase, aggiungendo sotto alle zeppe, uno strato in più di gomma siliconica. Il risultato è stato soddisfacente, cioè non si rilevavano più scariche parziali superficiali, questo a conferma dell'identificazione precisa del problema non solo da parte dell'esperienza degli operatori con strumentazione a larga banda analogica, ma soprattutto a conferma della possibile validità dello strumento digitale ad ultra larga banda Techimp PDBase 2.

Figura 8.1.1(2): Rapporto di prova ad uso pro memoria della rilevazione delle scariche parziali sul trasformatore monofase Amadori isolato in resina epossidica da 185 kVA
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

In un secondo momento è stata eseguita una seconda prova di misura delle scariche parziali, sul medesimo trasformatore monofase, come si può vedere dal rapporto di prova riportato nella figura 8.1.1(2). Questo rapporto di prova, redatto ad uso di promemoria è stato costruito, eseguendo nuovamente la misura delle scariche parziali con il sistema a larga banda, con la differenza che in questa seconda prova sono state rimosse le zeppe e le viti di fissaggio delle bobine. Il risultato di tale operazione è la scomparsa delle scariche parziali, a conferma del fatto che le zeppe erano la sorgente delle scariche parziali superficiali. Il costruttore ha risolto il problema mediante l'aggiunta di uno strato isolante di gomma siliconica, che ha aumentato la distanza fra la testa delle viti di fissaggio delle zeppe e la bobina riducendo il campo elettrico e dunque l'insorgere delle scariche parziali.

8.2 MISURA DI SCARICHE PARZIALI SU DI UN TRASFORMATORE MONOFASE ISOLATO IN RESINA EPOSSIDICA DA 220 kVA

Il presente paragrafo riporta i risultati delle misure effettuate su un trasformatore di costruzione simile al precedente ma con caratteristiche lievemente diverse ed a seguito riportate:

- POTENZA NOMINALE 220 kVA
- TENSIONE PRIMARIA $6060 \pm 2 \times 2,5$ V
- TENSIONE SECONDARIA 260 V

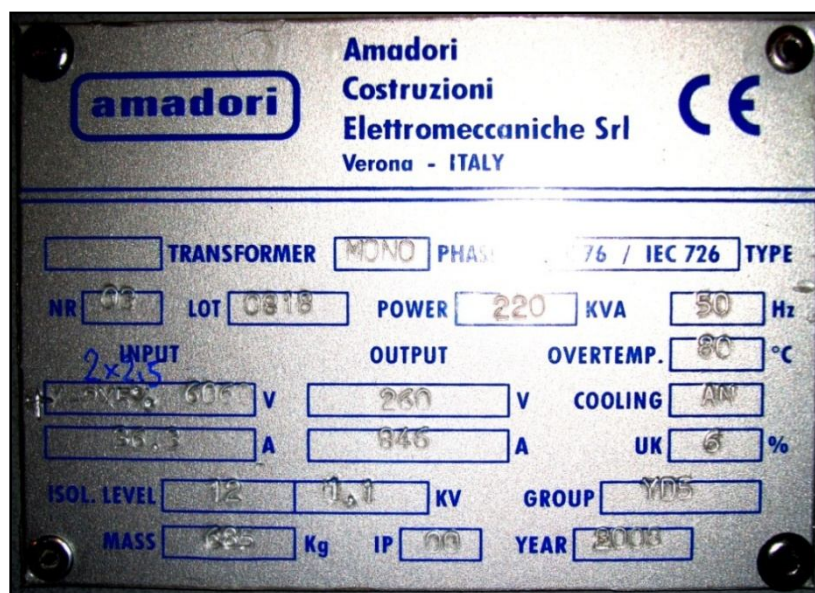


Figura 8.2(1): Targa del trasformatore
Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Il secondo trasformatore provato, di potenza maggiore, era anch'esso destinato alla alimentazione di un sistema di eccitazione per gruppi sincroni per cui è stato provato come il precedente con un punto dell'avvolgimento di media tensione a terra.



Figura 8.2(2): Trasformatore monofase Amadori da 220 kVA inserito nel circuito di prova delle scariche parziali nel quale si riesce a notare come le zeppe superiori ed inferiori servano al sostegno ed al bloccaggio sia per le bobine primarie esterne che per le bobine secondarie interne.

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

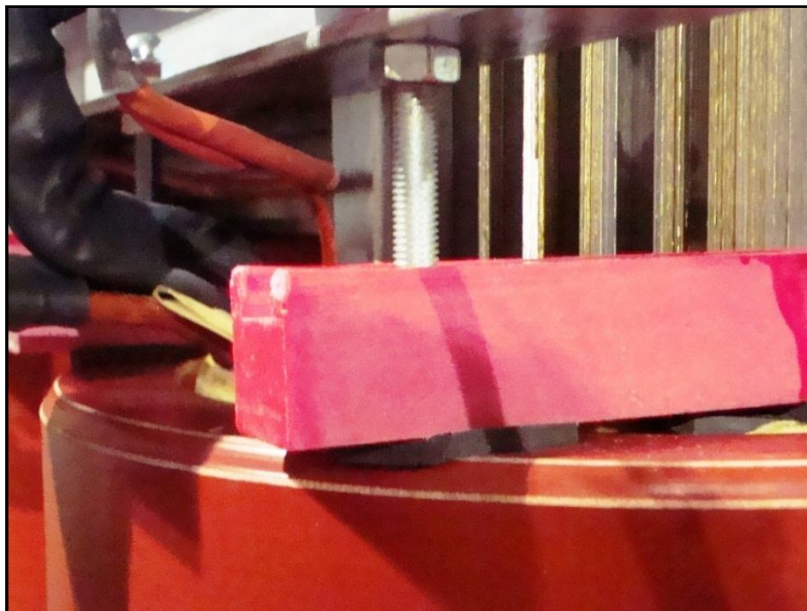


Figura 8.2(3): Particolare di una zeppa di bloccaggio superiore del trasformatore.
Si può notare come sia presente un esiguo strato di gomma siliconica nera.
Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

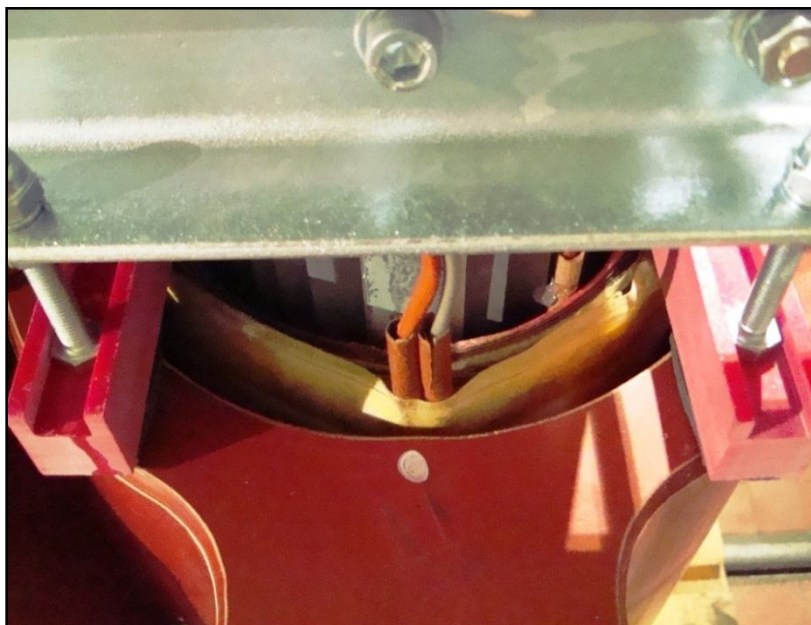


Figura 8.2(4): Particolare del canale d'aria tra la bobina primaria e secondaria del trasformatore.
Si può notare l'erroneo posizionamento delle sonde di temperatura che creano una discontinuità di spessore del canale d'aria e come la testa delle viti di bloccaggio sia troppo vicina alle bobine di M.T.

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Come si può notare dalla figura 8.2(3), la configurazione costruttiva delle zeppe di sostegno e bloccaggio delle bobine primarie e secondarie risulta sostanzialmente diversa dall'analogo trasformatore monofase di potenza nominale pari a 185 kVA.

Si nota, inoltre, uno strato di gomma siliconica per appoggio delle zeppe alle bobine e che le zeppe oltre a bloccare le bobine di media tensione, attraverso il canale bloccano entrambe le bobine secondarie.

La figura 8.2(4) pone in risalto il fatto che gli alloggiamenti per le sonde di temperatura creano una riduzione della distanza nel canale d'aria tra bobine primarie e bobine secondarie.

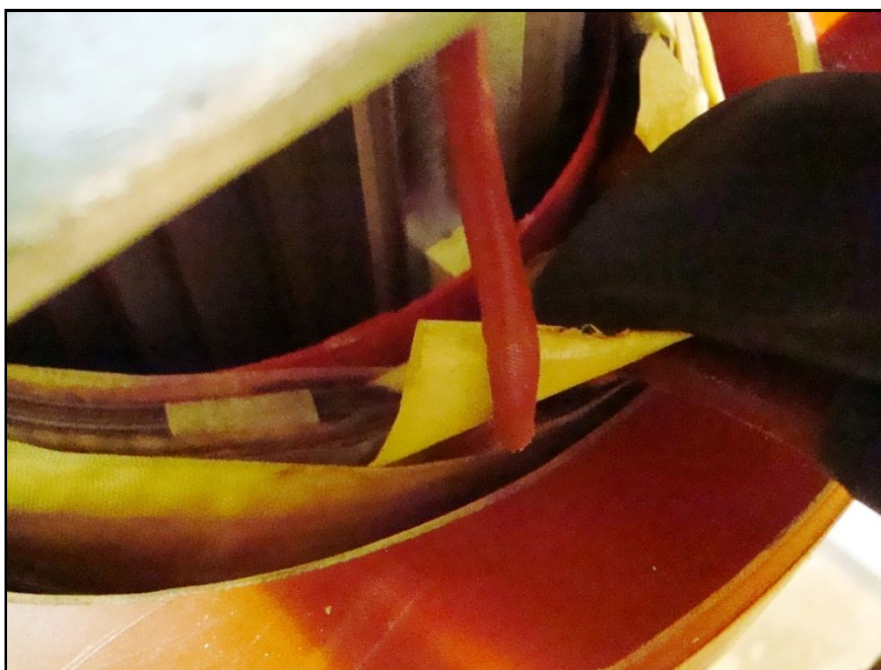


Figura 8.2(5): Particolare del canale d'aria tra ingresso – uscita della bassa tensione e la bobina di media tensione. Notiamo come praticamente ci sia un'esigua lama d'aria tra le due parti in tensione, sicura sede di scariche parziali superficiali e Corona.

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

La figura 8.2(5) mette in evidenza la ridotta distanza tra ingresso in tensione della bobina secondaria e la bobina primaria, possibile sede di scariche parziali superficiali all'aumentare della tensione.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.2.1 RILIEVO DELLE SCARICHE PARZIALI CON IL SISTEMA IN BANDA LARGA

In conformità alla normativa IEC 60270 ed IEC 60076-11 si è lasciato il trasformatore in laboratorio per alcune ore al fine di giungere all'equilibrio termico con l'ambiente. Sul trasformatore in prova non sono state svolte altre operazioni, come ad esempio la pulizia delle superfici esterne del trasformatore, anche se sarebbero state necessarie al fine di escludere umidità e incrostazioni dall'elenco delle cause di scariche parziali superficiali.

In seguito a questa fase iniziale di condizionamento e preparazione della macchina, è stata svolta la misura delle scariche parziali con il metodo a larga banda secondo la procedura IEC 60270, utilizzando il sistema di rilevazione analogico James G. Biddle.

Rapporto di prova											
OGGETTO:	Trasformatore Monofase in resina 220 kVA V. 6060 +/- 2X2,5% / V. 260 LOTTO NR 0818/08-3 – LOTTO NR 0818/08-4 data inizio trasporto 27/01/09										
PROVA:	test scariche parziali con circuito indiretto secondo norma IEC 60270 e IEC 60076 calibrazione effettuata a 10 pC pre - stress effettuato a 1,8 Vnom per 30" misura PD effettuata a 1,3 Vnom per 3' data prova 27/01/09										
RISULTATO:	trasformatore lotto nr 0818/08-3										
	<table border="1"><thead><tr><th>V alimentazione</th><th>Livello PD</th></tr></thead><tbody><tr><td>338 V</td><td>300 pC</td></tr><tr><td>136 V</td><td>< 10 pC (disinnesco)</td></tr><tr><td>157 V</td><td>30 pC</td></tr><tr><td>260 V</td><td>100 pC</td></tr></tbody></table>	V alimentazione	Livello PD	338 V	300 pC	136 V	< 10 pC (disinnesco)	157 V	30 pC	260 V	100 pC
V alimentazione	Livello PD										
338 V	300 pC										
136 V	< 10 pC (disinnesco)										
157 V	30 pC										
260 V	100 pC										
RISULTATO:	trasformatore lotto nr 0818/08-4										
	<table border="1"><thead><tr><th>V alimentazione</th><th>Livello PD</th></tr></thead><tbody><tr><td>338 V</td><td>300 pC</td></tr><tr><td>130 V</td><td>< 10 pC (disinnesco)</td></tr><tr><td>152 V</td><td>30 pC</td></tr></tbody></table>	V alimentazione	Livello PD	338 V	300 pC	130 V	< 10 pC (disinnesco)	152 V	30 pC		
V alimentazione	Livello PD										
338 V	300 pC										
130 V	< 10 pC (disinnesco)										
152 V	30 pC										

Figura 8.2.1(1): Rapporto di prova ad uso pro – memoria delle rilevazioni delle scariche parziali sul trasformatore monofase Amadori isolato in resina epossidica da 220 kVA.

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Dal rapporto di prova si può notare che la tensione secondaria di questo trasformatore è superiore rispetto al trasformatore monofase verificato precedentemente.

Come conseguenza di questo incremento, le tensioni di prova applicate sono state differenti, in particolare la tensione secondaria in pre-stress è stata pari a 1,8 volte la tensione nominale cioè 468 V per 30 secondi e la tensione di misura delle scariche parziali è stata pari a 1,3 volte la tensione nominale cioè 338 V per 3 minuti. Prima di iniziare la prova è stata effettuata la calibrazione con il calibratore del sistema di rilevazione analogico James G. Biddle riportato nella figura 8.2.1(2) al valore di 10 pC, valore pari al limite normativo imposto dalla norma di prodotto IEC 60076-11.



Figura 8.2.1(2): Calibratore esterno dello strumento di misura a larga banda James G. Biddle
Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

Successivamente alla fase di calibrazione dell'oggetto in prova si è applicata la tensione al secondario del trasformatore, regolata gradualmente la tensione al valore di pre stress ed è stata mantenuta a tale valore per 30 secondi.

Terminate le fasi preliminari si è passati alla fase di misura, alla tensione di 338 V, durante la quale, dopo 3 minuti, risultavano ancora presenti scariche parziali il con picco ripetitivo di 300 pC.

La tensione di estinzione delle scariche parziali è stata rilevata essere pari a 136 V.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Aumentando nuovamente la tensione si è determinato il valore di reinnesco delle scariche parziali, pari a 157 V, valore molto basso se comparato con la tensione nominale dell'avvolgimento.

Al fine di determinare, se possibile, la sorgente delle scariche parziali, si è analizzata la risposta dello strumento utilizzato mediante un oscilloscopio analogico notando che gli impulsi rilevati risultavano essere leggermente oscillanti.

Tale caratteristica, legata ad un errore di integrazione dello strumento ha messo in evidenza che gli impulsi rilevati, non essendo pesantemente deformati dovevano essere vicine al terminale di prova.

In seguito alla ipotesi fatta si sono, come nel caso precedente, rimosse le zeppe di sostegno e bloccaggio delle bobine superiori e le relative viti di fissaggio.

Ripetendo la prova secondo le modalità IEC 60270 si sono riscontrati ancora elevati valori di scariche parziali leggermente oscillanti; pertanto si è concluso che le scariche fossero di natura superficiale localizzate nel modesto canale di aria tra alta e bassa tensione.

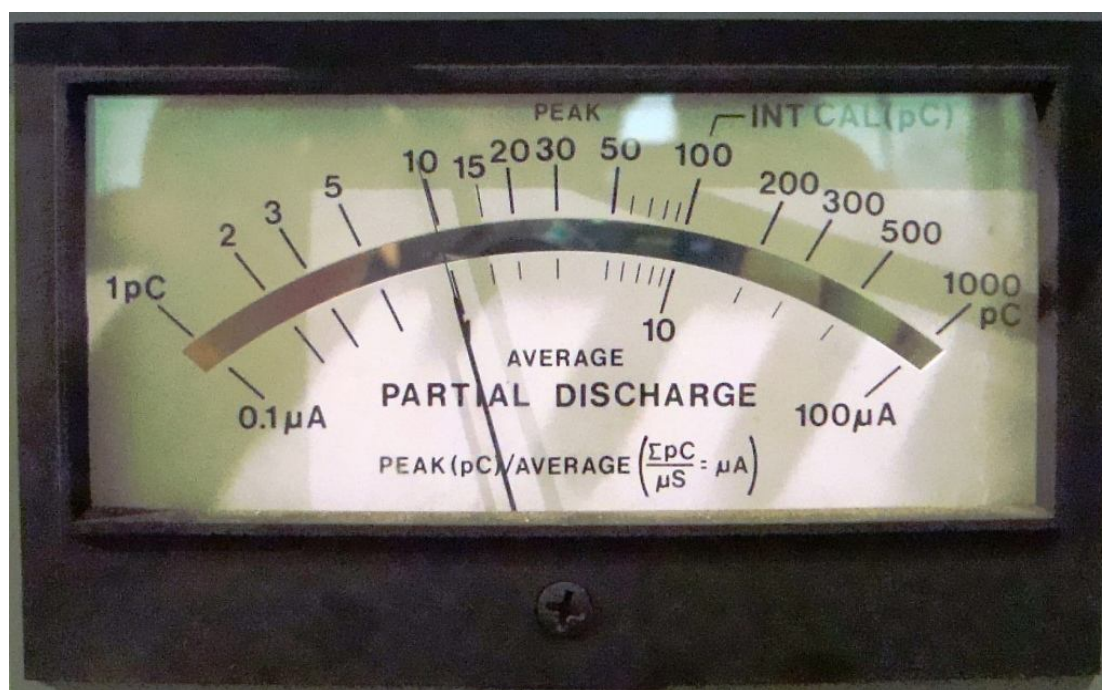


Figura 8.2.1(3): Display di visualizzazione elettromeccanica della carica associata alle scariche parziali.

Si può notare il valore della carica di calibrazione su scala logaritmica.

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

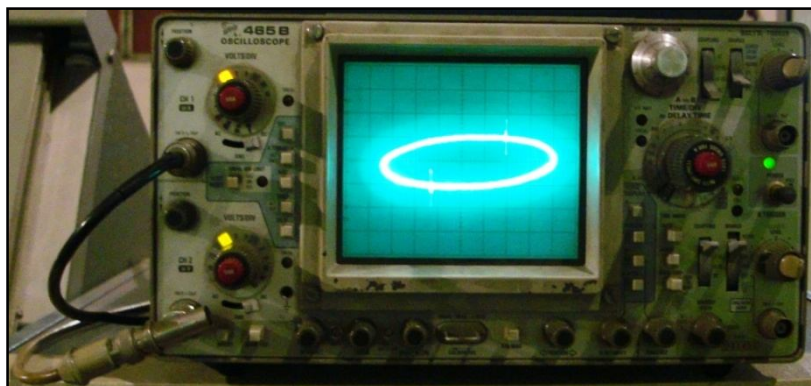


Figura 8.2.1(4): Oscilloscopio analogico connesso allo strumento a larga banda James G. Biddle.
Visualizzazione X-Y dell'impulso di calibrazione di 10 pC.

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8.2.2 RILIEVO DELLE SCARICHE PARZIALI CON IL SISTEMA IN BANDA ULTRA LARGA

La misura delle scariche parziali sul trasformatore monofase da 220 kVA è stata ripetuta con il sistema di rilevazione delle scariche parziali a banda ultra larga TECHIMP PD BASE 2. È stato adottato il circuito di misura di tipo indiretto, analogo della prova precedente, cioè con condensatore d'accoppiamento in serie al quadripolo di misura e rilevazione analogo al precedente, del quale si propongono le immagini.



Figura 8.2.2(1): Trasformatore monofase Amadori da 220 kVA inserito nel circuito di prova delle scariche parziali

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

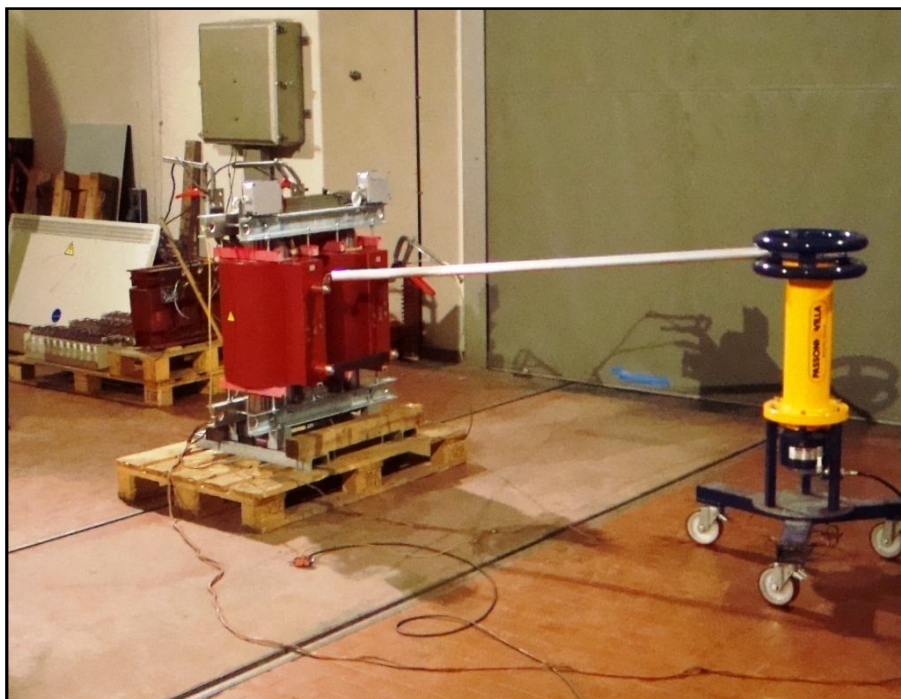


Figura 8.2.2(2): Circuito di rilevazione delle scariche parziali con condensatore giallo d'accoppiamento collegato in testa alla bobina A, mentre la bobina B è posta a terra.

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

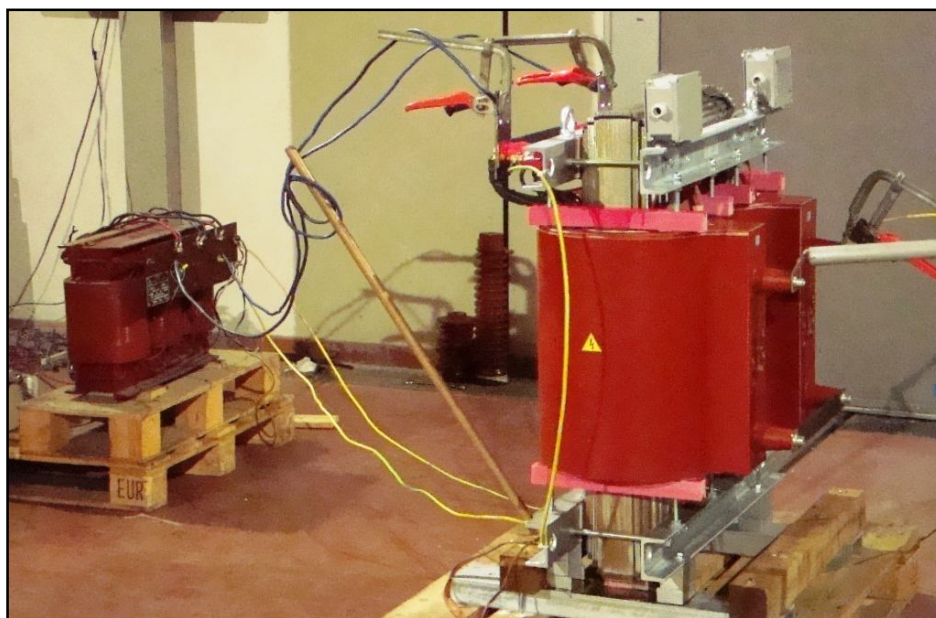


Figura 8.2.2(3): Alimentazione delle bobine di bassa tensione (cavi blu) e collegamento unico a terra tramite (cavi gialli e calza di rame).

Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

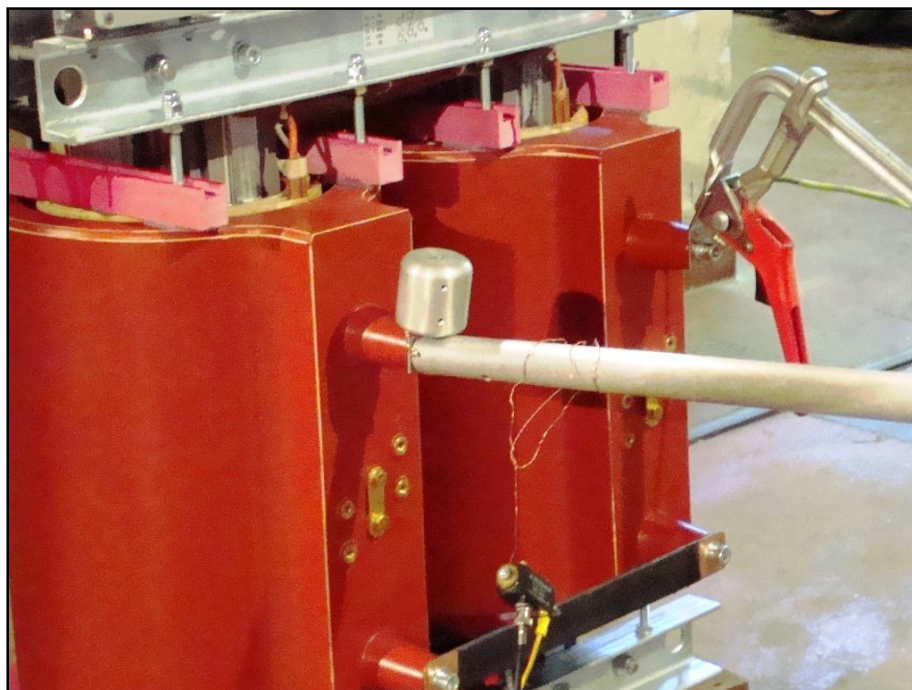


Figura 8.2.2(4): Vista frontale del trasformatore Amadori da 220 kVA.
Circuito di rilievo delle scariche parziali in fase di calibrazione.
Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

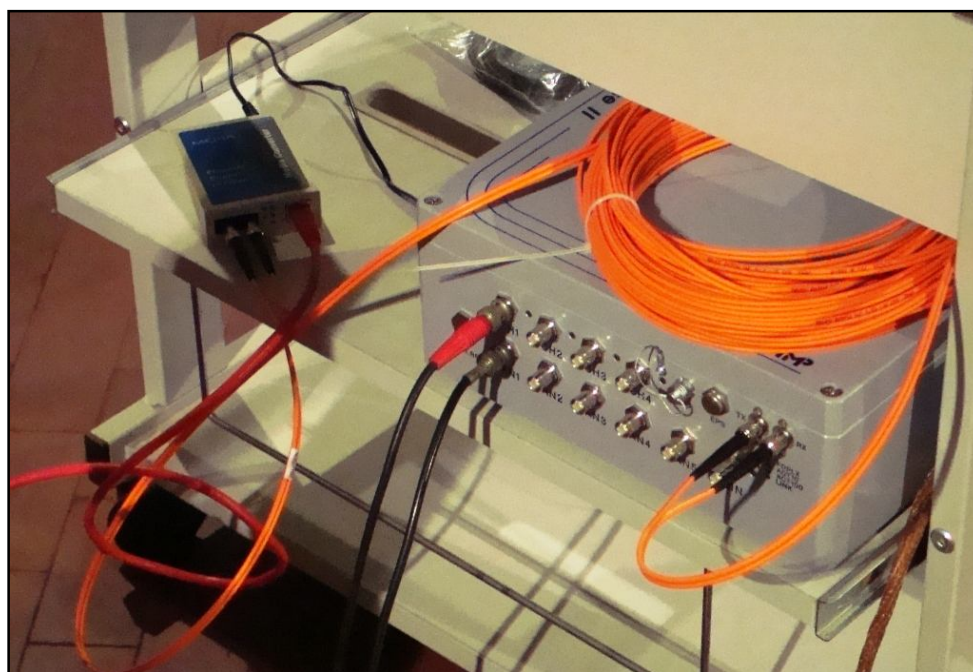


Figura 8.2.2(5): Unità d'acquisizione e d'interfaccia Techimp PD Base 2.
Fonte: Archivio personale foto tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Le immagini proposte rappresentano il trasformatore monofase in prova, il circuito di rilevazione usato, la fase di calibrazione del medesimo ed il sistema U.W.B. Techimp PD Base 2.

Il sistema a banda ultra larga Techimp PD Base 2, è stato connesso al trasformatore in prova con le medesime modalità utilizzate per la misura a banda larga. La calibrazione è stata effettuata usando il calibratore dello strumento analogico James G. Biddle e la rilevazione degli impulsi è stata effettuata nelle tre modalità operative previste dallo strumento:

- W.B. (Wide Band)
- W.B. + IEC SOFTWARE
- IEC 60270.

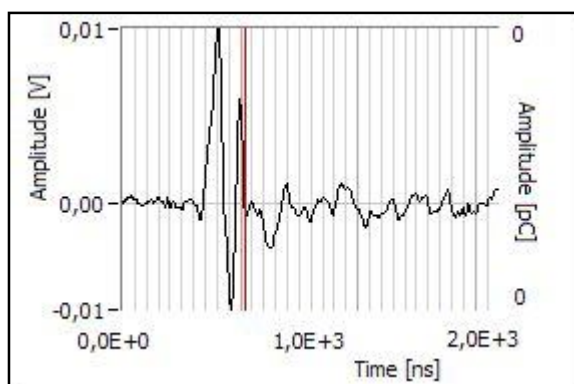


Figura 8.2.2(6): Diagramma PDProcessing® dell'impulso di calibrazione in modalità W.B. a 10 pC

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

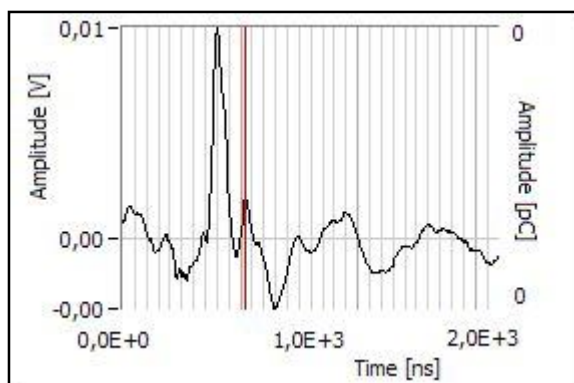


Figura 8.2.2(7): Diagramma PDProcessing® dell'impulso di calibrazione in modalità W.B. + I.E.C. SOFTWARE a 10 pC

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

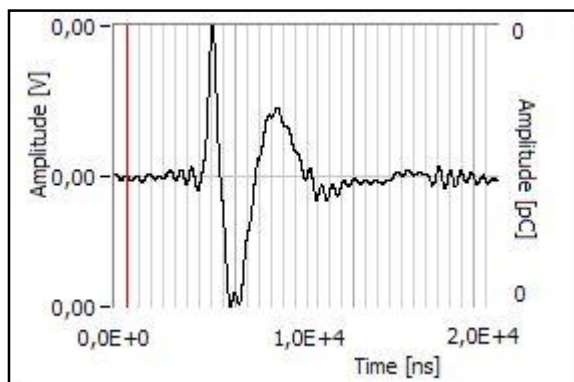


Figura 8.2.2(8): Diagramma PDProcessing® dell'impulso di calibrazione in modalità I.E.C. 60270 a 10 pC
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

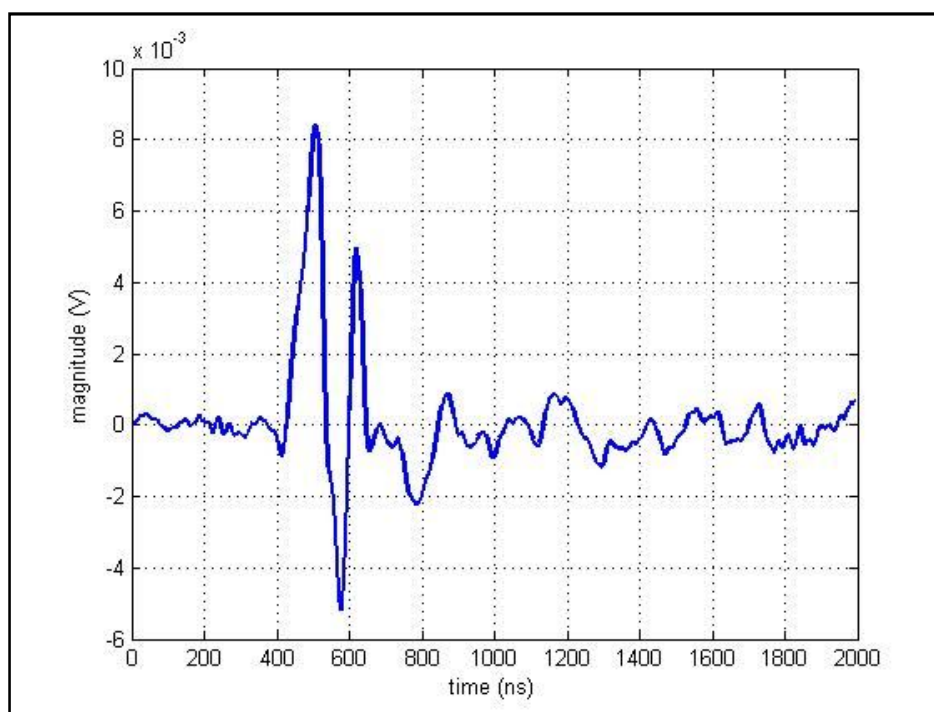


Figura 8.2.2(9): Diagramma Matlab® dell'impulso di calibrazione in modalità W.B. a 10 pC
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

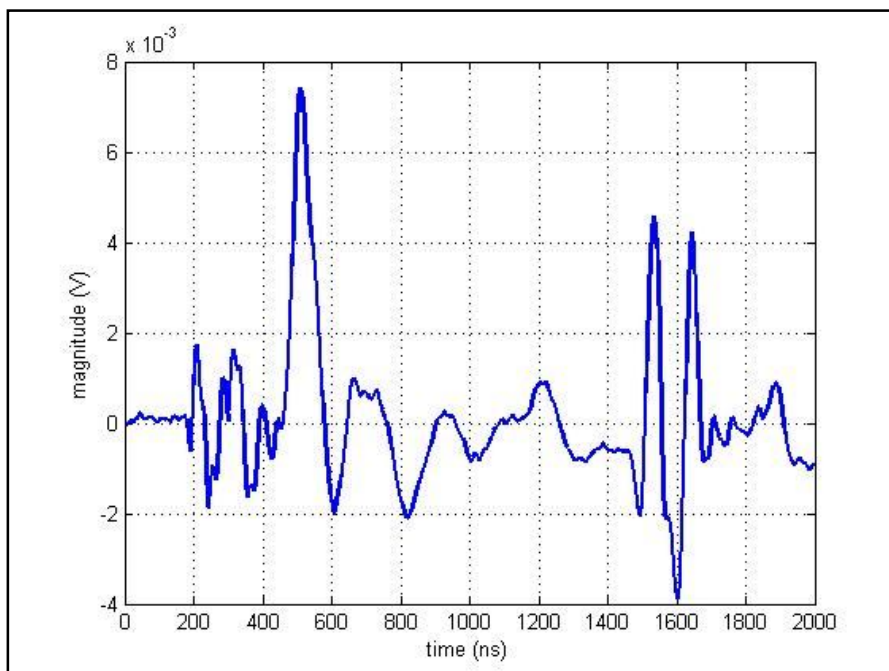


Figura 8.2.2(10): Diagramma Matlab[®] dell'impulso di calibrazione in modalità W.B. + I.E.C. SOFTWARE a 10 pC
Fonte: Elaborazioni Matlab[®] - Bottega Luca

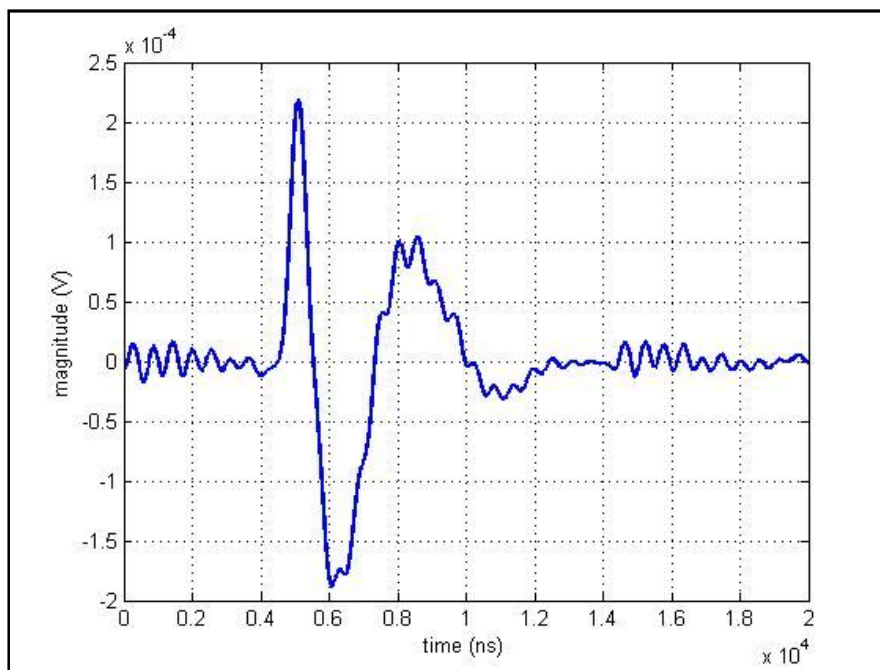


Figura 8.2.2(11): Diagramma Matlab[®] dell'impulso di calibrazione in modalità I.E.C. 60270 a 10 pC
Fonte: Elaborazioni Matlab[®] - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

La misura delle scariche parziali sul trasformatore è stata ripetuta nelle medesime modalità messe in atto per la misura con strumentazione a banda larga ma utilizzando lo strumento Techimp. In questo caso, utilizzando un sistema di rilevazione delle scariche parziali in banda ultra larga è stato possibile osservare la forma d'onda degli impulsi di corrente delle scariche parziali. Sfruttando le capacità software del sistema Techimp è stato generato un report con il software PDProcessing[®]. Tali elaborazioni sono finalizzate alla separazione dei segnali dal rumore e l'individuazione di famiglie di scariche parziali riconducibili a particolari difetti dei trasformatori. A titolo di esempio si sono riportati due report generati dal software Techimp.

8.2.2.1 PRIMO REPORT GENERATO CON IL SOFTWARE PDPROCESSING[®]

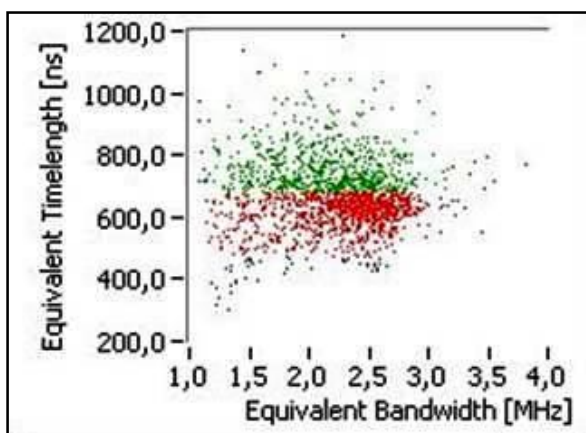


Figura 8.2.2.1(1): Diagramma tempo – frequenza generato con il software PDProcessing[®] parte comune dei due report generati; tale diagramma consente la separazione degli impulsi in famiglie corrispondenti a segnali aventi la stessa forma d'onda.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing[®] - Bottega Luca

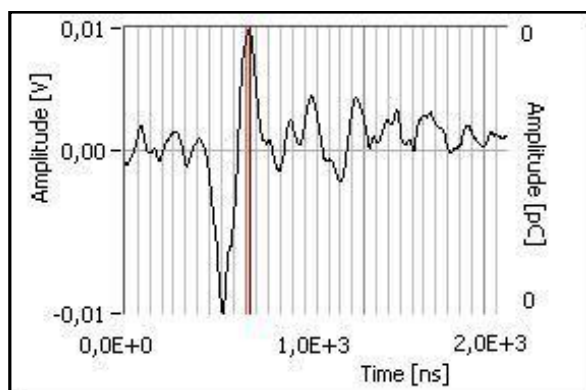


Figura 8.2.2.1(2): Diagramma ampiezza - tempo generato con il software PDProcessing[®] relativo al primo report generato; forma d'onda di un impulso di scarica parziale rilevato.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing[®] - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

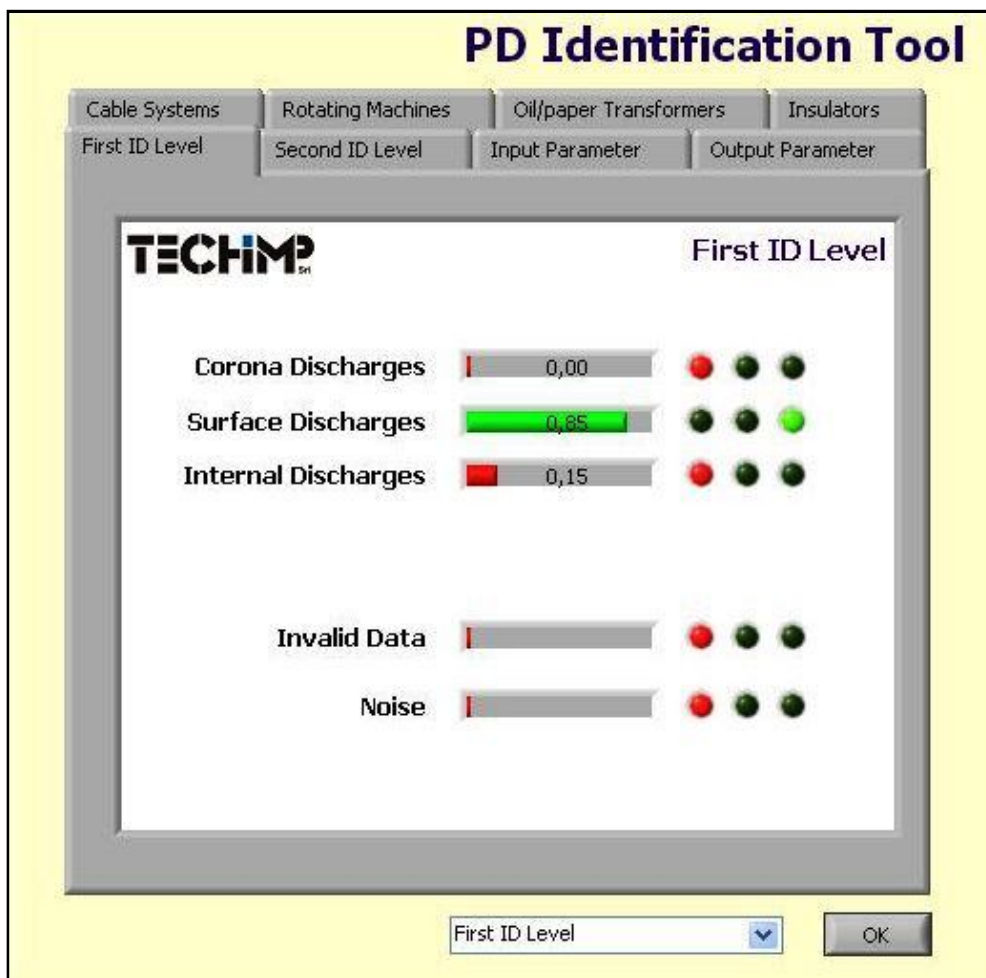


Figura 8.2.2.1(3): Finestra d'identificazione generata con il software PDProcessing® relativo al primo report generato; tentativo di identificazione della tipologia di scariche parziali.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

L'esempio riportato (figura 8.2.2.1(1) – figura 8.2.2.1(2) – figura 8.2.2.1(3)), dimostra la capacità del software incluso nello strumento Techimp di individuare, nei dati acquisiti nel corso della prova, due famiglie di scariche parziali.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

La prima famiglia individuata, riconosciuta dal software come tipica distribuzione dovuta a scariche parziali superficiali, ha la seguente collocazione nel diagramma tempo frequenza:

da 400 a 650 ns e

da 1,5 a 3 MHz

mentre la seconda famiglia riconosciuta come tipica distribuzione dovuta a scariche interne al dielettrico, ha la seguente collocazione nel diagramma tempo frequenza:

da 650 a 1000 ns e

da 1,5 a 3 MHz .

Dall'analisi delle forme d'onda si nota che l'impulso rilevato presenta caratteristiche temporali molto simili all'impulso di calibrazione.

Naturalmente la distribuzione nel tempo del segnale rilevato è non completamente riconosciuta dal database del software in quanto in tale database non sono mai stati inseriti risultati di prove su trasformatori.

Come conseguenza principale della mancanza di dati nel database si ha che il riconoscimento degli impulsi rilevati porta il software a stabilire la presenza nella registrazione sia di scariche di natura superficiale (85%) sia di natura interna (15%). Verosimilmente, dato che i segnali rilevati ed isolati in un unico gruppo possono essere ricondotti a scariche parziali aventi simili caratteristiche di forma d'onda, l'origine geometrica del fenomeno, non influenzata dalla distorsione di bobina, può essere identificata in una singola zona del trasformatore vicina al terminale di misura.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.2.2.2 SECONDO REPORT GENERATO CON IL SOFTWARE PDPROCESSING[®]

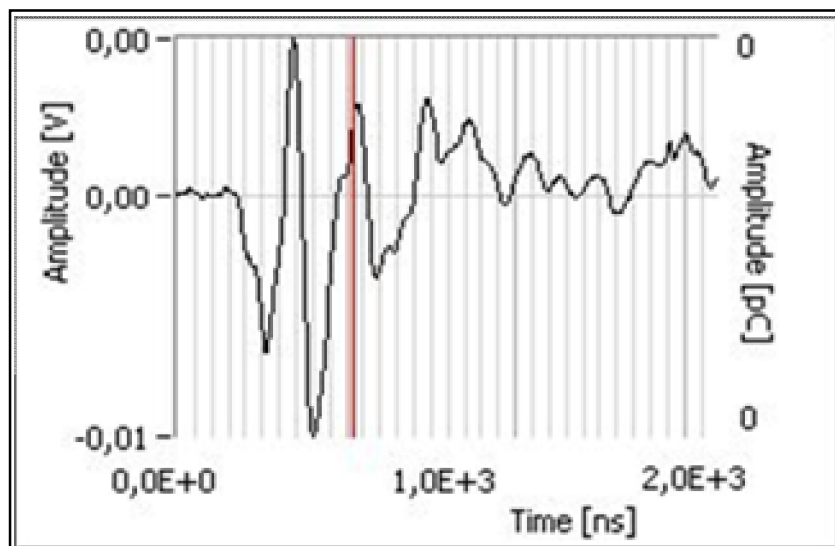


Figura 8.2.2.2(1): Diagramma ampiezza - tempo generato con il software PDProcessing[®] relativo al secondo report generato; forma d'onda di un impulso di scarica parziale rilevato.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing[®] - Bottega Luca

Nella forma d'onda dei segnali identificati dal software come appartenenti al secondo gruppo, si nota una grande differenza con la forma d'onda del segnale di calibrazione ed una discreta oscillazione del segnale.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

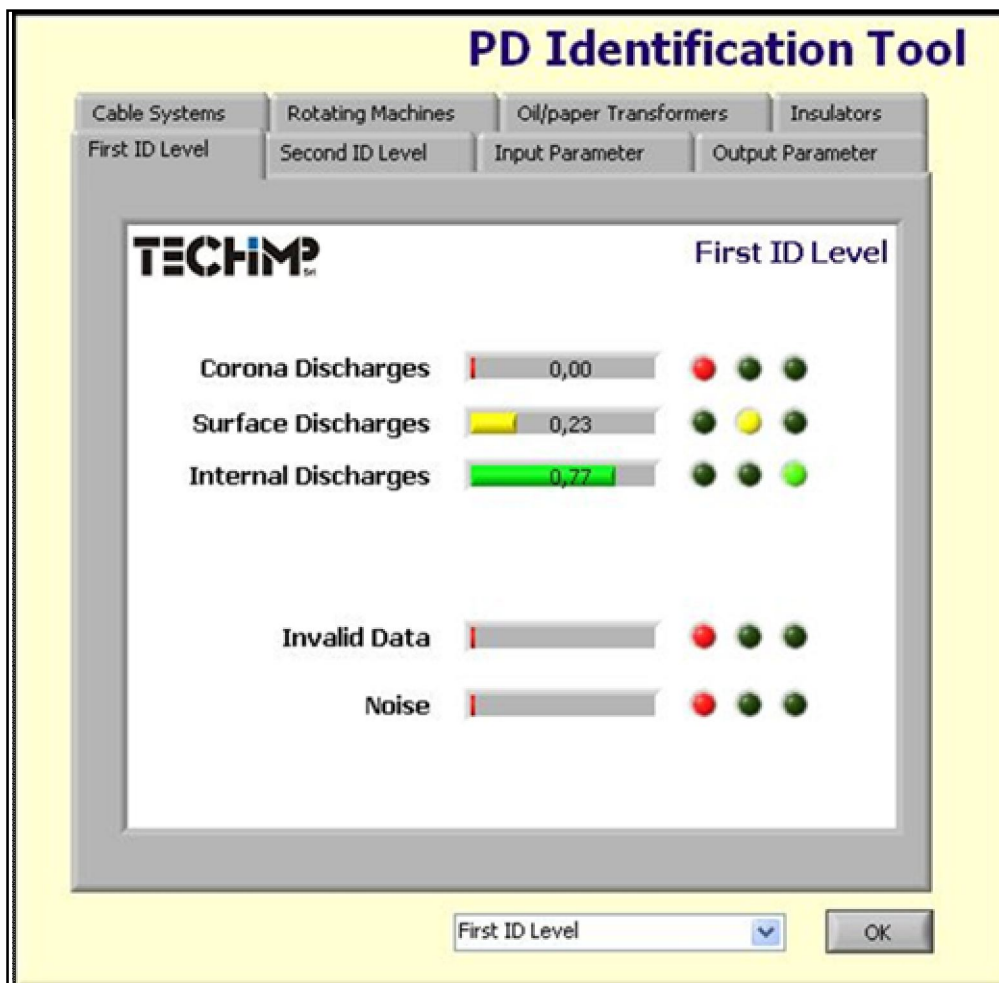


Figura 8.2.2.2(2): Finestra d'identificazione generata con il software PDProcessing® relativo al secondo report generato; tentativo di identificazione della tipologia di scariche parziali.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

Il software ci dice che i segnali rilevati hanno una probabilità maggiore di essere d'origine interna, tuttavia questa identificazione rimane un tentativo ben lontano dall'aver una qualche validità sperimentale.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Dopo aver tolto la sbarra di messa in serie delle bobine e aver rifatto la rilevazione delle scariche parziali tramite il sistema U.W.B. Techimp PDBase 2, abbiamo generato altre cinque immagini come commento ai due report prodotti dal medesimo software.

