



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

***Dipartimento di Ingegneria Industriale DII***

*Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica*

Rilievo di scariche parziali nelle macchine rotanti per scopi diagnostici

*