I risultati della ripetizione delle misure a seguito della rimozione della sbarra di collegamento in serie delle bobine MT sono in seguito riportati. I risultati ottenuti in questo caso, rispetto al precedente, consentono di escludere l'influenza nella misura di una bobina in quanto non connessa al sistema di misura.

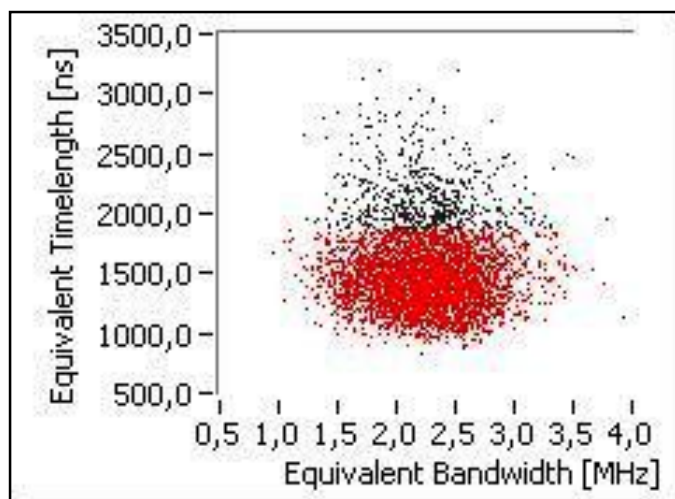


Figura 8.2.2.(12): Diagramma tempo – frequenza generato con il software PDProcessing® parte comune dei due report generati; tale diagramma consente la separazione degli impulsi in famiglie corrispondenti a segnali aventi la stessa forma d'onda.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

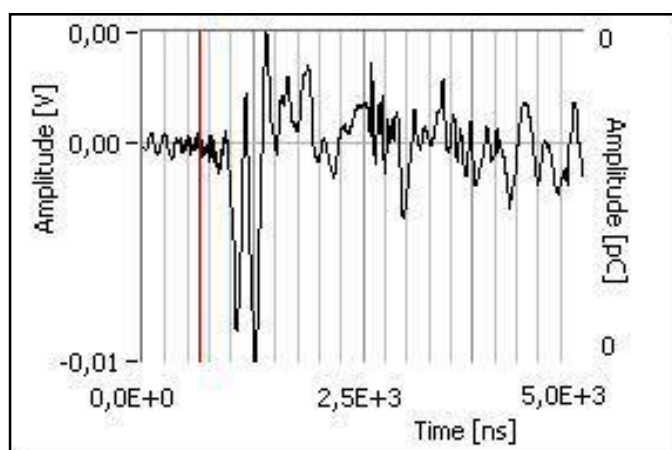


Figura 8.2.2.(13): Diagramma ampiezza - tempo generato con il software PDProcessing® relativo al primo report generato; forma d'onda di un impulso di scarica parziale rilevato.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

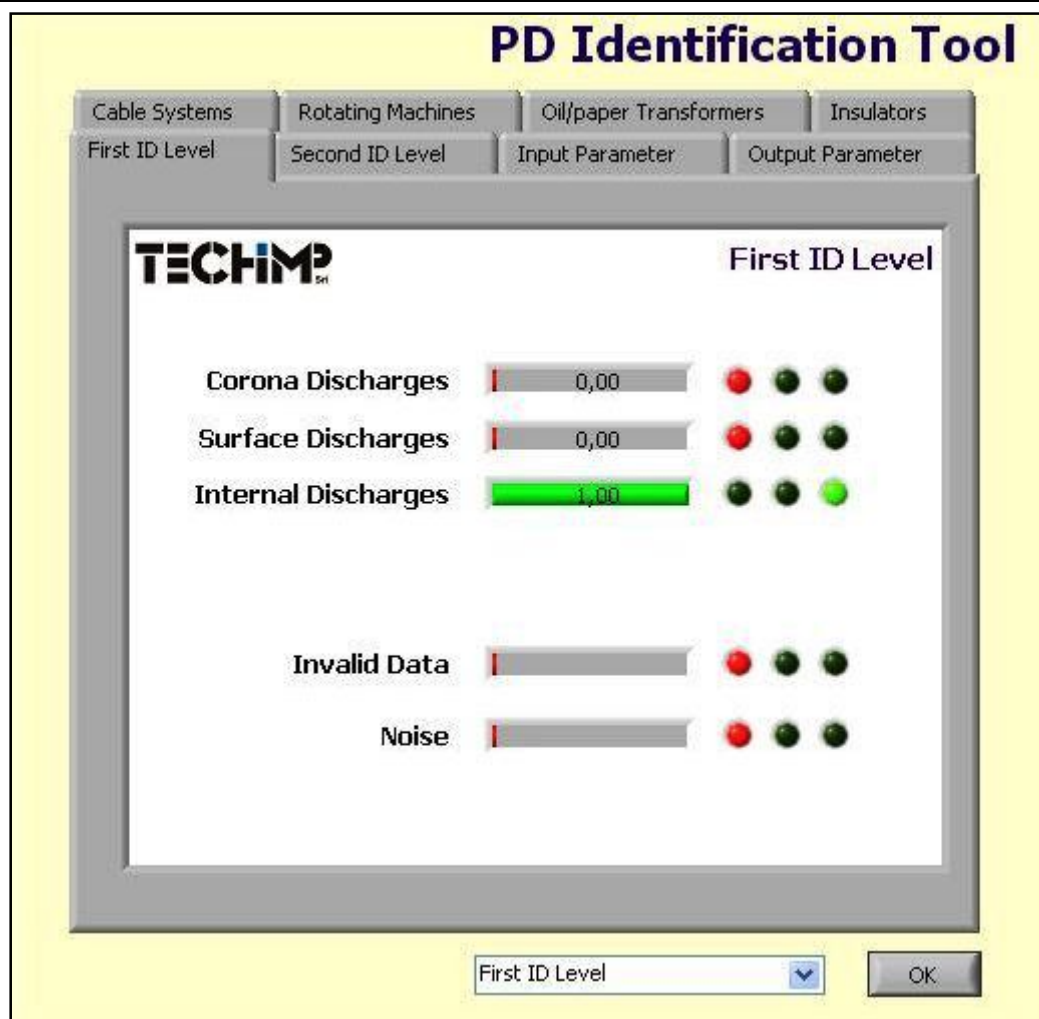


Figura 8.2.2(14): Finestra d'identificazione generata con il software PDProcessing® relativo al primo report generato; tentativo di identificazione della tipologia di scariche parziali.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

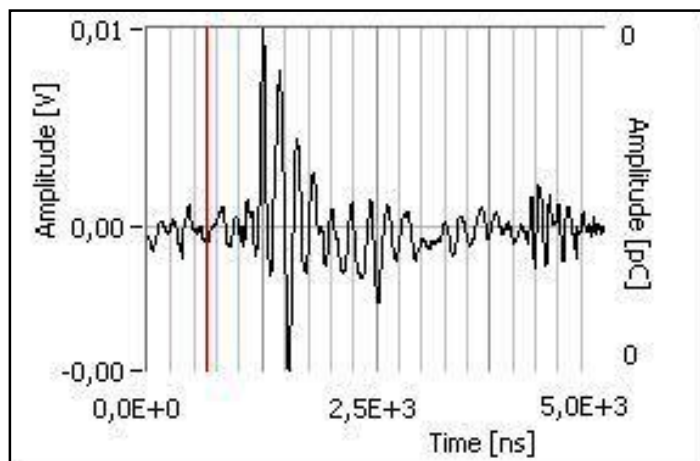


Figura 8.2.2(15): Diagramma ampiezza - tempo generato con il software PDProcessing® relativo al secondo report generato; forma d'onda di un impulso di scarica parziale rilevato.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

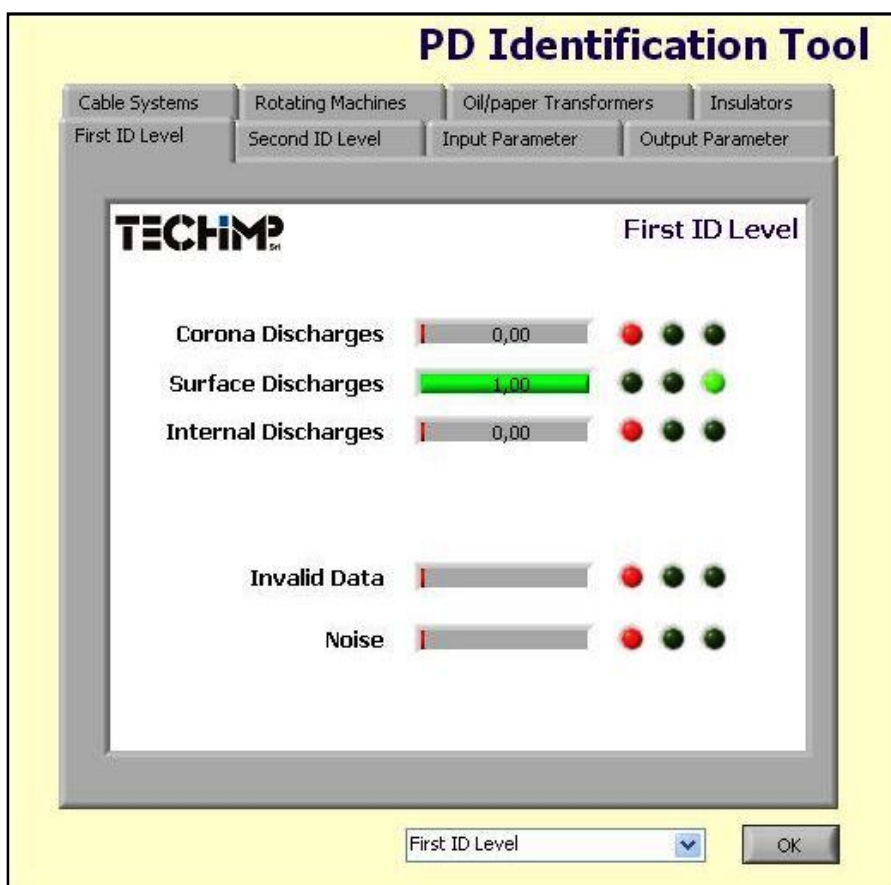


Figura 8.2.2(16): Finestra d'identificazione generata con il software PDProcessing® relativo al secondo report generato; tentativo di identificazione della tipologia di scariche parziali.

Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Il primo report rappresentato dalle figure 8.2.2(12), 8.2.2(13), 8.2.2(14), mette in evidenza il fatto che oltre ad esserci due famiglie probabili di sorgenti di scariche parziali, il diagramma ampiezza-tempo ci mostra un segnale molto oscillante e non somigliante all'impulso di calibrazione. Questo risultato può derivare dal fatto che la bobina potrebbe effettivamente contenere dei difetti interni.

Il secondo report rappresentato dalle figure 8.2.2(15), 8.2.2(16), analizzando la seconda famiglia di segnali rilevati, ci dice che la loro origine è superficiale senza alcun dubbio, tuttavia la loro forma, come si può notare è sì oscillante, ma non assomiglia per nulla all'impulso di calibrazione. Da notare il fatto che l'ampiezza dei segnali rilevati in quest'ultimo caso è più elevata a frequenze leggermente superiori al caso precedente, mentre la prima famiglia di scariche presenta valori d'ampiezza elevati a basse frequenze.

8.3 MISURA DI SCARICHE PARZIALI SU DI UN TRASFORMATORE TRIFASE ISOLATO IN RESINA EPOSSIDICA DA 400 KVA

E' stato provato un trasformatore trifase con le seguenti caratteristiche:

POTENZA NOMINALE	400	kVA
TENSIONE PRIMARIA	$21000 \pm 2 \times 2,5 \%$	V
TENSIONE SECONDARIA	410	V

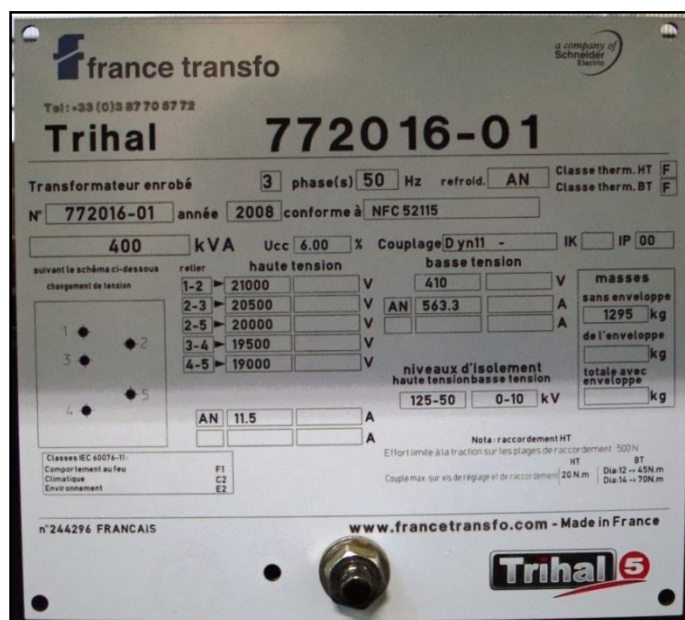


Figura 8.3(1): Targa del trasformatore

Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.3.1 RILIEVO DELLE SCARICHE PARZIALI CON IL SISTEMA IN BANDA LARGA

Rapporto di prova									
OGGETTO:	Trasformatore Trifase in resina 400 kVA V. 20 kV +/- 2X2,5% / V. 410 V – DYn11 Ucc=6% LOTTO NR 772016-01								
PROVA:	test scariche parziali con circuito indiretto secondo norma IEC 60270 e IEC 60076 calibrazione effettuata a 10 pC pre - stress effettuato a 1,8 Vnom per 30" e misura PD effettuata a 1,3 Vnom per 3'								
RISULTATO:	trasformatore lotto nr 0818/08-3								
<p>E' stato eseguito un pre - stress a 738 V per 30 secondi e successivamente una misura di scariche parziali a 533 V per 3 minuti con triangolo inserito lato M.T. . Abbiamo effettuato una misura per ogni fase, mettendone a turno una a terra, usando la procedura di prova aggiuntiva descritta nel paragrafo 22.4.1.2 della norma EN 60076-11:2004 .</p> <ul style="list-style-type: none">• misurando in testa alla fase A con fase B a terra: < 3 pC a 540 V• misurando in testa alla fase B con fase C a terra: 700pC a 500 V• misurando in testa alla fase C con fase A a terra: 100pC a 560 V <p>Chiaramente usando la procedura standard cioè quella descritta al paragrafo 22.4.1.1 della norma EN 60076-11:2004, il trasformatore in questione rientrava perfettamente nei valori di scariche parziali. Visto che sollecitando il canale d'aria tra i due avvolgimenti di una stessa bobina con la tensione concatenata efficace, come prevede la procedura speciale, abbiamo riscontrato valori elevati di scariche parziali, abbiamo deciso di rifare la misura di scariche parziali singolarmente per ogni bobina, cioè non abbiamo fatto altro che togliere il triangolo, alimentare come prima il trasformatore e rilevare ai capi della singola bobina i valori di scariche parziali. Così facendo abbiamo scoperto che oltre ad esserci scariche interne alle bobine di media isolate in resina prese singolarmente, ce ne sono di più sulla fase A rispetto alle altre due e si sentono dei ronzii sulla zeppa bianca che funge da sostegno per le bobine di bassa tensione, usando un metodo di rilevazione acustico.</p>									
RISULTATO: fase A									
<table border="1"><thead><tr><th>V alimentazione</th><th>Livello PD</th></tr></thead><tbody><tr><td>422 V</td><td>-----</td></tr><tr><td>442 V</td><td>40 pC</td></tr><tr><td>570 V</td><td>800 pC</td></tr></tbody></table>		V alimentazione	Livello PD	422 V	-----	442 V	40 pC	570 V	800 pC
V alimentazione	Livello PD								
422 V	-----								
442 V	40 pC								
570 V	800 pC								
RISULTATO: fase B									
<table border="1"><thead><tr><th>V alimentazione</th><th>Livello PD</th></tr></thead><tbody><tr><td>676 V</td><td>30 pC</td></tr></tbody></table>		V alimentazione	Livello PD	676 V	30 pC				
V alimentazione	Livello PD								
676 V	30 pC								

Figura 8.3.1(1): Rapporto di prova ad uso pro – memoria del rilievo di scariche parziali sul trasformatore trifase France Transfo isolato in resina epossidica da 400 kVA
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Le prove condotte con lo strumento analogico James G. Biddle sul trasformatore trifase in questione hanno dato come risultati, i dati riportati nel rapporto di prova proposto in veste di pro memoria.

A seguito di un iniziale condizionamento dell'oggetto in prova per alcune ore alla temperatura ambiente del laboratorio di prova, sono state eseguite le misure delle scariche parziali seguendo le indicazioni della normativa IEC 60270 ed IEC 60076, già ampiamente descritte al capitolo 5.

Dopo aver effettuato la calibrazione a 10 pC secondo la norma IEC 60076-11:2004, è stato eseguito un pre - stress alla tensione pari a 1,8 volte la tensione nominale, cioè 738 V per 30 secondi e successivamente una misura di scariche parziali a 533 V, pari a 1,3 volte la tensione nominale per 3 minuti con triangolo inserito.

Come vediamo dai risultati del caso di misura sulla testa della fase A con la testa della fase B a terra ad 1,3 volte la tensione nominale, il livello delle scariche parziali rimane nella norma e si confonde con il rumore di fondo rilevato dal circuito.

Proseguendo la misura ad 1,3 volte la tensione nominale ponendo a terra alternativamente le altre fasi dopo la fase B, il livello delle scariche parziali è abbondantemente fuori norma.

Queste prime tre misure ci permettono di sottolineare il fatto che in una o più bobine ci sono delle scariche parziali interne, poiché osservando i segnali visualizzati nell'oscilloscopio analogico vediamo che essi non somigliano per nulla all'impulso di calibrazione, tuttavia sono abbastanza oscillanti.

Andando in un secondo momento a ripetere le stesse misure sulle singole bobine, alimentando il trasformatore trifase, come fosse una misura a carico, come vediamo dal rapporto di prova, le singole bobine presentano comunque elevati livelli di scariche parziali, in particolare la fase A, che presenta 800 pC a poco più di 1,3 volte la tensione nominale.

Usando contemporaneamente un metodo acustico di rilevazione delle scariche parziali, abbiamo capito che, i segnali sono abbastanza oscillanti, poiché ci sono degli impulsi di corrente di scarica parziale superficiale sulla zeppa di sostegno bianca delle bobine di bassa tensione più vicine al nucleo.

L'oscillazione evidente di questi ultimi segnali può anche essere dovuta al fatto che vengono trasferiti dai collegamenti del triangolo oppure nel caso di misura su singola bobina possono effettivamente essere scariche parziali superficiali.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.3.2 RILIEVO DELLE SCARICHE PARZIALI CON IL SISTEMA IN BANDA ULTRA LARGA

Il trasformatore trifase che ci apprestiamo a provare con il metodo digitale di acquisizione dei segnali provenienti dalle sorgenti di scarica parziale è della società France Transfo di cui proponiamo delle immagini.



Figura 8.3.2(1): Trasformatore trifase isolato in resina epossidica con cabina France Transfo da 400 kVA
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

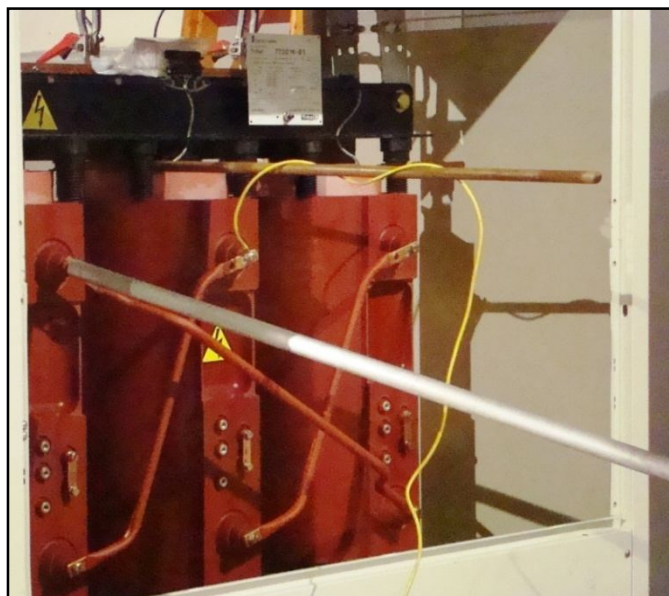


Figura 8.3.2(2): Particolare del circuito di rilevazione delle scariche parziali.
Procedura di prova speciale con un punto del triangolo a terra.
Testa della bobina B e coda della bobina A poste a terra.
Rilievo delle scariche parziali in testa alla bobina A.
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

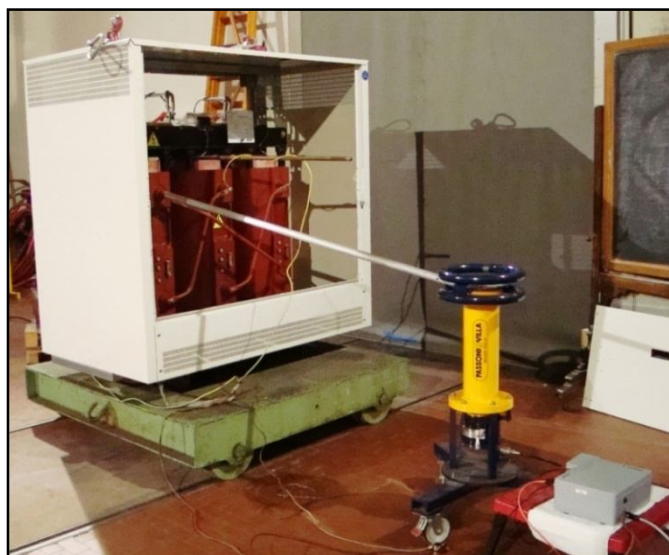


Figura 8.3.2(3): Circuito di rilievo delle scariche parziali.
Particolare del circuito di rilevazione delle scariche parziali.
Procedura di prova speciale con un punto del triangolo a terra.
Testa della bobina B e coda della bobina A poste a terra.
Rilievo delle scariche parziali in testa alla bobina A.
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

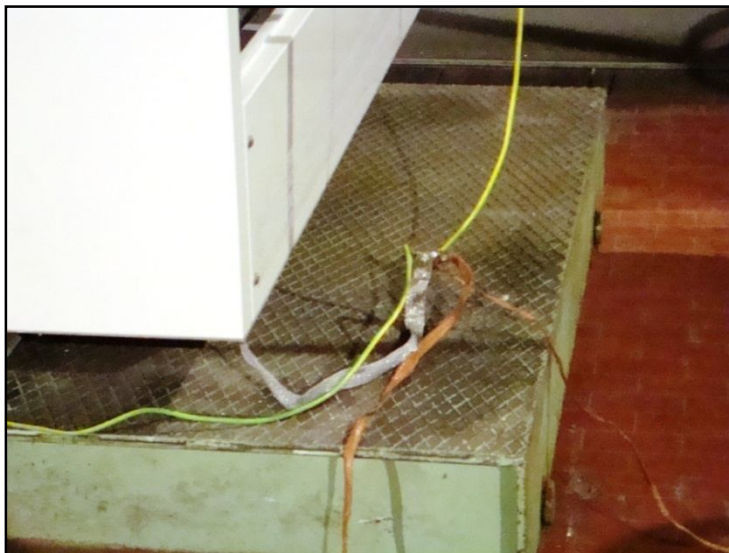


Figura 8.3.2(4): Particolare del circuito di rilievo delle scariche parziali.
Unico punto di messa a terra delle parti del circuito.
Procedura di prova speciale con un punto del triangolo a terra.
Testa della bobina B e coda della bobina A poste a terra.
Rilievo delle scariche parziali in testa alla bobina A.
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca



Figura 8.3.2(5): Particolare del circuito di rilievo delle scariche parziali.
Procedura di prova speciale con un punto del triangolo a terra.
Bobine secondarie alimentate alla frequenza di 100 Hz.
Collegamento secondario a stella (sbarra orizzontale di rame).
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Le immagini proposte, anche se non dettagliatamente e numericamente adeguate, cercano di dare un'idea sul circuito di misura adottato, sui collegamenti effettuati e sui dispositivi utilizzati a tal fine.

Connettendo dunque il circuito di misura al sistema di rilevazione delle scariche parziali U.W.B., si è eseguita una calibrazione a 10 pC usando il calibratore esterno dello strumento W.B. e contemporaneamente si è calibrata l'unità di acquisizione U.W.B. .

Non sono stati purtroppo acquisiti segnali di calibrazione a 10 pC, tuttavia, in un secondo momento, avendo riscontrato la presenza massiccia di scariche parziali d'intensità del picco massimo ripetitivo superiori a 100 pC, si è deciso di ricalibrare lo strumento U.W.B. a 100 pC.

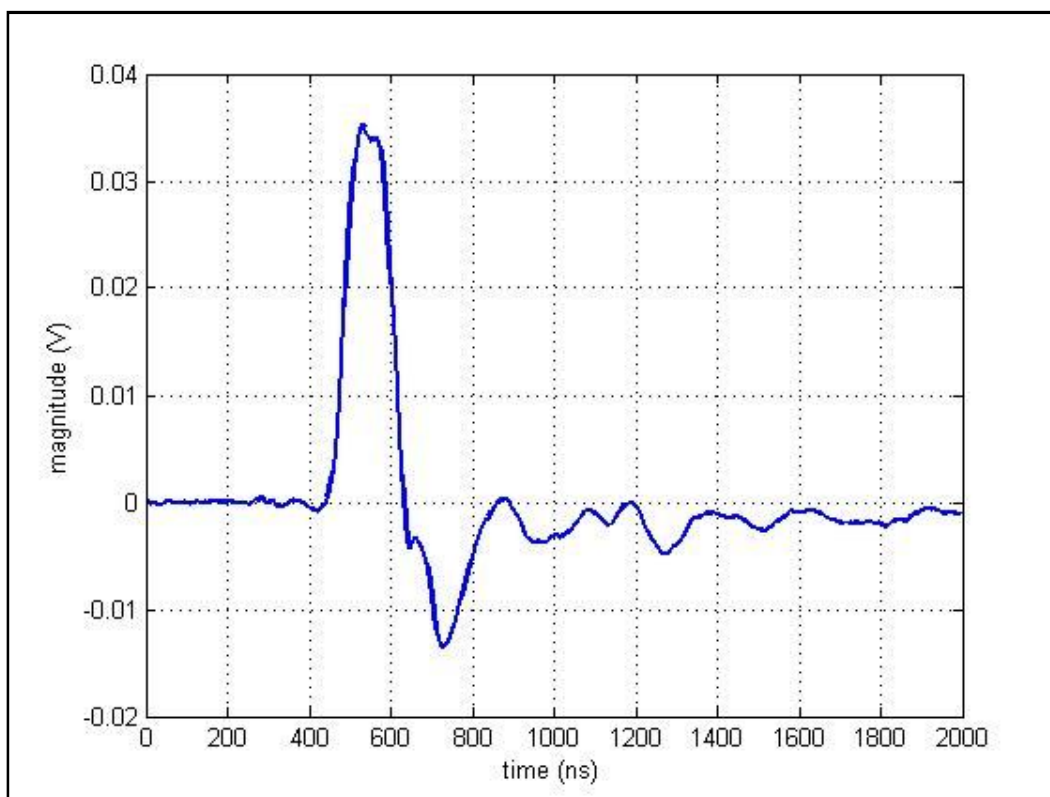


Figura 8.3.2(6): Diagramma Matlab[®] dell'impulso di calibrazione in modalità W.B. a 10 pC
Fonte: Elaborazione Matlab[®] - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

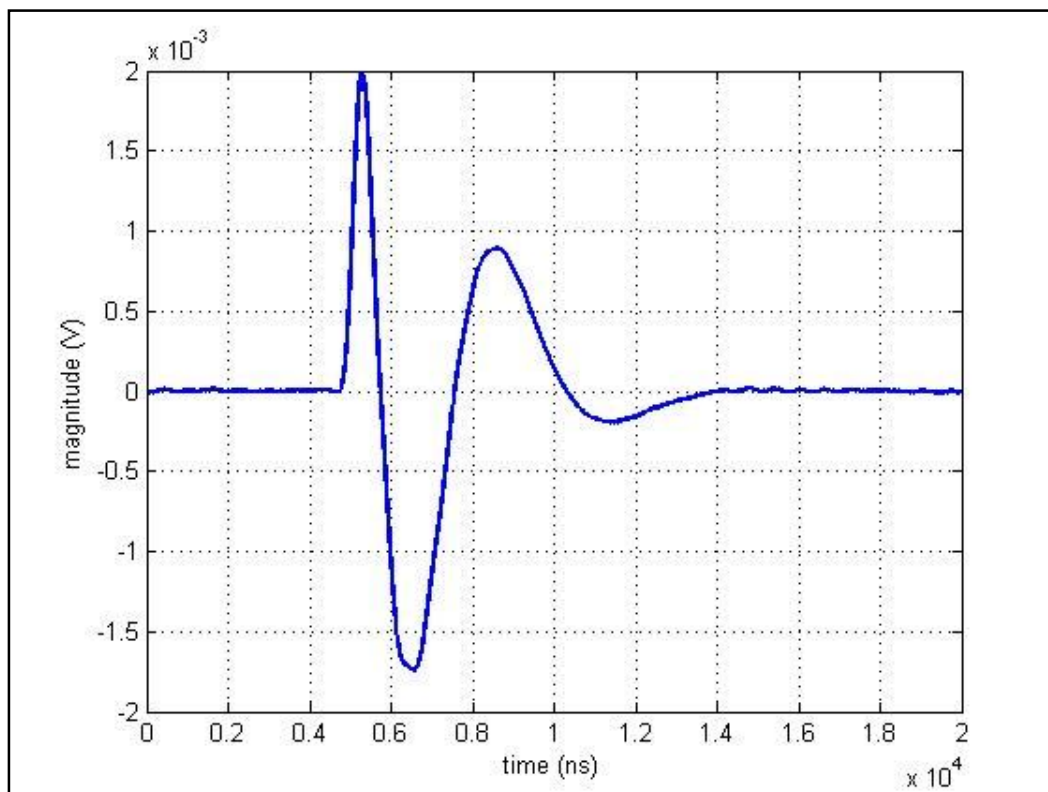


Figura 8.3.2(7): Diagramma Matlab® dell'impulso di calibrazione in modalità I.E.C. 60270 a 10 pC
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

Chiaramente omettiamo i risultati avuti con il sistema U.W.B. secondo normativa con procedura standard, poiché essendo il trasformatore a norma, i dati raccolti risulterebbero di scarsa importanza allo scopo di analizzare il software PDProcessing®. Avendo chiaro ciò che lo strumento U.W.B. può visualizzare e del metodo normativo necessario per condurre una misura o rilevazione delle scariche parziali su di un trasformatore trifase come quello in esame, andiamo a riportare e commentare brevemente i report che è possibile generare con il software PDProcessing® con triangolo inserito.

Ricordandoci del fatto che, il software PDProcessing® non riesce ad individuare precisamente le famiglie di segnali che elabora, se non viene comunque guidato dall'operatore in base alla propria esperienza, andiamo ad analizzare il primo report generato.

In ogni caso i risultati ottenuti mediante questa elaborazione sono da interpretare poiché come già accennato il software Pd Processing® non possiede un database di misure su trasformatori isolati in resina epossidica.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.3.2.1 PRIMO REPORT GENERATO CON IL SOFTWARE PDPROCESSING®

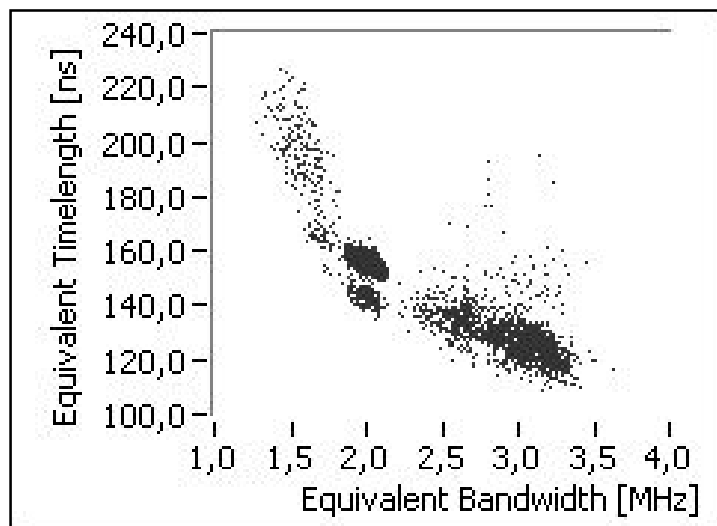


Figura 8.3.2.1(1): Diagramma tempo-frequenza generato con il software PDProcessing®
parte comune dei report proposti
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

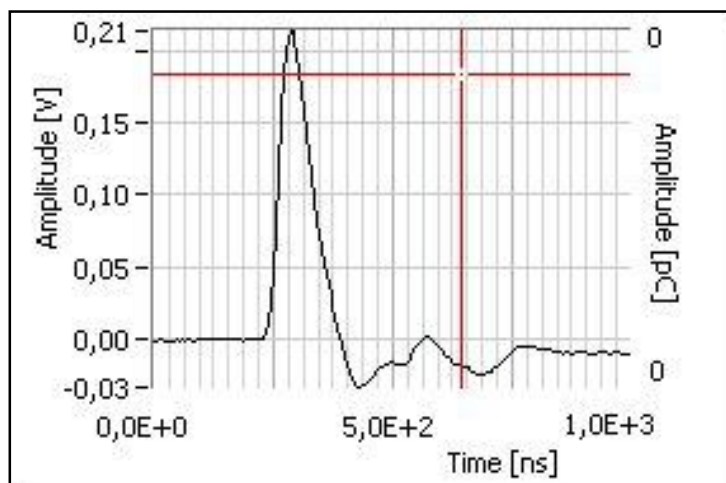


Figura 8.3.2.1(2): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
relativo al primo report generato
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

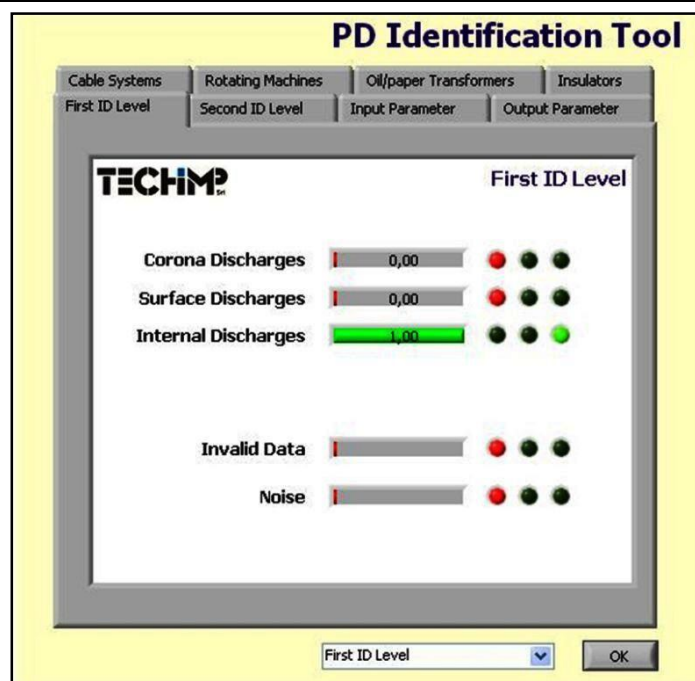


Figura 8.3.2.1(3): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

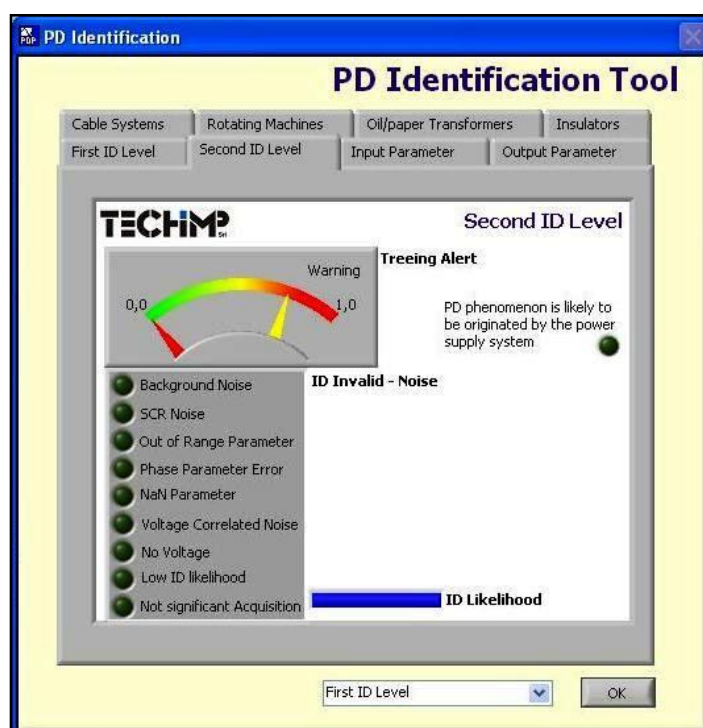


Figura 8.3.2.1(4): Secondo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Questo primo report è stato generato senza guidare il software nell'identificazione delle tipologie probabili di scariche parziali, quindi è stato acquisito l'intero pattern ed è stato elaborato di conseguenza.

Alla tensione di 617 V il software Pd Processing® individua un'unica famiglia di fenomeni impulsivi.

Il software prevede un secondo livello d'identificazione "SECOND ID LEVEL", nel quale, come ampiamente commentato nel capitolo 7, vengono fornite delle indicazioni sulla validità della rilevazione effettuata.

Ebbene in questo caso il secondo livello d'identificazione ci avverte che i segnali rilevati possono ramificarsi, cioè svilupparsi ad albero all'interno dell'isolamento dielettrico.

Non soddisfatti da tale report abbiamo allora cercato di indirizzare il software nell'individuazione delle tipologie di scariche rilevate usando una classificazione manuale in base ad un approccio visivo, individuando i "punti di accumulazione" dei segnali e selezionando un'area che si ritiene essere una famiglia di impulsi omologhi.

Così facendo abbiamo selezionato 6 aree possibili, di cui proponiamo il diagramma tempo-frequenza generato in automatico dal software PDProcessing®.

Senza riportare in continuazione i vari report, creiamo una tabella nella quale riportiamo i campi di tempo e frequenza delle varie famiglie e l'identificazione che ne fa il software.

n°	time range	frequency range	first ID level	second ID level
1^	da 160 a 235 ns	da 1 a 1,7 MHz	Corona Discharges	ok
2^	da 145 a 170 ns	da 1,7 a 2,1 MHz	Invalid Data	ok
3^	nell'intorno dei 140 ns	da 1,7 a 2,1 MHz	Invalid Data	not significant acquisition
4^	da 120 a 145 ns	da 2,2 a 2,75 MHz	Corona 0,68 Surface 0,32	ok
5^	da 130 a 200 ns	da 2,5 a 3,5 MHz	Corona 0,35 Surface 0,65	ok
6^	da 115 a 140 ns	da 2,75 a 3,5 MHz	Corona Discharges	ok

Figura 8.3.2(8): Tabella riassuntiva dei report generati tramite il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

I risultati dei 6 report generati stupiscono rispetto a quello precedente riportato nella trattazione, in quanto in nessuno dei sei casi vengono discriminati fenomeni impulsivi analoghi.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Le cause di un comportamento siffatto potrebbero essere molteplici, tra le quali, queste risultano avere maggiore significato:

- il software PDProcessing[®] non è stato addestrato adeguatamente nel riconoscimento seppur parziale delle tipologie di scariche nei trasformatori isolati in resina epossidica;
- il tentativo di riconoscere le tipologie di scarica parziale automaticamente non sempre va a buon fine e comunque necessita in ogni caso di un indirizzamento dell'operatore in base alla propria esperienza.

Allo scopo dunque di mettere in evidenza i limiti del software se non viene guidato da un operatore esperto esterno riportiamo altre prove effettuate come una sorta di test di riconoscimento. Il primo test prevede l'impianto di una punta metallica nei pressi della testa dell'avvolgimento in prova della macchina, sempre con triangolo inserito e condurre una rilevazione delle scariche parziali secondo norma.

In questo modo dovremmo riuscire a vedere il fenomeno dell'effetto Corona prodotto dalla punta metallica anche usando uno strumento U.W.B. .

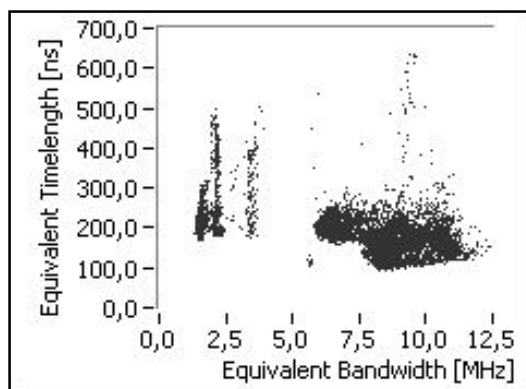


Figura 8.3.2(9): Diagramma tempo-frequenza generato con il software PDProcessing[®]
Fonte: Elaborazione PDProcessing[®] - Bottega Luca

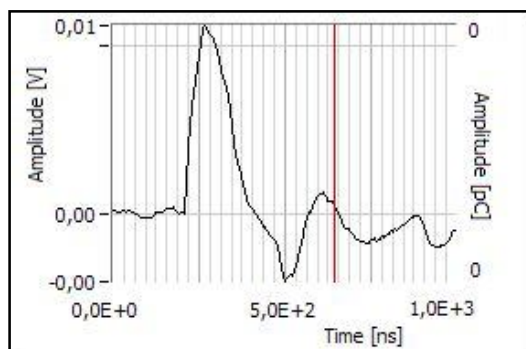


Figura 8.3.2(10): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing[®]
Fonte: Elaborazione PDProcessing[®] - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

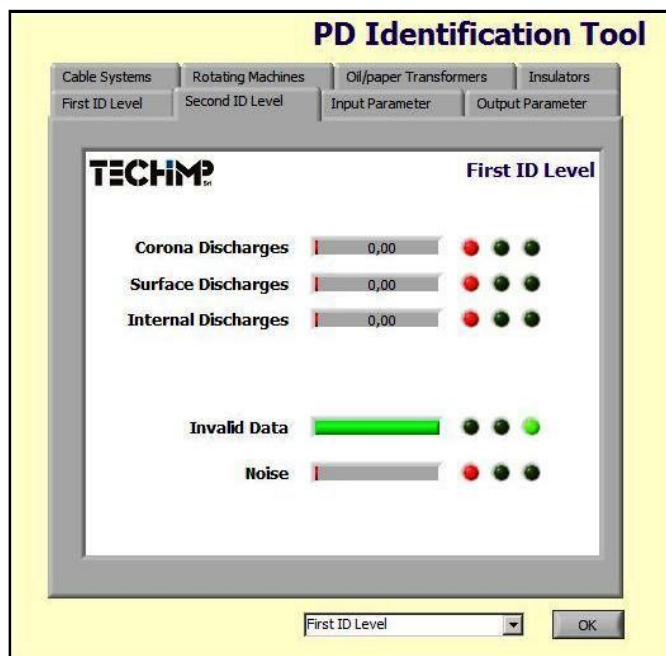


Figura 8.3.2(11): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

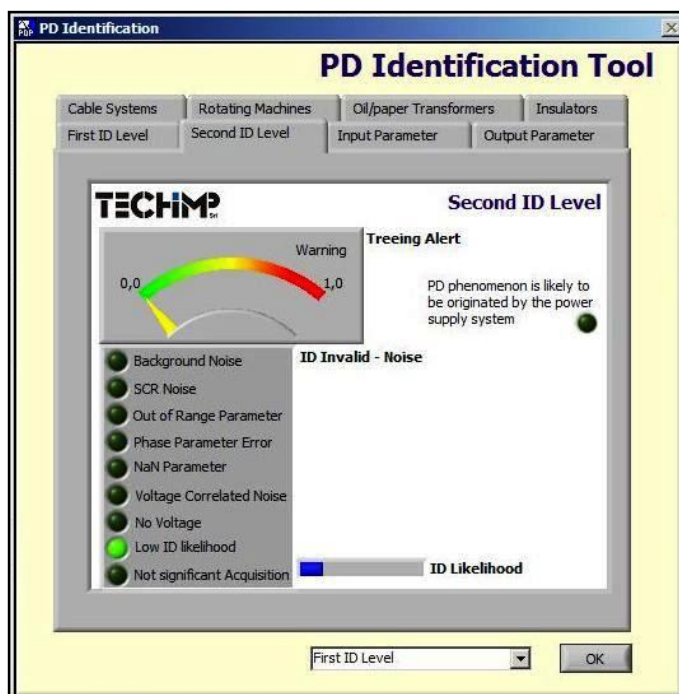


Figura 8.3.2(12): Secondo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Possiamo vedere dal report prodotto dallo strumento che il medesimo non riesce a distinguere nessuna famiglia di scariche parziali in automatico.

Il secondo livello di identificazione ci dice che sono stati superati dei limiti di calcolo del software, in particolare come possiamo vedere nella figura 8.3.2(12) abbiamo un basso coefficiente d'identificazione associato all'algoritmo usato dal software per determinare la tipologia e la quantità di famiglie di scariche parziali presenti nelle acquisizioni effettuate.

Proponiamo ora i report generati dal software guidato dall'operatore esterno tramite una selezione manuale delle famiglie di fenomeni acquisiti.

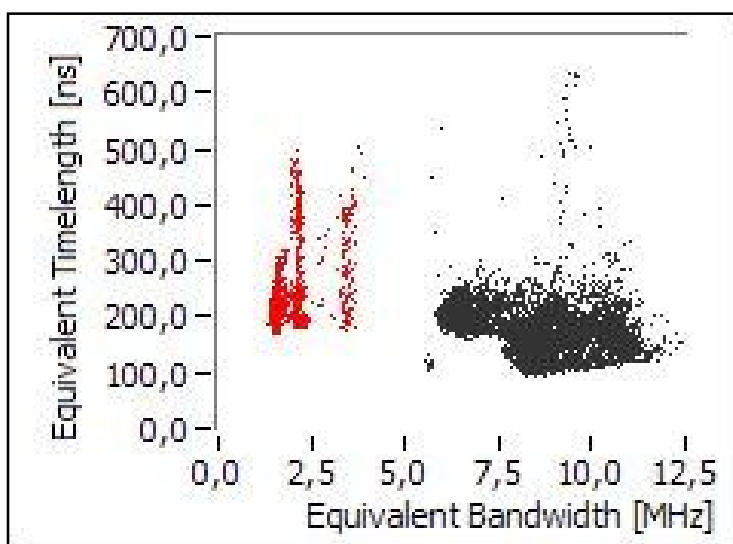


Figura 8.3.2(13): Diagramma tempo-frequenza generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

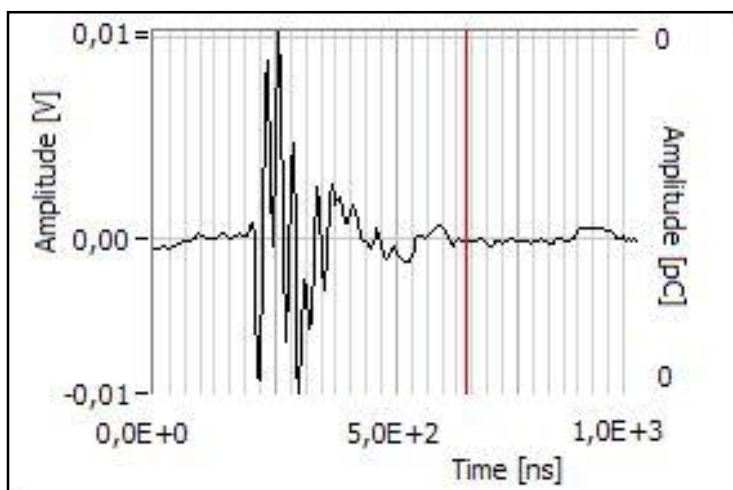


Figura 8.3.2(14): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

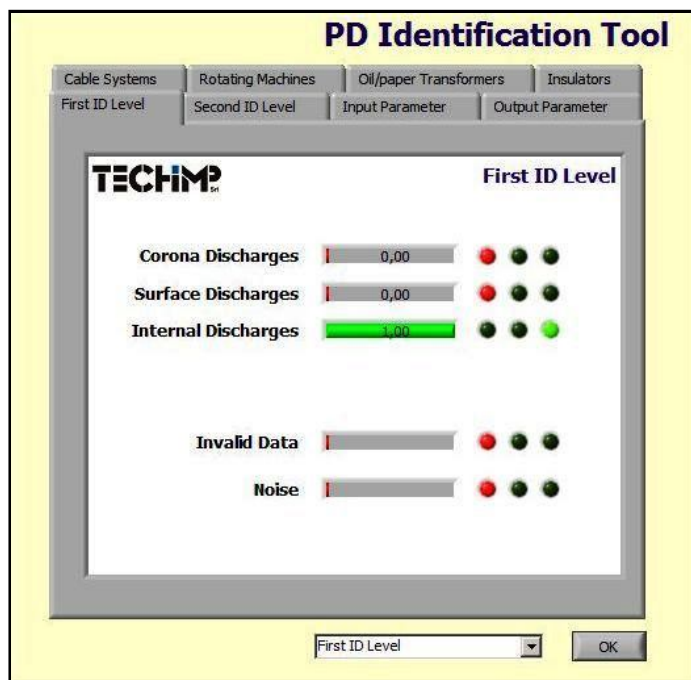


Figura 8.3.2(15): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

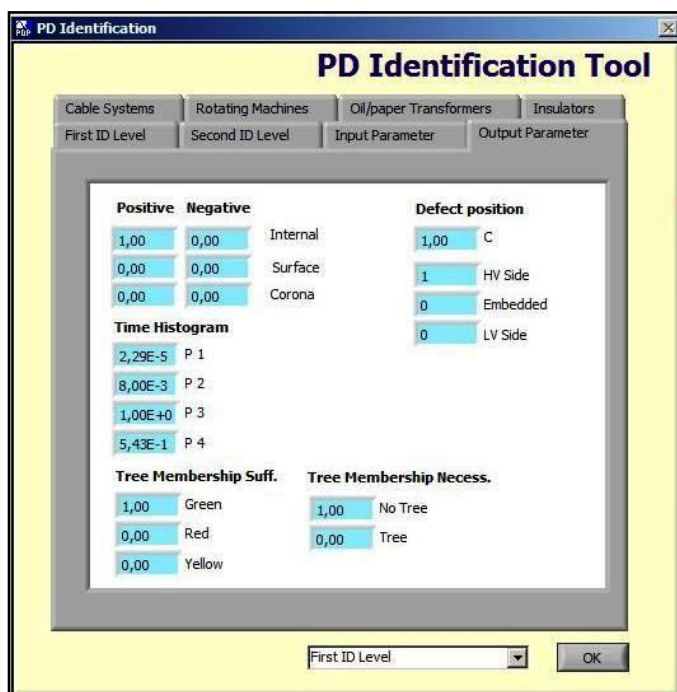


Figura 8.3.2(16): Secondo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

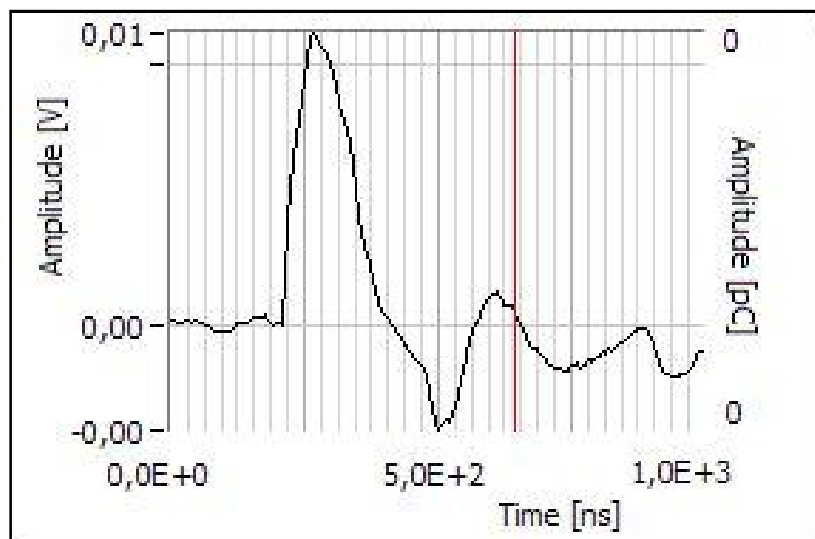


Figura 8.3.2(17): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

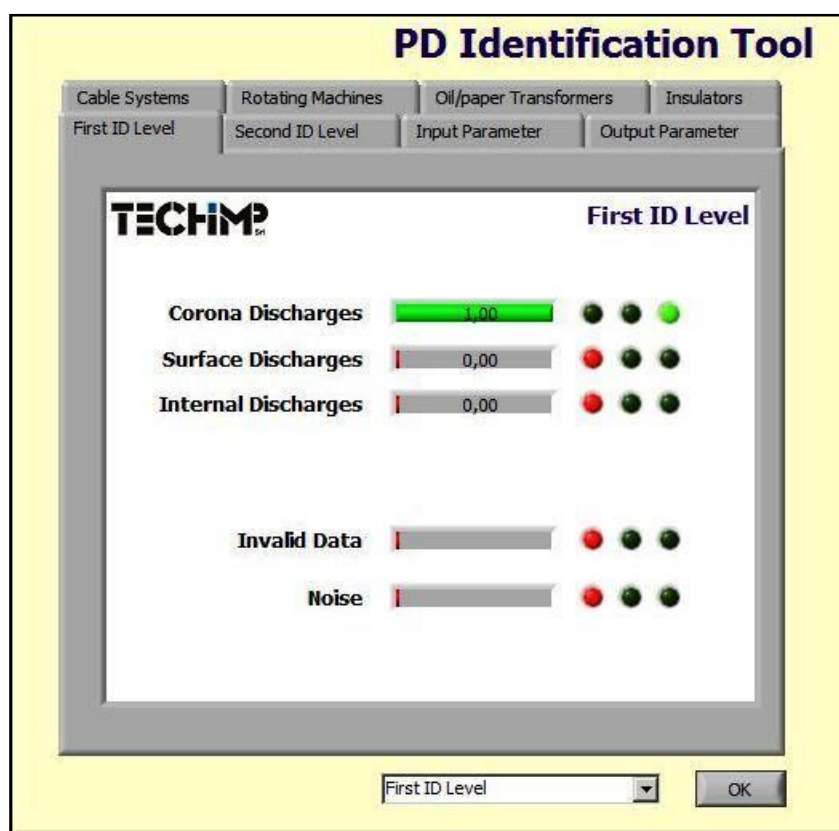


Figura 8.3.2(18): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Vediamo che, da questi ultimi due report generati, prodotti con l'aiuto di un operatore esterno che ha selezionato due aree distinte, esistono due famiglie distinte di segnali impulsivi.

Sarà un caso ma è proprio il risultato che ci aspettavamo, cioè che il software riesce in qualche modo a distinguere segnali di natura diversa, solo se indirizzato nella comprensione dei pattern di segnale.

Allo scopo di verificare ulteriormente le potenzialità di elaborazione del PDProcessing[®] abbiamo posto sulla sommità della bobina in prova prima un bullone con sotto due strati di gomma siliconica e poi invece un isolatore di resina epossidica e abbiamo cercato di verificare la presenza di anomalie nel pattern di segnali acquisito.

Per riassumere tutti questi report che è inutile riportare, creiamo una tabella riassuntiva delle prove eseguite.

tipo di prova	famiglia di PD	time range	frequency range	first ID level	second ID level
rilevazione PD con bullone e 2 strati di gomma siliconica	1 [^]	da 250 a 300 ns	da 1.75 a 2.25 MHz	Surface 84 % Internal 16 %	OK LV SIDE
	2 [^]	da 200 a 300 ns	da 2.25 a 3.5 MHz	Internal	WARNING TREEING
	3 [^]	da 200 a 250 ns	da 3.5 a 4.5 MHz	Surface 28 % Internal 72 %	OK LV SIDE
rilevazione PD con bullone	1 [^] (prova eseguita in tre riprese a 410 V, a 460 V e 480 V)	da 200 a 400 ns	da 2 a 4 MHz	Internal	WARNING TREEING
rilevazione PD con isolatore in resina epossidica	1 [^]	da 120 a 150 ns	da 2 a 2.75 MHz	Surface 26 % Internal 74 %	OK LV SIDE
	2 [^]	da 115 a 140 ns	da 2.75 a 3.5 MHz	Surface 1 % Internal 99 %	WARNING TREEING LV SIDE
	3 [^]	da 115 a 140 ns	da 3.5 a 4 MHz	Internal	WARNING TREEING

Figura 8.3.2(19): Tabella riassuntiva dei report generati
Fonte: Elaborazione PDProcessing[®] - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

La tabella 8.3.2(19) ci offre numerosi spunti di riflessione:

- il posizionamento degli oggetti usati come test sulla sommità della bobina in prova e il livello della tensione hanno consentito in modo limitato, come nel caso dell'effetto Corona, la riuscita del test, cioè il riconoscimento da parte del software in questione di una tipologia diversa di segnale impulsivo;
- in diverse occasioni il secondo livello d'identificazione ci ha permesso di capire che il fenomeno impulsivo proviene dalla bassa tensione come volevasi dimostrare;
- l'intervento dell'utente come guida per il riconoscimento delle diverse tipologie di segnale risulta fondamentale per un ottimale uso del PD Processing®.

8.4 MISURA DI SCARICHE PARZIALI SU DI UN TRASFORMATORE TRIFASE ISOLATO IN RESINA EPOSSIDICA DA 315 kVA

E' stato provato un trasformatore trifase della ditta EUROELETTRO tramite l'utilizzo del sistema di rilevazione delle scariche parziali in banda ultra larga.

I dati di targa principali sono:

- POTENZA NOMINALE 315 kVA
- TENSIONE PRIMARIA $20000 \pm 2 \cdot 2,5 \% V$
- TENSIONE SECONDARIA 400 V

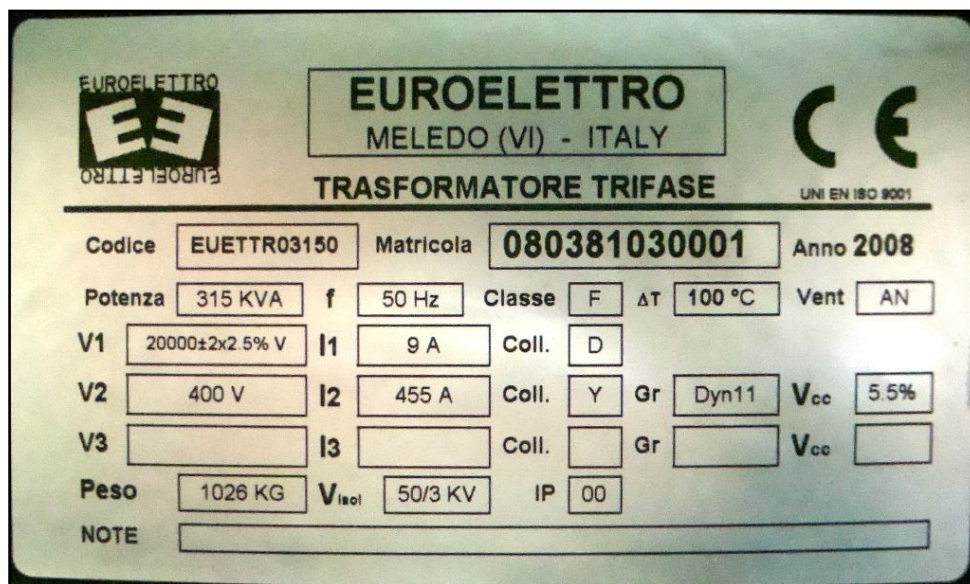


Figura 8.4(1): Targa del trasformatore

Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Proponiamo quindi una serie di fotografie del trasformatore trifase in questione, del circuito di misura e dei particolari costruttivi.



Figura 8.4(2): Trasformatore trifase EUROELETTRO da 315 kVA.
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

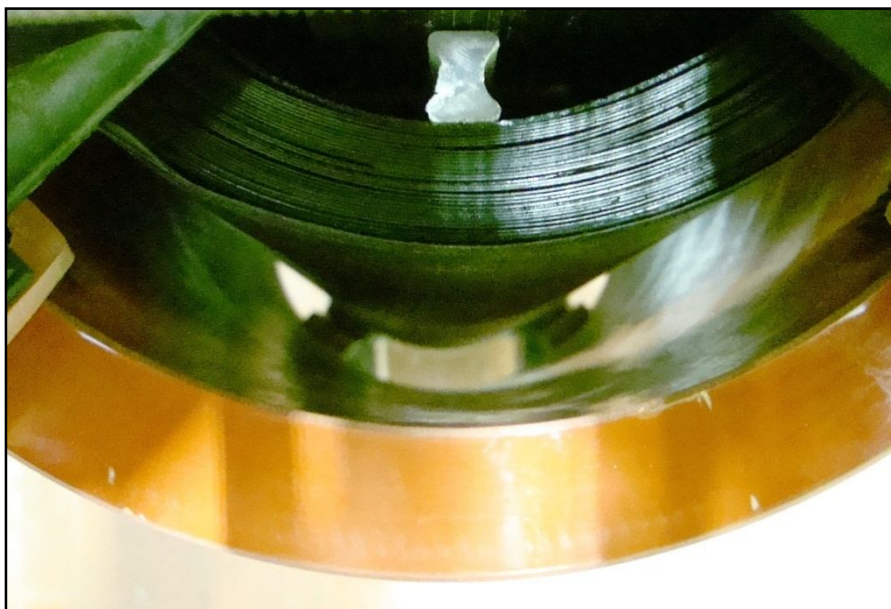


Figura 8.4(3): Particolare costruttivo del trasformatore trifase EUROELETTRO.
Canale d'aria ampio tra la bobina M.T. rossa e la bobina B.T. nera.
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

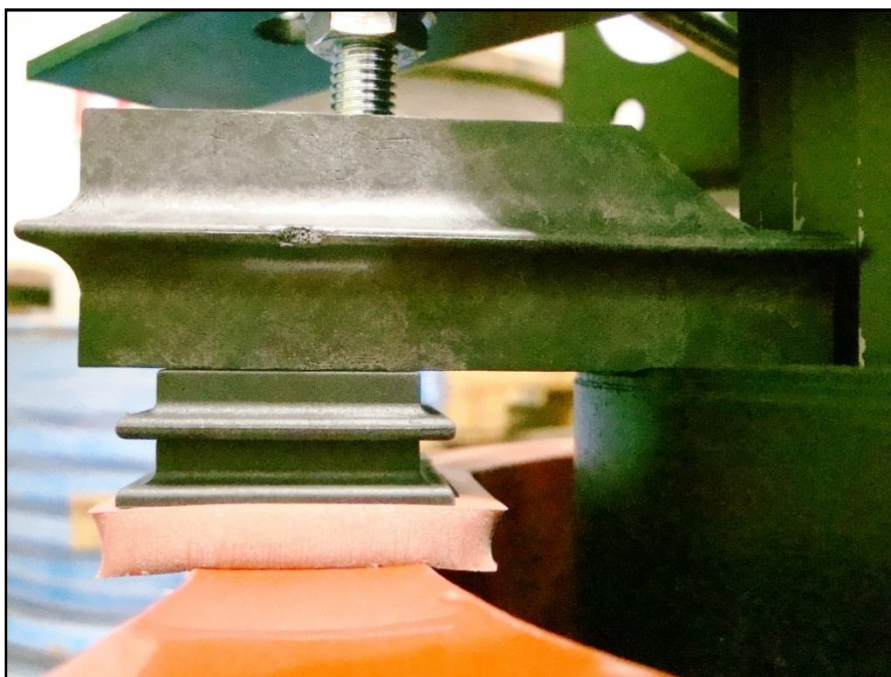


Figura 8.4(4): Particolare costruttivo del trasformatore trifase EUROELETTRO.
Zeppa di bloccaggio con uno strato consistente di gomma siliconica.
Si può notare la distanza consistente della testa della vite dalla bobina M.T. .
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

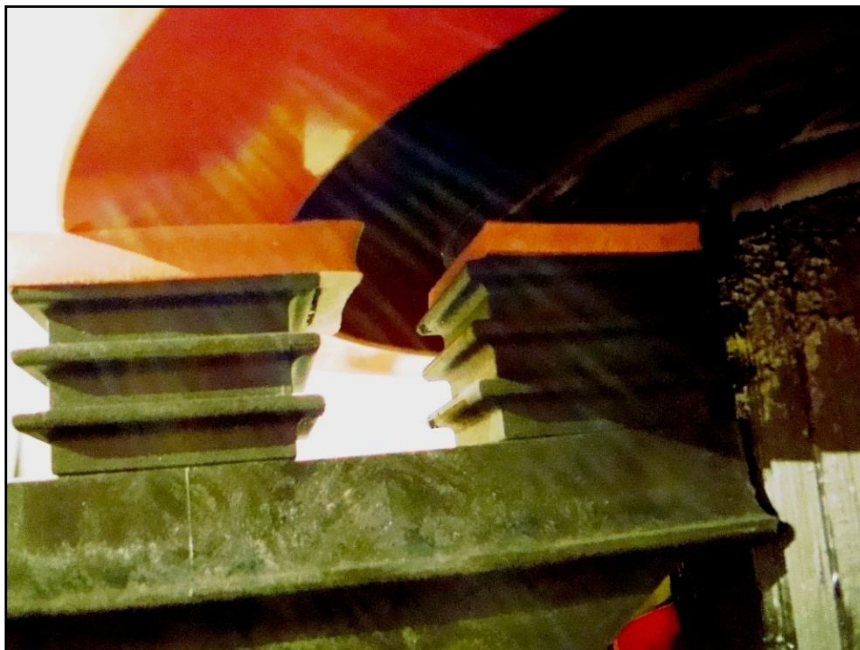


Figura 8.4(5): Particolare costruttivo del trasformatore trifase EUROELETTRO.
Zeppine di sostegno con uno strato consistente di gomma silconica.
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

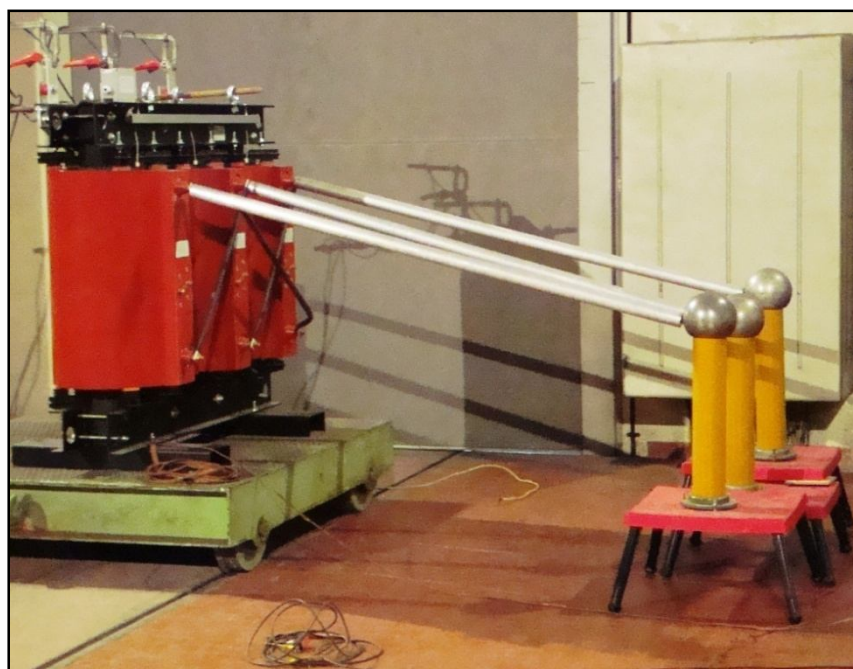


Figura 8.4(6): Circuito di misura delle scariche parziali con procedura standard I.E.C. 60076 .
Si possono notare i tre condensatori gialli d'accoppiamento da 2.8 nF cadauno.
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

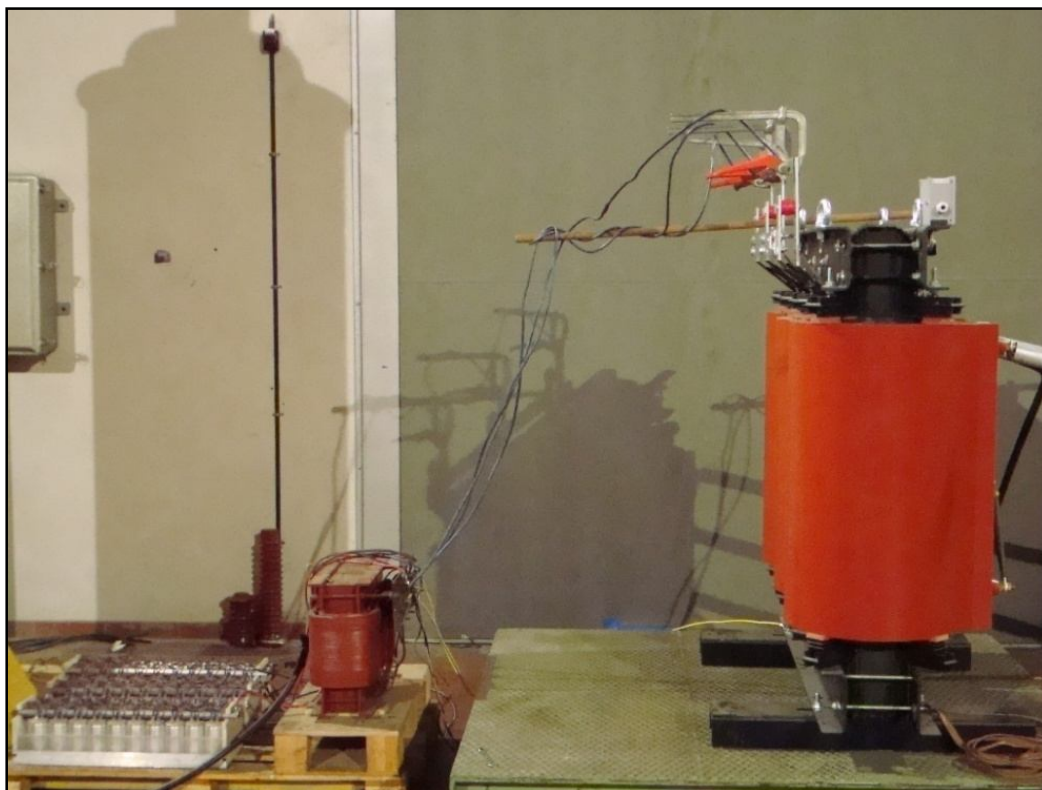


Figura 8.4(7): Circuito di misura delle scariche parziali con procedura standard I.E.C. 60076 .
Si può notare il retro del trasformatore e l'alimentazione trifase sulla bobina M.T. .
Si può notare la lontananza che viene tenuta tra i conduttori in B.T. e le bobine M.T.
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

Le rilevazioni eseguite tramite lo strumento analogico James G. Biddle secondo la normativa IEC 60270 e seguendo la procedura standard, non hanno portato alla luce scariche parziali.

Neppure con l'utilizzo dello strumento digitale in banda ultra larga, sono state riscontrate anomalie seguendo la procedura normata.

Aumentando gradualmente la tensione indotta al primario si possono però, allo scopo di testare il sistema U.W.B., mettere in evidenza l'insorgere di scariche parziali, delle quali proponiamo alcuni report generati con il software PDProcessing[®] .

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.4.1 PRIMO REPORT GENERATO CON IL SOFTWARE PDPROCESSING®

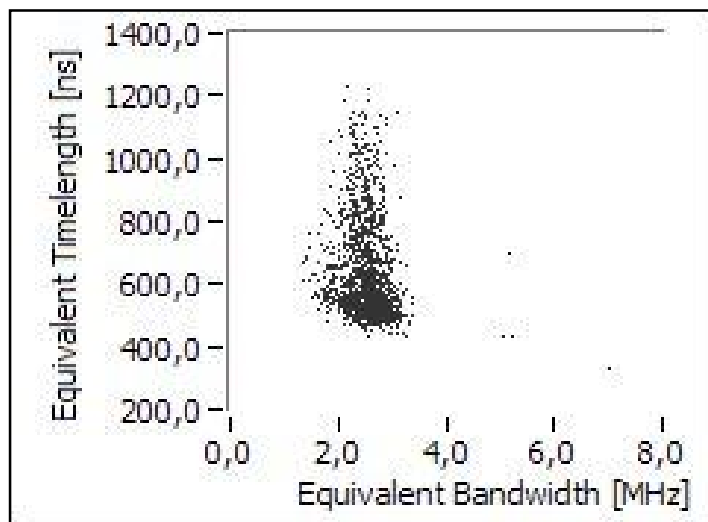


Figura 8.4.1(1): Diagramma tempo-frequenza generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

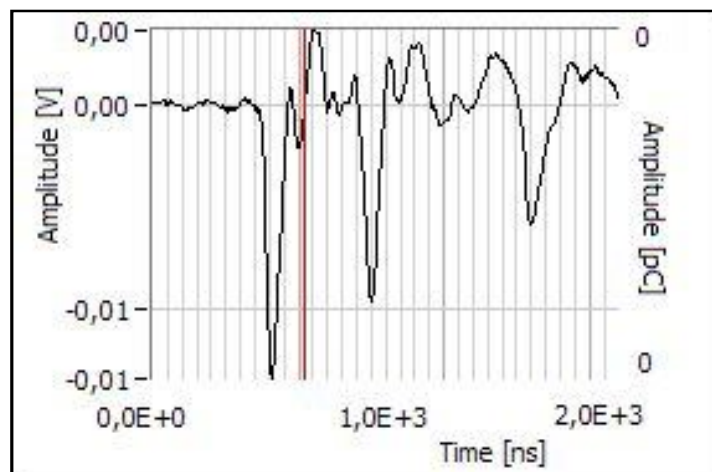


Figura 8.4.1(2): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

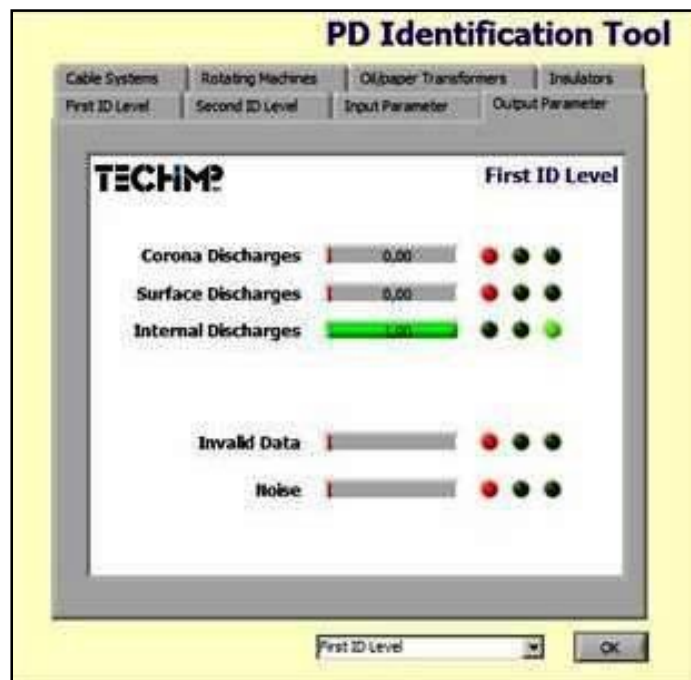


Figura 8.4.1(3): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

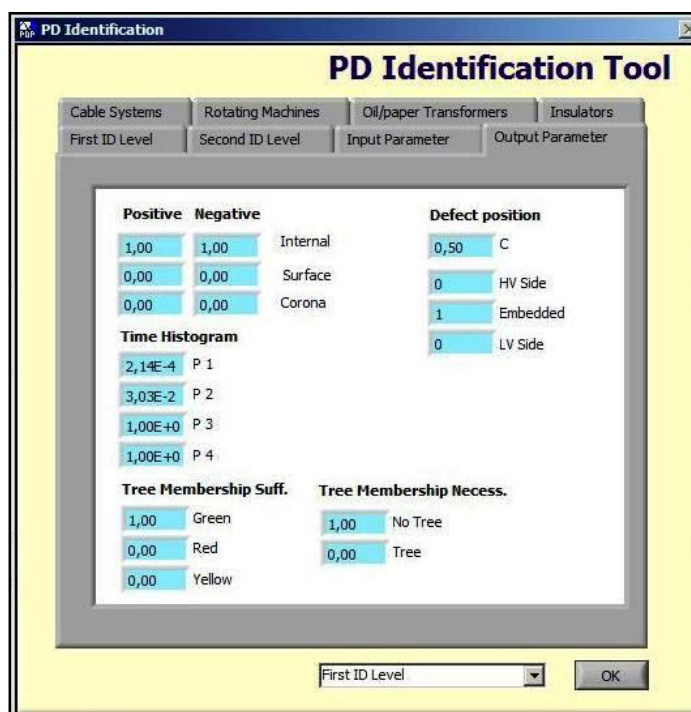


Figura 8.4.1(4): Secondo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Dopo aver aumentato la tensione al secondario fino a 552 V, cioè 24 kV primari, abbiamo acquisito una serie di segnali, ricordando che 552 V corrisponde nel caso di questo trasformatore trifase a 1.38 volte la tensione nominale secondaria.

Chiaramente essendo ad un livello di tensione superiore a 1.3 volte la tensione nominale, ci si aspetta che comunque qualche impulso di corrente di scarica parziale sia presente. In effetti da questo primo report possiamo notare la presenza di consistenti fenomeni impulsivi rilevati. Il software, in questo caso, senza la guida dell'operatore, riesce a discriminare una tipologia di segnali, che solo per puro caso associa a sorgenti interne di scariche parziali.

8.4.2 SECONDO REPORT GENERATO CON IL SOFTWARE PDPROCESSING®

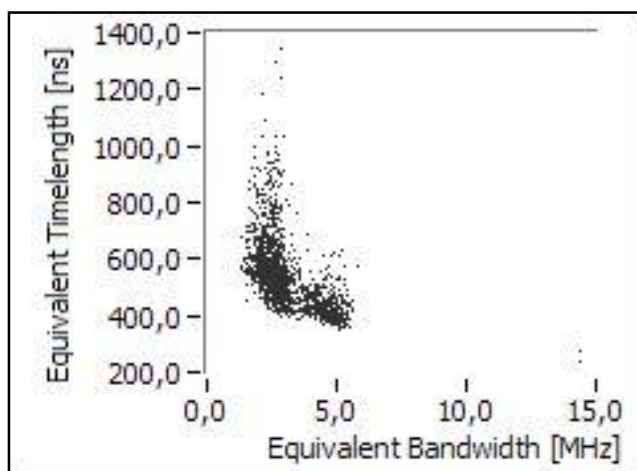


Figura 8.4.2(1): Diagramma tempo-frequenza generato con il software PDProcessing®

Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

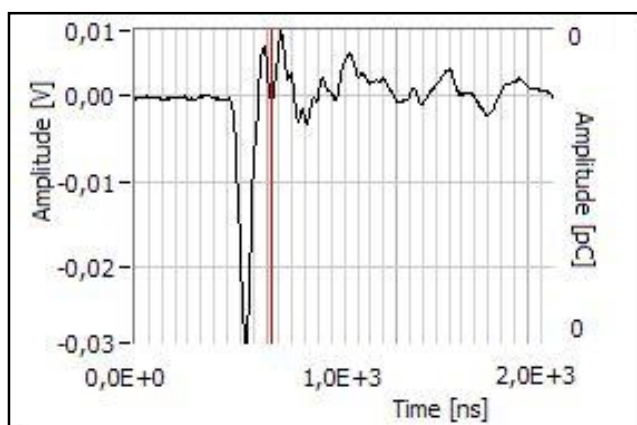


Figura 8.4.2(2): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®

Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

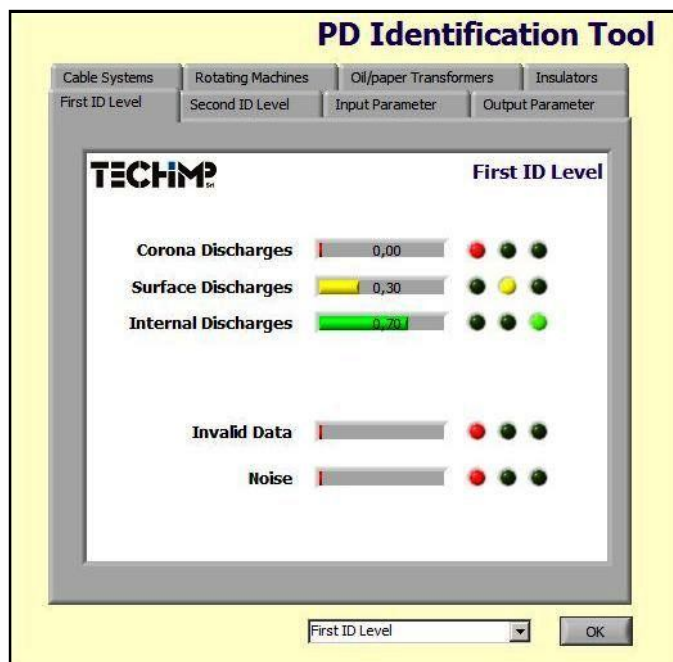


Figura 8.4.2(3): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

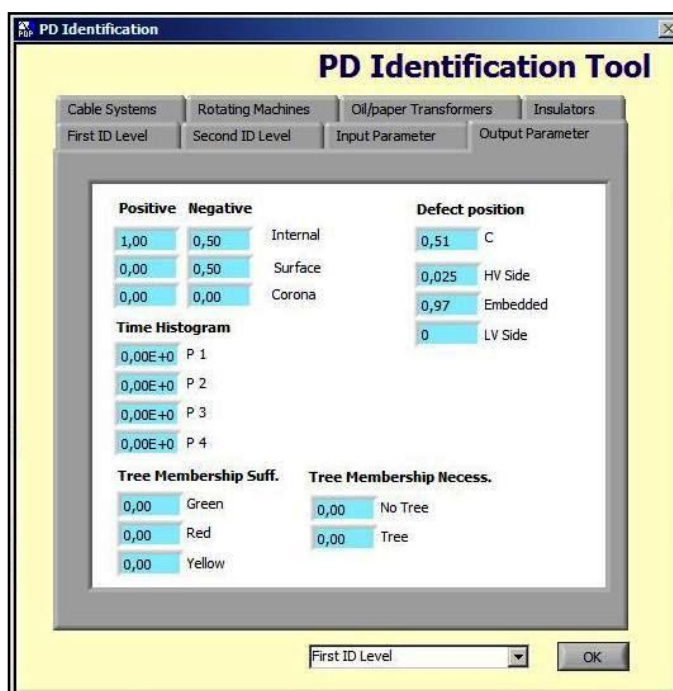


Figura 8.4.2(4): Secondo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

In questa secondo report abbiamo aumentato gradualmente la tensione fino a 597 V secondari, cioè 26,1 kV primari, senza guidare il software nell'identificazione delle scariche parziali.

Il risultato ottenuto utilizzando il PD Processing[®] è stata l'individuazione di due famiglie distinte di impulsi di corrente di scarica parziale, senza l'intervento dell'operatore come guida all'individuazione di tali famiglie o gruppi di impulsi.

8.4.3 TERZO REPORT GENERATO CON IL SOFTWARE PDPROCESSING[®]

In un secondo momento l'intervento dell'operatore esterno consente al programma di individuare meglio questi gruppi di segnali almeno per quanto riguarda la loro collocazione nel diagramma tempo-frequenza, come si può vedere dalle figure che ora riportiamo di seguito relative al terzo report generato con il software suddetto.

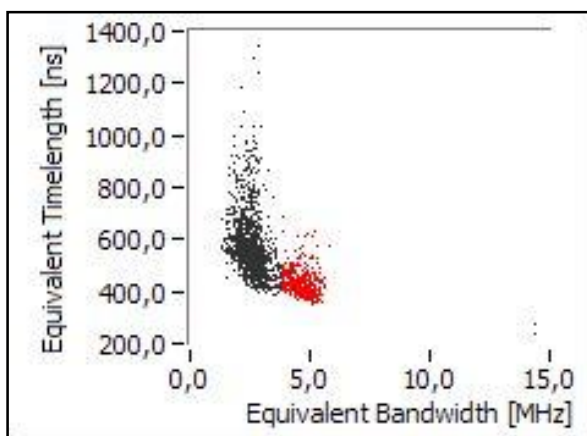


Figura 8.4.3(1): Diagramma tempo-frequenza generato con il software PDProcessing[®]
Fonte: Elaborazione PDProcessing[®] - Bottega Luca

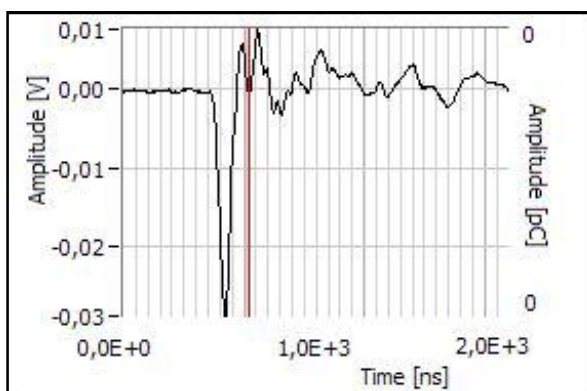


Figura 8.4.3(2): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing[®]
Fonte: Elaborazione PDProcessing[®] - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

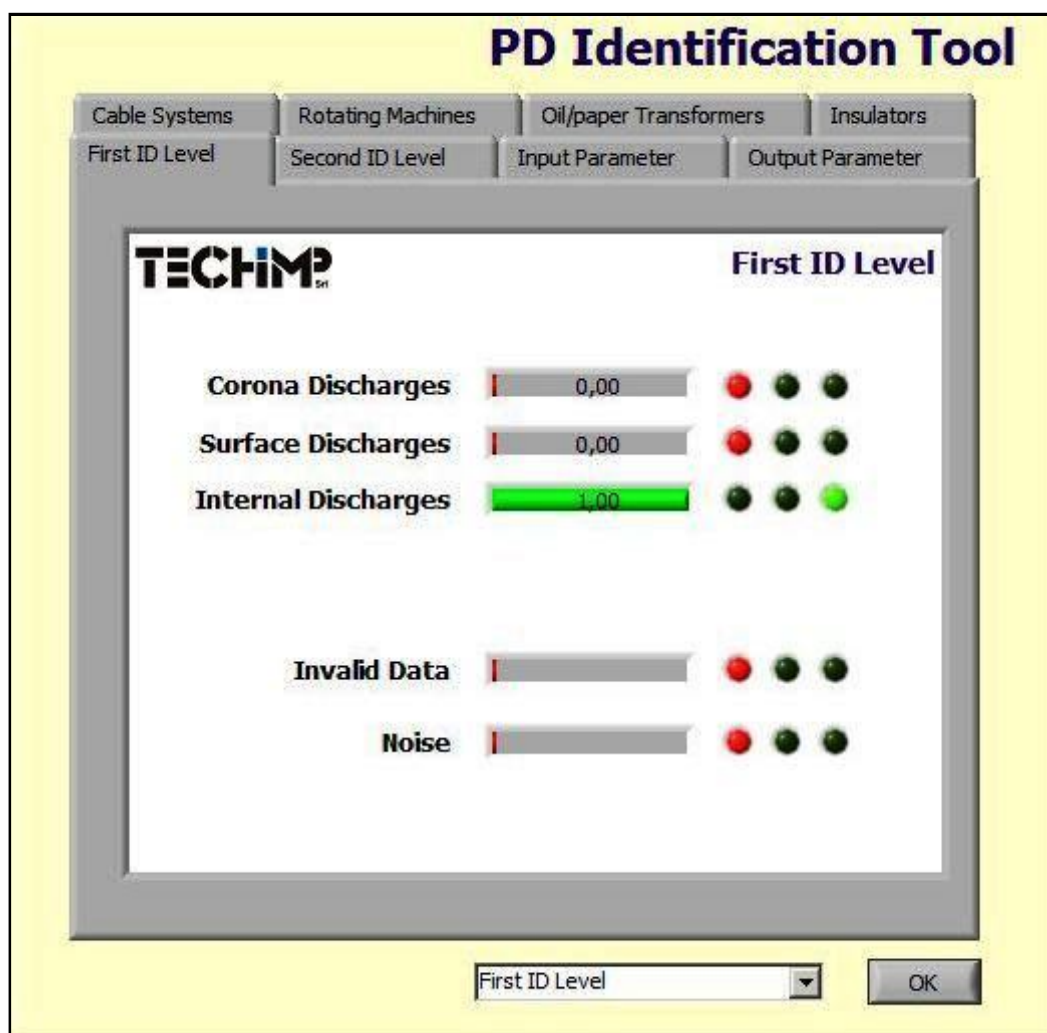


Figura 8.4.3(3): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

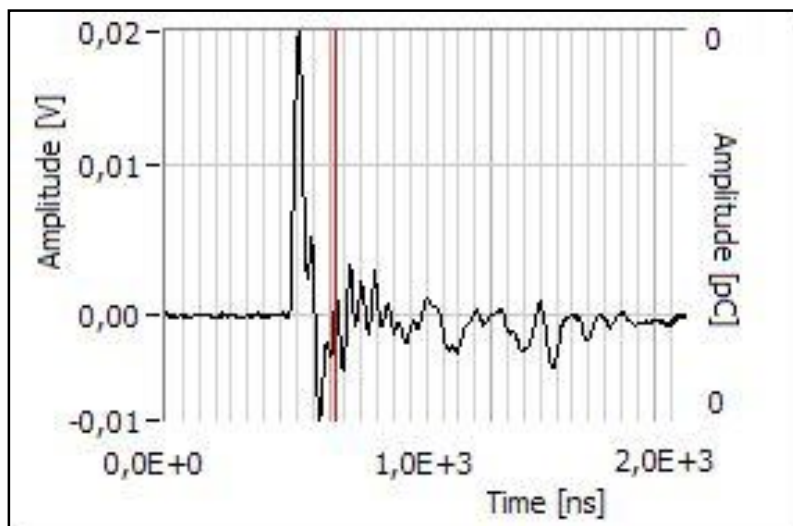


Figura 8.4.3(4): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

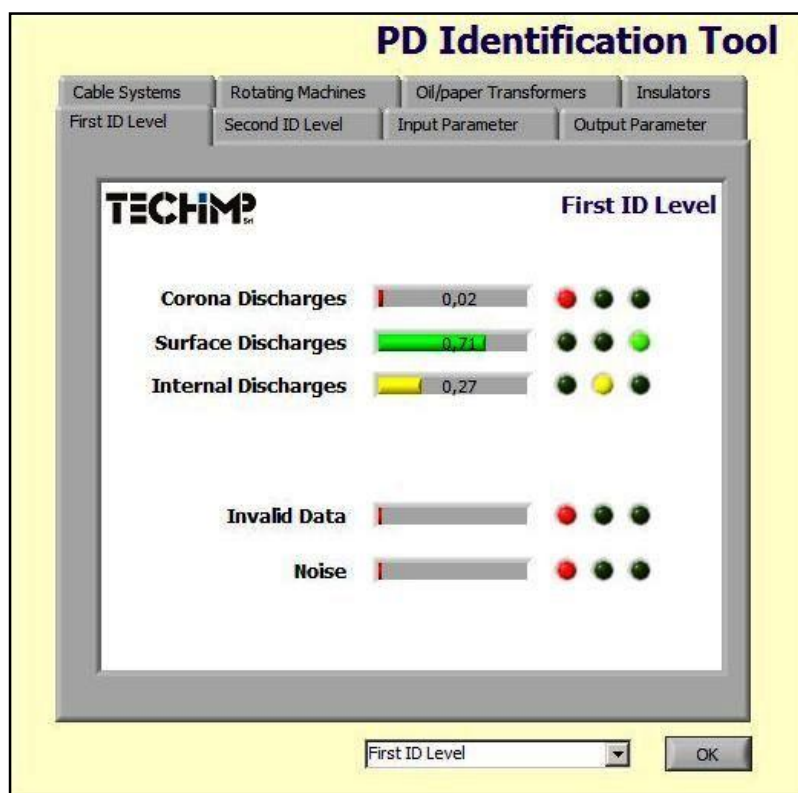


Figura 8.4.3(5): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.4.4 QUARTO REPORT GENERATO CON IL SOFTWARE PDPROCESSING®

Proponiamo ora un ultimo esempio d'acquisizione con una elaborazione senza l'intervento dell'operatore.

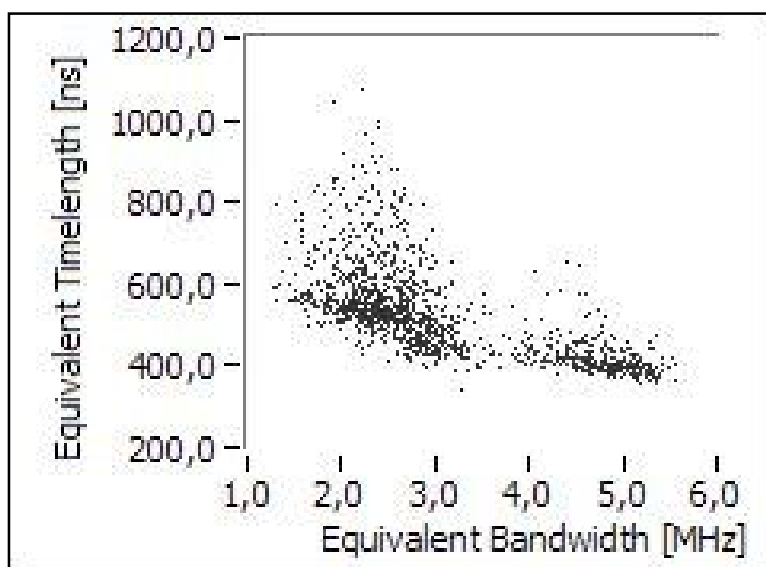


Figura 8.4.4(1): Diagramma tempo-frequenza generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

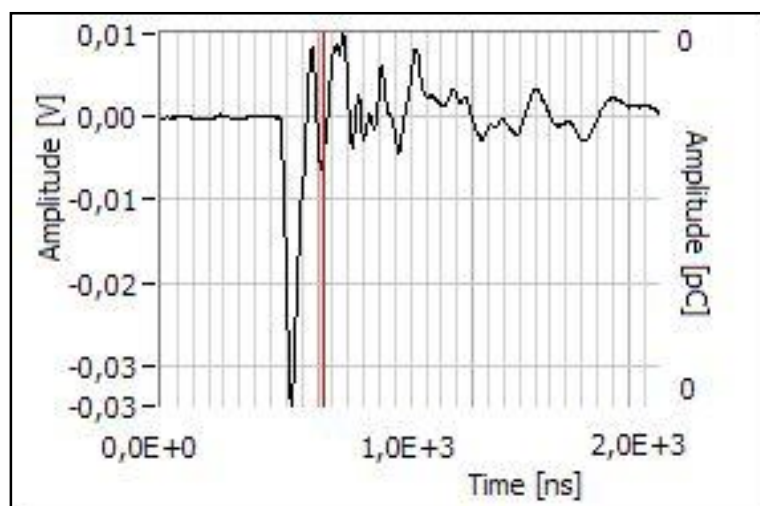


Figura 8.4.4(2): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

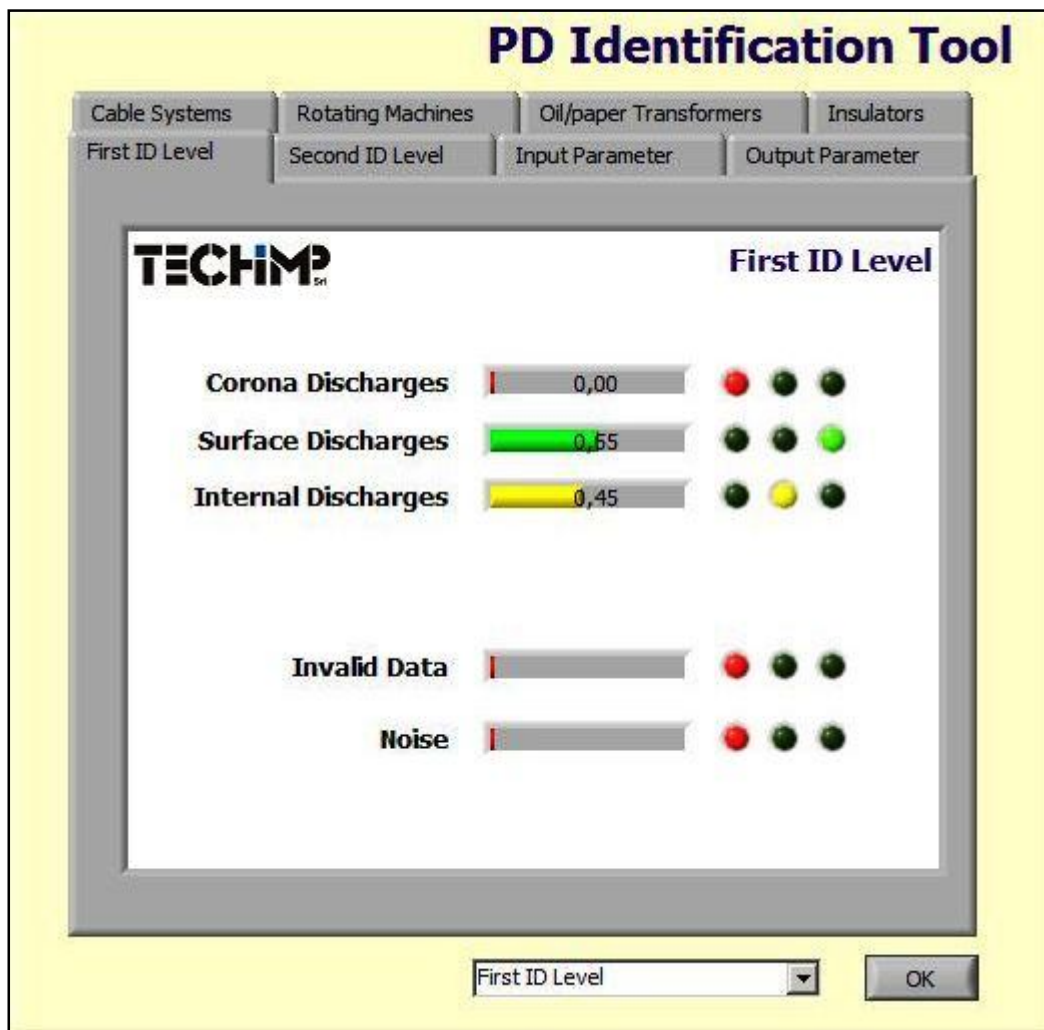


Figura 8.4.4(3): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

Vediamo dalle figure 8.4.4(1), 8.4.4(2) e 8.4.4(3) che il software senza la guida dell'operatore individua due gruppi di segnali diversi, anche se come ampiamente detto in precedenza questa discriminazione non può essere supportata da dati incontrovertibili in quanto tale algoritmo non possiede un database di prove effettuate su trasformatori isolati in resina epossidica. Pertanto la discriminazione di segnali di diversa natura resta un fatto puramente statistico. Ora tramite lo stesso esempio fatto in questo quarto report, andiamo a generare un quinto report guidando questa volta il software nell'individuazione di categorie di fenomeni impulsivi diversi. Questo vuol dire che andando nella sezione "Run Classification" e selezionando "Manual", bisognerebbe saper individuare ad occhio nudo quali sono le famiglie di scariche parziali, osservando il fatto che esse si raggruppano intorno ad un punto centrale, che possiede una determinata frequenza di ripetizione ed è caratterizzato da un certo tempo equivalente.

8.4.5 QUINTO REPORT GENERATO CON IL SOFTWARE PDPROCESSING®

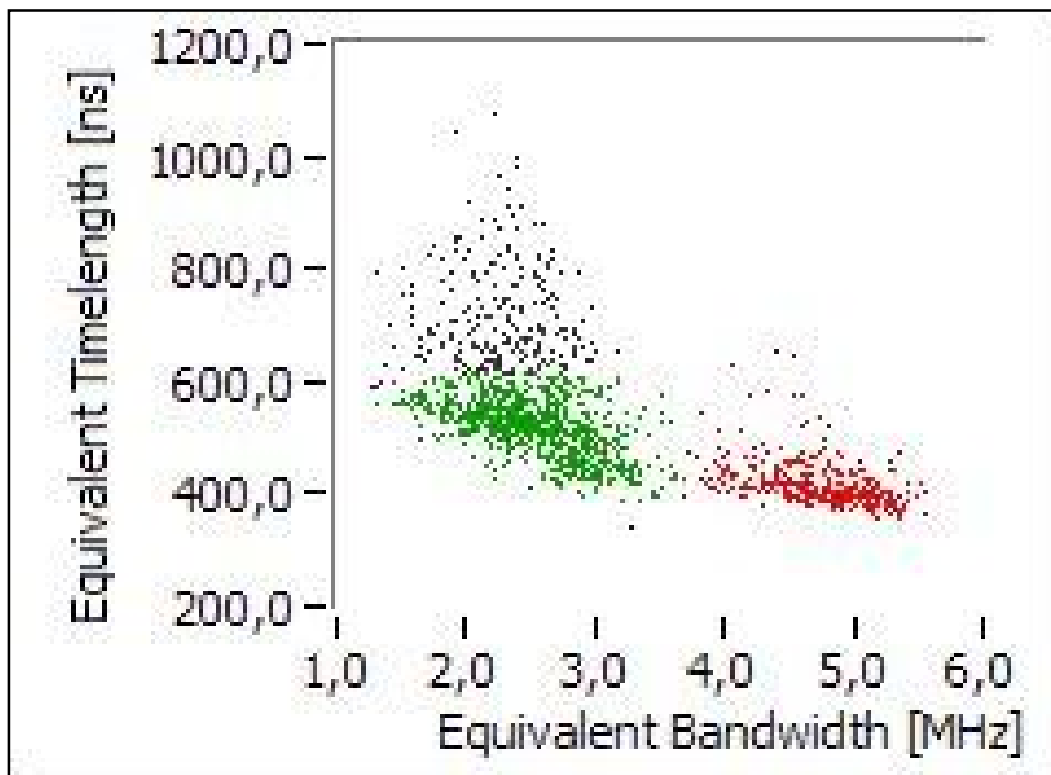


Figura 8.4.5(1): Diagramma tempo-frequenza generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

Come possiamo osservare dalla figura 8.4.5(1) la guida dell'operatore sul software PDProcessing® porta all'individuazione di tre possibili gruppi di segnali centrati ognuno su un proprio punto centrale, che possiede una determinata frequenza di ripetizione ed è caratterizzato da un certo tempo equivalente.

La procedura è manuale e solo un operatore esperto di teoria tempo – frequenza è in grado di capire “ad occhio” quali siano le probabili famiglie di impulsi presenti in tale diagramma.

Sono state dunque individuate tre possibili gruppi di fenomeni impulsivi e di seguito ne proponiamo dei brevi report composti da un diagramma ampiezza – tempo e da un primo livello d'identificazione ciascheduno.

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.4.5.1 PRIMO GRUPPO DI SEGNALI ACQUISITI

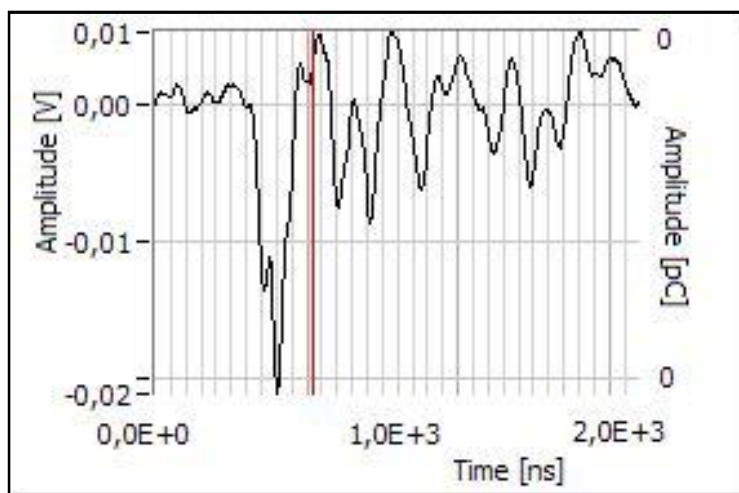


Figura 8.4.5.1(1): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

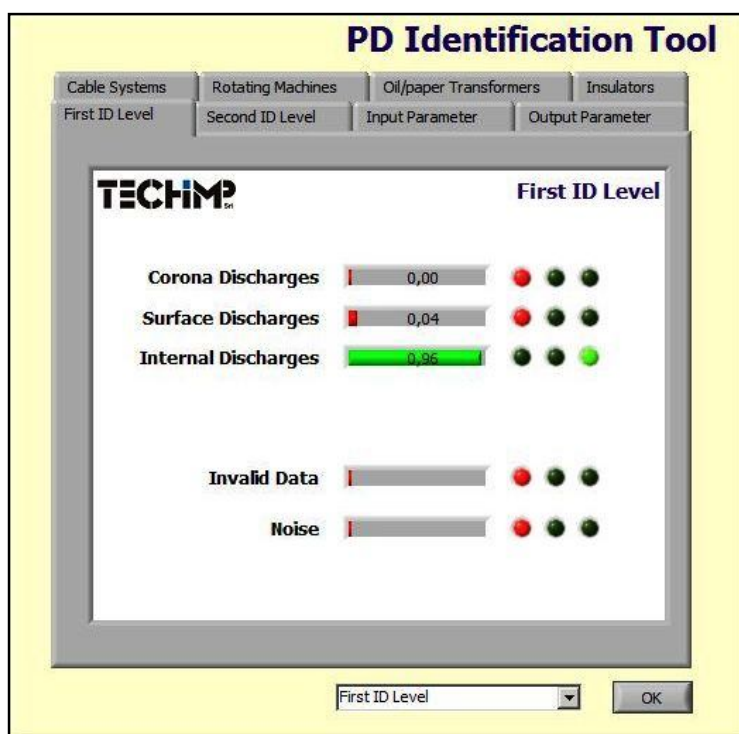


Figura 8.4.5.1(2): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.4.5.2 SECONDO GRUPPO DI SEGNALI ACQUISITI

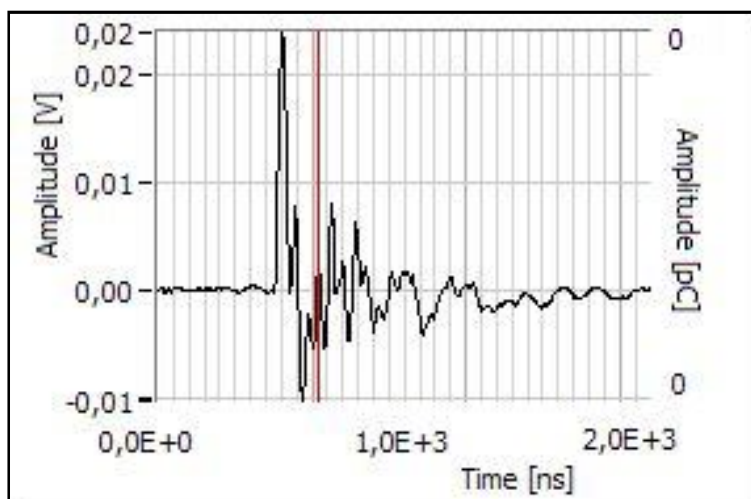


Figura 8.4.5.2(1): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

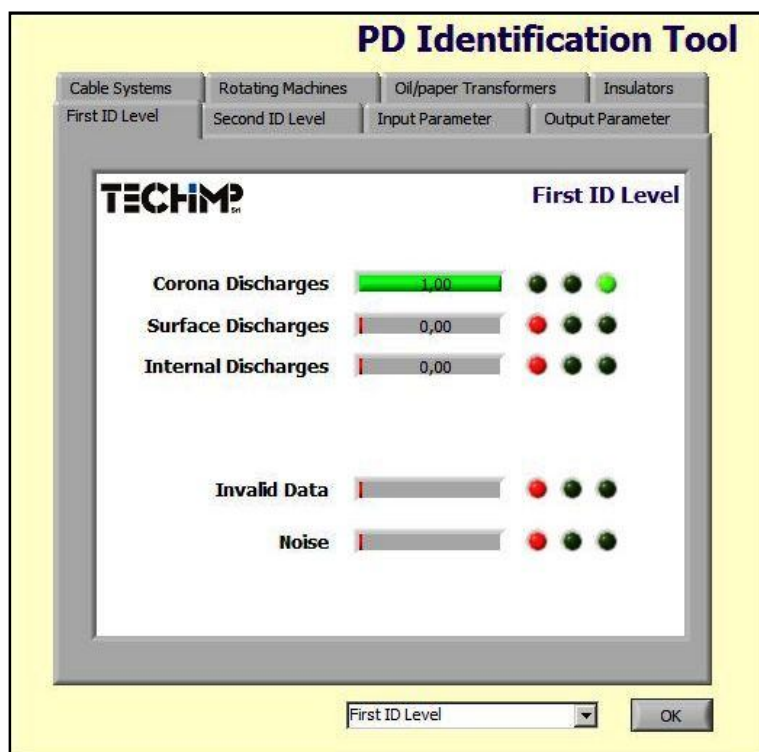


Figura 8.4.5.2(2): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

8.4.5.3 TERZO GRUPPO DI SEGNALI ACQUISITI

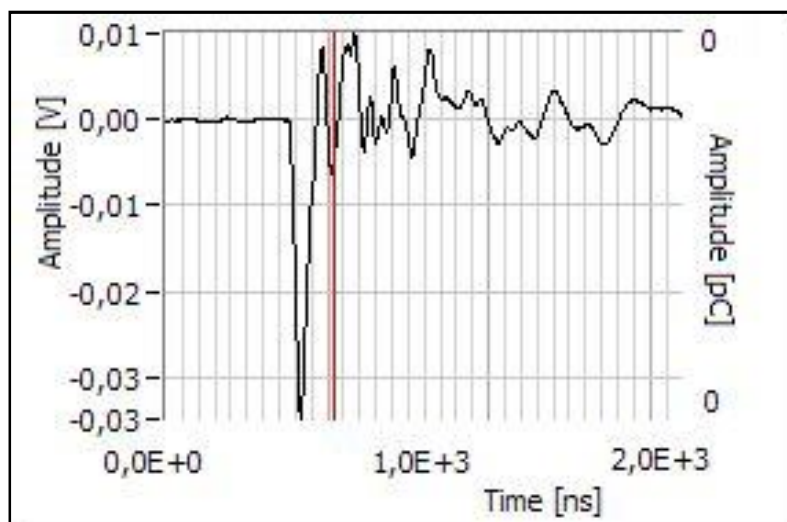


Figura 8.4.5.3(1): Diagramma ampiezza-tempo generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

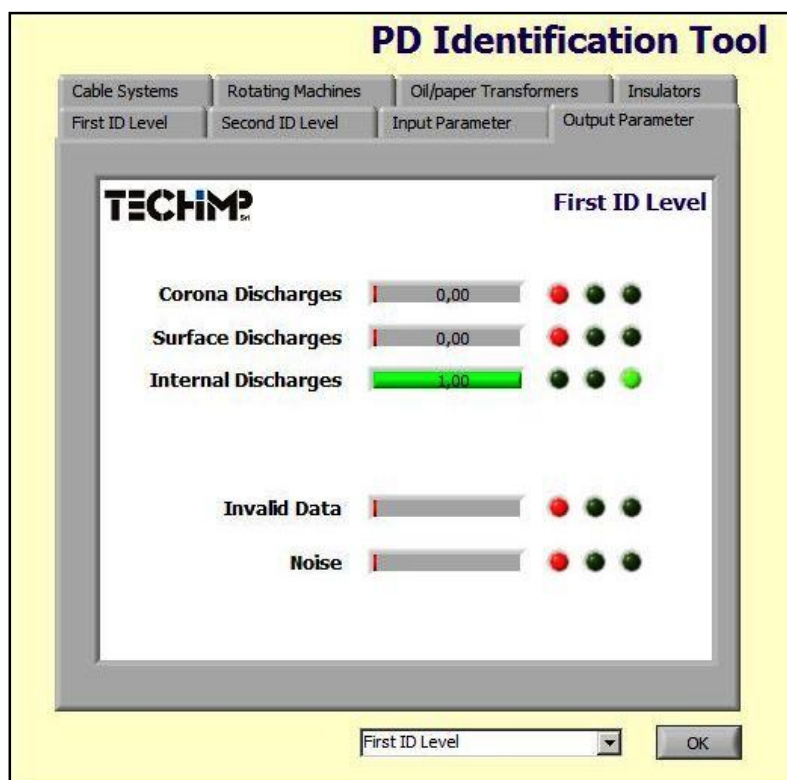


Figura 8.4.5.3(2): Primo livello d'identificazione generato con il software PDProcessing®
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

8. Misure di scariche parziali su trasformatori isolati in resina epossidica

Quest'ultima misura effettuata sempre con tensione sinusoidale secondaria pari a 597 V alla frequenza di 100 Hz come in tutti gli altri casi, mostra ancora una volta come sia necessaria una guida esterna che indirizzi il software in analisi all'individuazione completa almeno della quantità di famiglie di segnali presenti nel pattern.

L'acquisizione effettuata senza l'aiuto dell'utente ha messo in evidenza scariche parziali che secondo l'elaboratore sono da attribuirsi a sorgenti interne ed esterne alla bobina, in modo più marcato le prime e meno le seconde.

Vengono tuttavia individuati solamente due gruppi di segnali analoghi e nulla si può dire sulla loro natura, poiché come ribadito più volte, il software non è stato addestrato nel riconoscimento delle tipologie di scariche parziali nei trasformatori isolati in resina epossidica.

Andando l'operatore a guidare il software, selezionando le aree che nel diagramma tempo-frequenza sembrano rappresentare gruppi auto consistenti di segnali, vengono messi in evidenza tre gruppi o famiglie distinte di segnali, mentre nel caso precedente ne venivano discriminati solo due.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

9.1 METODO TEMPO-FREQUENZA

La discriminazione di impulsi di corrente o di tensione nell'ambito elettrotecnico non è un problema legato alla misura delle scariche parziali, ma si può estendere a tutta una serie di applicazioni, basti pensare alle misure in alta tensione.

Esistono molti metodi per distinguere le varie tipologie di impulsi, tra le quali quella usata con le apparecchiature in banda larga analogiche, dove si può visualizzare l'andamento (non la forma d'onda) degli impulsi di corrente di scarica parziale tramite un oscilloscopio analogico e in base alle misure effettuate, all'esperienza sull'oggetto in prova e all'ampiezza degli impulsi, si può dire qualcosa sulla loro tipologia e ubicazione. Non ci si può comunque limitare a queste sommarie speculazioni, specialmente quando il numero di impulsi visualizzati diventa elevato. Bisogna allora approntare dei sistemi di misura che oltre ad acquisire gli impulsi riescano pure in automatico a farne una seppur sommaria classificazione. Esistono in letteratura svariate metodologie di riconoscimento degli impulsi (Pattern Recognition) basate su diverse strategie e diverse definizioni dei parametri da valutare. In pratica non esiste una metodologia migliore delle altre ma per ogni applicazione esiste un metodo che meglio si presta alla risoluzione del problema. Le applicazioni, nelle quali abbiamo necessità di riconoscere impulsi, dovrebbero essere in grado di osservare il tempo di salita e di discesa dei medesimi. La quantità di impulsi da analizzare, nel caso della misura di scariche parziali in banda larga, è generalmente molto elevata e conseguentemente i tempi di elaborazione e la quantità di memoria da impiegare per lo svolgimento delle operazioni di riconoscimento sono da tenere di conto. Gli impulsi di corrente di scarica parziale contengono l'informazione sull'evoluzione temporale delle ampiezze e sulle frequenze messe in gioco da ogni singolo impulso. Il riconoscimento degli impulsi di corrente di scarica parziale deve pertanto avvenire tramite l'analisi simultanea di almeno due grandezze, una legata al tempo (evoluzione temporale) ed una legata alla frequenza (spettro in frequenza). La tecnica chiamata "metodo tempo-frequenza", consente di condensare l'informazione relativa ad ogni singolo impulso in una coppia di valori reali, uno in funzione del tempo e l'altro in funzione dello spettro delle armoniche presenti nel segnale stesso. 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 cui formule per il calcolo sono a seguito riportate.

$$t_0 = \frac{\sum_{i=0}^K t_i \cdot S_i(t_i)^2}{\sum_{i=0}^K S_i(t_i)^2} \quad 9.1$$

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

$$T^2 = \frac{\sum_{i=0}^K (t_i - t_0)^2 \cdot S_i(t_i)^2}{\sum_{i=0}^K S_i(t_i)^2} \quad 9.2$$

$$W^2 = \frac{\sum_{i=0}^K f_i^2 \cdot |X_i(f_i)|^2}{\sum_{i=0}^K |X_i(f_i)|^2} \quad 9.3$$

delle quali i parametri sono:

- 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 di un grafico cartesiano bidimensionale detto "diagramma tempo-frequenza".

L'analisi del grafico, sotto determinate ipotesi, rendono visibili dei raggruppamenti di segnali che possono risultare distinti: tali costellazioni di segnali 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.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Proponiamo ora tre diagrammi ampiezza – tempo di tre segnali diversi e tramite una freccia andiamo ad individuare dove vengono posizionati sul diagramma tempo – frequenza.

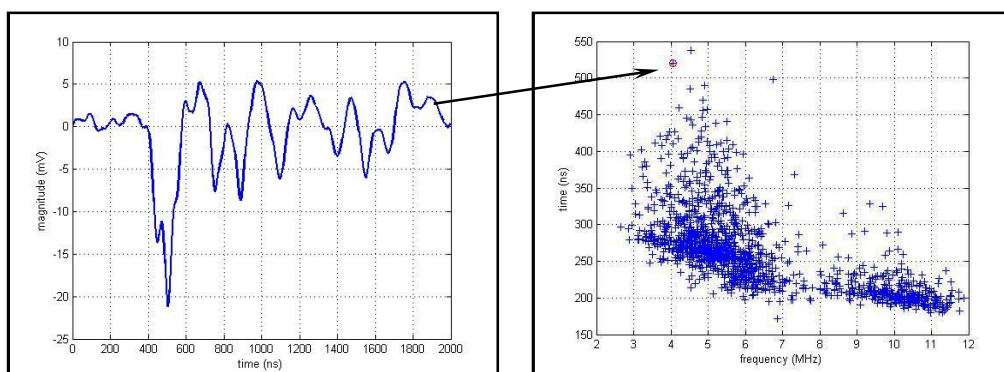


Figura 9.1(1): Collocazione del segnale nel diagramma tempo-frequenza
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

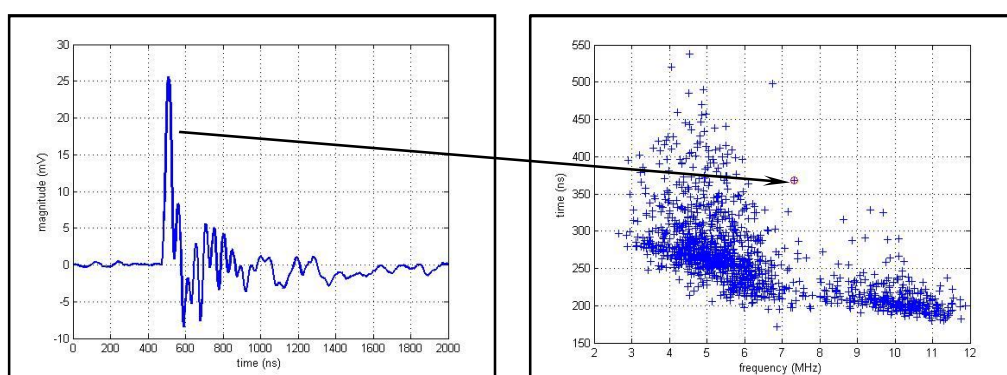


Figura 9.1(2): Collocazione del segnale nel diagramma tempo-frequenza
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

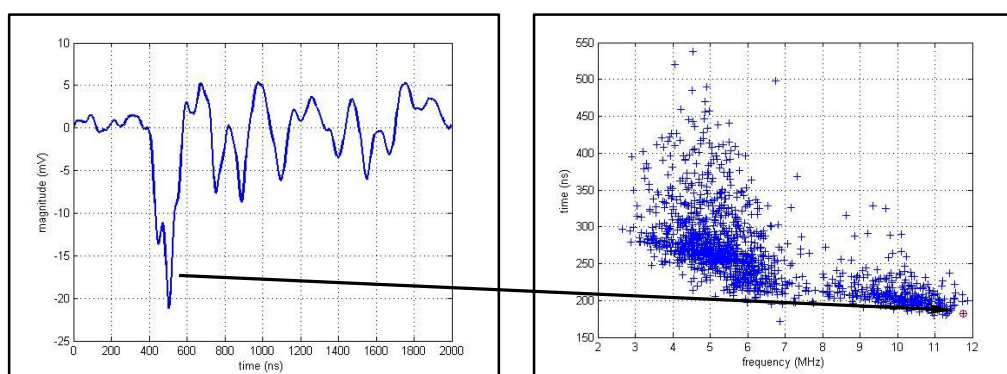


Figura 9.1(3): Collocazione del segnale nel diagramma tempo-frequenza
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

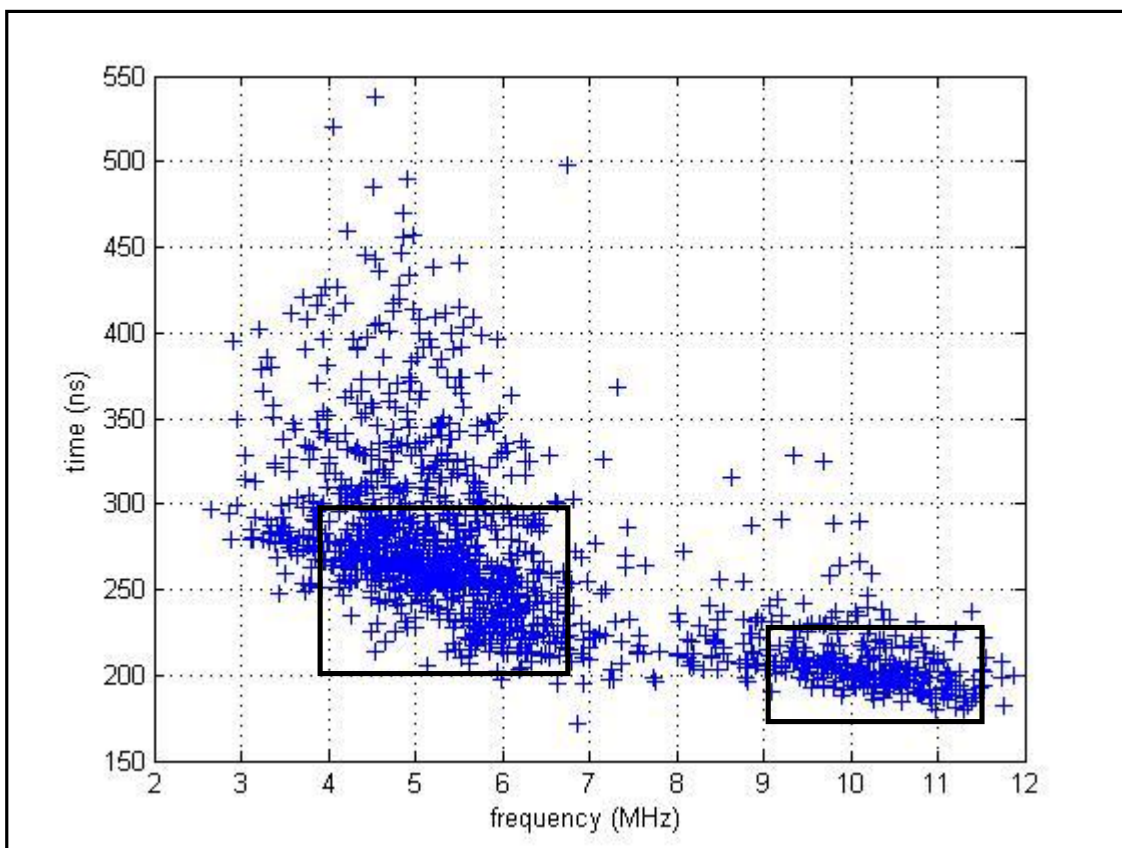


Figura 9.1(4): Esempio di diagramma tempo-frequenza
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

Come si può vedere dal diagramma tempo – frequenza proposto sopra, che è il medesimo delle figure 9.1(1), 9.1(2) e 9.1(3), esistono due famiglie di scariche parziali presenti e visualizzate tramite due rettangoli neri.

Vediamo infatti, come saltino all’occhio subito, osservando attentamente il pattern, i punti nei quali vi è una concentrazione maggiore di fenomeni impulsivi registrati.

Questo metodo “visivo” consente, in prima analisi, di discriminare manualmente le possibili famiglie di scariche parziali riportate nel pattern e costituisce una guida anche per quei software cosiddetti “esperti”, nei quali in ogni caso vi è la necessità dell’intervento di un operatore esterno per indirizzare l’analisi delle tipologie di fenomeni impulsivi acquisiti.

Come si può notare sarà difficile ad ogni modo discriminare nettamente le varie tipologie di scariche parziali in quanto molti segnali di diversa natura risultano graficamente vicini nel diagramma tempo – frequenza, generando problemi nella separazione delle varie costellazioni di segnali e aumentando di fatto l’imprecisione del metodo stesso.

9.2 ELABORAZIONE DELLE MISURE DI SCARICHE PARZIALI IN BANDA ULTRA LARGA SUI TRASFORMATORI MEDIANTE MATLAB®

Lo scopo principale di questo paragrafo è l'analisi dei pattern dei segnali acquisiti tramite il software PD Base 2®. I files sono stati convertiti dal formato *.pd2 al formato *.pdbw ed elaborati con il software PD Processing® nel capitolo precedente. In questo paragrafo analizzeremo i files convertiti dal formato *.pdbw al formato *.xlsx mediante l'utilizzo di routine Matlab® appositamente scritte. Le prove, dalle quali sono stati ricavati i pattern dei segnali, sono state eseguite su tre trasformatori, uno monofase e due trifasi. Le misure svolte a tal fine hanno consentito di accumulare maggiore esperienza in merito alla misura delle scariche parziali sui trasformatori isolati in resina epossidica tramite il sistema in banda ultra larga Techimp PD Base 2.

9.2.1 PROVE CONDOTTE SU DI UN TRASFORMATORE MONOFASE DA 220 kVA

Il trasformatore presenta le seguenti caratteristiche di targa:

- POTENZA NOMINALE 220 kVA
- TENSIONE PRIMARIA $6060 \pm 2 \cdot 2,5 \% V$
- TENSIONE SECONDARIA 260 V

I parametri d'acquisizione dei segnali nella prova in analisi sono riportati nella figura 9.2.1(1) qui sotto.

General Acquisition Parameters	
Pulses Acquired	1650
Samples per Segment	400
Sampling Time [ns]	5
BWL	25 MHz
Test Circuit	CCS
Voltage Amplitude [kV]	7,90
Voltage Frequency [Hz]	100,00
Acquisition Duration	19,98
Trigger Level	-0,008
Rev. Trigger Level	0,008

Figura 9.2.1(1): Parametri generali di acquisizione dei segnali
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

In base ai dati acquisiti ho costruito il diagramma ampiezza – fase e il diagramma tempo – frequenza dei segnali campionati, che propongo alle figure 9.2.1(2) e 9.2.1(3) sotto.

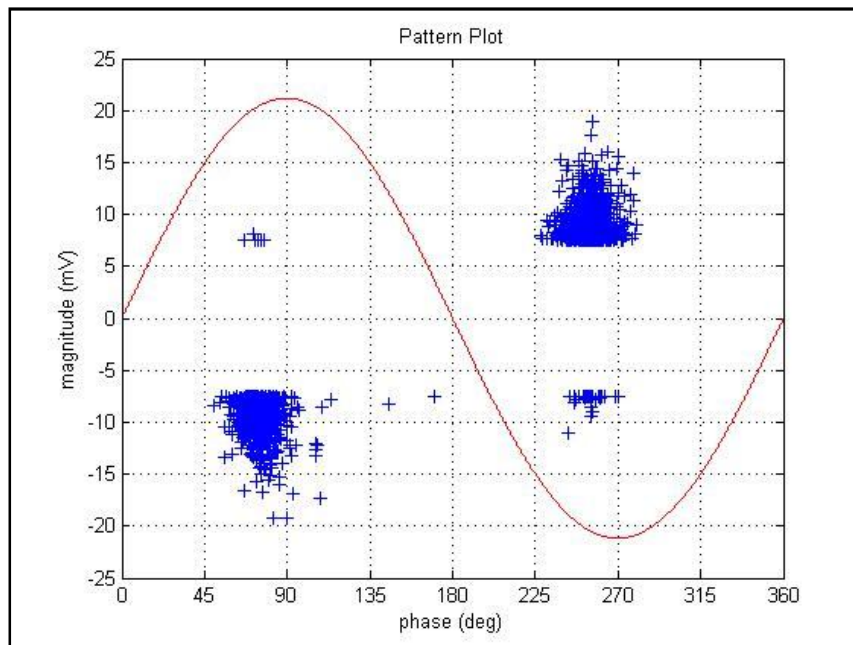


Figura 9.2.1(2): Diagramma ampiezza – fase dei segnali acquisiti
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

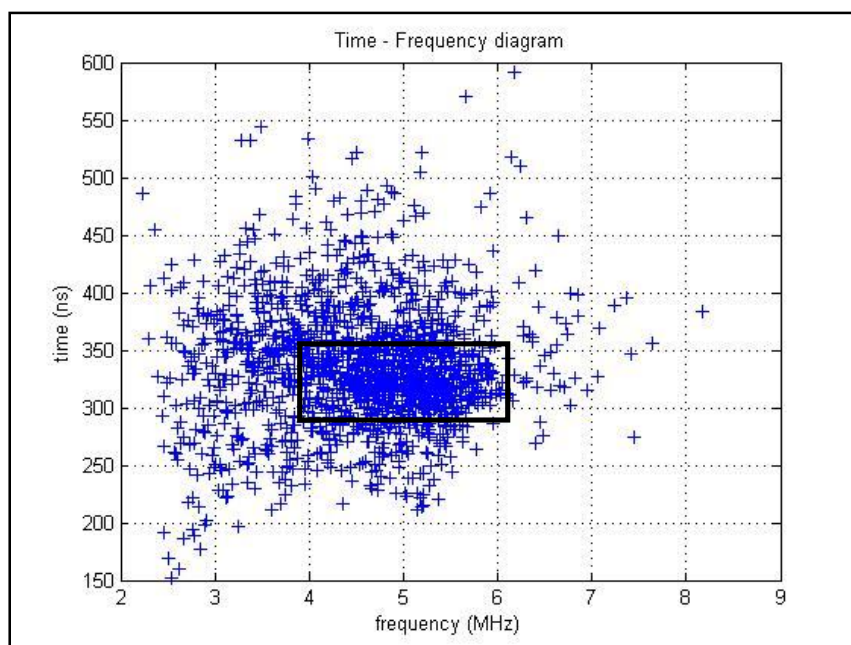


Figura 9.2.1(3): Diagramma tempo – frequenza dei segnali acquisiti
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Il diagramma ampiezza – fase ci mostra la possibile presenza di due tipologie di segnali centrati sulla stessa fase, ma di ampiezza e segno diversi.

Si può notare comunque che questi segnali si presentano praticamente tutti nel momento in cui si ha un aumento della tensione applicata all'oggetto in prova, sia esso negativo che positivo.

Come si può notare dal diagramma tempo – frequenza abbiamo una possibile famiglia di segnali omologhi concentrati nelle coordinate:

- Da 4 a 6 MHz
- Da 300 a 350 ns.

Andiamo ora ad analizzare più in dettaglio le forme d'onda dei fenomeni impulsivi sul diagramma tempo – frequenza, selezionando la famiglia di segnali omologhi già citata.

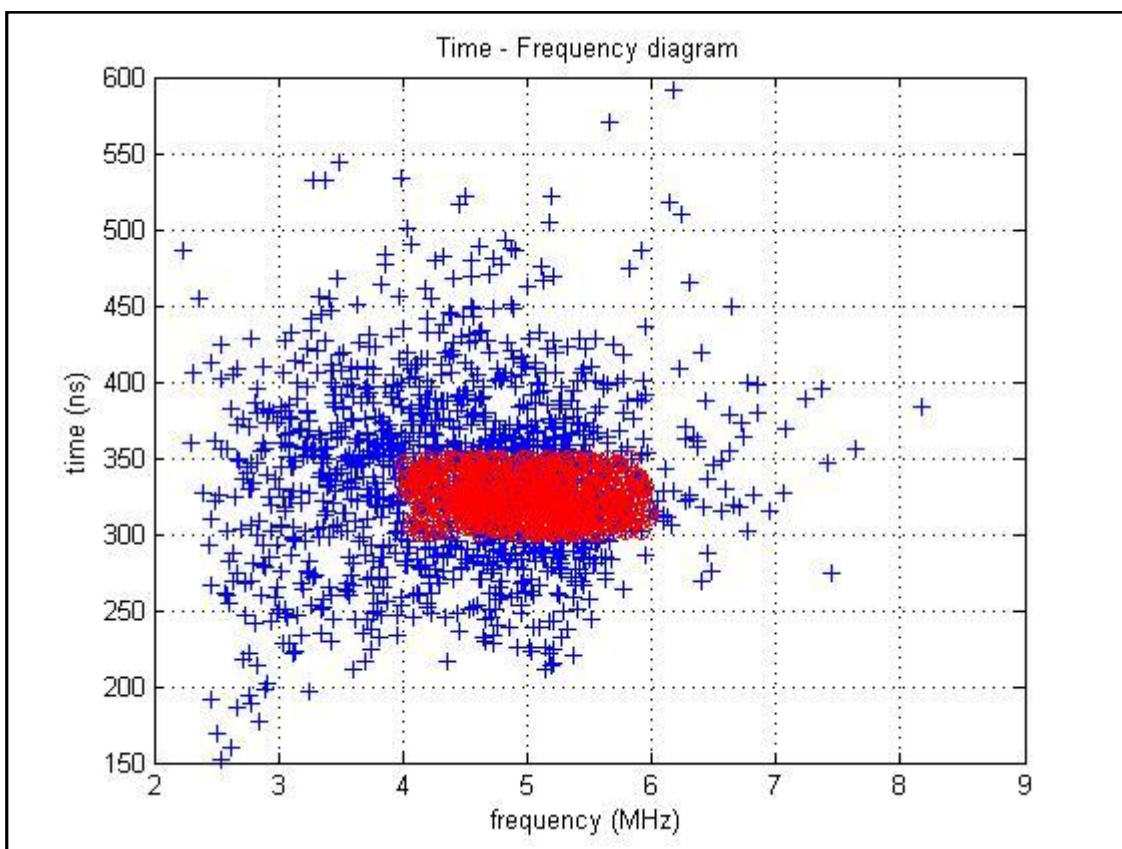


Figura 9.2.1(4): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

E' difficile ora selezionare su questo diagramma tempo – frequenza un segnale singolo per verificarne la forma d'onda, proviamo allora ad utilizzare il diagramma ampiezza – fase e andiamo a selezionare le due tipologie di segnale che si possono osservare anche nella figura 9.2.1(1).

Come abbiamo già detto i segnali acquisiti sono centrati tutti tra le fasi 45° e 90° a diversa ampiezza.

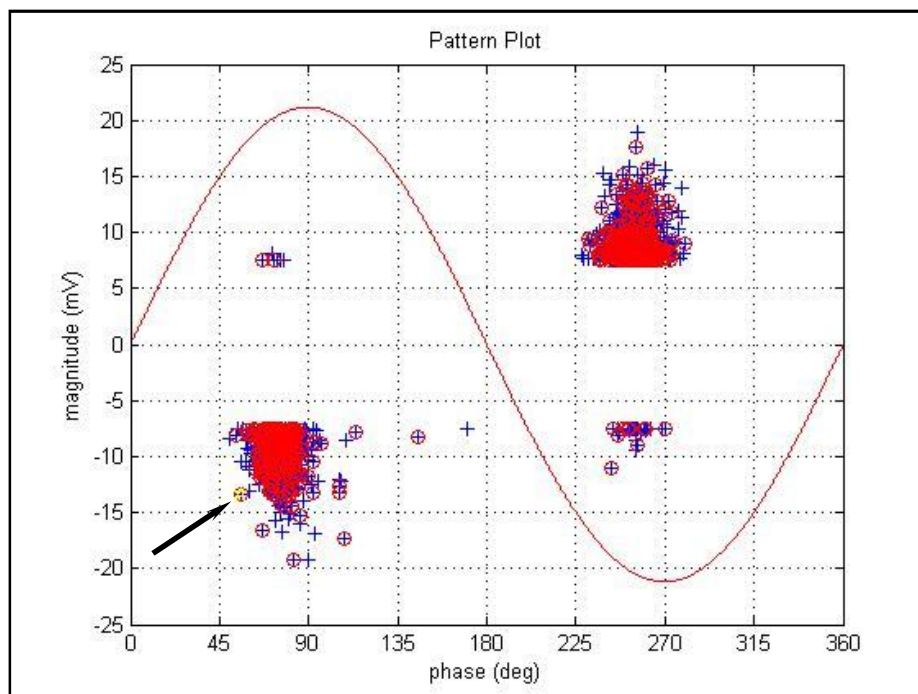


Figura 9.2.1(5): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

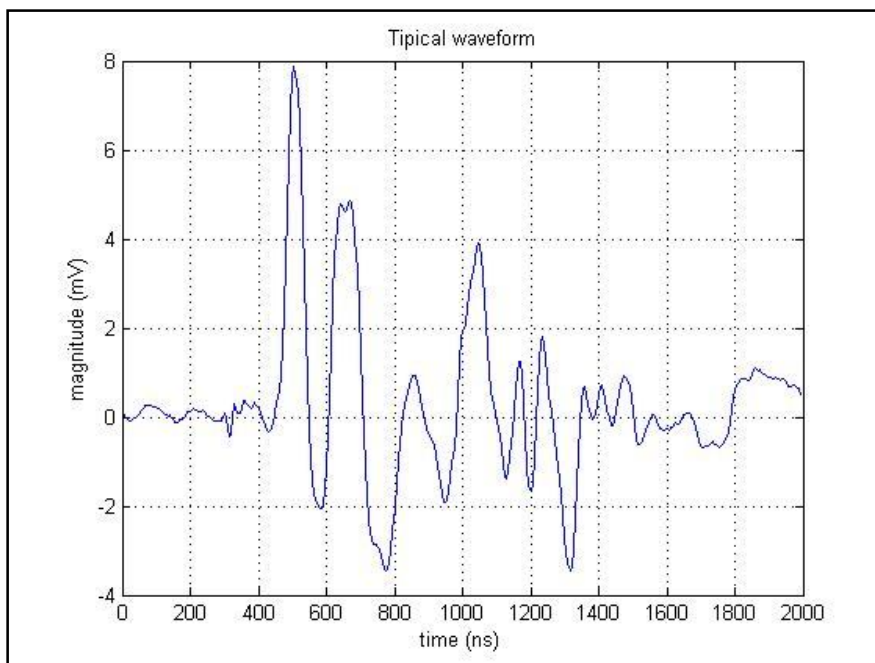


Figura 9.2.1(6): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare che il segnale è estremamente oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

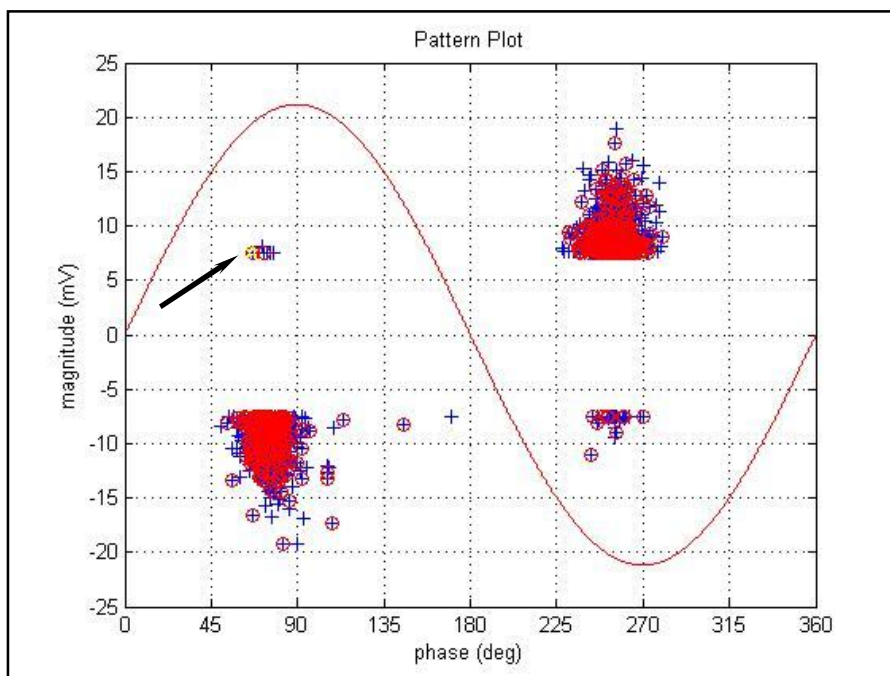


Figura 9.2.1(7): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

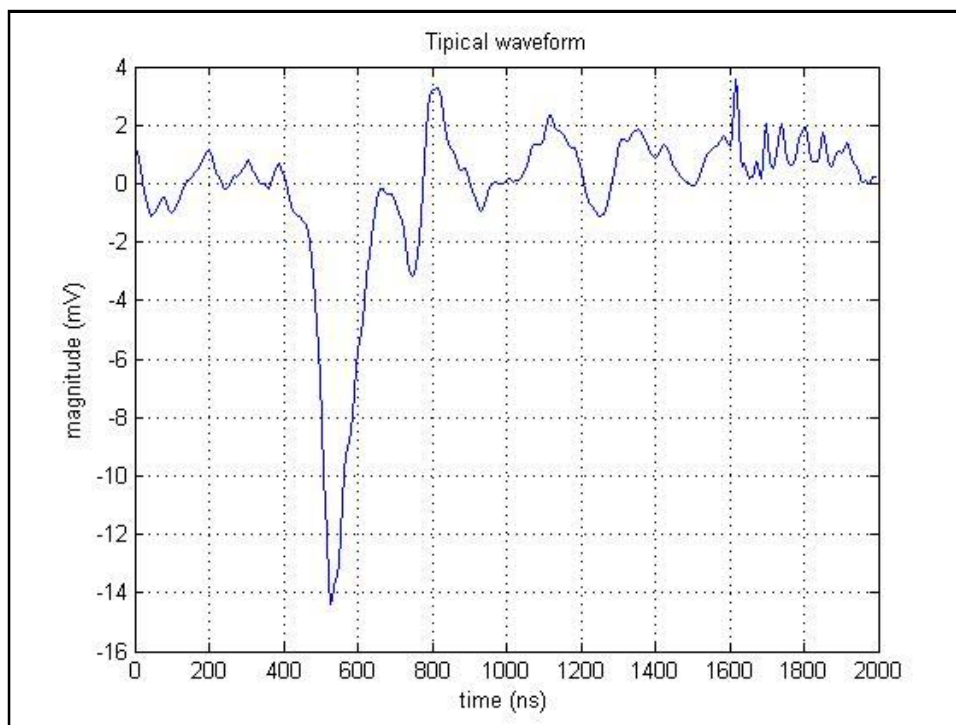


Figura 9.2.1(8): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare che il segnale è un impulso negativo non particolarmente oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

Abbiamo verificato, usando il diagramma ampiezza – fase, la presenza di due tipologie di segnali, entrambe centrate sulla stessa fase, ma di natura diversa e segno diverso. Possiamo dire che il segnale visualizzato nella figura 9.2.1(5) è estremamente oscillante e questo può portarci a pensare che esso sia stato distorto dalla funzione di trasferimento che sta tra il punto d'origine del fenomeno e il punto di rilevazione del medesimo. Diversamente da quanto detto il fenomeno impulsivo plottato alla figura 9.2.1(7) non è gran ché oscillante e presenta polarità opposta rispetto al segnale già analizzato. Quest'ultimo fenomeno impulsivo si presume non essere proveniente da un punto d'origine distante dal punto di acquisizione del segnale stesso, poiché altrimenti sarebbe stato un fenomeno molto più oscillante. Si può comunque osservare che entrambi i segnali non somigliano per niente all'impulso di calibrazione, pertanto difficilmente si potrà supporre che la sorgente di scarica sia esterna all'avvolgimento.

9.2.2 PROVE CONDOTTE SU DI UN TRASFORMATORE TRIFASE DA 400 kVA

Il trasformatore presenta le seguenti caratteristiche di targa:

- POTENZA NOMINALE 400 kVA
- TENSIONE PRIMARIA $20000 \pm 2 \cdot 2,5 \% \text{ V}$
- TENSIONE SECONDARIA 410 V

I parametri d'acquisizione dei segnali nella prova in analisi sono riportati nella figura 9.2.2(1) qui sotto.

General Acquisition Parameters	
Pulses Acquired	3814
Samples per Segment	200
Sampling Time [ns]	5
BWL	25 MHz
Test Circuit	CCS
Voltage Amplitude [kV]	30,11
Voltage Frequency [Hz]	100,10
Acquisition Duration	19,98
Trigger Level	-0,055
Rev. Trigger Level	0,055

Figura 9.2.2(1): Parametri generali di acquisizione dei segnali
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

Ricordando che i dati raccolti sono stati ottenuti da una misura di scariche parziali sul trasformatore in questione con triangolo inserito, andiamo ad osservare il diagramma tempo – frequenza riportato nella figura 9.2.2(2).

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

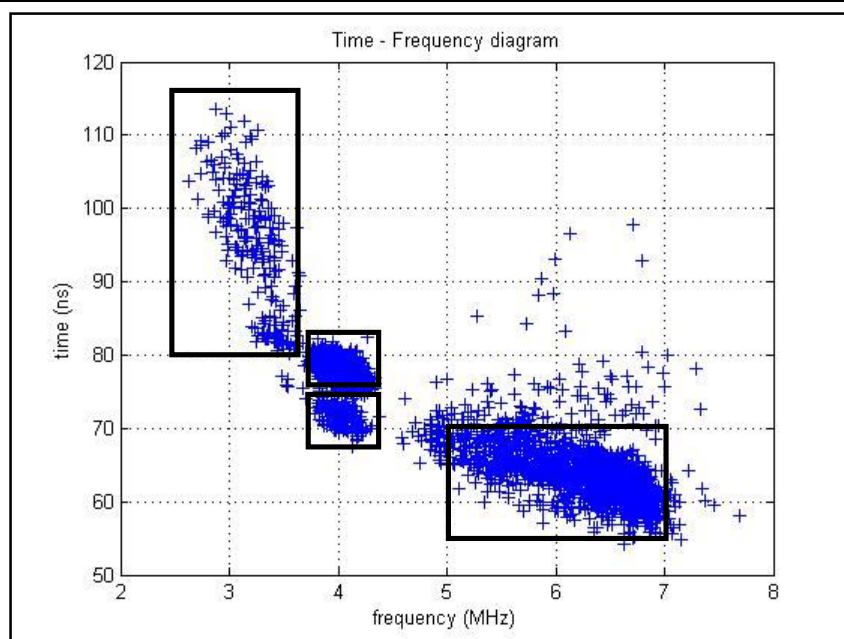


Figura 9.2.2(2): Diagramma tempo – frequenza dei segnali acquisiti
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

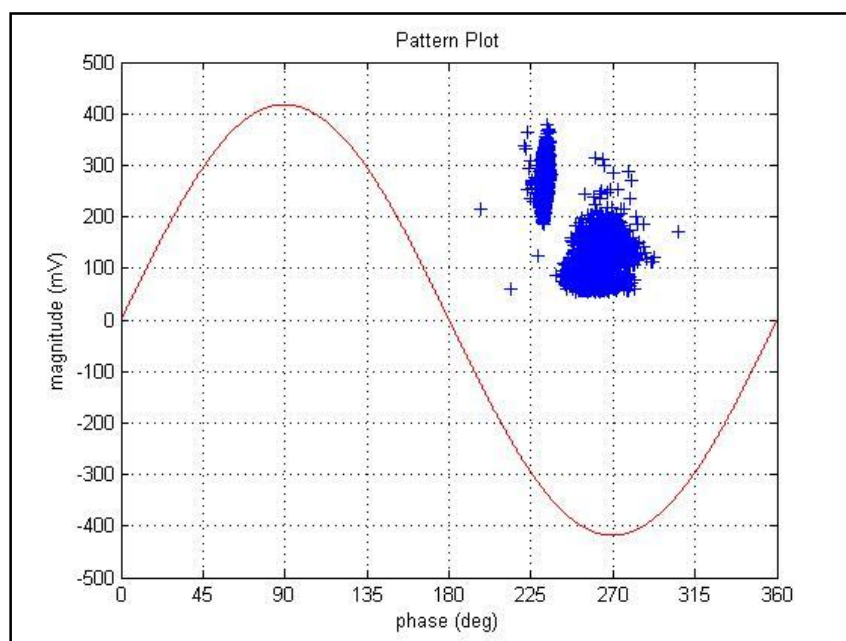


Figura 9.2.2(3): Diagramma ampiezza – fase dei segnali acquisiti
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

Come si può notare da quest'ultimo grafico ampiezza – fase, i segnali acquisiti sono stati rilevati tutti durante la semionda negativa della tensione d'alimentazione di prova.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Osservando attentamente il diagramma tempo – frequenza alla figura 9.2.2(2) si possono osservare 4 gruppi di segnali omologhi che sono stati segnalati da un riquadro nero.

Il diagramma ampiezza – fase alla figura 9.2.2(3), invece sembra mettere in evidenza la presenza di sole due tipologie di fenomeni impulsivi.

Proviamo ad analizzare le forme d'onda degli impulsi acquisiti del gruppo costituito dai segnali compresi nelle coordinate:

- Da 5 a 7 MHz
- Da 55 a 70 ns.

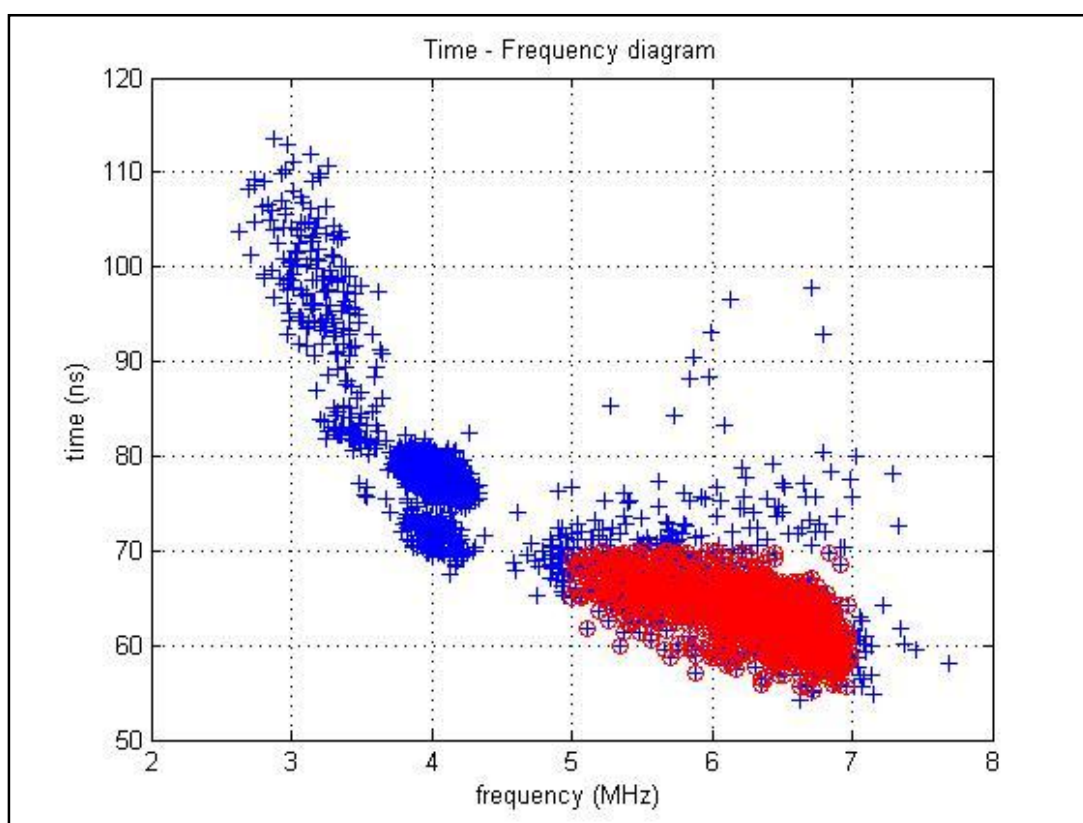


Figura 9.2.2(4): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

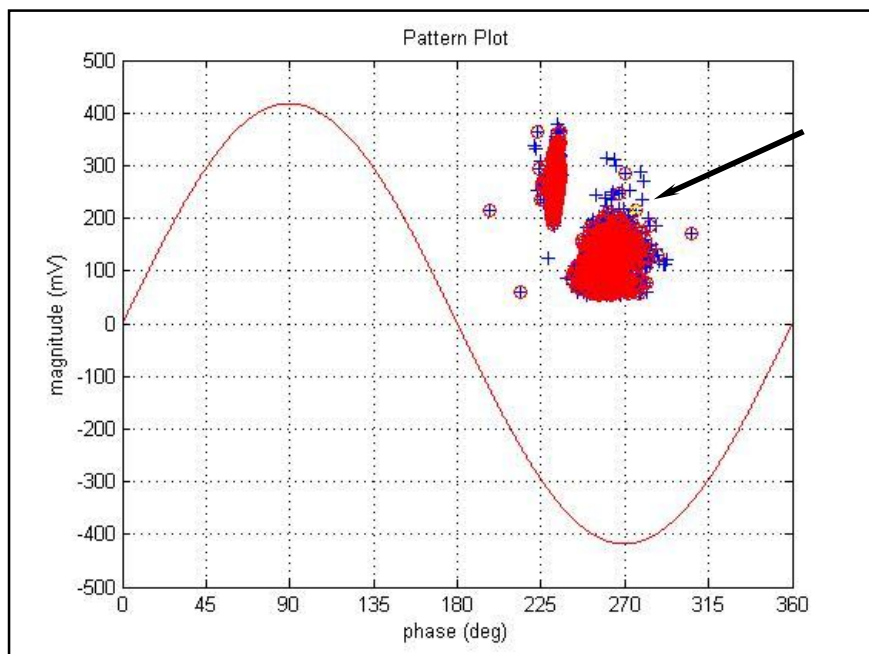


Figura 9.2.2(5): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

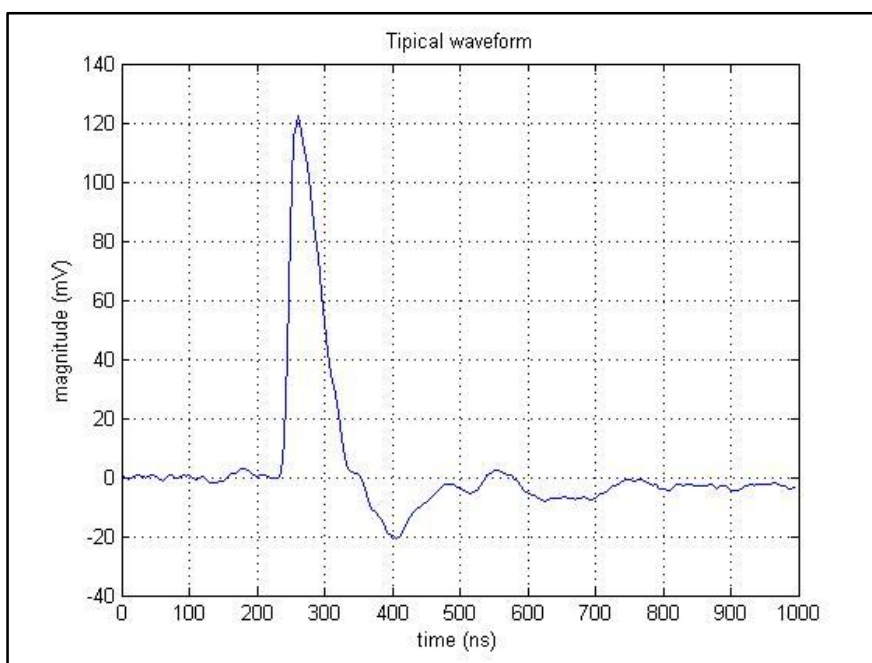


Figura 9.2.2(6): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare come il segnale somigli all'impulso di calibrazione e non sia oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Il grafico di figura 9.2.2(5) mette in evidenza come l'ipotesi di avere quattro tipologie di fenomeni impulsivi sia errata in quanto la maggior parte dei segnali presenti su tale diagramma è stata compresa nel gruppo selezionato.

Il segnale individuato tramite la ricerca selettiva, eseguita dalle routine Matlab[®] scritte per il caso, non è oscillante e somiglia all'impulso di calibrazione come si vede nella figura 9.2.2(6), indice di una provenienza esterna rispetto all'avvolgimento.

Andiamo ora a selezionare un secondo segnale dello stesso gruppo, ma con fase inferiore, per vedere se la forma d'onda differisce molto da quella dell'impulso alla figura 9.2.2(6).

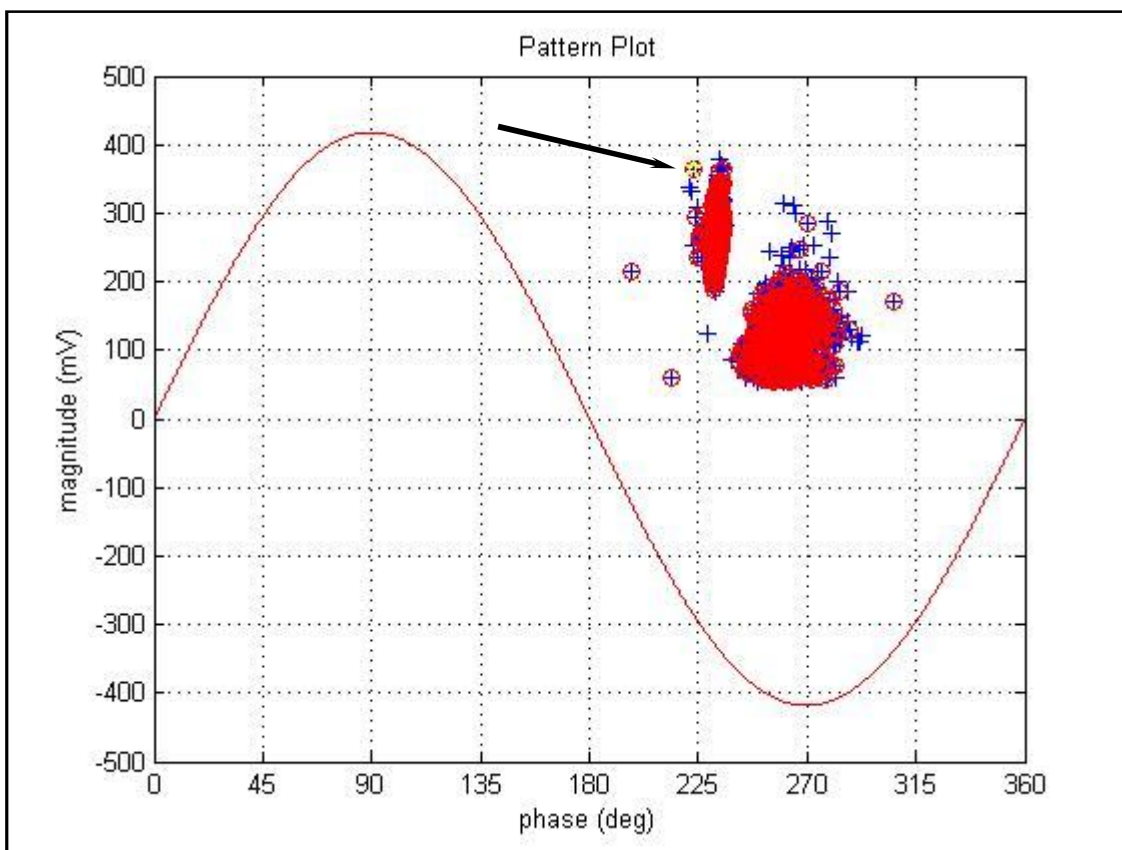


Figura 9.2.2(7): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab[®] - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

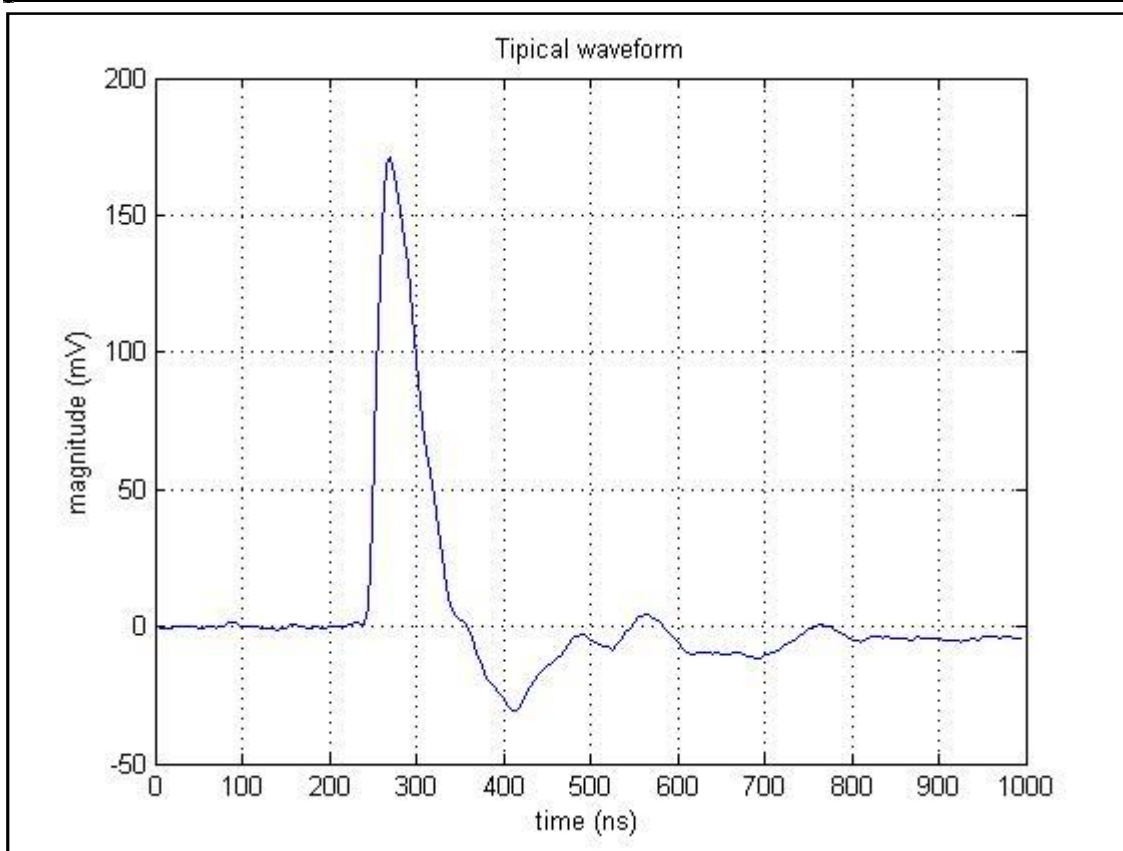


Figura 9.2.2(8): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare come il segnale somigli all'impulso di calibrazione e non sia oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

Come si può notare dalla figura 9.2.2(8) il segnale selezionato risulta essere non oscillante somigliante all'impulso di calibrazione.

Questo segnale, se messo in confronto con il segnale alla figura 9.2.2(6) è praticamente identico nella forma, tuttavia presenta un'ampiezza maggiore di circa 50 mV.

Molto probabilmente esiste un'unica famiglia di fenomeni impulsivi tra quelli appartenenti al gruppo selezionato.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Andiamo ad analizzare ora il gruppo di segnali con coordinate:

- Da 3.6 a 4.4 MHz
- Da 65 a 75 ns.

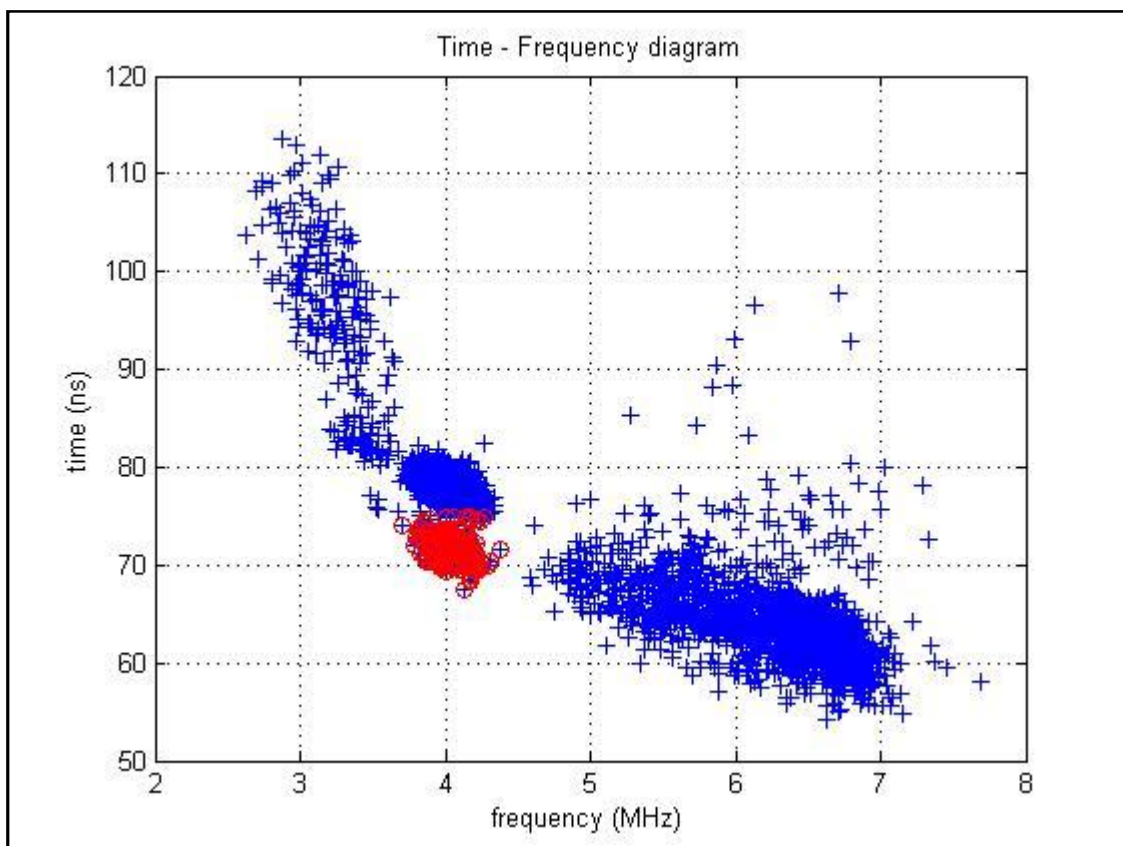


Figura 9.2.2(9): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Andiamo ora a tracciare il diagramma ampiezza – fase e ad selezionare il segnale che rappresenta il gruppo selezionato.

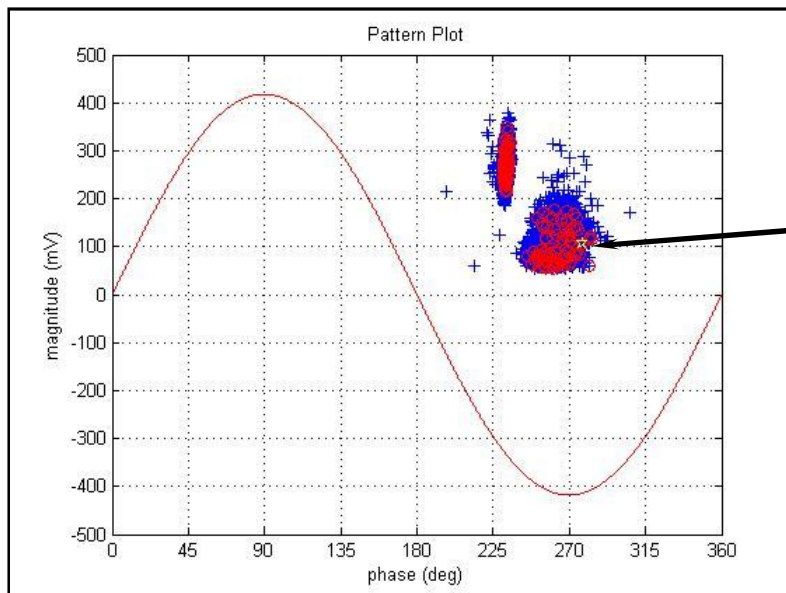


Figura 9.2.2(10): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

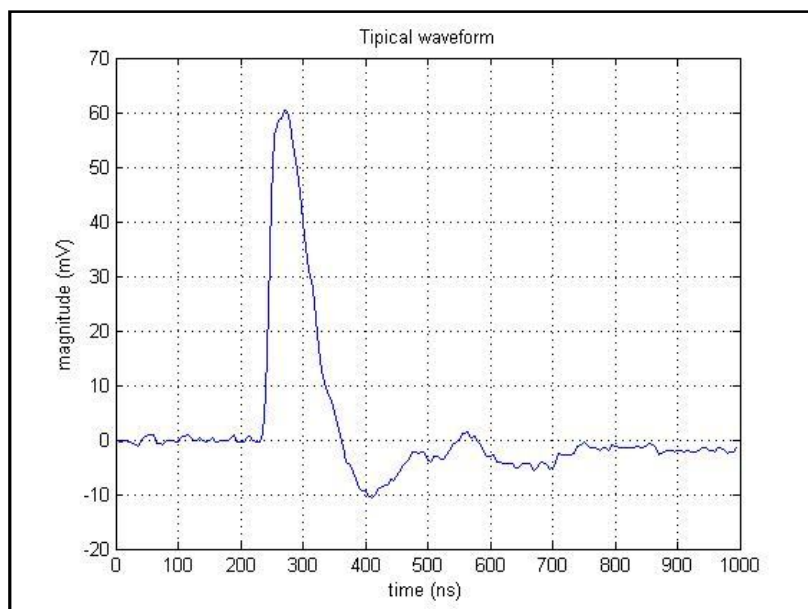


Figura 9.2.2(11): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare come il segnale somigli all'impulso di calibrazione e non sia oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Come si può vedere il gruppo che è stato analizzato presenta segnali omologhi al gruppo di impulsi analizzati precedentemente, quindi possiamo escludere sin d'ora che ci sia la presenza di quattro famiglie di fenomeni impulsivi diversi.

Vediamo ora il terzo gruppo selezionato caratterizzato dall'aver frequenza compresa fra 3.6 e 4.4 MHz e tempo compreso fra 76 e 83 ns.

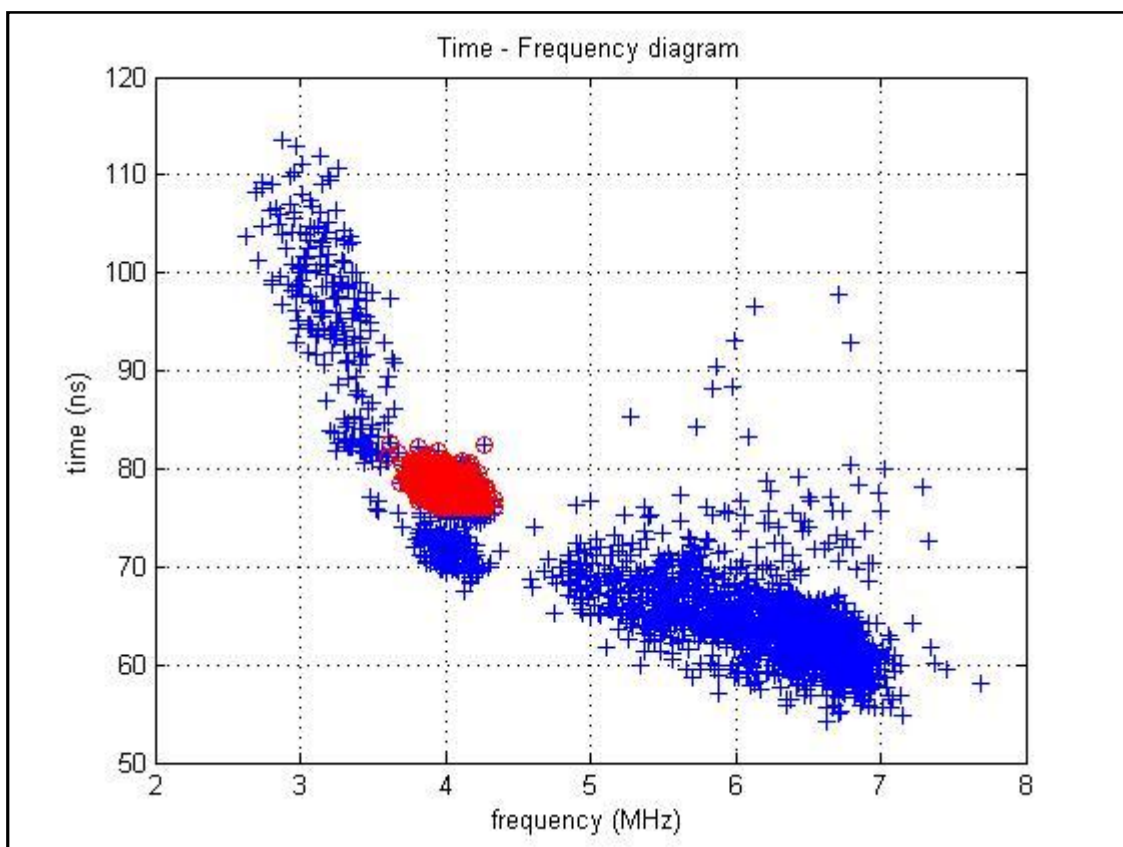


Figura 9.2.2(12): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

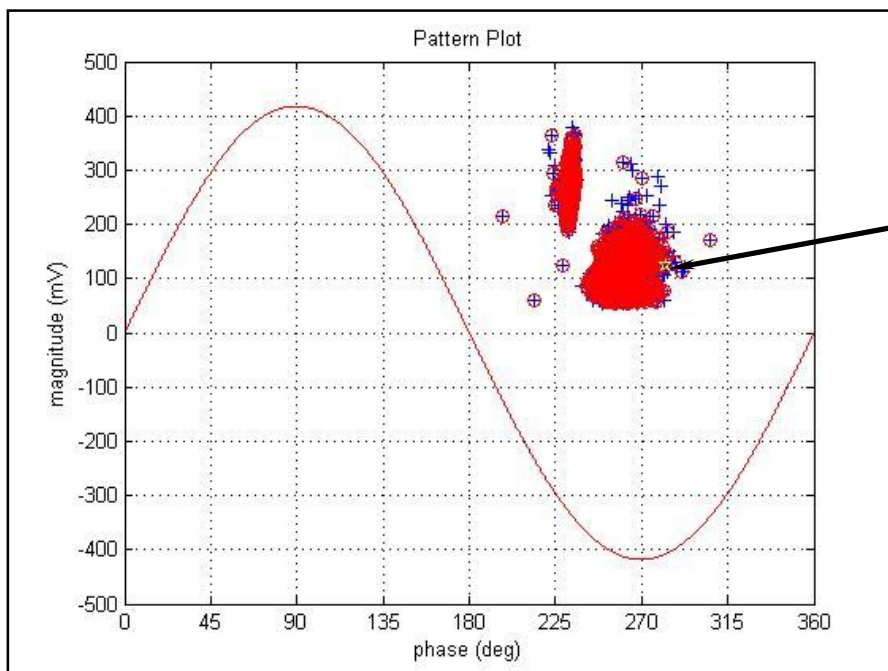


Figura 9.2.2(13): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

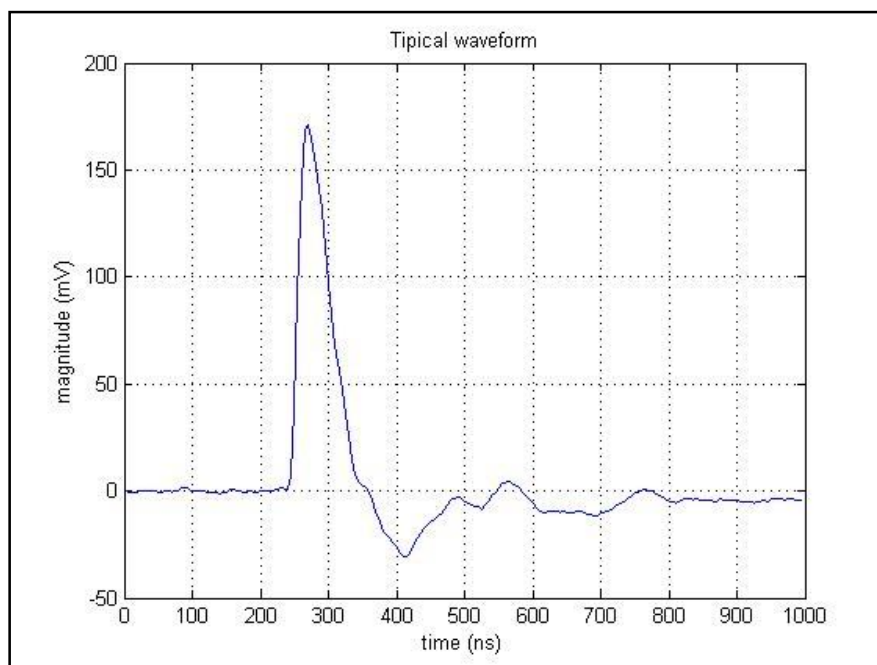


Figura 9.2.2(14): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare come il segnale somigli all'impulso di calibrazione e non sia oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Purtroppo anche questo gruppo risulta avere segnali omologhi ai precedenti e quindi ci permette di stabilire che le famiglie di segnali diversi non sono tre, ma al massimo due. Non ci resta che analizzare la forma d'onda di uno degli impulsi acquisiti del quarto gruppo per vedere se almeno questo presenta caratteristiche diverse rispetto a quelli già visualizzati.

La quarta famiglia che abbiamo scelto sul diagramma tempo – frequenza ha le seguenti coordinate:

- Da 2.5 a 3.5 MHz
- Da 80 a 120 ns.

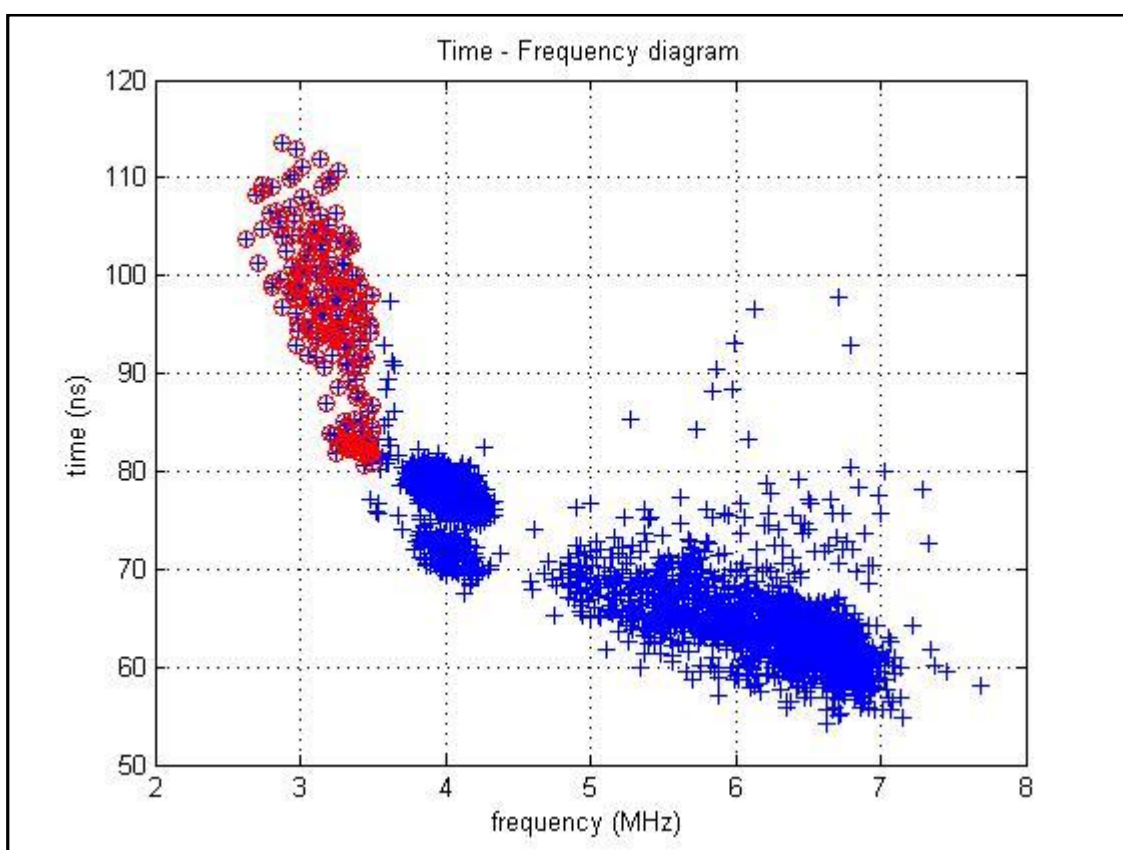


Figura 9.2.2(15): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

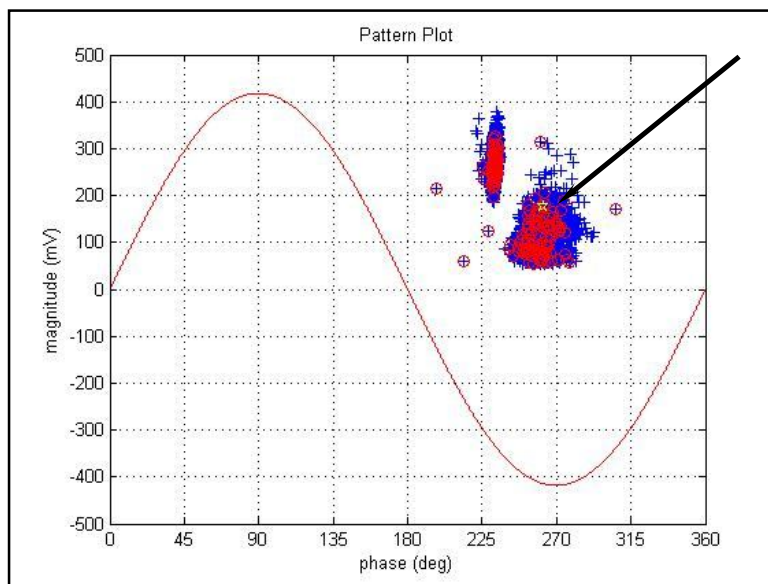


Figura 9.2.2(16): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

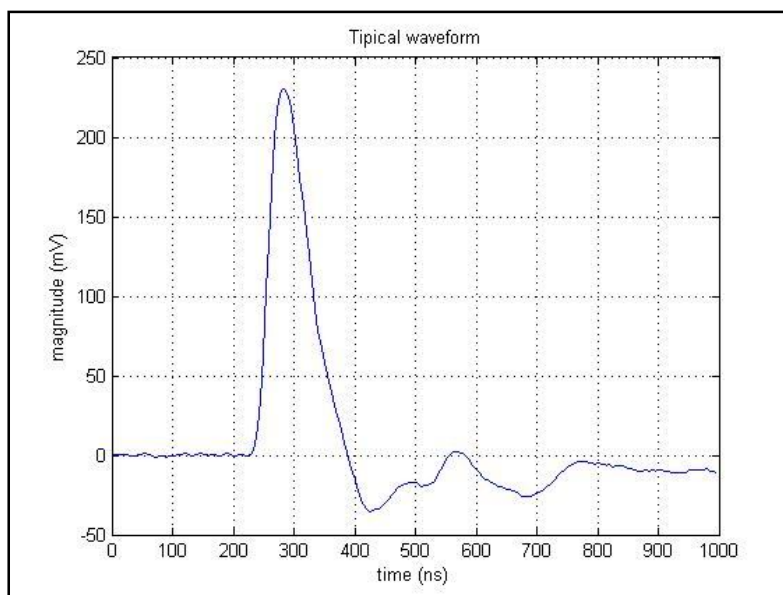


Figura 9.2.2(17): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare come il segnale somigli all'impulso di calibrazione e non sia oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

Come si può notare il pattern presenta infine una sola tipologia di fenomeni impulsivi somiglianti all'impulso di calibrazione ma tutti con ampiezze diverse.

9.2.3 PROVE CONDOTTE SU DI UN TRASFORMATORE TRIFASE DA 315 kVA

I dati di targa principali del trasformatore sono:

- POTENZA NOMINALE 315 kVA
- TENSIONE PRIMARIA $20000 \pm 2 \cdot 2,5 \% \text{ V}$
- TENSIONE SECONDARIA 400 V

I parametri d'acquisizione dei segnali nella prova in analisi sono riportati nella figura 9.2.3(1) qui sotto.

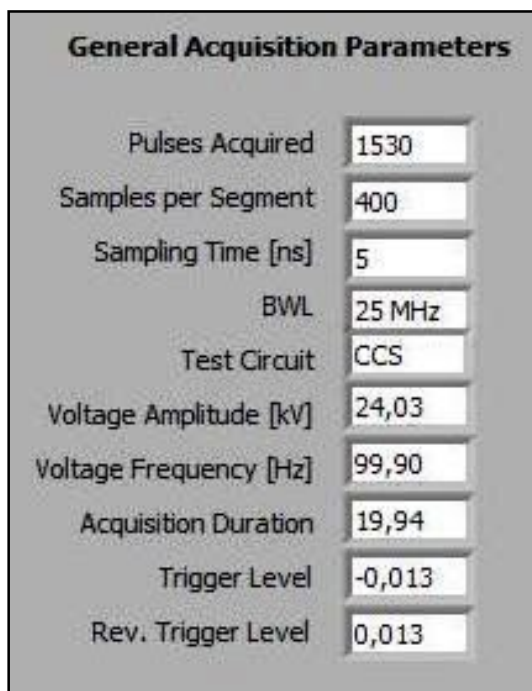


Figura 9.2.3(1): Parametri generali d'acquisizione dei segnali
Fonte: Elaborazione PDProcessing® - Bottega Luca

Andiamo ora ad analizzare diversi pattern di segnali acquisiti con le prove eseguite per la misura delle scariche parziali.

Partiamo visualizzando il primo diagramma tempo – frequenza che si può ricavare.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

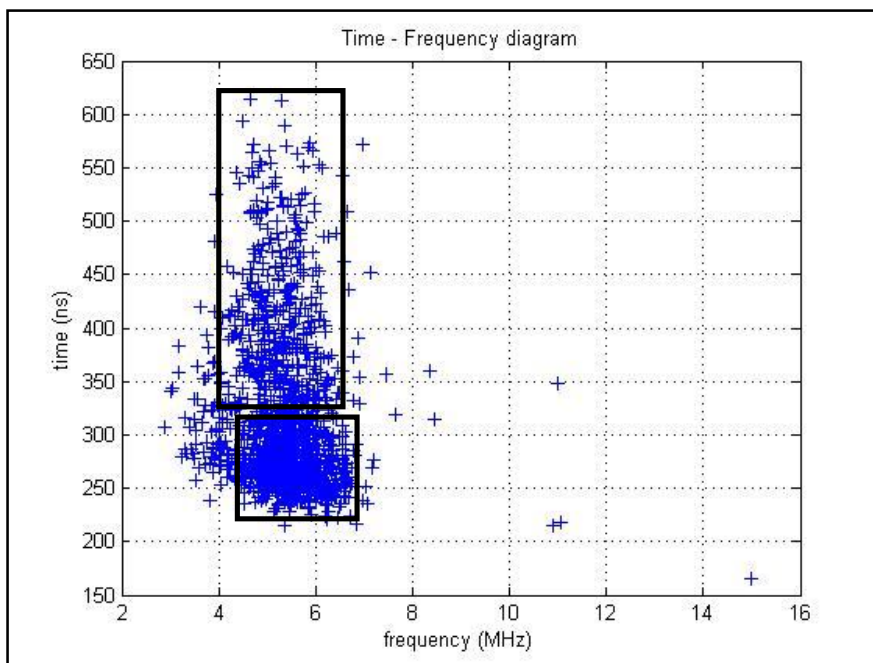


Figura 9.2.3(2): Diagramma tempo – frequenza dei segnali acquisiti
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

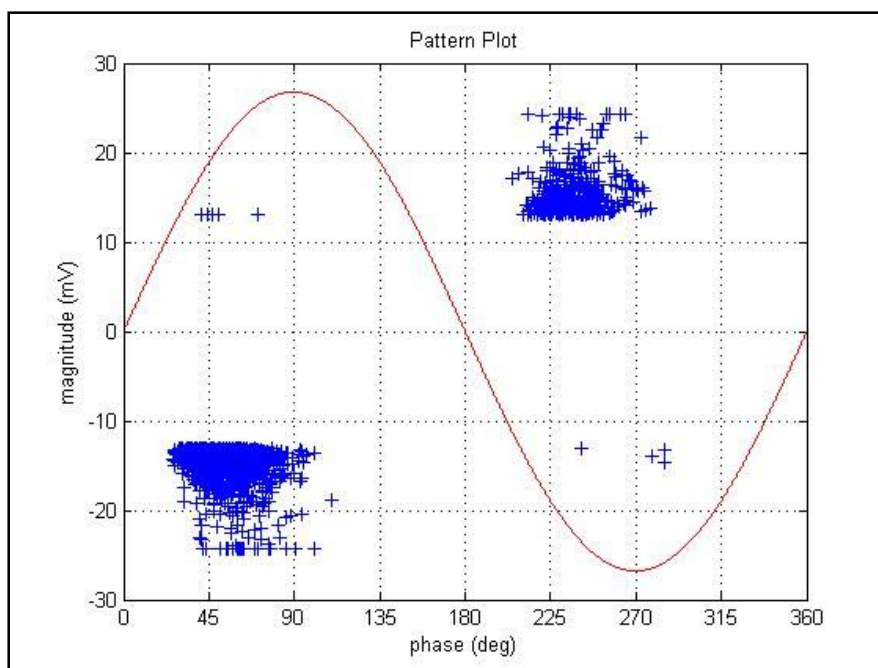


Figura 9.2.3(3): Diagramma ampiezza – fase dei segnali acquisiti
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Come possiamo vedere dal diagramma tempo – frequenza le probabili famiglie di fenomeni impulsivi sono due, anche se una sembra avere una concentrazione di segnali maggiore rispetto all'altra. L'interesse è sempre quello di visualizzare la forma d'onda dei segnali selezionati per poterli confrontare e per poter disquisire su di essi. Analizziamo dunque il gruppo di segnali che ha le seguenti caratteristiche:

- Da 4 a 7 MHz;
- Da 225 a 325 ns.

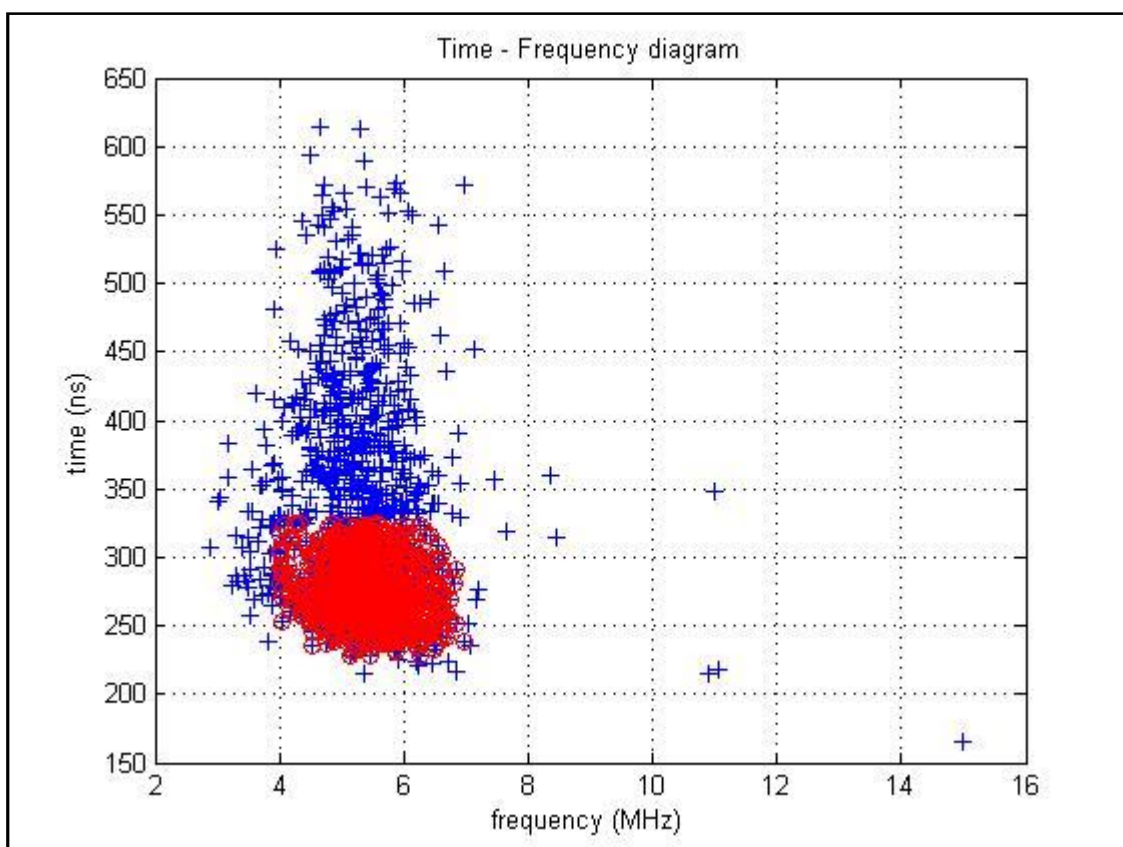


Figura 9.2.3(4): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

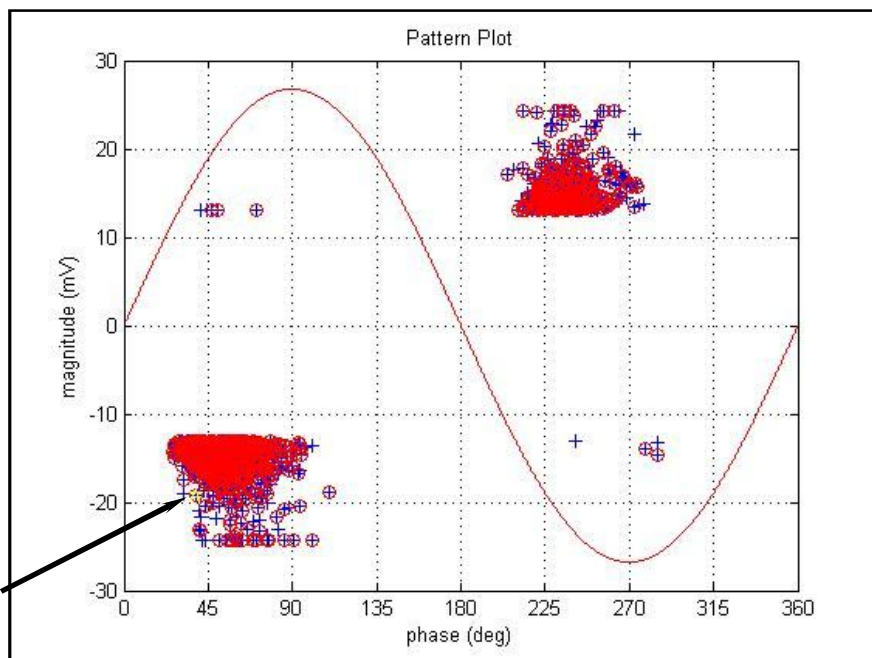


Figura 9.2.3(5): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

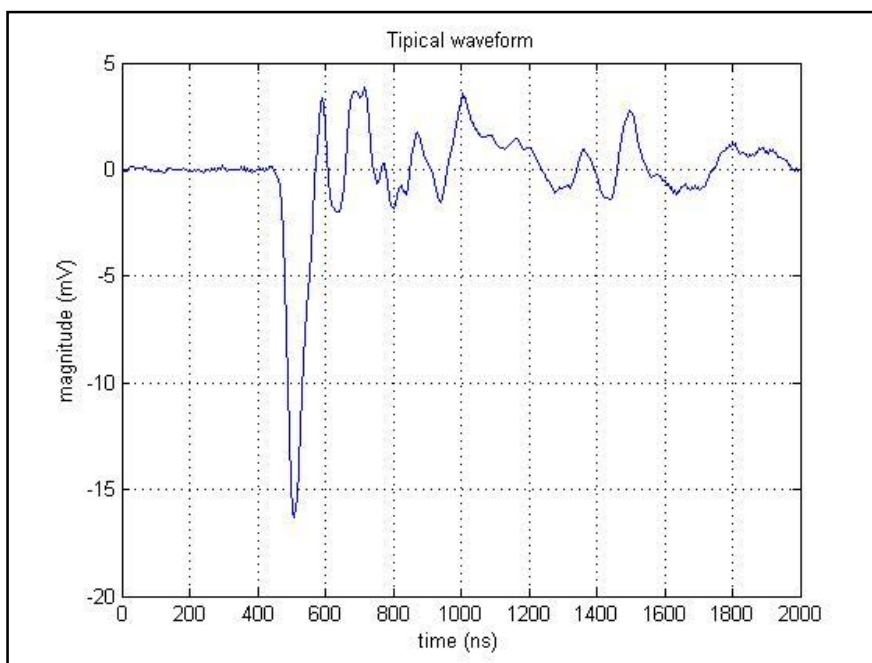


Figura 9.2.3(6): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare come il segnale abbia polarità negativa e poco oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Vediamo che il segnale visualizzato ha polarità negativa e non è molto oscillante, pertanto possiamo pensare che la sorgente di tale fenomeno si trovi non distante dal terminale di misura, quindi all'interno della bobina del trasformatore.

Andiamo ora a vedere la forma d'onda dei segnali dell'altra famiglia individuata nella figura 9.2.3(2) .

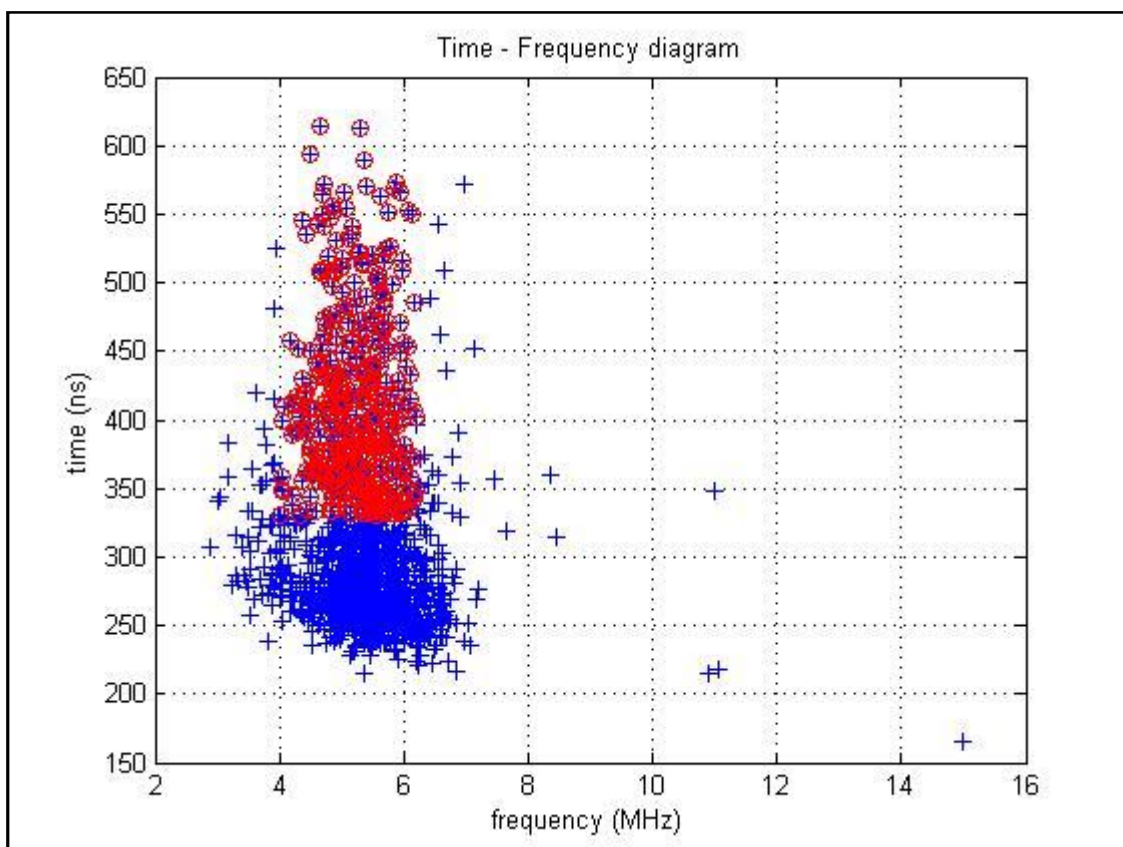


Figura 9.2.3(7): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
Si può notare che i segnali selezionati sono più dispersi rispetto alla famiglia già analizzata
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

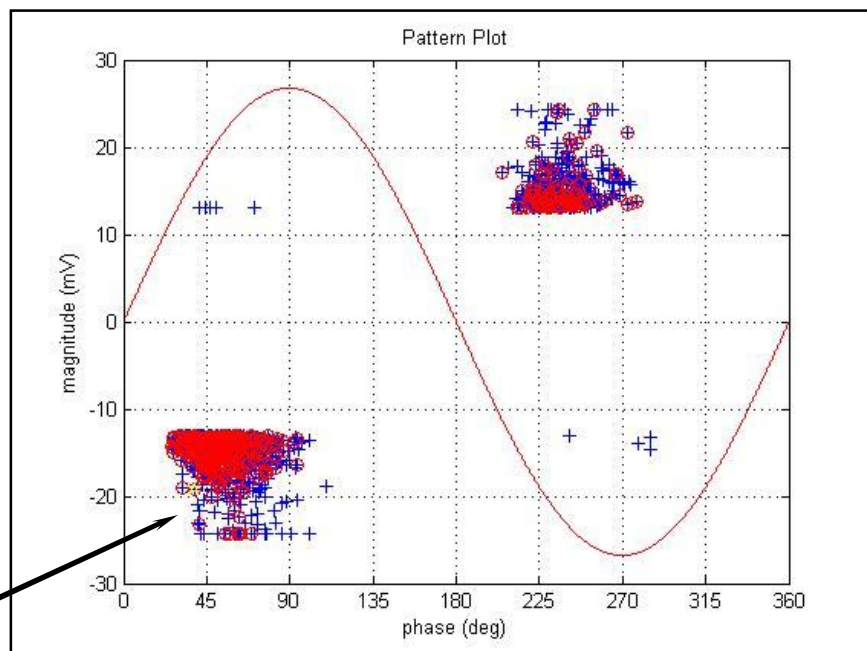


Figura 9.2.3(8): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

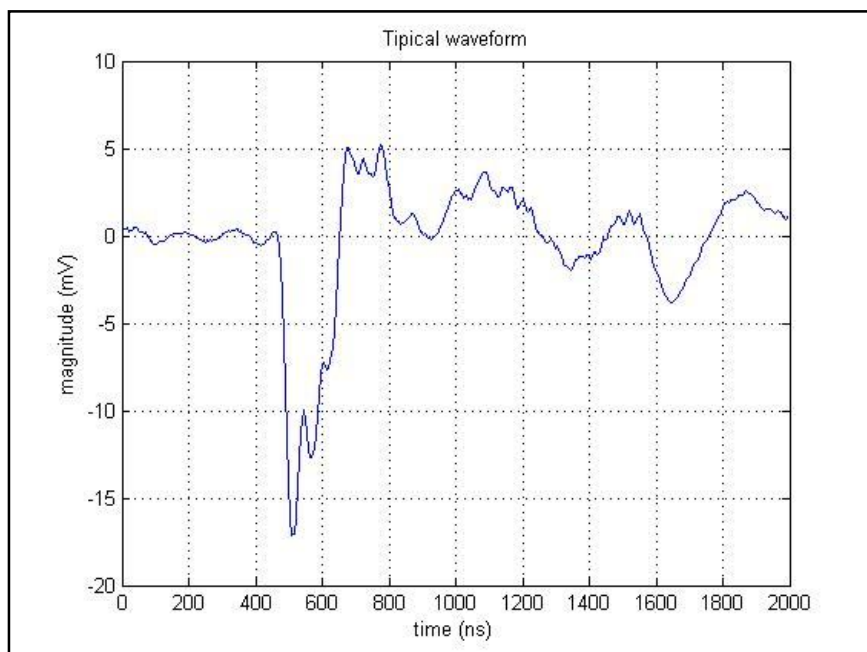


Figura 9.2.3(9): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Si può notare come il segnale abbia polarità negativa e sia poco oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Come possiamo notare l'impulso visualizzato nella figura 9.2.3(9) ha la stessa ampiezza e la stessa forma d'onda dell'impulso relativo alla figura 9.2.3(6), tuttavia presenta una durata leggermente maggiore e un contenuto armonico decisamente più elevato.

Non si può comunque concludere che siano fenomeni impulsivi diversi, pertanto in prima ipotesi diciamo che la tipologia dei segnali è unica.

Sarà sicuramente presente del rumore di fondo abbastanza intenso che produce segnali rilevati nel pattern insieme ai segnali di scarica parziale.

Proviamo ora ad analizzare i dati relativi ad un'altra acquisizione eseguita sul medesimo trasformatore, il cui diagramma tempo – frequenza è visualizzato nella figura 9.2.3(10) .

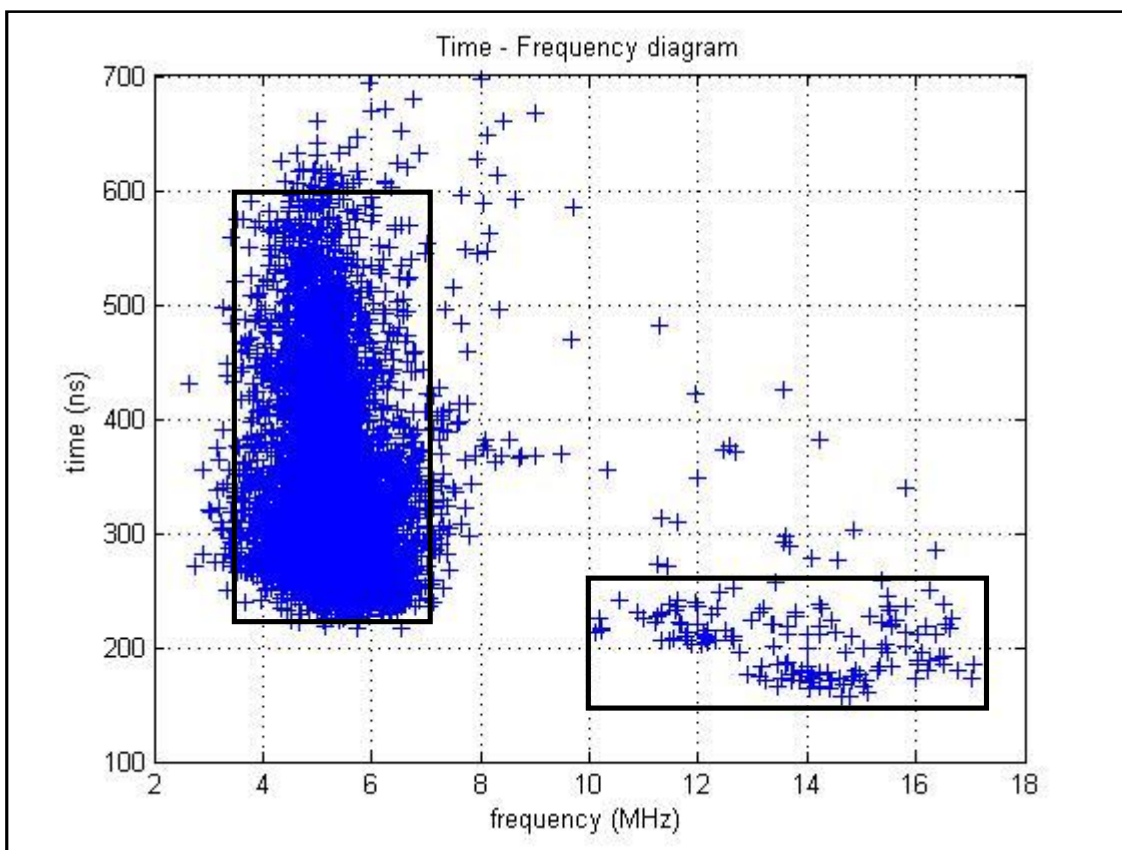


Figura 9.2.3(10): Diagramma tempo – frequenza dei segnali acquisiti
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

Osservando il diagramma tempo – frequenza sopra riportato possiamo individuare due famiglie di segnali e andare ad analizzarle.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

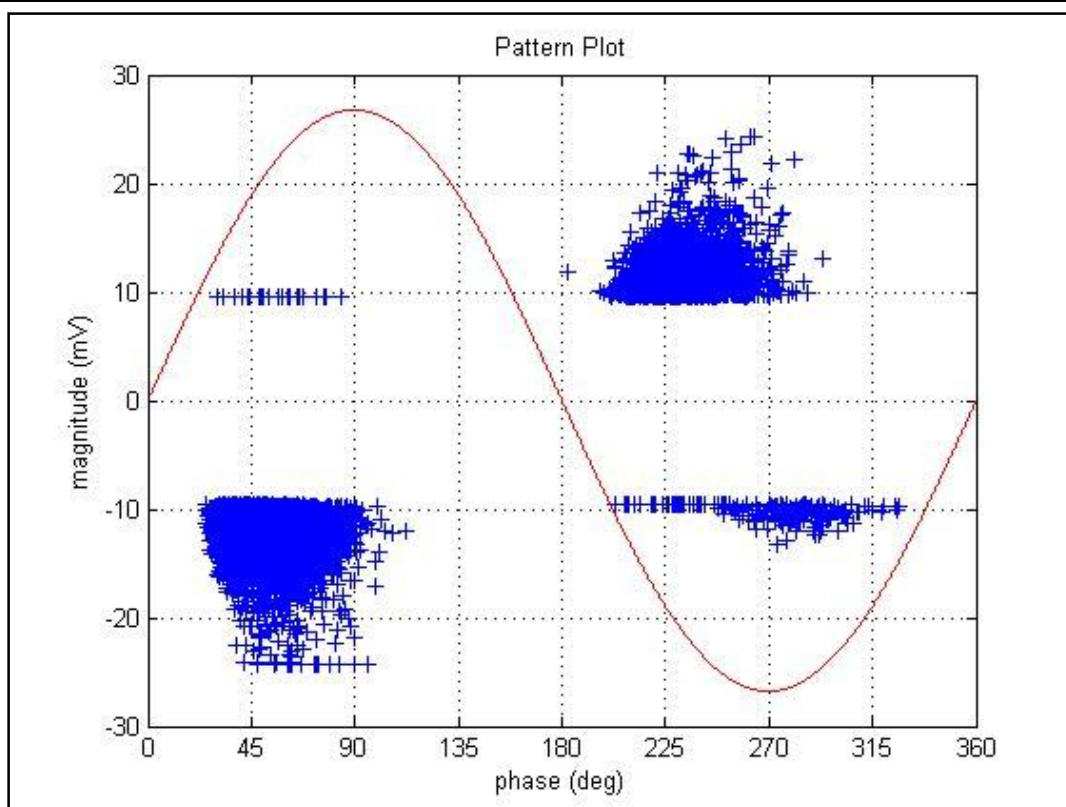


Figura 9.2.3(11): Diagramma ampiezza – fase dei segnali acquisiti
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

Analizzando il pattern dei segnali proposto alla figura 9.2.3(11) possiamo notare come i fenomeni impulsivi siano concentrati su angoli di fase caratterizzati da una tensione d'alimentazione crescente.

Essi inoltre sono presenti in entrambe le semionde e rappresentano dei fenomeni simmetrici.

Andiamo ora a vedere quali sono le forme d'onda dei segnali delle due famiglie.

La prima famiglia caratterizzata dalle coordinate:

- Da 3 a 7 MHz
- Da 220 a 300 ns.

La seconda famiglia caratterizzata dalle coordinate:

- Da 10 a 17 MHz
- Da 150 a 250 ns.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

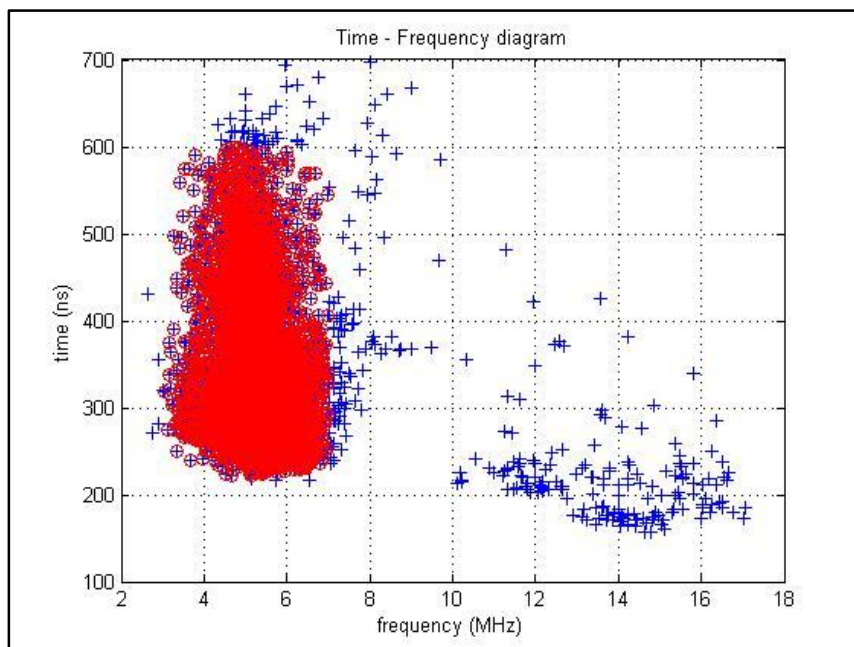


Figura 9.2.3(12): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
E' interessante evidenziare la grossa concentrazione dei segnali in questo gruppo
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

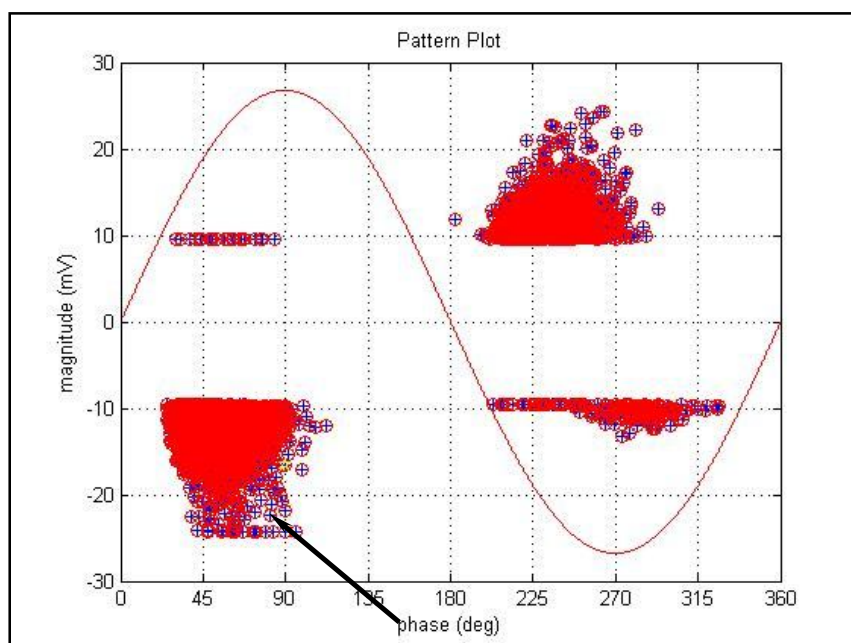


Figura 9.2.3(13): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

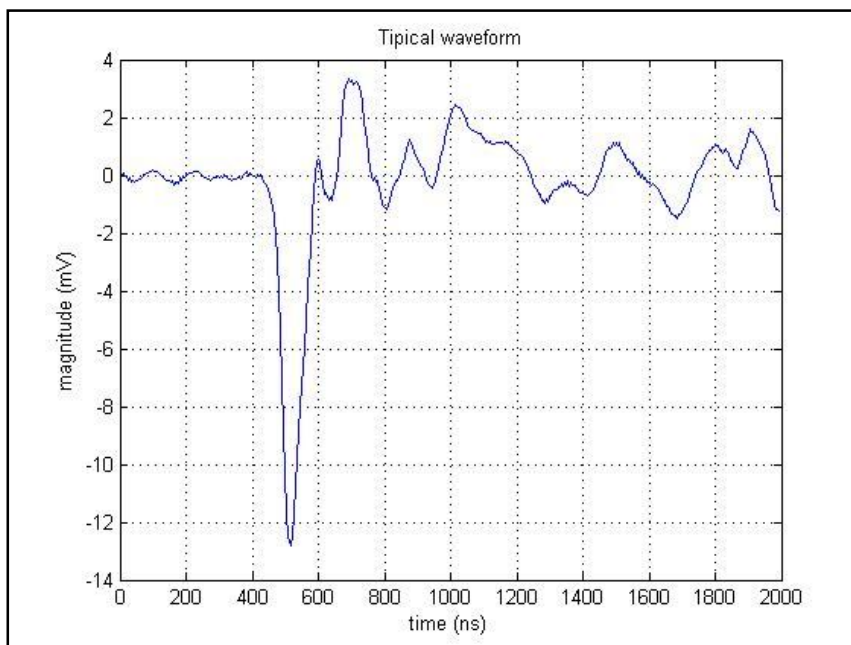


Figura 9.2.3(14): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato
Si può notare come il segnale abbia polarità negativa e sia poco oscillante
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

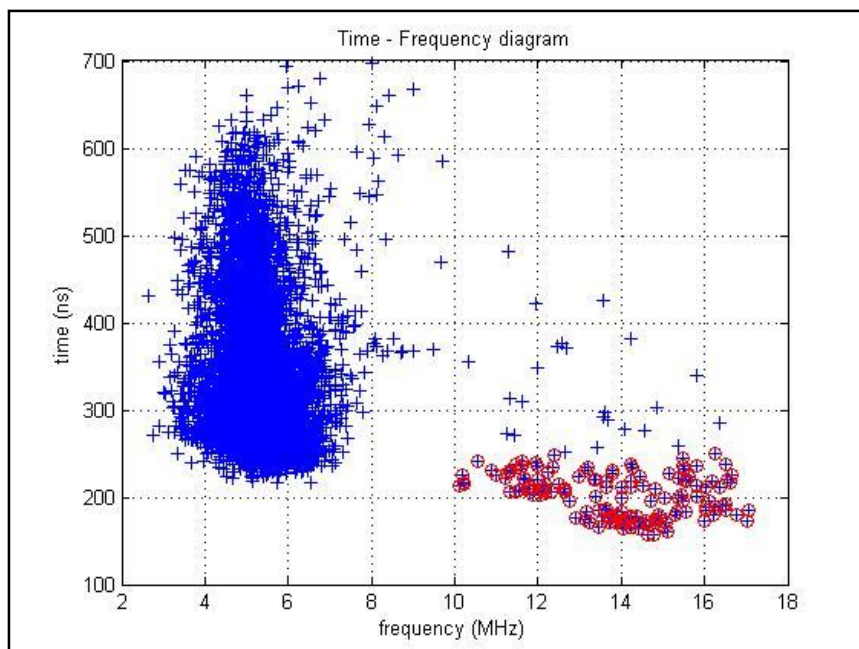


Figura 9.2.3(15): Diagramma tempo – frequenza dei segnali selezionati
E' interessante evidenziare la bassa concentrazione dei segnali in questo gruppo
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

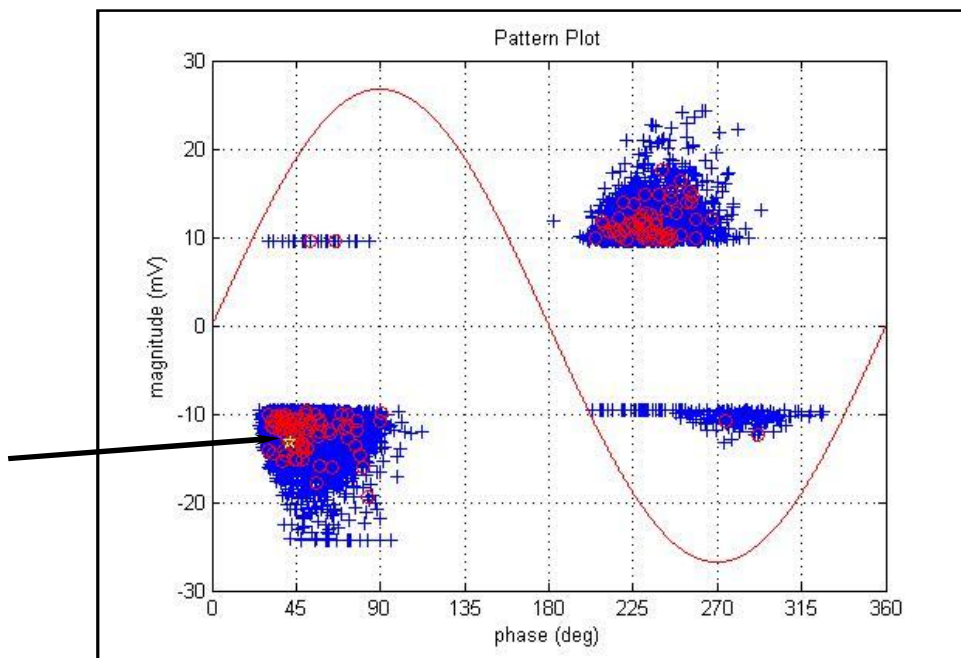


Figura 9.2.3(16): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

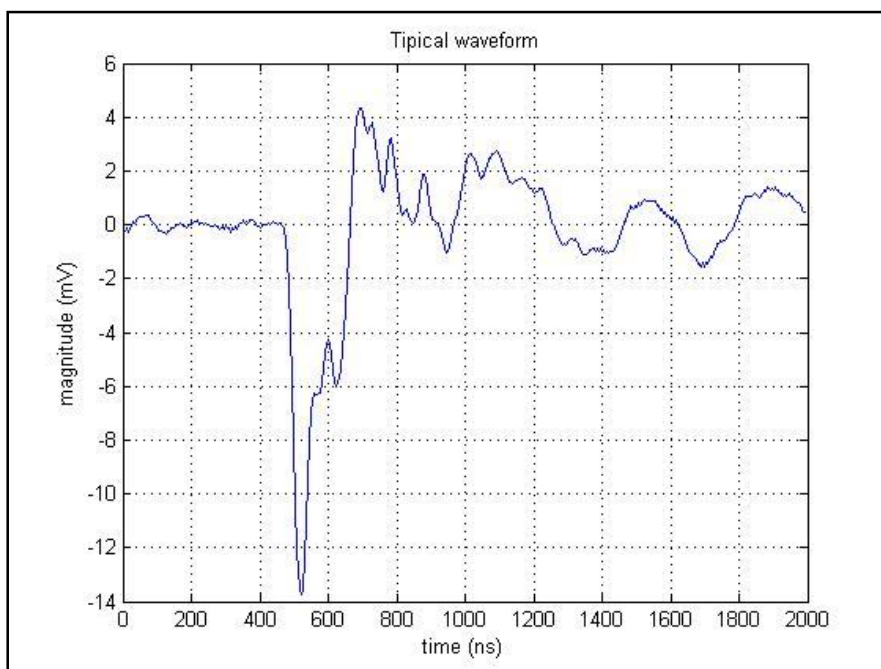


Figura 9.2.3(17): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

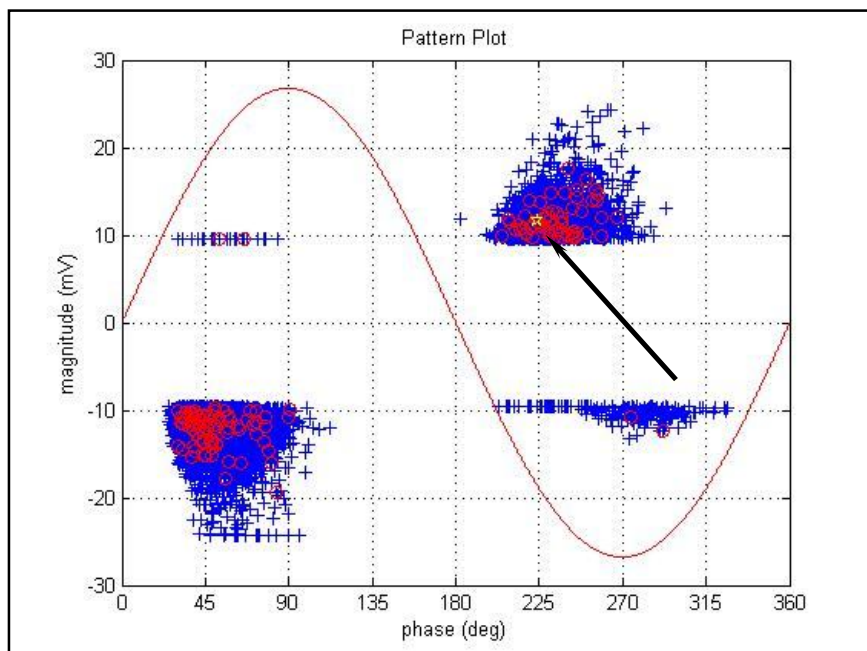


Figura 9.2.3(18): Diagramma ampiezza – fase dei segnali selezionati
Il segnale selezionato è indicato dalla stella gialla e dalla freccia nera
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

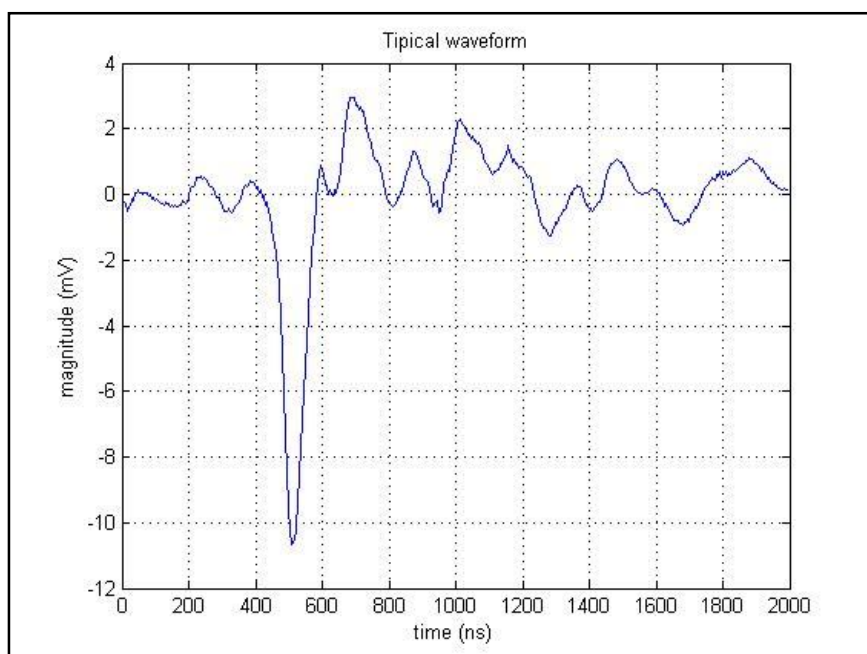


Figura 9.2.3(19): Diagramma ampiezza – tempo del segnale selezionato sopra
Fonte: Elaborazione Matlab® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Come possiamo notare dai diversi segnali selezionati, non esiste una grande differenza tra il segnale rappresentato nella figura 9.2.3(14) relativo al primo gruppo di fenomeni analizzati e gli altri due segnali appartenenti al secondo gruppo, né in termini di forma d'onda, né in termini d'ampiezza.

Pertanto in generale si può affermare che sia presente una sola tipologia di fenomeni impulsivi e diverso rumore di fondo proveniente dal circuito di misura.

9.3 CONCLUSIONI SUL SISTEMA A BANDA ULTRA LARGA TECHIMP PD BASE 2

Il sistema di misura delle scariche parziali Techimp PD Base 2 fa parte della categoria dei sistemi a banda ultra larga, cioè quel gruppo di strumenti che ci permettono la rilevazione della forma d'onda dell'impulso di corrente o di tensione di scarica parziale. La competenza minima richiesta a tale strumentazione è quella di riuscire a discriminare autonomamente segnali di diversa natura in base alle acquisizioni effettuate durante le prove.

Non è possibile, almeno per quanto riguarda la strumentazione in commercio, avere dei sistemi a banda ultra larga che autonomamente riescano ad identificare la tipologia di un gruppo di scariche parziali acquisito.

Il passaggio successivo dunque sarebbe l'identificazione della tipologia dei segnali acquisiti, per rendere, come usualmente si dice, "esperto" il sistema di misura.

I sistemi "esperti" tuttavia devono essere "addestrati" nel riconoscimento delle tipologie di fenomeni impulsivi, attraverso delle misure eseguite su provini standard e nel nostro caso misure su trasformatori prototipo isolati in resina epossidica.

La maggior parte dei software commerciali attualmente sul mercato non possiede dei database di misure eseguite su trasformatori isolati in resina epossidica e tra questi c'è il software PDProcessing[®] associato al sistema Techimp PD Base 2.

Un ulteriore passo avanti sarebbe quello di riuscire ad implementare un sistema per la diagnostica sulla base delle misure di scariche parziali.

Questo sistema dovrà dunque avere tre caratteristiche:

- Deve riuscire a separare segnali di diversa natura;
- Deve essere in grado autonomamente di identificare la natura di tali segnali;
- Deve poter dare qualche indicazione pratica sulla pericolosità dei fenomeni impulsivi misurati in relazione alla vita utile dell'oggetto in prova.

Proviamo ora attraverso l'analisi delle misure di scarica parziale effettuate mediante l'utilizzo del sistema Techimp PD Base 2 a dire se tale sistema a banda ultra larga riesce per lo meno nell'intento di separare segnali di diversa natura.

Siamo comunque già consapevoli del fatto che tale sistema Techimp PD Base 2 non è in grado allo stato attuale di identificare autonomamente la natura dei segnali eventualmente separati, né tantomeno dare indicazioni più elaborate su tali fenomeni impulsivi dal punto di vista della riduzione di vita utile dell'oggetto in prova.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Prendiamo per esempio un'acquisizione di dati relativi ad una misura di scariche parziali e ne riportiamo il diagramma ampiezza – fase generato dal software PDProcessing® qui sotto.

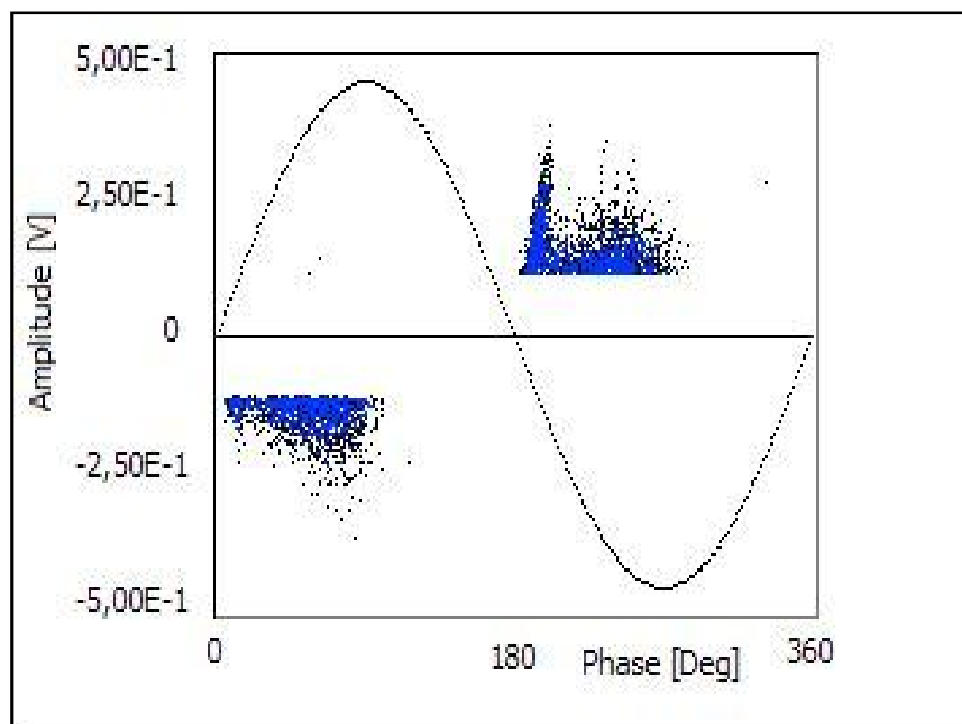


Figura 9.3(1): Diagramma ampiezza – fase generato dal software PDProcessing®
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

Come possiamo notare dal grafico sommario che ci viene fornito dal software in questione il fenomeno impulsivo visualizzato inizia non appena la tensione d'alimentazione aumenta partendo da zero, sia in senso positivo che in senso negativo. Si può segnalare un fenomeno più marcato nella semionda negativa non appena la tensione diventa negativa e aumenta negativamente.

Non si riescono comunque a vedere bene i punti sul diagramma e le ampiezze sono riportate in modo alquanto approssimativo.

Riportiamo nella Figura 9.3(2) la corretta versione del diagramma ampiezza – fase .

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

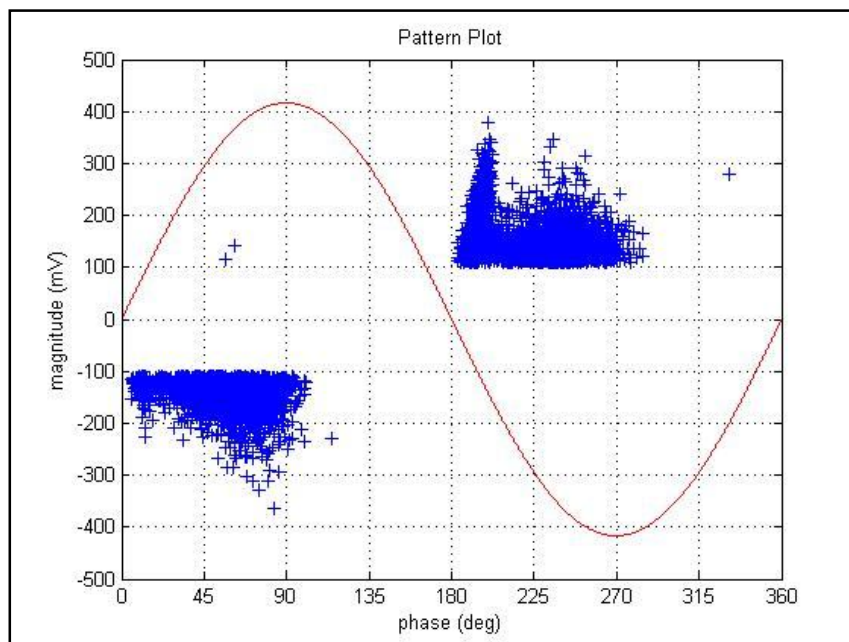


Figura 9.3(2): Diagramma ampiezza – fase dei segnali campionati
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

Vediamo ora il diagramma tempo – frequenza generato dal software PDProcessing®.

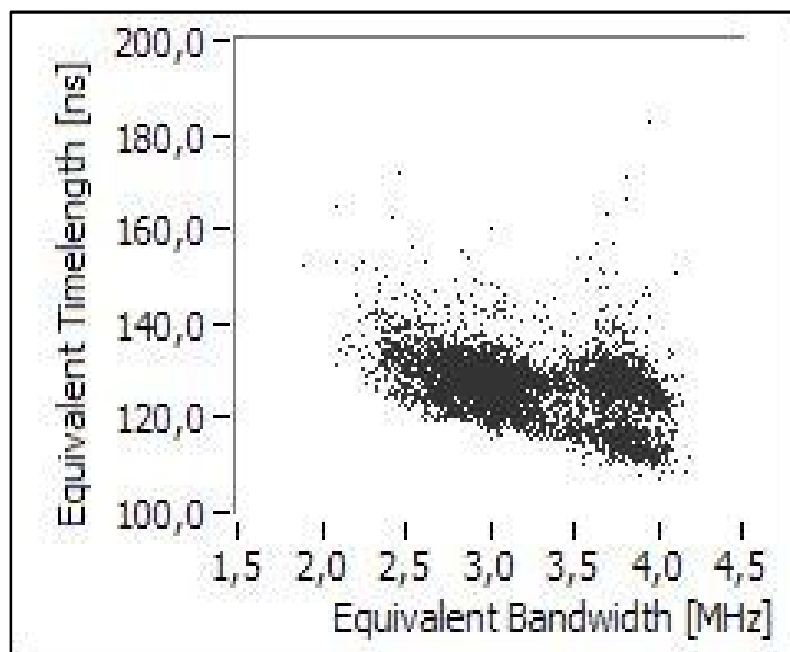


Figura 9.3(3): Diagramma tempo – frequenza generato dal software PDProcessing®
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Come possiamo notare anche questo diagramma generato dal software lascia molto a desiderare in termini di chiarezza.

Vediamo ora come dovrebbe essere visualizzato un grafico tempo – frequenza leggibile.

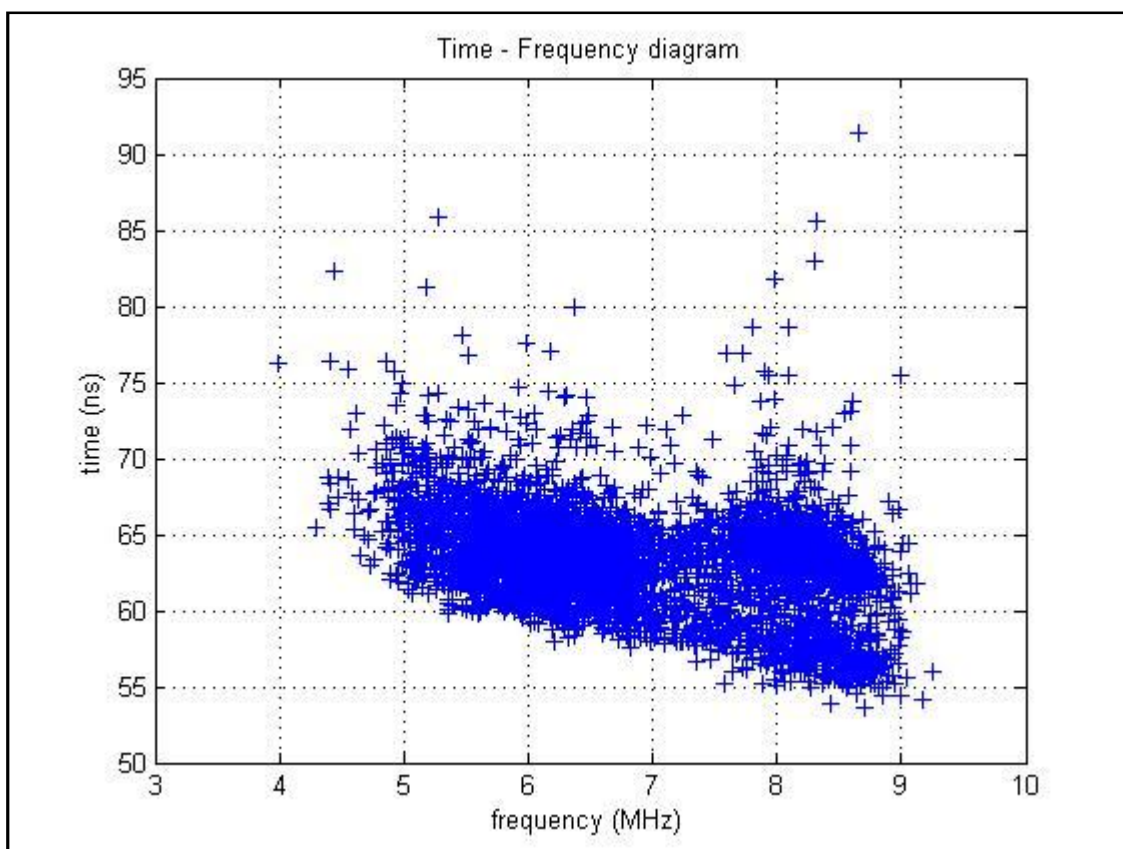


Figura 9.3(4): Diagramma tempo – frequenza dei segnali campionati
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

Si può notare come la scala dell'asse delle ascisse dei diagrammi tempo – frequenza generati dal software PDProcessing® sia errata poiché riporta metà della frequenza originale dei segnali acquisiti.

Vediamo ora altre due informazioni fornite dai report che si possono generare con il software in analisi.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

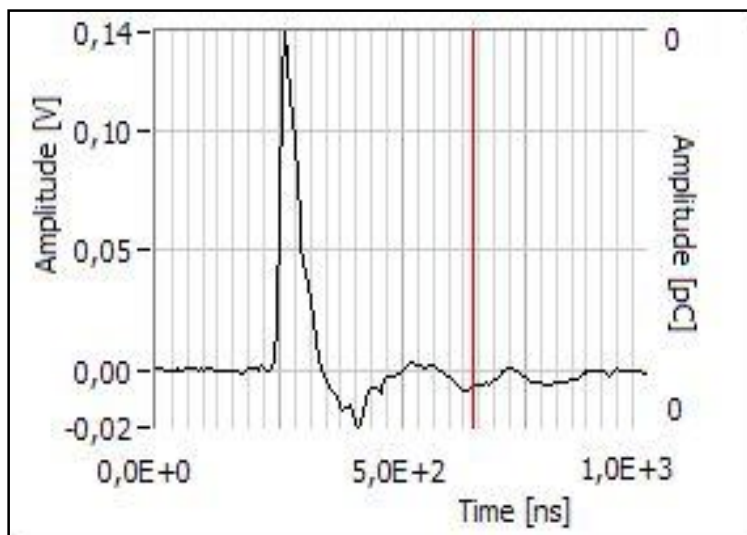


Figura 9.3(5): Diagramma ampiezza – tempo del segnale tipico campionato
Viene visualizzato dal software il primo segnale campionato dell'intera matrice dei segnali
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

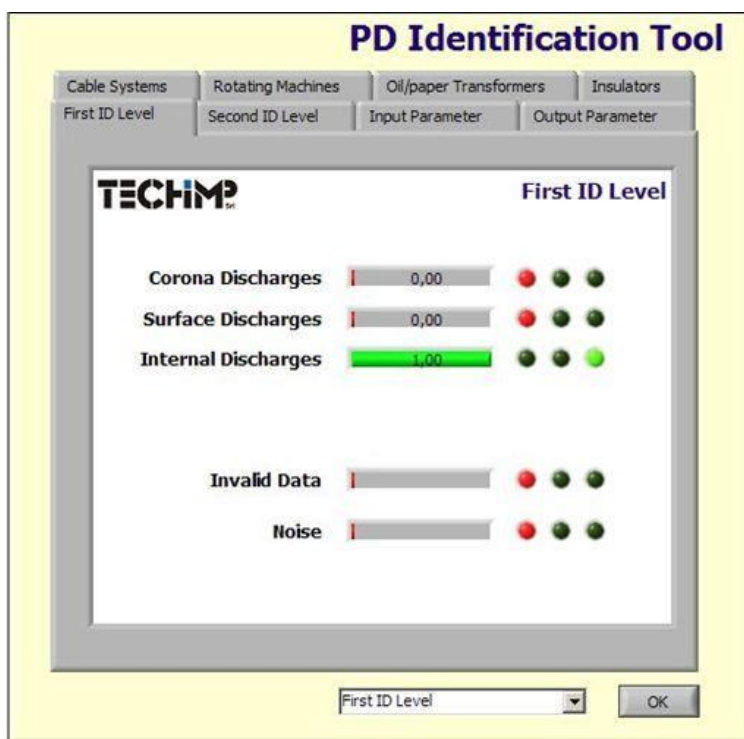


Figura 9.3(6): Finestra d'identificazione di primo livello
Il software tenta di identificare la tipologia delle scariche parziali misurate
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Quest'ultima figura 9.3(6) ci mostra come il software in questione cerchi di determinare la natura del fenomeno impulsivo acquisito, ma oltre a non riuscire nell'intento, non riesce neppure ad discriminare la presenza di segnali diversi, inevitabili vista la presenza dell'isolatore appoggiato sopra la bobina del trasformatore.

Andiamo ora ad osservare se almeno con l'aiuto esterno di un operatore che agisce utilizzando una classificazione manuale, il software riesce a discriminare segnali di natura differente.

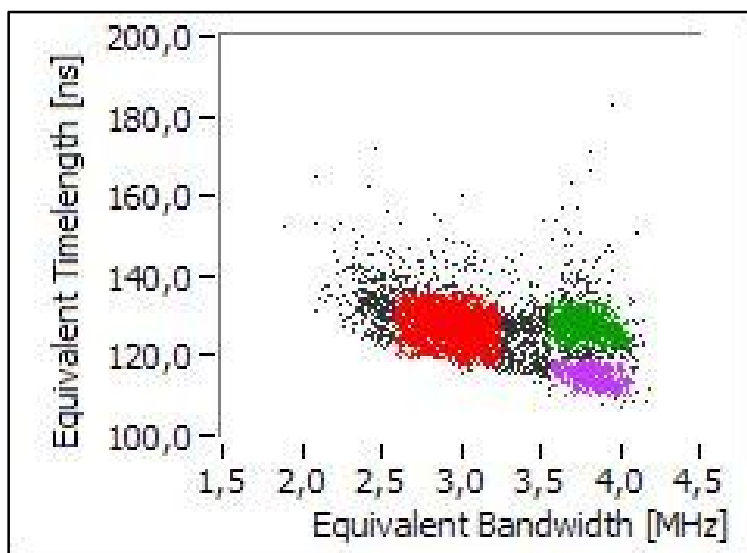


Figura 9.3(7): Diagramma tempo – frequenza generato dal software PDProcessing®
Nel grafico si possono notare i gruppi di segnali selezionati manualmente dall'utente
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

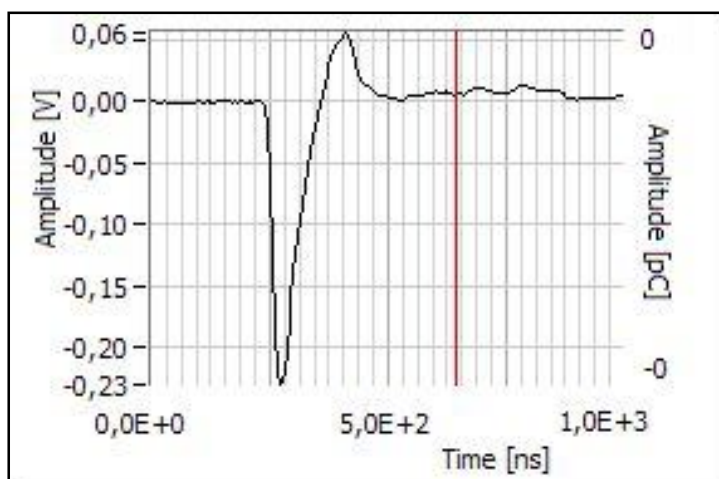


Figura 9.3(8): Diagramma ampiezza – tempo generato dal software PDProcessing®
E' un impulso somigliante al segnale di calibrazione con polarità negativa
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

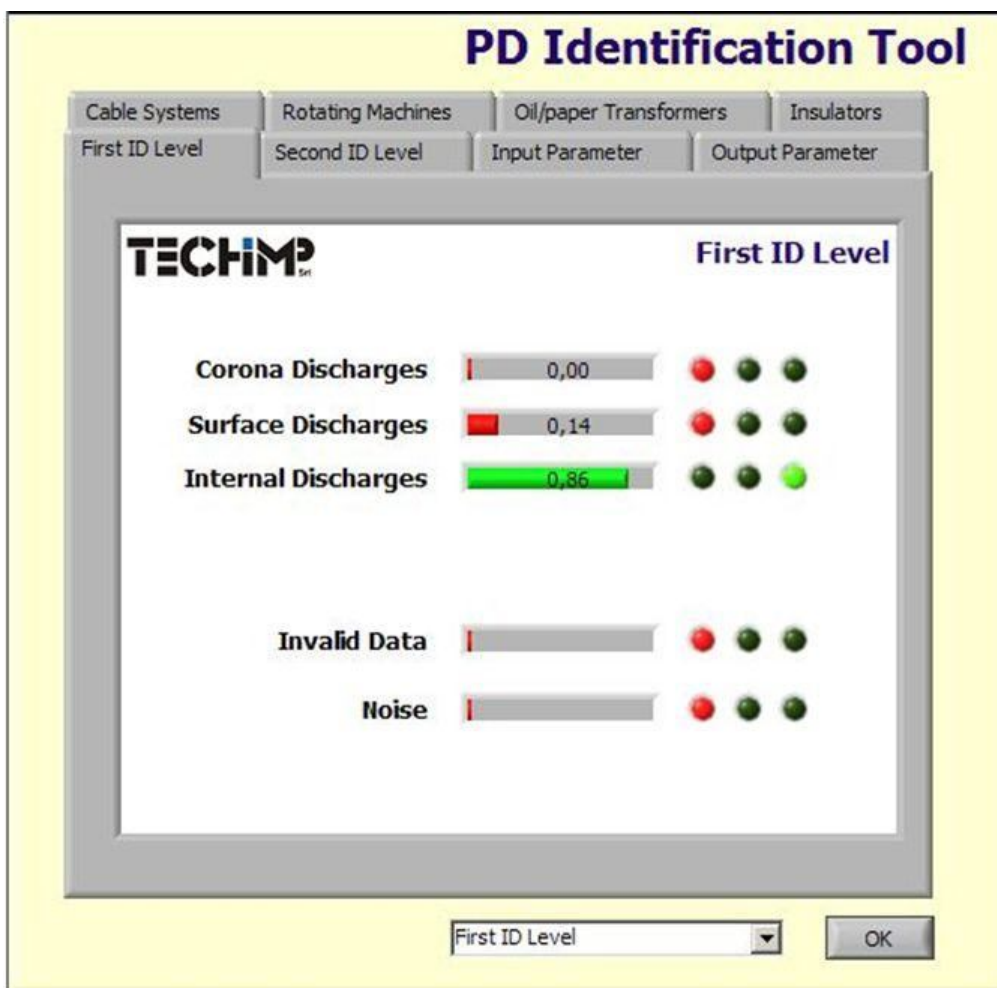


Figura 9.3(9): Finestra d'identificazione di primo livello
Il software tenta di identificare la tipologia delle scariche parziali misurate
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

La figura 9.3(8) e quest'ultima 9.3(9) ci confermano che se il software viene guidato nell'elaborazione dei dati riguardanti i segnali acquisiti, in determinati casi è capace di riconoscere segnali di differente natura.

Vediamo infatti che il segnale riportato nella figura 9.3(8) ha polarità negativa, somiglia all'impulso di calibrazione e non è oscillante.

Bisogna però essere obiettivi ed affermare il fatto che questo programma PDProcessing® non è in grado autonomamente di identificare la tipologia dei segnali acquisiti ma non solo, non riesce neppure in alcuni casi a distinguere la presenza di segnali diversi come abbiamo verificato in questa piccola analisi.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Verifichiamo l'utilizzo della logica Fuzzy come metodo di discriminazione e classificazione dei segnali acquisiti visto che è una funzione implementata dal PDProcessing® ed appliciamola allo stesso pattern.

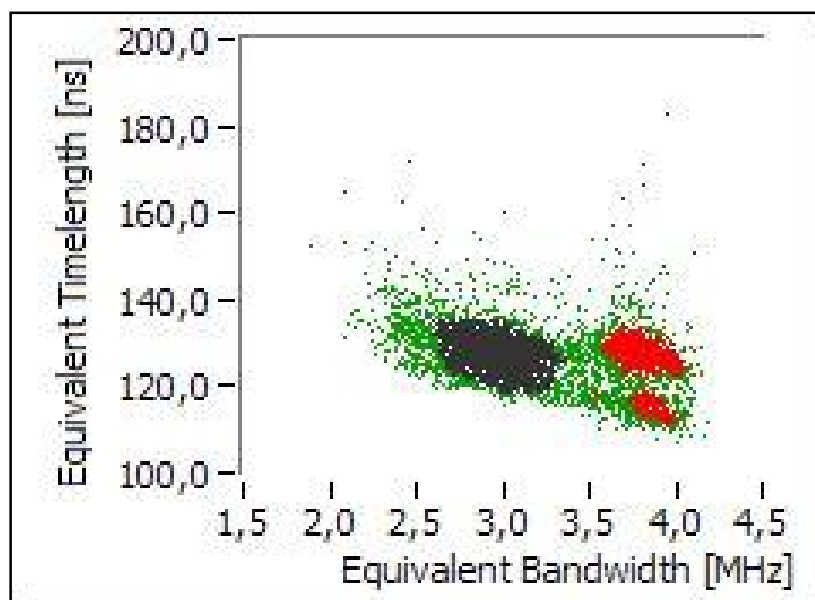


Figura 9.3(10): Diagramma tempo – frequenza generato dal software PDProcessing®
E' stata scelta la logica Fuzzy come metodo di classificazione dei gruppi di segnali
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

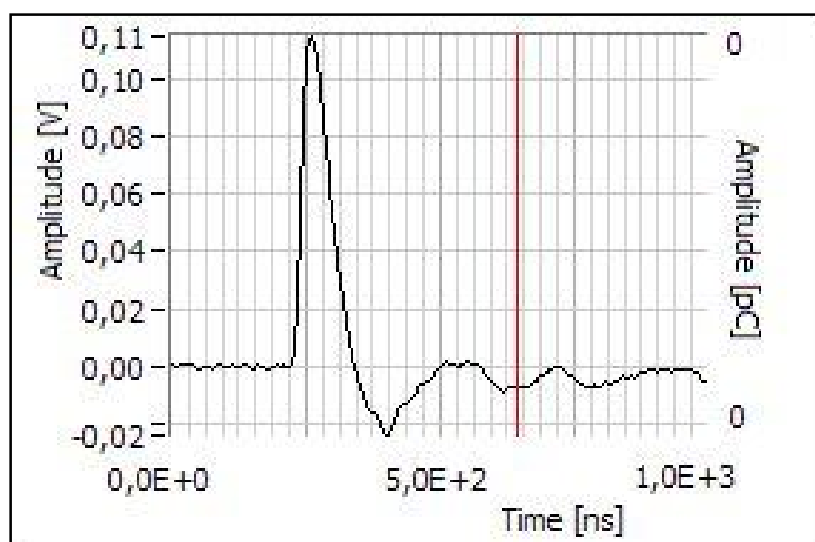


Figura 9.3(11): Diagramma ampiezza – tempo generato dal software PDProcessing®
E' stata scelta la logica Fuzzy come metodo di classificazione dei gruppi di segnali
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

E' necessario osservare che la logica Fuzzy implementata all'interno del software PDProcessing® riesce ad indirizzare il sistema al riconoscimento di segnali di natura diversa, tuttavia l'approccio manuale utilizzato nella figura 9.3(7) porta ai medesimi risultati. La logica Fuzzy dunque non aggiunge nulla di nuovo a quello che già si riesce a fare manualmente, risultando così una funzione superflua nel merito dell'analisi.

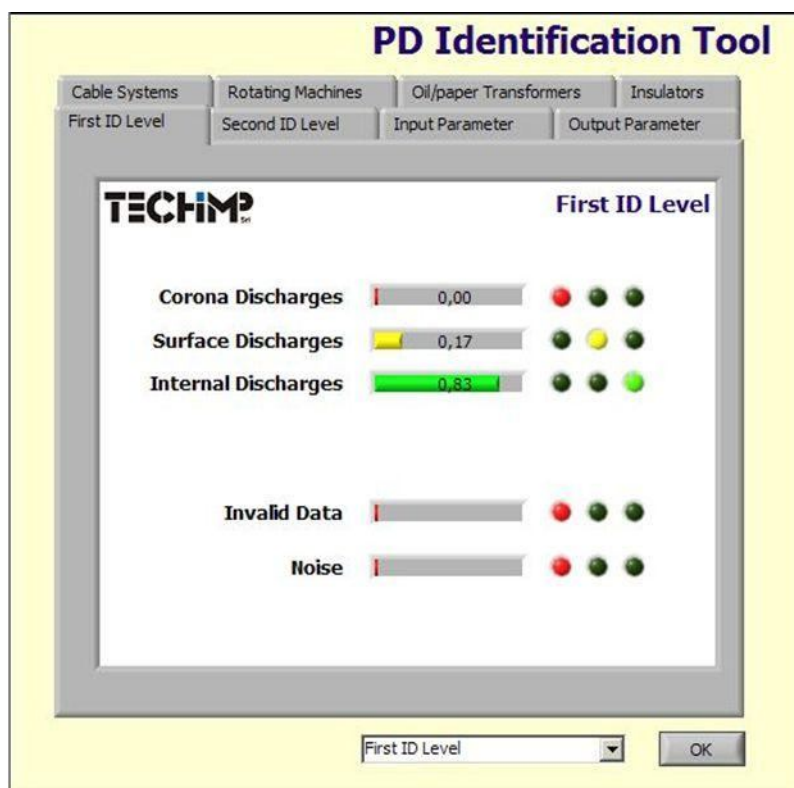


Figura 9.3(12): Finestra d'identificazione di primo livello
Il software tenta di identificare la tipologia delle scariche parziali misurate
Fonte: Elaborazioni PDProcessing® - Bottega Luca

Ci si rende conto che pur utilizzando la logica Fuzzy come metodo per la discriminazione di segnali di natura diversa, il sistema non riesce ad identificare autonomamente con precisione la tipologia dei fenomeni impulsivi coinvolti nell'analisi, tutt'al più riesce a separarli come fenomeni di natura diversa.

Esiste all'interno del software un secondo livello di identificazione dei fenomeni impulsivi analizzati, chiamato "Second ID Level".

In questo secondo livello di identificazione vengono fornite delle informazioni su dei parametri fondamentali per una buona riuscita dell'acquisizione dei segnali impulsivi, come ad esempio la presenza o meno di tensione d'alimentazione, la presenza o meno di disturbi provenienti dall'alimentazione stessa, la presenza di rumore di fondo del circuito di misura, ecc.

9. Considerazioni e analisi del sistema digitale U.W.B. Techimp PD Base II

Questo secondo livello di identificazione tuttavia non aggiunge nulla in più alla possibilità di distinguere segnali diversi presenti nel pattern e neppure aggiunge informazioni sulla tipologia dei segnali o sulla loro ubicazione spaziale nell'oggetto in prova.

Si tenta addirittura nella finestra "Output Parameters", nella sezione "Defect Position", di dare una collocazione spaziale a grandi linee delle sorgenti di scarica parziale, operazione vana vista l'impossibilità a monte di riconoscere la tipologia delle stesse.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

10.1 ANALISI DELLA POLARITA' DEGLI IMPULSI

Questa analisi fa riferimento al fatto che esiste un metodo di misura delle scariche parziali che consente di visualizzare entrambi gli impulsi generati da una singola scarica parziale usando una rilevazione a ponte o bilanciata.

Si può infatti distinguere la tipologia degli impulsi di corrente di scarica parziale all'interno dei trasformatori di media tensione analizzandone la polarità.

Questa operazione è possibile sia con strumentazione a banda larga che a maggior ragione con strumentazione a banda ultra larga.

Sarà necessario approntare una misura delle scariche parziali che tenga conto della duplice lettura da effettuare quindi dovranno essere preparati due canali di acquisizione dei segnali di scarica parziale uno posto in testa all'avvolgimento e l'altro sull'ultima presa del medesimo.

Un'analisi circuitale infatti dimostra 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.

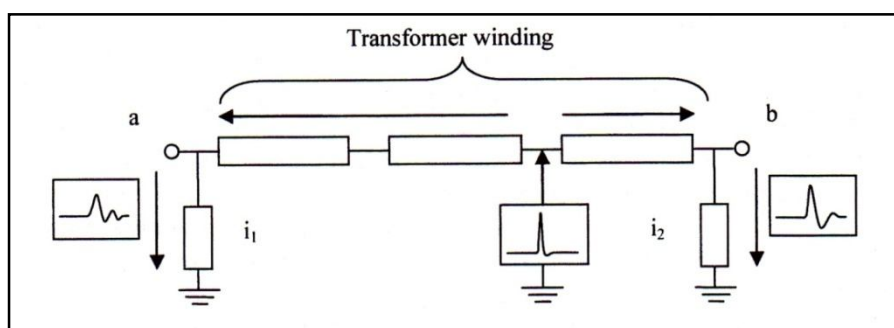


Figura 10.1(1): Configurazione dell'avvolgimento del trasformatore con risposte alla scarica parziale verso terra

Fonte: Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica
"Analisi delle scariche parziali per la diagnostica delle macchine elettriche"
Dott. Ing. Ceretta Claudio – 31 gennaio 2008

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

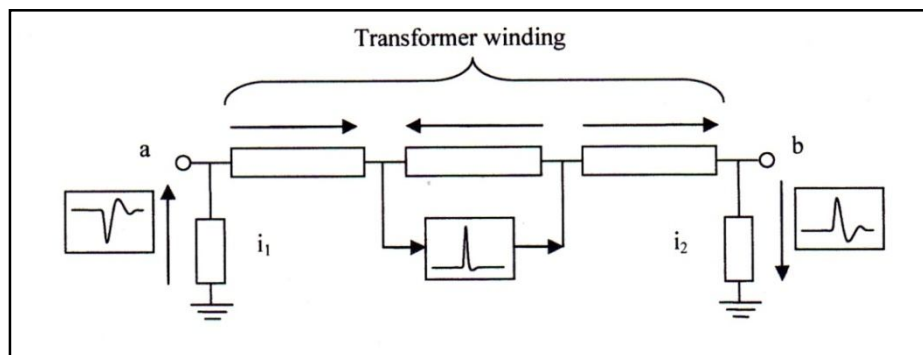


Figura 10.1(2): Configurazione dell'avvolgimento del trasformatore con risposte alla scarica parziale tra due punti dell'avvolgimento

Fonte: Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica
"Analisi delle scariche parziali per la diagnostica delle macchine elettriche"
Dott. Ing. Ceretta Claudio – 31 gennaio 2008

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.

In presenza di più sorgenti di scariche parziali interne all'avvolgimento del trasformatore isolato in resina epossidica è possibile comunque utilizzare tale metodo per constatarne il numero ma non la localizzazione.

I segnali di natura interna abbiamo detto mantengono la stessa ampiezza ma hanno polarità inversa, quindi se contiamo il numero di segnali con la stessa ampiezza e segno diverso possiamo capire quante sono le sorgenti interne di scariche parziali.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

10.2 ANALISI A MAPPATURA DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DELL'AVVOLGIMENTO DI UN TRAFIO

L'analisi a mappatura della funzione di trasferimento è un metodo matematico di analisi della struttura di un avvolgimento di un trasformatore isolato in resina epossidica, il cui fine principale è la localizzazione delle sorgenti di scarica parziale all'interno del medesimo.

La bobina di un trasformatore isolato in resina epossidica 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 metta in relazione ciascuna uscita a ciascun ingresso del sistema "bobina".

Dato un segnale in un ingresso del sistema, cioè dato un segnale applicato ad una presa qualsiasi del trasformatore è possibile registrare la risposta al segnale in ingresso in tale presa acquisendo in questo modo l'informazione necessaria per capire come viene trasformato tale segnale dalla particolare presa in cui viene iniettato alla presa in cui si legge la risposta del sistema.

Si può fare anche qualcosa in più che registrare le risposte nel canale d'acquisizione per ogni segnale iniettato sulle prese del trasformatore, cioè si può trovare la funzione di trasferimento che mette in relazione il singolo ingresso con la singola uscita.

Supponendo infatti che un ingresso sia sollecitato da un segnale, dalle uscite del sistema potrà essere vista la risposta al segnale d'ingresso come convoluzione del segnale sorgente con la particolare funzione di trasferimento che collega il particolare ingresso con l'uscita. 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 d'ingresso per il quale il segnale riprodotto a partire dalle due uscite è unico: tale punto rappresenta il punto di origine del segnale.

Chiaro che nel momento in cui iniettando ad una presa del trasformatore un segnale noto e leggendone le risposte alle due uscite, cioè alla testa e alla coda della bobina, trovassi conferma della presenza di un'anomalia allora essa sarebbe presente allo stesso livello fisico della presa in cui ho iniettato il segnale noto.

Infatti 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.

Avendo a disposizione l'avvolgimento del trasformatore bisogna procedere nella rilevazione e registrazione dei due segnali in uscita, iniettando su ogni presa della bobina un segnale noto attraverso un accoppiamento capacitivo.

Il rapporto tra la corrente iniettata e le due correnti (o tensioni a seconda del circuito adottato) in uscita fornisce per ogni presa la coppia di funzioni di trasferimento ingresso-uscite.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

Operativamente bisognerà avere a disposizione un trasformatore campione, cioè un trasformatore che metta a disposizione tutte le prese lungo la colonna o almeno una serie di prese uniformemente distribuite lungo la colonna, oltre che le prese del commutatore.

Appare chiaro sin d'ora che l'analisi sin qui esposta non è generalizzabile alla totalità dei trasformatori isolati in resina epossidica, poiché esistono varie tipologie costruttive degli avvolgimenti, variabili del tempo e variabili a seconda del costruttore.

Sarà quindi necessario procedere con un'analisi a mappatura della funzione di trasferimento per ogni tipologia di trasformatore isolato in resina epossidica presente sul mercato in modo che un eventuale misura di scariche parziali possa essere adattata alle varie tipologie di trasformatori in resina in commercio.

In ogni caso durante la misura delle scariche parziali, a seguito di un fenomeno impulsivo, sarà possibile registrare i due impulsi di risposta ai due terminali addetti, partendo dai quali potrà essere calcolata per tutti gli ingressi considerati, l'ipotetica forma d'onda dell'impulso.

Per l'unicità del fenomeno considerato, 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.

Chiaramente sarà difficile che l'ingresso scelto per iniettare il segnale noto sia anche il punto d'origine delle scariche parziali perciò sarà necessario verificare quali siano i punti di massima verosimiglianza dei segnali ricostruiti.

Bisognerà cioè verificare quali segnali ricostruiti sono stati distorti dalla presenza di un'anomalia interna alla bobina e quali invece non lo sono, cioè mantengono le caratteristiche standard conosciute a priori o comunque che ci si aspetta di avere.

Appare chiaro sin d'ora che se le sorgenti di scarica parziale all'interno dell'avvolgimento sono molteplici e casualmente distribuite risulterà difficile anche elaborando opportunamente i dati in possesso ricostruire con tale metodo la localizzazione delle medesime.

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.

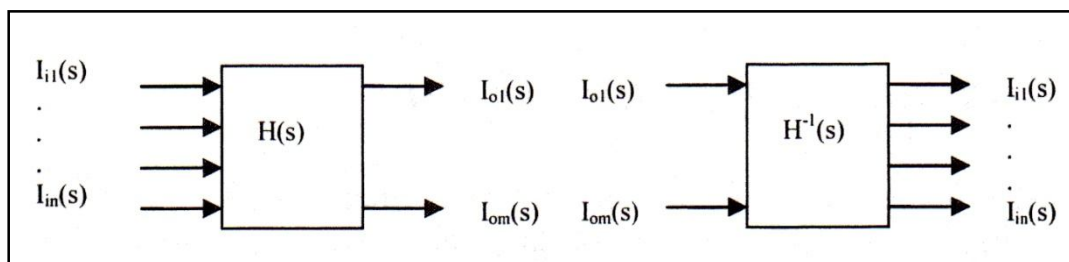


Figura 10.2(1): Schematizzazione del sistema lineare mediante la propria funzione di trasferimento

Fonte: Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica

“Analisi delle scariche parziali per la diagnostica delle macchine elettriche”

Dott. Ing. Ceretta Claudio – 31 gennaio 2008

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

La relazione che lega gli ingressi alle uscite è:

$$[I_{om}(S)] = [H_{mn}(S)] \cdot [I_{in}(S)] \quad 10.1$$

La relazione che lega le uscite agli ingressi è:

$$[I_{in}(S)] = [H_{mn}^{-1}(S)] \cdot [I_{om}(S)] \quad 10.2$$

Pensando ad un trasformatore da cabina M.T./B.T. isolato in resina epossidica, il primario è rappresentato dall'avvolgimento di media tensione, mentre il secondario è rappresentato dall'avvolgimento di bassa tensione.

La prova di laboratorio per la misura delle scariche parziali viene eseguita a tensione indotta, pertanto verrà alimentato l'avvolgimento secondario, cioè in bassa tensione, ad una frequenza superiore a quella industriale, in modo da indurre al primario, cioè in media tensione, una tensione adeguata per la misura delle scariche parziali secondo normativa, cioè 1.8 volte la tensione nominale per il pre-stress ed 1.3 volte la tensione nominale per la misura vera e propria.

Chiaramente le prese del trasformatore e quindi il commutatore sono posti al primario dello stesso, cioè sulla media tensione e quindi queste prese sono gli ingressi del sistema "trasformatore".

Le due uscite corrispondono ai terminali di alimentazione della media tensione, che nel caso della misura delle scariche parziali sono disponibili, poiché come abbiamo detto l'alimentazione per la prova è fornita alla bassa tensione, in quanto la prova è a tensione indotta.

Allo scopo di mappare la funzione di trasferimento della bobina del trasformatore, prima di fare quanto detto sopra, è necessario dunque iniettare un segnale noto in ognuno degli n punti che si possa ragionevolmente ritenere un ingresso del sistema, cioè le prese disponibili, ottenendo alle uscite cioè ai terminali di alimentazione della media tensione, n coppie di segnali.

La relazione tra ingressi ed uscite formerà la mappa della relazione tra ingresso e coppie di uscite, cioè la matrice delle funzioni di trasferimento.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

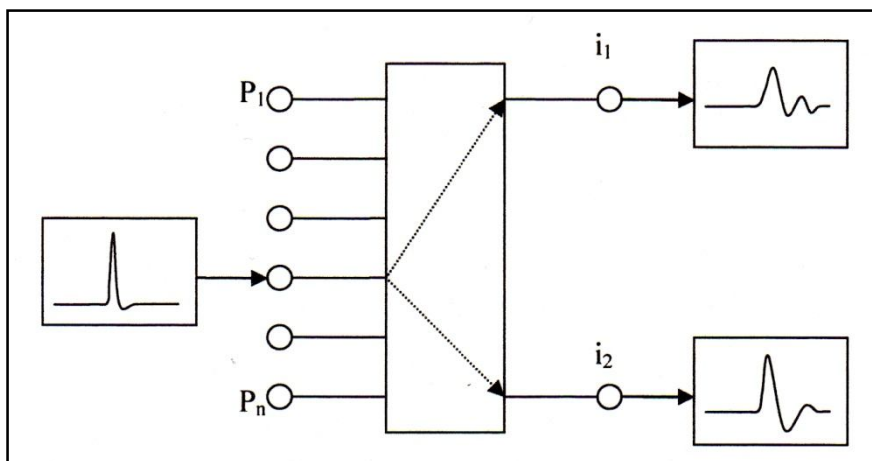


Figura 10.2(2): Mappatura della bobina

Fonte: Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica
“Analisi delle scariche parziali per la diagnostica delle macchine elettriche”
Dott. Ing. Ceretta Claudio – 31 gennaio 2008

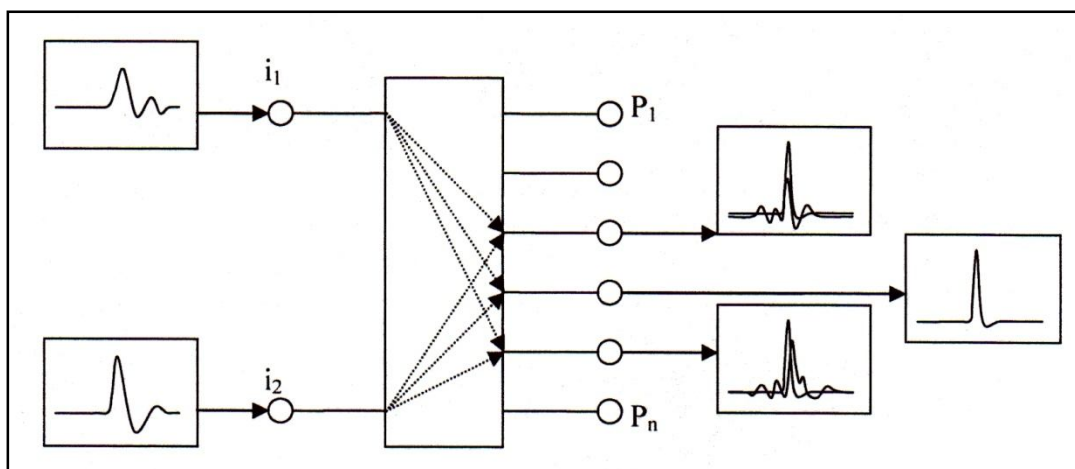


Figura 10.2(3): Rilievo del punto di origine del segnale e delle caratteristiche del medesimo

Fonte: Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica
“Analisi delle scariche parziali per la diagnostica delle macchine elettriche”
Dott. Ing. Ceretta Claudio – 31 gennaio 2008

A seguito di un segnale originato da uno degli ingressi, si rileva alle uscite una coppia di segnali, i quali rappresentano la risposta del sistema a tale forzante.

Per ogni coppia di segnali si ricostruisce, tramite le funzioni di trasferimento che già si conoscono, l'ipotetica forma d'onda 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, hanno la massima somiglianza.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

10.3 RILIEVO DELLA RISPOSTA IN FREQUENZA ALL'IMPULSO DI CALIBRAZIONE DI UN TRASFORMATORE TRIFASE CAMPIONE

Il rilievo della risposta in frequenza all'impulso di calibrazione è un metodo necessario per verificare il comportamento dei segnali iniettati alle varie prese del trasformatore trifase campione.

Lo scopo finale è quello di verificare come varia l'ampiezza e la forma del segnale nel tempo ed osservare come si modificano i rispettivi spettri in frequenza.

In questo modo saremo in grado di capire quale è l'effetto delle impedenze parassite distribuite lungo la bobina del trasformatore in questione ed ipotizzare quale sia la rete equivalente della bobina stessa. Le distorsioni dei segnali ricavati dalle misure sono dovuti infatti alla funzione di trasferimento che sta tra la presa in cui viene iniettato l'impulso di calibrazione e i terminali di misura delle risposte in frequenza. Non si sono purtroppo misurati i segnali iniettati e quindi non si è potuta fare l'analisi a mappatura della funzione di trasferimento dei segnali interessanti.

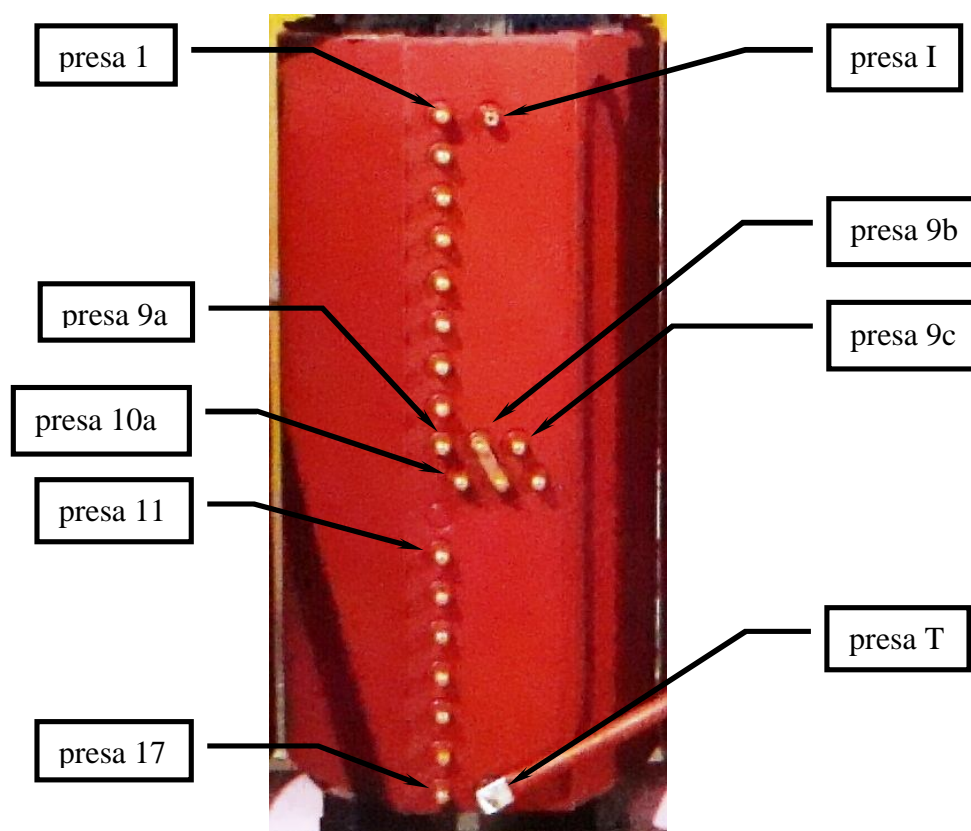


Figura 10.3(1): Bobina di media tensione del trasformatore trifase prototipo con prese in evidenza
Fonte: Archivio personale foto per tesi di laurea specialistica – Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

Come possiamo vedere nella figura 10.3(1), il trasformatore trifase è un prototipo munito di tutte le prese che si possono ricavare dagli strati interni.

Solitamente non tutte le prese sono a disposizione dell'utente ma solamente quelle del commutatore e dei terminali superiore ed inferiore.

La prova è stata effettuata numerando preventivamente le prese come si osserva in figura 10.3(1).

E' stato dunque inviato un impulso di calibrazione ad ogni singola presa riportata in figura del valore di 100 pC e tramite una routine Matlab[®] si sono ricavati i diagrammi ampiezza – tempo dei segnali acquisiti e i diagrammi ampiezza – frequenza dei medesimi.

10.3.1 PROVA DEL 22/12/2008

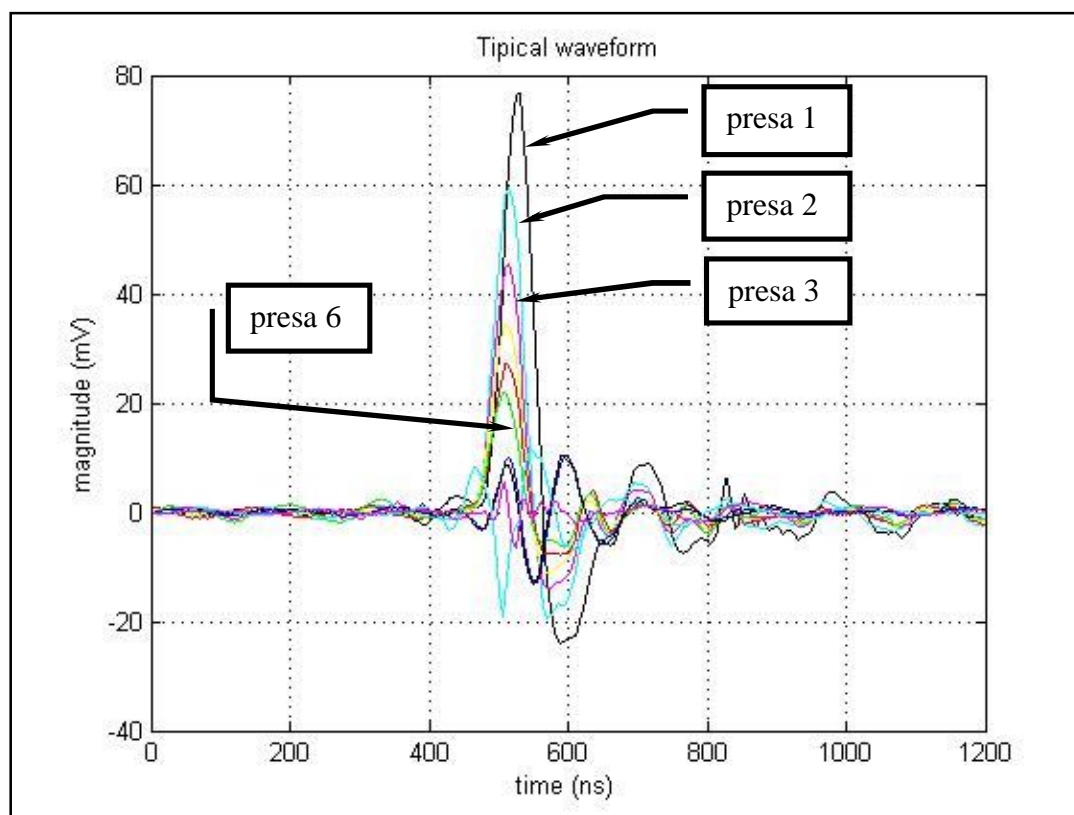


Figura 10.3.1(1): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab[®] - Bottega Luca

La figura 10.3.1(1) ci illustra chiaramente il fatto che uno stesso segnale di calibrazione da 100 pC iniettato nelle varie prese del trasformatore in questione viene distorto in modo diverso a seconda della presa in cui viene iniettato.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

In particolare possiamo vedere come i segnali di risposta che si rilevano alle prese I e T della figura 10.3(1) sono attenuati in ampiezza passando dalla presa 1 alla presa 8. Osserviamo inoltre come la forma d'onda di tali fenomeni impulsivi sia analoga fino alla presa 6 e successivamente cambi radicalmente.

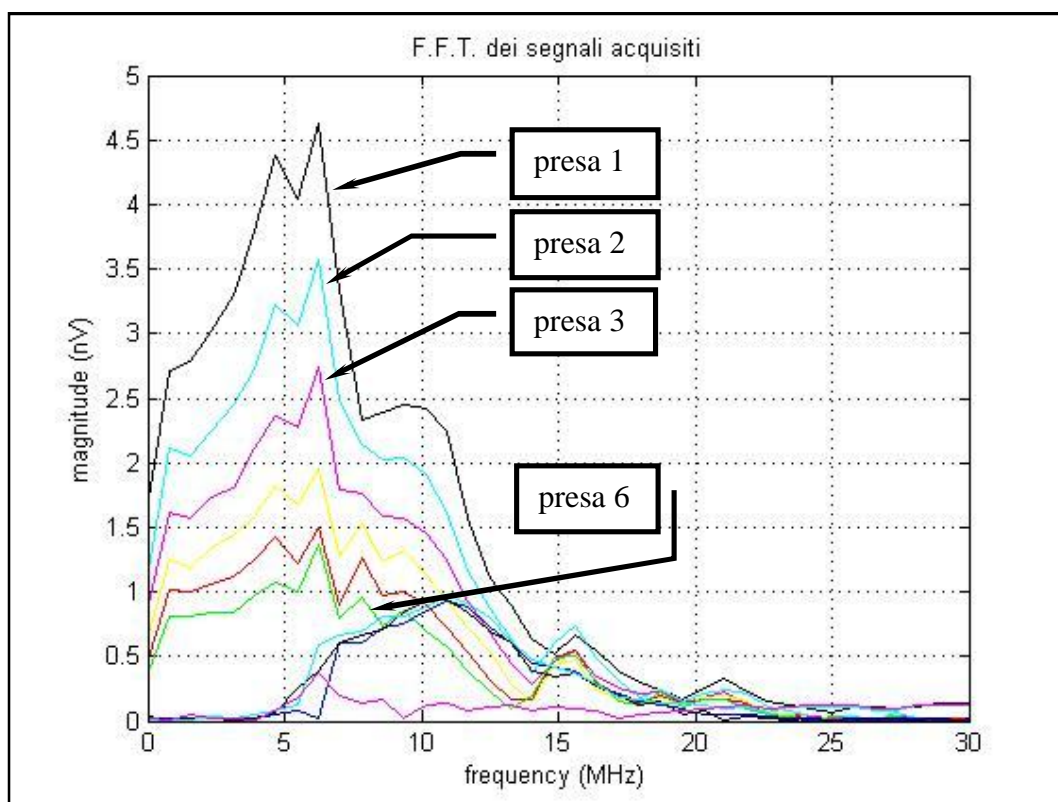


Figura 10.3.1(2): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

La figura 10.3.1(2) sopra ci mostra come sono le ampiezze degli spettri in frequenza dei segnali visualizzati in funzione del tempo nella figura 10.3.1(1). Notiamo come anche l'ampiezza degli spettri in frequenza dei segnali analizzati si riduca man mano si passa dalla presa 1 alle prese più vicine al commutatore, mantenendo la stessa forma d'onda fino alla presa 6. Gli spettri in frequenza dei segnali rilevati avendo iniettato l'impulso di calibrazione dalla presa 7 alla presa 9a non mantengono la stessa forma d'onda e presentano un'ampiezza in funzione della frequenza molto ridotta rispetto alle prese dalla 1 alla 6.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

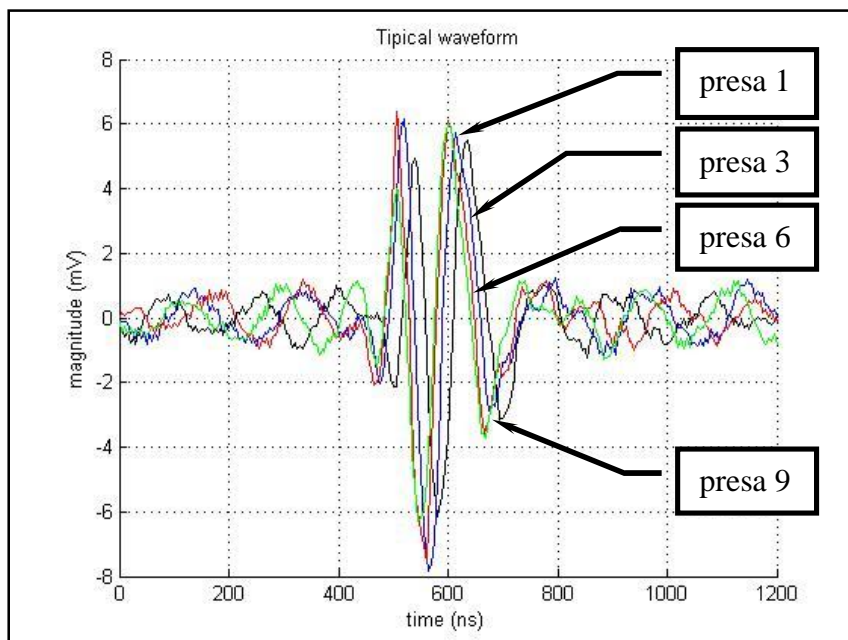


Figura 10.3.1(3): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore con triangolo inserito
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

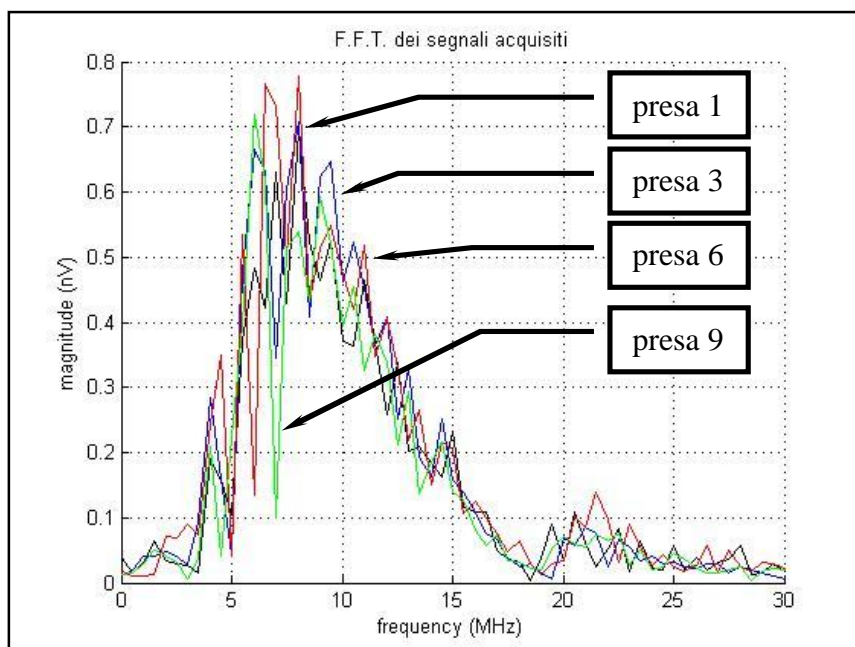


Figura 10.3.1(4): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore con triangolo inserito
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

Osserviamo nella figura 10.3.1(3) come prendendo dalla presa 1 alla presa 9 il comportamento della bobina all'iniezione dell'impulso di calibrazione sulle prese analizzate cambi radicalmente rispetto al caso analogo ma senza triangolo inserito.

Si vede bene che la differenza principale sta nella forma d'onda dei segnali di risposta rilevati ai terminali di misura.

Si può ben capire che le risposte in frequenza della bobina con triangolo inserito risentono profondamente del collegamento con le altre due bobine, infatti questi segnali rilevati in figura 10.3.1(3) sono molto più oscillanti rispetto a quelli registrati in configurazione senza triangolo.

Queste risposte impulsive della bobina con triangolo inserito sono oscillanti poiché parte dei segnali rilevati passano attraverso la funzione di trasferimento delle bobine connesse alla bobina in questione.

Non solo i segnali hanno una forma d'onda totalmente diversa rispetto alla configurazione senza triangolo, ma l'ampiezza viene attenuata di un ordine di grandezza, sia nel diagramma ampiezza – tempo, sia nel diagramma ampiezza – frequenza riportato nella figura 10.3.1(4).

La figura 10.3.1(4) rispetto alla figura 10.3.1(2) ci mostra come l'inserimento del triangolo porti ad una stabilizzazione dell'ampiezza in frequenza dei segnali di risposta, cioè si può notare come l'attenuazione dell'ampiezza dello spettro in frequenza dei singoli segnali sia molto minore procedendo dalla presa 1 alla presa 9.

Resta dunque il fatto che l'inserimento del triangolo porta con se sia un cambiamento radicale nella forma d'onda delle risposte in frequenza della bobina, sia un attenuazione delle ampiezze di un ordine di grandezza in generale.

Si dovrà dunque tenere di conto della connessione a triangolo nella misura delle scariche parziali come sorgente di segnali trasferiti e nell'analisi a mappatura bisognerà evitare la connessione a triangolo delle bobine.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

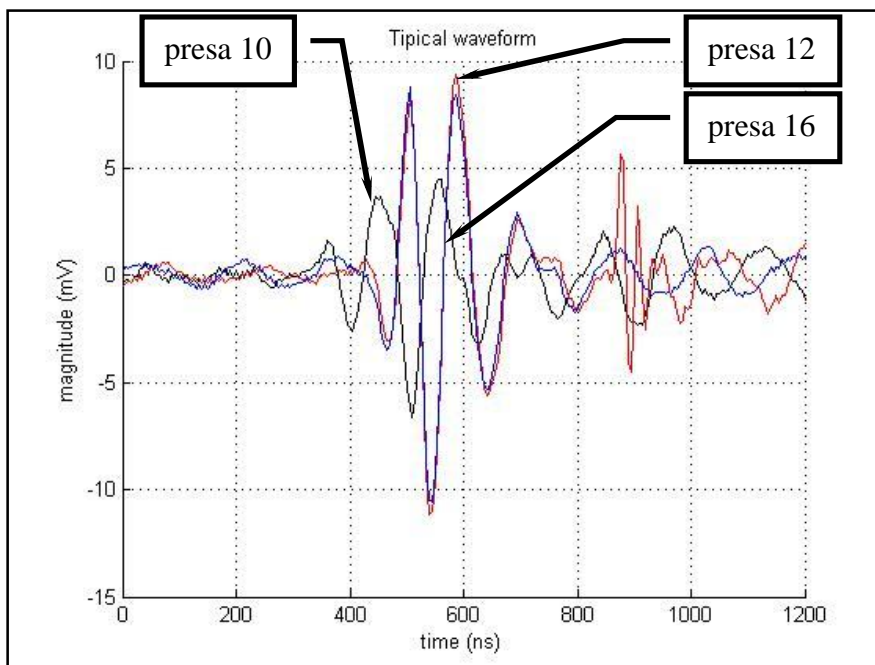


Figura 10.3.1(5): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta nelle prese sotto al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

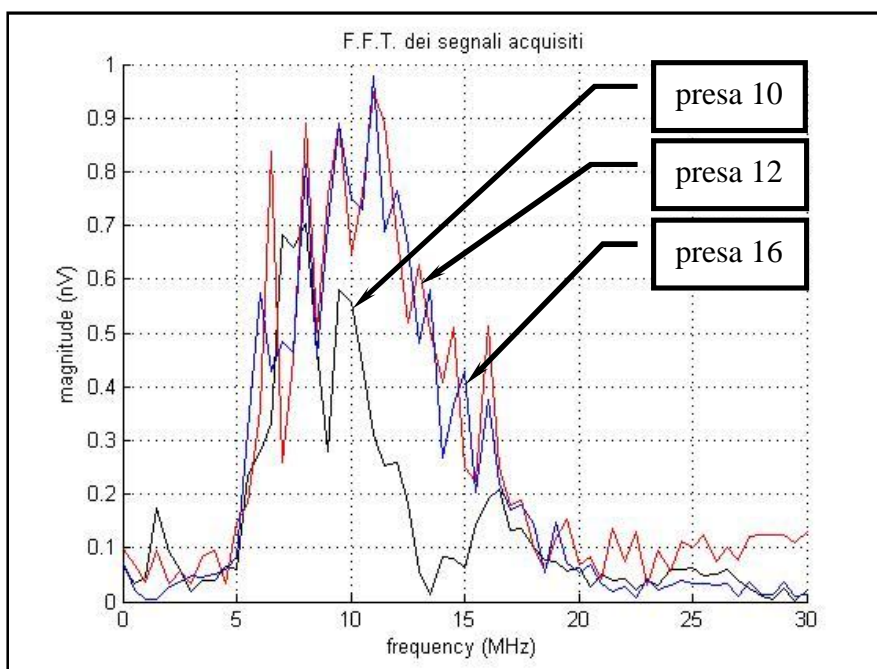


Figura 10.3.1(6): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese sotto al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

La figura 10.3.1(5) ci mostra come le forme d'onda dei segnali rilevati ai terminali di misura delle prese sotto al commutatore senza aver inserito il triangolo siano molto oscillanti e comunque diverse da quelle rilevate sopra al commutatore sempre senza triangolo inserito mostrate nella figura 10.3.1(1).

Le ampiezze di tali segnali sono molto attenuate rispetto ai segnali rilevati per le prese sopra al commutatore di circa un ordine di grandezza scarso; da notare il fatto che le ampiezze dei segnali rilevati aumentano passando dalla presa 10 alla presa 16, quando invece secondo logica dovrebbero diminuire.

La figura 10.3.1(6) mette in evidenza la presenza di componenti armoniche dei segnali acquisiti anche a frequenze più elevate, come ad esempio nell'intorno dei 30 MHz.

Si può notare inoltre sia nella forma d'onda dei segnali acquisiti nel tempo che nella figura dei rispettivi spettri in frequenza, le forme d'onda siano a parte l'ampiezza sostanzialmente le medesime.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

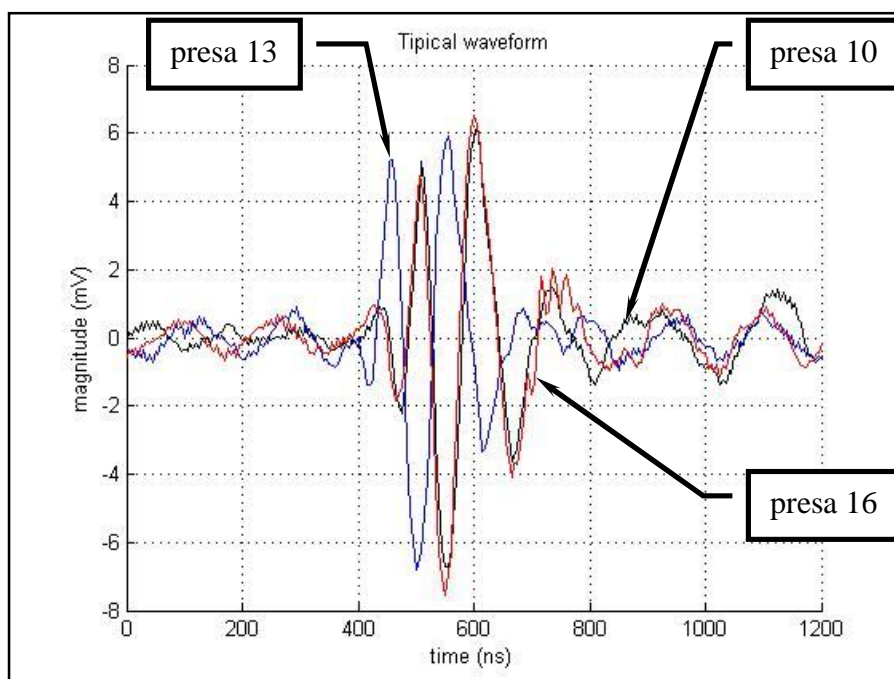


Figura 10.3.1(7): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta nelle prese sotto al commutatore con triangolo inserito
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

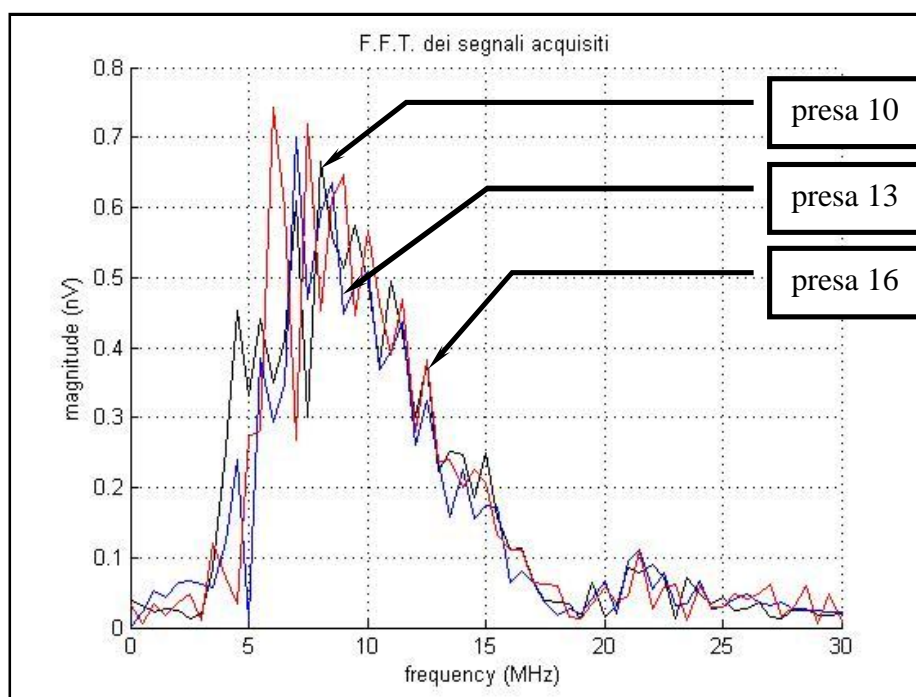


Figura 10.3.1(8): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese sotto al commutatore con triangolo inserito
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

Le differenze tra i segnali rilevati con o senza il triangolo inserito nelle prese sotto al commutatore del trasformatore trifase prototipo sono minime.

Se osserviamo la figura 10.3.1(7) vediamo come sostanzialmente le forma d'onda dei fenomeni rilevati siano pressoché le stesse di quelle descritte nella figura 10.3.1(5) e la medesima circostanza si può evidenziare nel confronto della figura 10.3.1(8) con la figura 10.3.1(6), nella quale però avevamo riscontrato un maggiore contenuto armonico su frequenza elevate.

Un'ipotesi che si può formulare è che l'inserimento del triangolo nel trasformatore in questione non porti a significative variazioni dei segnali acquisiti in seguito all'iniezione dell'impulso di calibrazione nelle prese al di sotto del commutatore.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

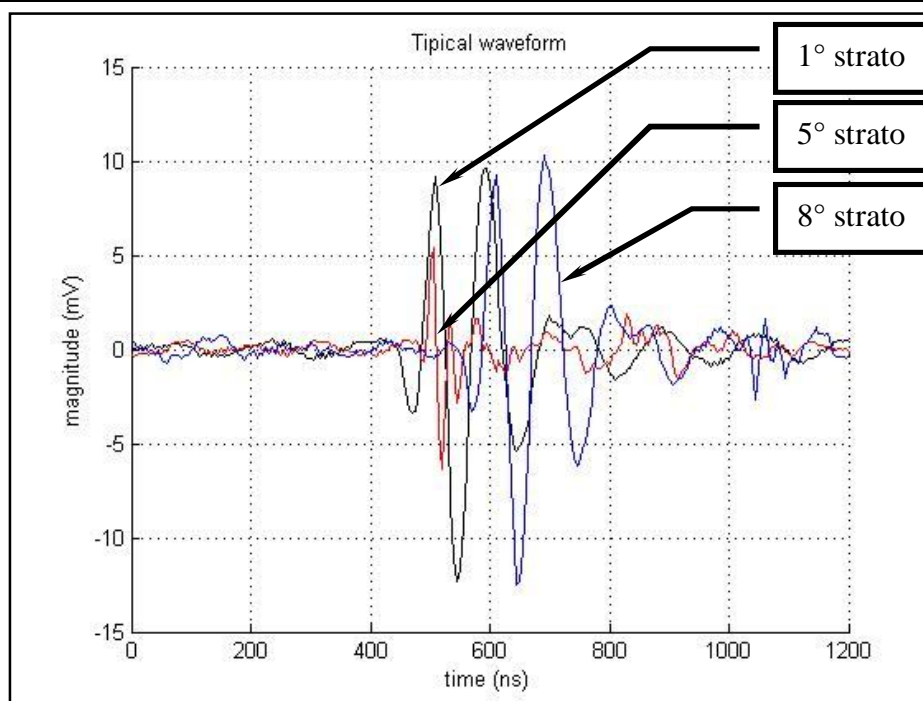


Figura 10.3.1(9): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta negli strati sopra al commutatore senza aver inserito il triangolo

Fonte: Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

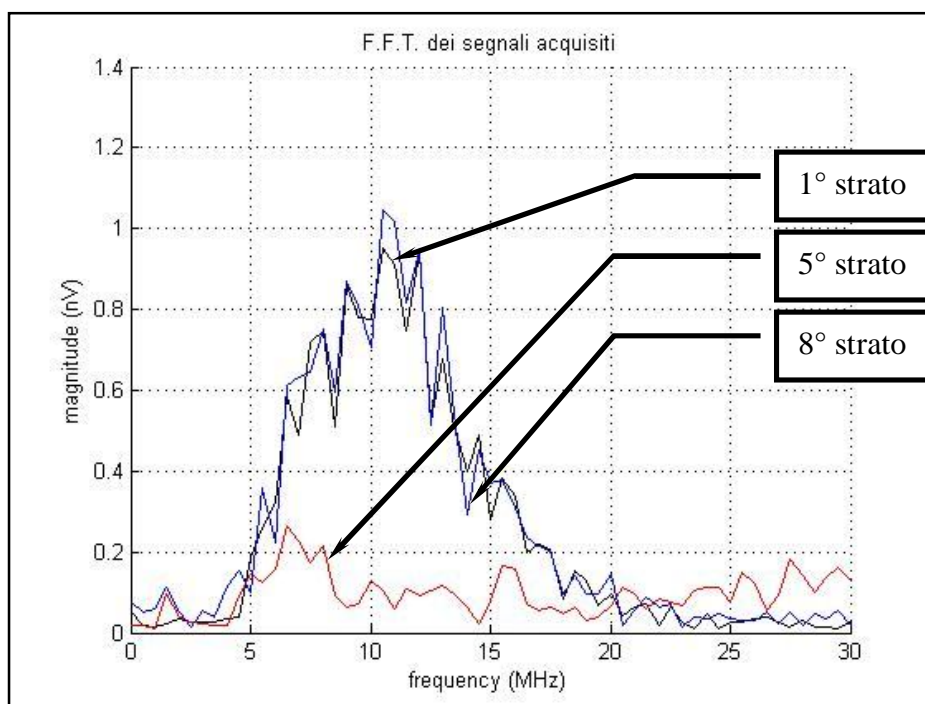


Figura 10.3.1(10): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta negli strati sopra al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

Una sostanziale differenza tra gli strati e le spire lo possiamo notare osservando la figura 10.3.1(9) e la figura 10.3.1(1), cioè l'oscillazione.

Vediamo infatti che con triangolo non inserito, i segnali rilevati provenienti dalle singole prese mantengono la forma d'onda attenuando la loro ampiezza man mano si va verso il commutatore, mentre i segnali rilevati iniettati ai capi dei singoli strati, cioè ai capi di due prese successive, mantengono anch'essi la forma d'onda attenuando l'ampiezza, ma sono molto oscillanti.

L'oscillazione è sicuramente frutto della funzione di trasferimento data dal numero di spire tra una presa e la successiva nelle quali viene iniettato l'impulso di calibrazione. Esiste sempre un'anomalia negli strati intermedi come ad esempio il 5°, nel quale il contenuto armonico del segnale rilevato ha un'ampiezza molto ridotta rispetto agli altri. Stranamente il 1° e l'8° strato hanno medesimo contenuto armonico come si può vedere dalla figura 10.3.1(10), tuttavia presentano forme d'onda diverse come si vede in figura 10.3.1(9).

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

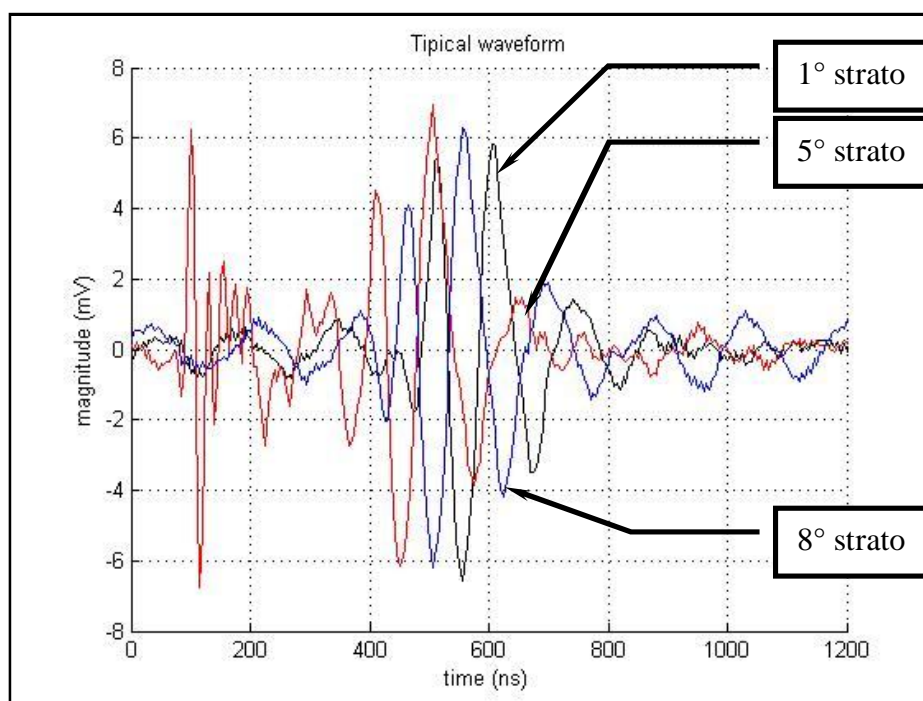


Figura 10.3.1(11): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta negli strati sopra al commutatore con triangolo inserito
Fonte: Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

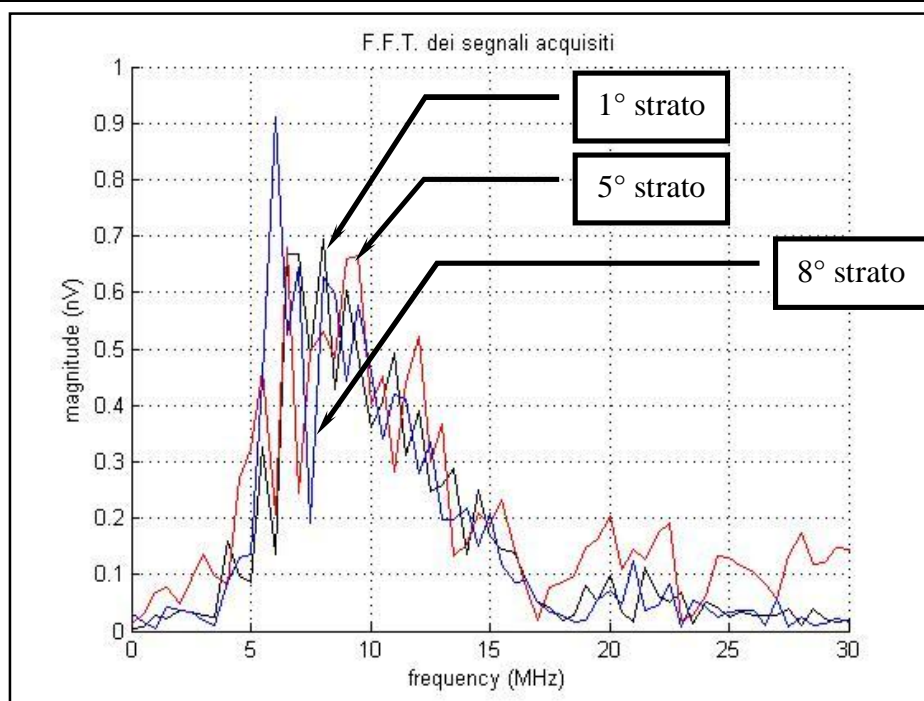


Figura 10.3.1(12): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta negli strati sopra al commutatore con triangolo inserito

Fonte: Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

Osservando la figura 10.3.1(11) possiamo notare come le forme d'onda dei segnali siano diverse tra loro.

Questi segnali presentano inoltre delle oscillazioni molto pronunciate, segno inconfondibile dell'inserimento del triangolo e quindi della funzione di trasferimento delle bobine non in prova.

Si può notare infatti come le oscillazioni nei segnali rilevati aumentino confrontando la figura 10.3.1(9) e la figura 10.3.1(11).

Il confronto fra queste figure mette in evidenza pure una leggera attenuazione dell'ampiezza dei segnali rilevati passando dalla configurazione senza triangolo inserito alla configurazione con triangolo inserito.

Osservando la figura 10.3.1(12) vediamo come i segnali rilevati non presentano forma d'onda analoga tra di loro e comunque diversa da quella con configurazione senza inserimento del triangolo.

Le ampiezze tuttavia rimangono pressoché tali sia con triangolo che senza.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

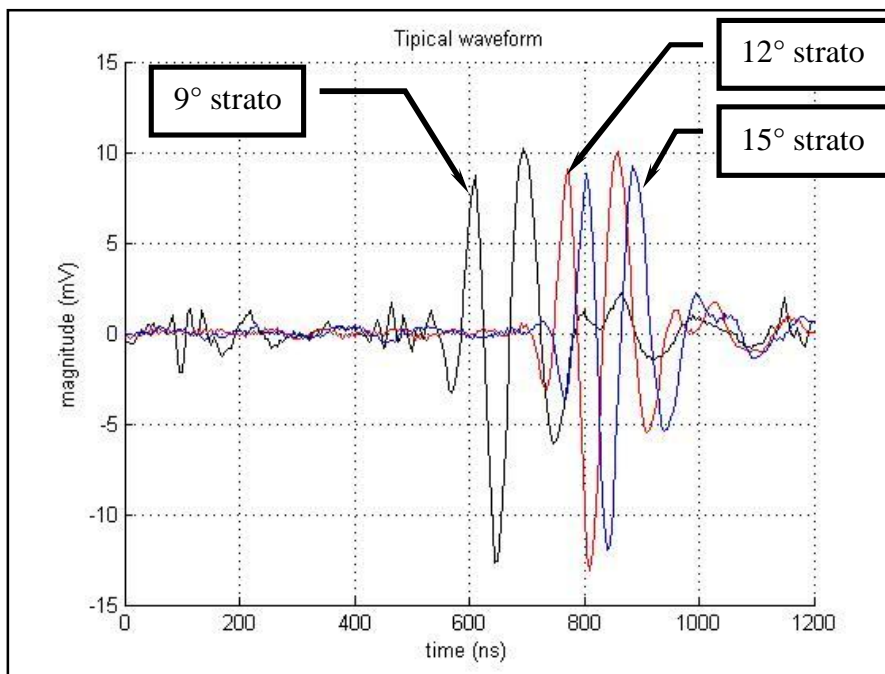


Figura 10.3.1(13): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta negli strati sotto al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

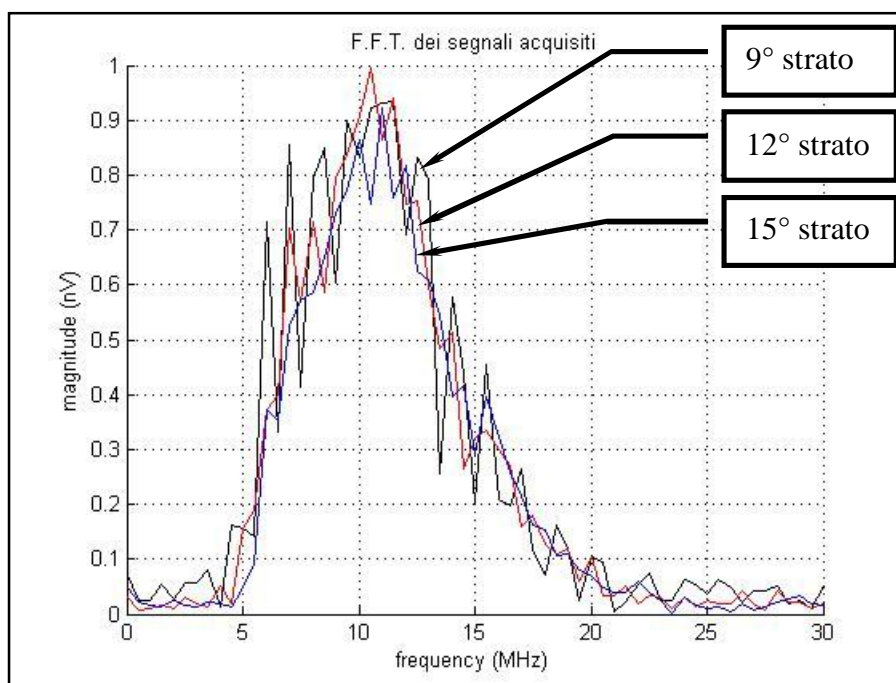


Figura 10.3.1(14): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta negli strati sotto al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

La figura 10.3.1(13) ci mostra delle forme d'onda dei segnali rilevati molto simili, che tuttavia presentano sempre meno oscillazioni passando dal primo all'ottavo strato. Notiamo come le forme d'onda dei segnali rilevati nel quinto e nell'ottavo strato si manifestano in un tempo equivalente maggiore rispetto al primo strato di circa 200 ns. Analizzando il secondo diagramma ampiezza – frequenza riportato nella figura 10.3.1(14) vediamo come le forme d'onda degli spettri dei segnali siano diverse tuttavia pressoché sovrapposte con qualche oscillazione sovrapposta di piccola ampiezza. Le ampiezze degli spettri dei segnali si mantengono abbastanza uniformi su tutte le frequenze a parte i segnali rilevati dal primo strato i quali hanno diversi picchi sovrapposti in diverse frequenze.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

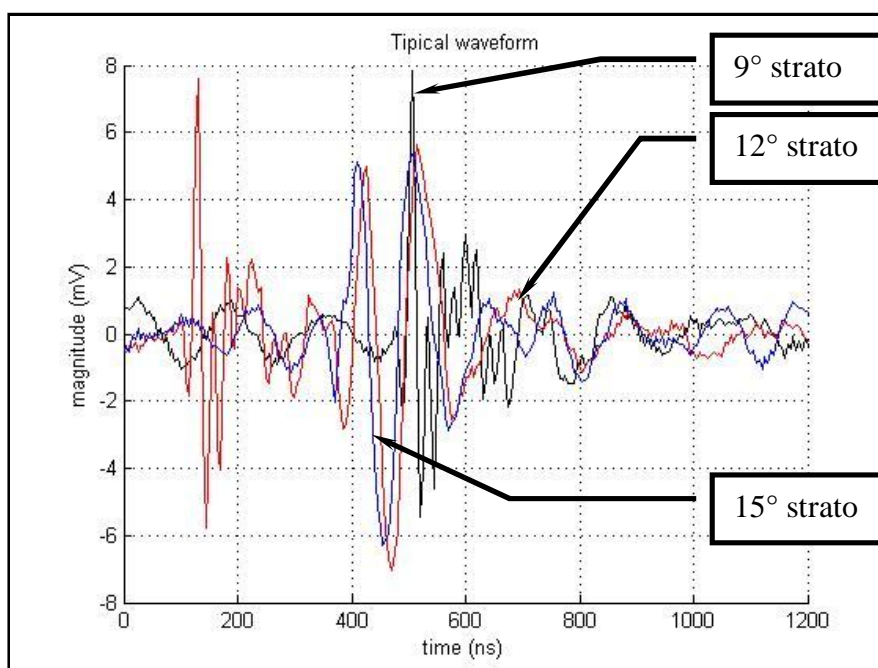


Figura 10.3.1(15): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta negli strati sotto al commutatore con triangolo inserito

Fonte: Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

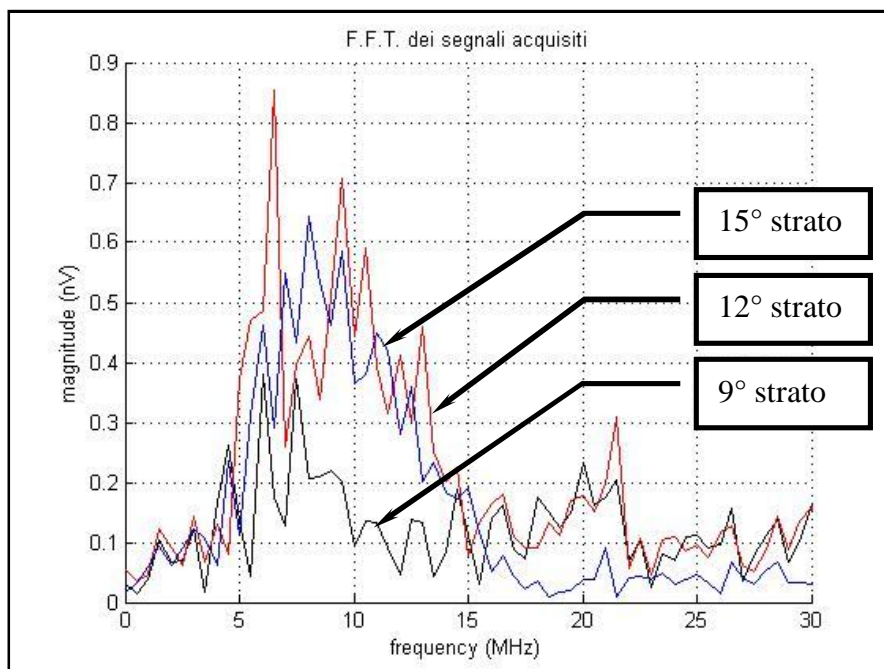


Figura 10.3.1(16): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta negli strati sotto al commutatore con triangolo inserito

Fonte: Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

I segnali visualizzati nella figura 10.3.1(15) non hanno la stessa forma d'onda e sono molto oscillanti specialmente lo strato centrale sotto al commutatore, cioè lo strato 12° facente capo alle prese 12 e 13 del trasformatore trifase prototipo in questione.

I segnali rilevati inoltre in questa figura 10.3.1(15) presentano delle oscillazioni molto maggiori rispetto a quelli rilevati e visualizzati nella figura 10.3.1(13), segno inequivocabile della presenza del triangolo.

Si può inoltre vedere che il tempo equivalente nel quale si manifestano tali segnali è minore rispetto a quelli rilevati senza aver inserito il triangolo di almeno 200 ns.

La figura 10.3.1(16) ci mostra l'effetto della presenza del triangolo, cioè un'attenuazione delle forme d'onda degli spettri dei segnali rilevati.

Si possono notare inoltre maggiori oscillazioni rispetto al caso senza triangolo e delle componenti a frequenze più elevate.

Anche in questo caso le forme d'onda non sono simili e le ampiezze stranamente aumentano passando dal 9° strato al 15° strato.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

10.3.2 PROVA DEL 02/04/2009

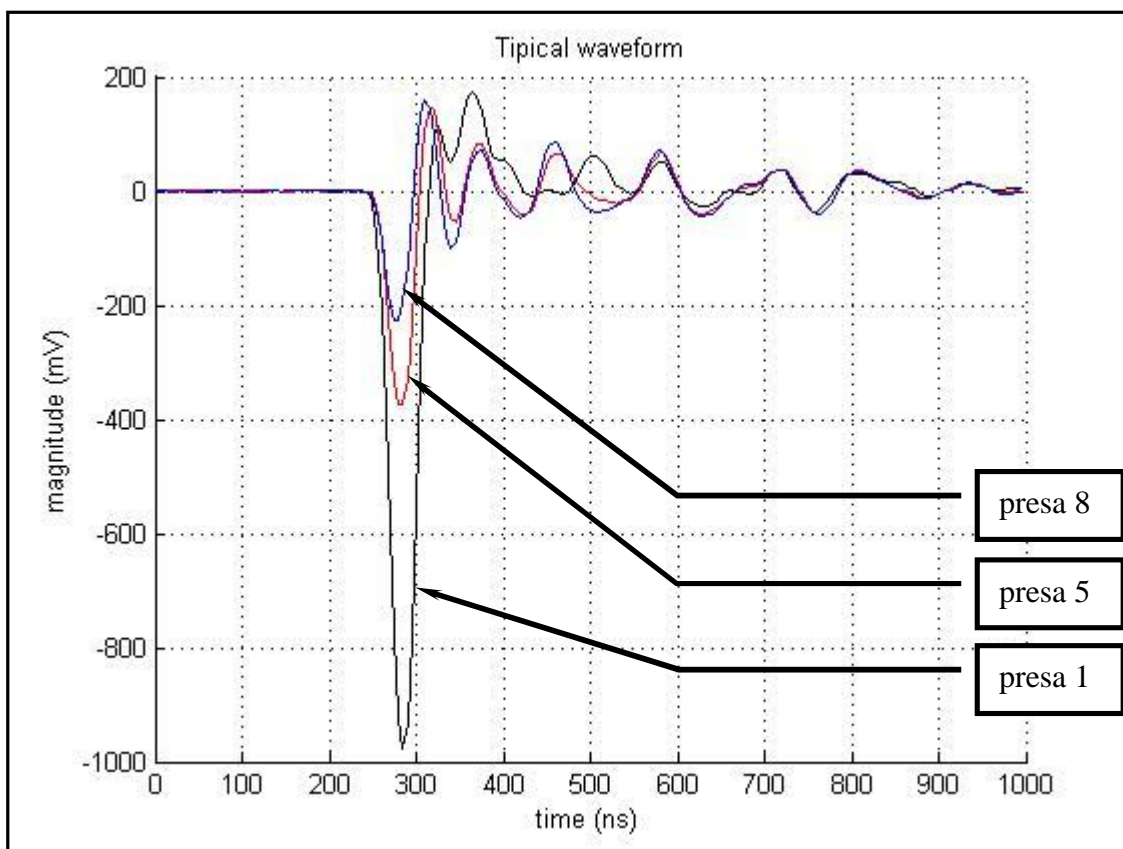


Figura 10.3.2(1): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore senza aver inserito il triangolo

Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

La prova è stata effettuata senza l'inserimento del triangolo, poiché come abbiamo potuto constatare nel paragrafo precedente, la sua presenza tende a modificare profondamente la forma d'onda dei segnali iniettati e quindi rilevati.

La prova inoltre è stata eseguita iniettando un impulso di calibrazione di polarità negativa con una carica apparente di 1500 pC.

La figura 10.3.2(1) di cui sopra, ci mostra come passando dalla presa 1 alla presa 8, i segnali iniettati vengono giustamente attenuati in ampiezza, mantenendo sostanzialmente la stessa forma d'onda, a parte la presa 1 nella quale la forma d'onda presenta alcuni picchi positivi sovrapposti rispetto alle altre due.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

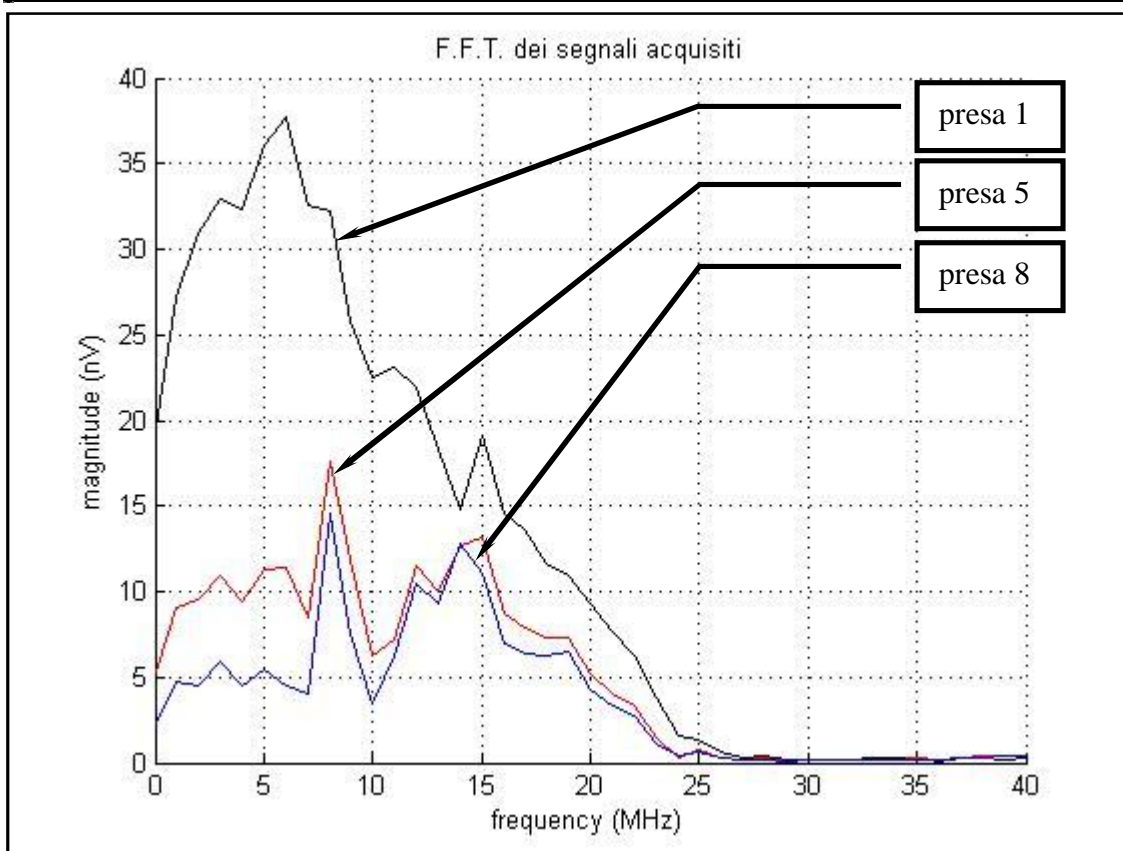


Figura 10.3.2(2): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

Come possiamo vedere anche il diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore conferma la sostanziale analogia tra le forme d'onda degli spettri in frequenza dei segnali e l'assenza di componenti armoniche di frequenza superiore ai 25 MHz.

Si può notare logicamente un'attenuazione dell'ampiezza degli spettri dei segnali rilevati come risposta del sistema a partire dalle presa 1 fino alla presa 8.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

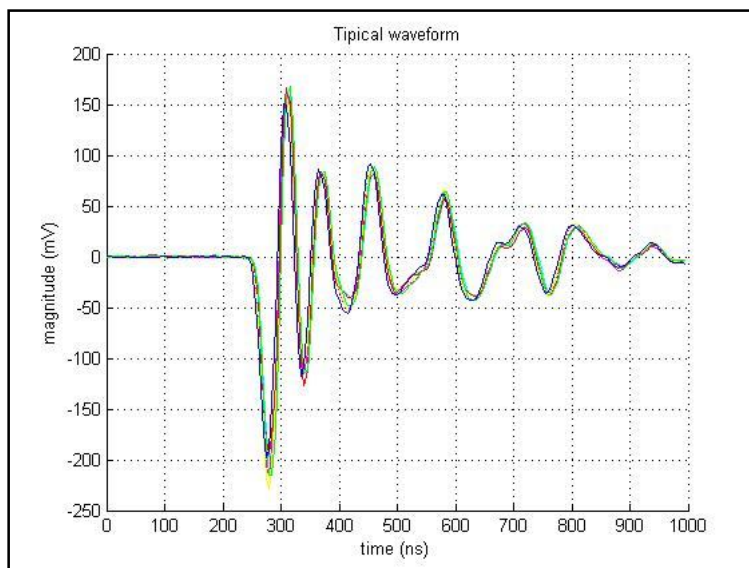


Figura 10.3.2(3): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta nelle prese del commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

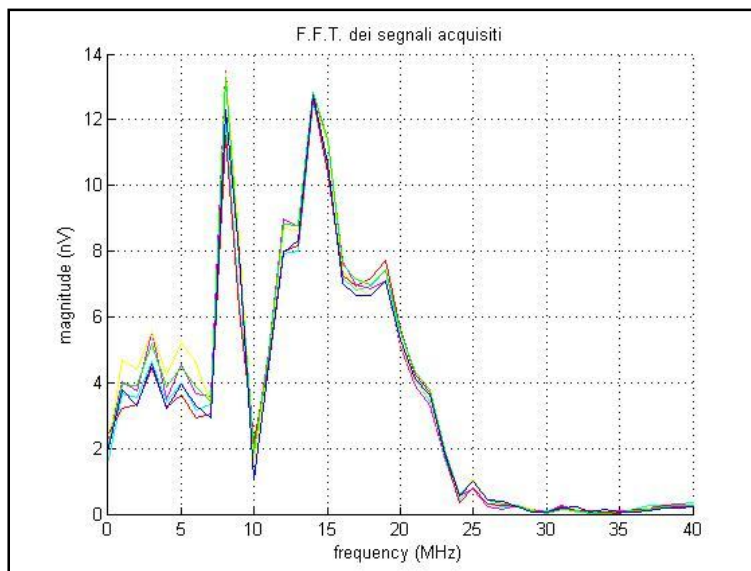


Figura 10.3.2(4): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese del commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

Possiamo vedere come in buona sintesi le forme d'onda dei segnali e dei loro spettri in frequenza siano praticamente uguali a parte qualche piccola oscillazione in certe frequenze. Logicamente l'ampiezza dei segnali e dei loro spettri è diminuita rispetto alle prese poste al di sopra del commutatore.

La forma d'onda dei segnali rilevati è molto oscillante rispetto a quella delle prese al di sopra del commutatore.

10.3.3 PROVA DEL 03/04/2009

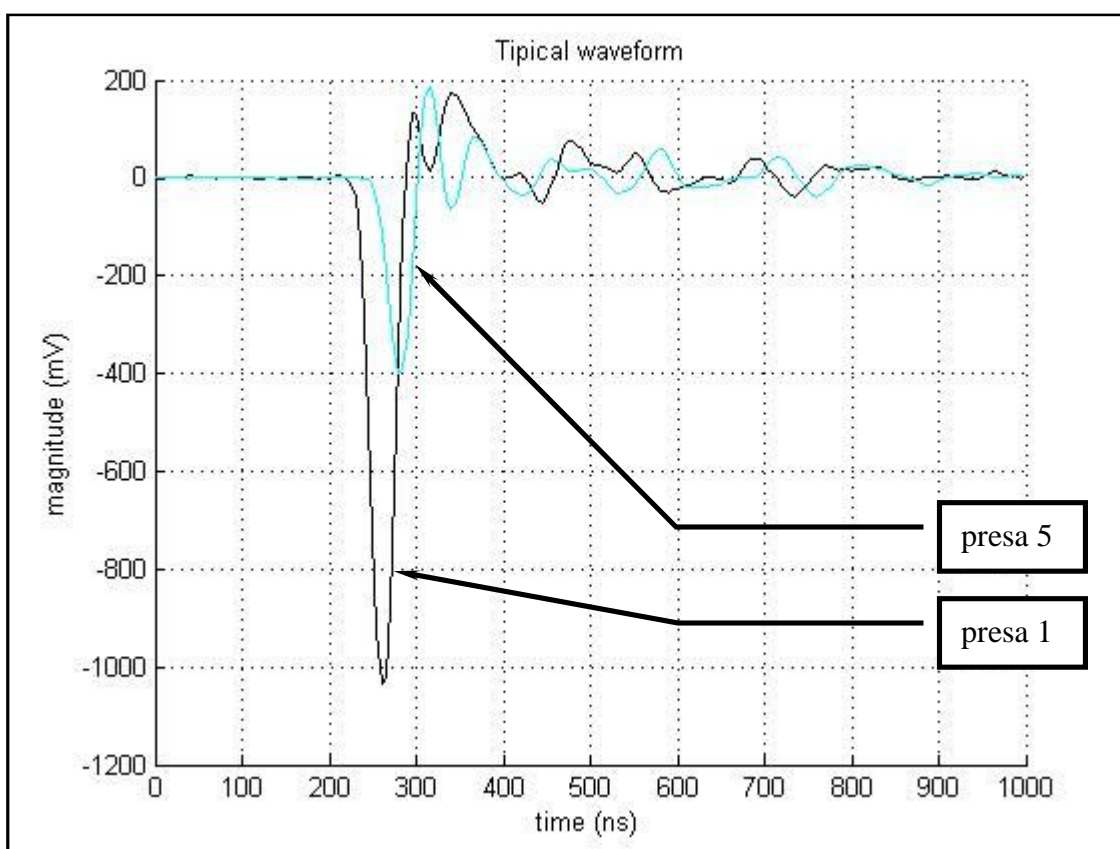


Figura 10.3.3(1): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

La prova in questione è stata condotta analogamente a quella descritta brevemente nel paragrafo precedente iniettando 1500 pC ad alcune prese del trasformatore trifase prototipo allo scopo di comprenderne il comportamento dal punto di vista della funzione di trasferimento del medesimo.

Come possiamo notare le forme d'onda dei due segnali rilevati sono simili, tuttavia presentano qualche differenza anche sostanziale.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

L'ampiezza come in tutti i casi visti sinora diminuisce man mano che si rilevano i segnali filtrati dalla funzione di trasferimento del trasformatore passando dalla presa 1 alle prese sottostanti.

Questo comportamento, ripetutamente verificato nel corso delle misure, ci fa pensare al fatto che i segnali vengano attenuati e distorti a causa delle capacità parassite della rete equivalente del trasformatore trifase campione.

Queste capacità parassite infatti manifestano la loro presenza man mano si aumenta la frequenza dei segnali iniettati, ecco perché man mano il segnale viene iniettato dalla prima presa all'ultima, esso dovrà subire un'attenuazione via via crescente a causa della presenza di un numero sempre maggiore di capacità che drenano corrente.

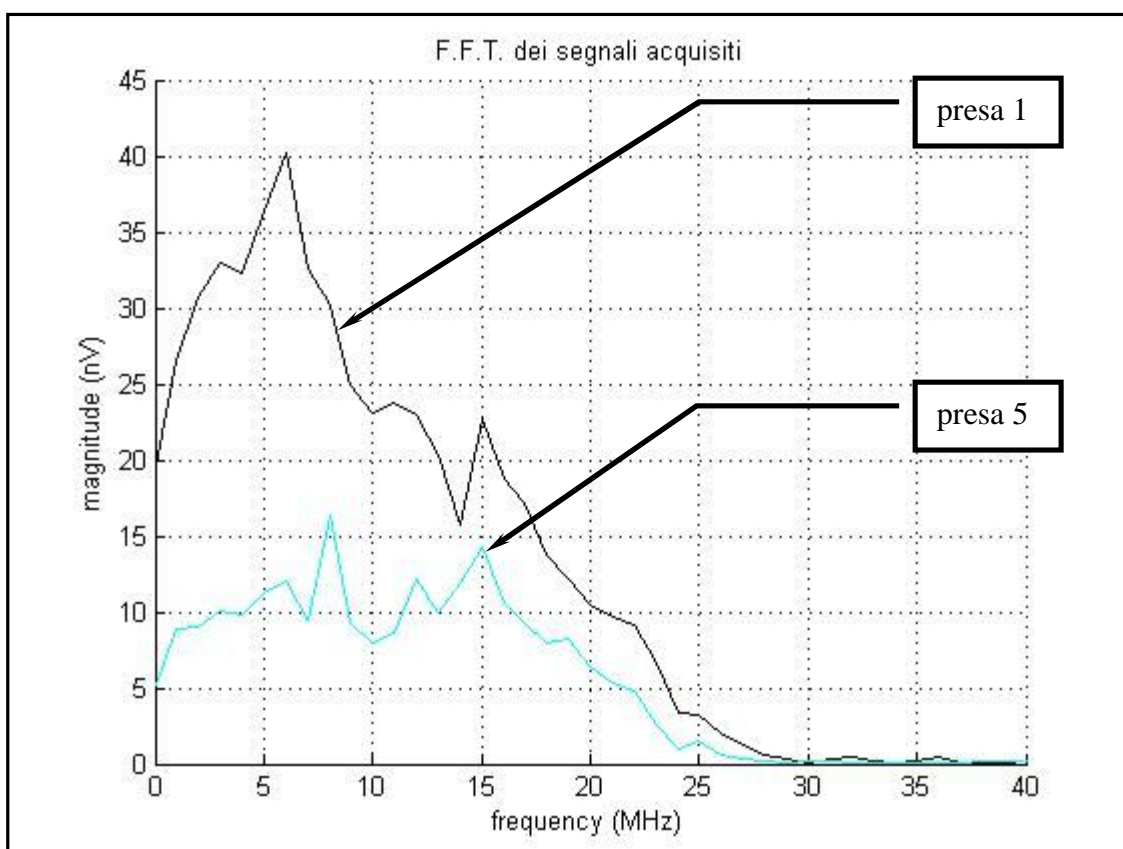


Figura 10.3.3(2): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese sopra al commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

Gli spettri in frequenza dei segnali rilevati sopra alla figura 10.3.3(1) confermano il fatto che ci sia un'attenuazione delle ampiezze in frequenza degli stessi passando dalla presa 1 alla presa 5 e così via.

10. Conclusioni sul rilievo U.W.B. (Ultra Wide Band) delle scariche parziali

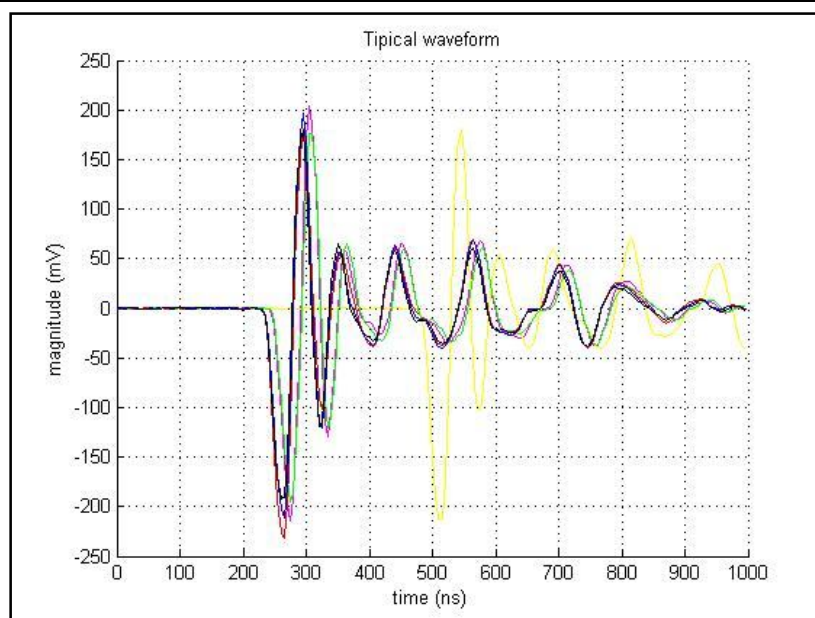


Figura 10.3.3(3): Diagramma ampiezza – tempo dei segnali di risposta nelle prese del commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

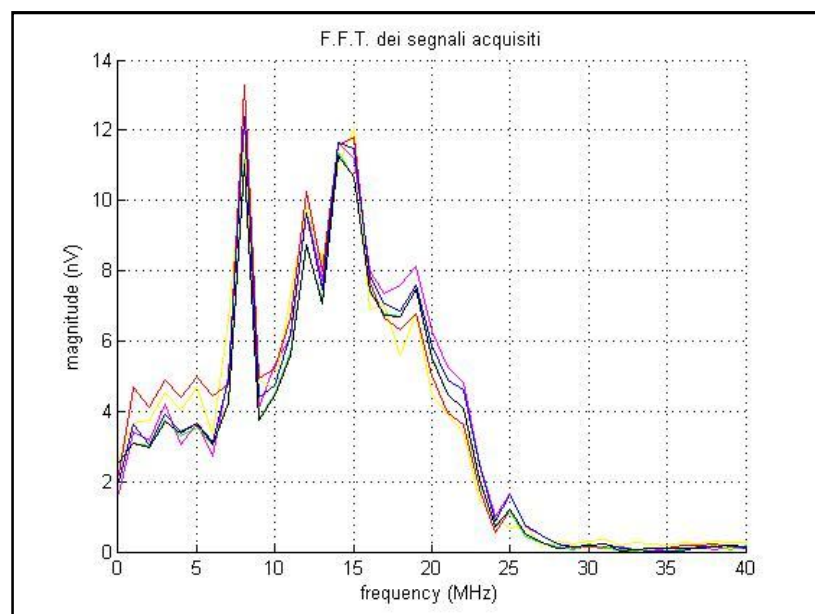


Figura 10.3.3(4): Diagramma ampiezza – frequenza dei segnali di risposta nelle prese del commutatore senza aver inserito il triangolo
Fonte: Elaborazioni Matlab® - Bottega Luca

10.4 CONCLUSIONI

Il tema legato alla misura in banda ultra larga delle scariche parziali è sicuramente quello della discriminazione di segnali diversi, all'identificazione della loro tipologia e alla localizzazione spaziale della sorgente di tali fenomeni impulsivi. Abbiamo già accennato che un fronte di ricerca parallelo a quelli appena citati è la diagnostica dei sistemi elettrici sede di scariche parziali. Si è potuto constatare come le apparecchiature di misura in banda ultra larga di scariche parziali attualmente in commercio non siano in grado, almeno per quanto riguarda il caso in esame in questa trattazione, di localizzare spazialmente le sorgenti di scarica parziale interne all'oggetto in prova. Non solo queste apparecchiature non sono in grado di localizzare le sedi di scarica parziale ma neppure sono in grado di identificare la tipologia di scarica parziale in piena autonomia.

Pertanto l'unica funzione che i sistemi di rilevazione in banda ultra larga delle scariche parziali riescono in qualche modo a dare è una discriminazione di fenomeni impulsivi di diversa natura (segnali di diversa forma d'onda), tuttavia anche questa funzione è nella maggior parte dei casi non automatica, cioè prevede l'intervento di un operatore esterno per guidare il software nell'elaborazione dei segnali acquisiti. Sarebbe dunque interessante riuscire ad automatizzare tale procedura per poter distinguere segnali di natura interna da segnali di natura esterna al dielettrico di un'apparecchiatura soggetta a tali fenomeni impulsivi. Un passo ulteriore di ricerca sarà quello di poter identificare la natura dei segnali rilevati come è stato proposto nei capitoli precedenti tramite il metodo Tempo – Frequenza e rendere anche questa funzione automatica. Il discorso riguardante invece la localizzazione spaziale di sorgenti di segnale interne al dielettrico di un oggetto in prova è una funzione più complessa delle precedenti. Per poter comprendere quali siano e dove siano poste le sorgenti di scarica parziale all'interno del dielettrico sarà necessario:

- Distinguere il rumore di fondo dai fenomeni impulsivi;
- Riuscire ad analizzare pattern omogenei;
- Conoscere la forma d'onda dei segnali rilevati.

La forma d'onda del segnale dovuto alle scariche parziali, infatti, nulla ha a che vedere con la forma d'onda del segnale che viene misurato, poiché chiaramente l'impulso di corrente di scarica parziale è filtrato dalla funzione di trasferimento della parte di circuito che sta tra il difetto e l'impedenza di rilevazione. Qualora sia disponibile un sistema di rilevazione in banda ultra larga riesco a discriminare segnali che abbiano forma d'onda diversa; se per quanto detto ci sono dei segnali che provengono da punti geometricamente diversi all'interno della bobina del trasformatore allora essi presenteranno forma d'onda diversa.

Analizzando la forma d'onda infatti è possibile fare una distinzione tra:

- Segnali aventi medesimo fenomeno fisico d'origine;
- Segnali provenienti da uno stesso punto geometrico ma aventi fisica diversa.

Bibliografia

Bibliografia

(Questa pagina è stata lasciata intenzionalmente bianca)

LIBRI:

- [1] F.H. Kreuger “Partial discharge Detection in High-Voltage Equipment”, Butterworths, 1989.
- [2] G. Baldo, G. Pesavento, “Tecnica delle Alte Tensioni”, Cleup 2004.
- [3] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel “High-Voltage Engineering: Fundamentals”, 2nd edition, Newnes, Oxford, 2005.
- [4] D. Kind, K. Feser “High-Voltage Test Techniques”, 2nd edition, Newnes, Oxford, 2001.
- [5] M.S. Naidu, W. Kamaraju “High-Voltage Engineering”, 2nd edition, Tata – McGraw Hill, 1995.
- [6] J.R. Lucas “High-Voltage Engineering”, University of Moratuwa, Sri Lanka, 2001.
- [7] S. Setti “Fenomeni di scarica parziale nei sistemi isolanti e loro misura”, ENEL s.p.a., 1995.
- [8] M. Mazzini “Corso di sicurezza ed analisi di rischio”, Università degli Studi di Padova, Facoltà d’Ingegneria, Diploma universitario in Ingegneria Meccanica e in Ingegneria Logistica e della Produzione, A.A. 2000-2001.
- [9] A. De Carli “Diagnosi dei guasti”, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Dipartimento di Informatica e Sistemistica, A.A. 2004-2005.
- [10] IEEE “Guide for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors”, 345 East 47th Street, New York, IEEE C57.113-1991.
- [11] IEEE “Guide for Making Corona (Partial Discharge) Measurement on Electronics Transformers”, 345 East 47th Street, New York, IEEE Std. 436-1991.
- [12] IEEE “Guide for Partial Discharge Measurement in Power Switchgear”, 345 East 47th Street, New York, IEEE Std. 1291-1993.
- [13] IEEE “Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery”, 3 Park Avenue, New York 10016-5997, USA, IEEE Std. 1434-2000.

Bibliografia

- [14] TechImp Systems S.r.l “TechImp PD Base II operator’s manual”, Via Toscana, 11/C - 40069 Zola Predosa, BOLOGNA, Italy.

NORMATIVE:

- [15] CEI EN 60270 “Tecniche di prova in alta tensione – Misure di scariche parziali”, 2002-06, terza edizione.
- [16] CEI EN 60076-11:2004 “Trasformatori di potenza – parte 11: Trasformatori di tipo a secco”, 2004.
- [17] IEC 60034-27 TS Ed.1: Rotating electrical machines – Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, 2006.

TESI:

- [18] C. Ceretta “Analisi delle scariche parziali per la diagnostica delle macchine elettriche”, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica, Università degli Studi di Padova, 2008.
- [19] A. Scroccaro “Metrologia delle scariche parziali”, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica, Università degli Studi di Padova, 2003.
- [20] A.K. Lazarevich “Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor”, Master in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.

ARTICOLI:

- [21] C. Ceretta, R. Gobbo, G. Pesavento “Analisi delle Scariche Parziali in Modalità Tempo-Frequenza”, XXII Congresso Nazionale GMEE 2005, A2/9.
- [22] N. Kuljaca, S. Meregalli, G. Rizzi, C. Ceretta, R. Gobbo, G. Pesavento “Development and application of innovative partial discharge analysis algorithms using advanced measuring systems”, ISH, 2009.
- [23] J. Fuhr “PD-Source Localization in the Insulating System of Large Power Transformers”, Electrical Insulation, 2006. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium.

Bibliografia

- [24] J. Fuhr "Procedure for Identification and Localization of Dangerous PD Sources in Power Transformers", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions, vol.12, 2005.
- [25] S.D. Mitchell, J.S. Welsh, R.H. Middleton, B.T. Phung "A Narrowband High Frequency Distributed Power Transformer Model for Partial Discharge Location", Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2007.
- [26] B. Florkowskal, M. Florkowski, P. Zydron "The Role of Harmonic Components on Partial Discharge Mechanism and Degradation Processes in Epoxy Resin Insulation", International Conference on Solid Dielectrics, Winchester, UK, 2007.
- [27] S. Boggs, J. Densley "Fundamentals of Partial Discharge in the Context of Field Cable Testing", IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol.16, No.5, 2000.
- [28] Yuming Tu, Z.D. Wang, P.A. Crossley "Partial Discharge Pattern Recognition Based on 2-D Wavelet Transform and Neural Network Techniques", Power Engineering Society Summer Meeting, vol.1, 2002 IEEE.
- [29] G.C. Stone, H.G. Sedding, N. Fujimoto, J.M. Braun "Practical Implementation of Ultrawideband Partial Discharge Detectors", Electrical Insulation, IEEE Transactions, vol.27, 1992.
- [30] M.S. Mashikian, A. Szatkowski "Medium Voltage Cable Defects Revealed by Off-Line Partial Discharge Testing at Power Frequency", IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol.22, No.4, 2006.
- [31] E. Gockenbach, H. Borsi "Transfer Function as Tool for Noise Suppression and Localization of Partial Discharges in Transformers during On-site Measurements", Leibniz Universität Hannover, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008.
- [32] G. Yeboah "On-Line Partial Discharge Measurements on Turbine Generator Experience with KCPL Montrose Unit 2", Kansas City Power & Light Company, Iris Rotating Machine Conference - New Orleans, 2004.
- [33] J. Wilson "Partial Discharge Analysis - Ultrasonic Techniques to Evaluate Partial Discharge in Electrical Machinery", Electric Power Applications, IEE Proceedings B, vol.132, 2004.

Bibliografia

- [34] TechImp Systems S.r.l “PD Monitoring Systems for Power Transformers - Transformer Condition Assessment Solutions - PD based innovative tools for the Condition Based Maintenance”, Via Toscana 11/C, 40069 Zola Predosa, BOLOGNA, Italy, 2006.
- [35] G. Cresta, G. Dal Mut, A. Oldrati, E.Tortello “Sistemi diagnostici per gli alternatori”, Ansaldo Energia S.p.a., 2006.
- [36] D. Saccardi, R. Villella “Dalla manutenzione programmata a quella predittiva e on-condition: un modello di valutazione tecnico-economica per giustificare le soluzioni di diagnostica e monitoraggio”, tratto da "Progettare e gestire la manutenzione", MC GRAW HILL, 2009.
- [37] M. Muhr “Non – Conventional PD Measurements”, IEC TC G42 WG14, Institute of High Voltage Engineering and System Management, University of Technology Graz, 2009.
- [38] D.Popa “Transformer diagnosis correlating DGA with PD Measurements results”, University of Craiova, No. 30, 2006.
- [39] D. Russwurm “Partial Discharge Measurements and Diagnostics on Power Transformers using a Multi Channel Digital PD Detector”, paper No.: 14, Workshop 2000, Alexandria, Virginia, 13 & 14 September 2000.
- [40] D. Denissov, W. Köhler, S. Tenbohlen, R. Grund, T. Klein “Wide and narrow band PD detection in plug-in cable connectors in the UHF range”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008.
- [41] S. Coenen, S. Tenbohlen, S.M. Markalous, T. Strehl “Performance Check and Sensitivity Verification for UHF PD Measurements on Power Transformers”, University of Stuttgart, Germany, 2006.
- [42] F. Haghjoo, M. Sarlak, S.M. Shahrtash “Implementation of an On-Line PD Measurement System Using HFCT”, Publication of World Academy of Science, Engineering and Technology, VOLUME 37, 2009, ISSN 2070-3740.
- [43] Kršňák, I. Kolcunová “Partial Discharge Measurements in HV Rotating Machines in Dependence on Pressure of Coolant”, Dept. of High Voltage Engineering, Technical University of Košice, Slovakia, Acta Polytechnica Vol. 42 No. 1/2002.

- [44] T. Boczar, S. Borucki, A. Cichon, M. Lorenc “Application of signal processing elements for the characteristics of acoustic emission pulses generated by partial discharges”, Technical University of Opole, Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, Poland, Molecular and Quantum Acoustics, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions, vol. 28, 2007.
- [45] T. Boczar “Application possibilities on the statistical analysis and digital processing methods in the characteristics of the AE signals generated by PDs”, Technical University of Opole, Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, Poland, Molecular and Quantum Acoustics, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions ,vol. 23, 2002.
- [46] K. Obata, R. Takeuchi, T. Shimozono, H. Kikuchi “Partial Discharge under Pulse Voltage with Narrow Pulse Width”, Hitachi, Ltd., Japan Science and Technology Information Aggregator, Electronic.
- [47] Y. Tian, P.L. Lewin, J.S. Wilkinson, S.J. Sutton, S.G. Swingler “Continuous Online Monitoring of Partial Discharges in High Voltage Cables”, High Voltage Laboratory, University of Southampton, Hampshire, IEEE Transactions, U.K.,2004.
- [48] P.K. Shetty, T.S. Ramu “An undecimated wavelet transform based enhancement, statistical feature extraction and detection-classification of PD signals”, Department of HVE, Indian Institute of Science, Bangalore, INDIA, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings. (ICASSP '04), vol.5, 2004.
- [49] D. Cornforth, R. Middleton “Visualisation of electrical transients using the wavelet transform”, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Newcastle, NSW, Australia, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.13, 1998.
- [50] Y. Wang “New Method for Measuring Statistical Distributions of Partial Discharge Pulses”, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 102, Number 5, 1997.
- [51] Ho-Woong Choi, Byoung-Woon Min, Hee-Chul Myoung, Byoung-Ho Lee, Sang-Moon Cho “Wireless sensor network based PD monitoring of underground cable system”, Jicable Conference, Paris, Versailles, France, 24-28 giugno 2007.

Bibliografia

- [52] G. Paoletti, A. Golubev “Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Equipment”, Cal Patterson – Cutler Hammer, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.37, 2001.
- [53] S.M. Hoek, U. Riechert, T. Strehl, K. Feser, S. Tenbohlen “New Procedures for Partial Discharge Localization in Gas-Insulated Switchgears in Frequency and Time Domain”, 15th International Symposium on High Voltage Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, 2007.
- [54] T. Braunsberger, S. Iova, V. Hinrichsen, M. Kurrat “Partial discharge processes at sessile water drop on insulating surfaces”, 16th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Xi’an, China, 2006.
- [55] P. Kundu, N.K. Kishore, A.K. Sinha “Classification of Acoustic Emission Based Partial Discharge in Oil Pressboard Insulation System Using Wavelet Analysis”, Industrial and Information Systems, ICIIS 2008, IEEE Region 10 and the Third International, 2008 , Page(s): 1 – 6 .
- [56] Ching-Chau Su, Hsien-Cheng Liu, Yu-Jung Lin, Ching-Shun Yi, Jiann-Fuh Chen, Tsorng-Juu Liang, Cheng-Chi Tai “Detection of Partial Discharge in Cast-Resin Dry-Type Transformer by using Acoustic Emission Technique”, Taiwan Electric Research and Testing Center, Ministry of Economic Affairs, 2002.
- [57] H.P. Burgener, K. Frohlich “Probability of Partial Discharge Inception in Small Voids”, 2001 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- [58] K. Zális “Propagation of Partial Discharge in winding”, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Power Engineering Technicka 2, CZ 16627 Prague 6, Czech Republic, zalis@fel.cvut.cz .
- [59] Vaillancourt, G.H., St-Arnaud, R., "Partial Discharge Location System for Power Transformers", IEEE Transformer Committee Meeting, Phoenix, Arizona, May 1991.
- [60] N. H. Ahmed, N. N. Srinivas “On-Line Partial Discharge Detection in Transformer”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, 1998.
- [61] S. Manconi “Introduzione alla manutenzione e alla diagnostica”, Università degli Studi di Pisa, 2008.

Bibliografia

- [62] L. Furnaletto “La prevenzione in manutenzione e la diagnostica”, Segesta Srl Milano, Comitato Organizzatore AIPnD, 2009.
- [63] Friedman, S. Berchiolli “Sistemi di Protezione e Sistemi di Diagnosi. Differenze e vantaggi di entrambi”, MANUTENZIONE, Tecnica e Management - 2006.
- [64] N. Bachshmid, G. Diana, P. Pennacchi, A. Vania “Diagnostica ed identificazione dei malfunzionamenti delle macchine rotanti”, Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Milano, MANUTENZIONE, Tecnica e Management - 2007.
- [65] P.G. Adriani, M. Paoli “La Diagnostica e la Manutenzione Predittiva”, Congresso Italiano di Manutenzione, Verona, 2008.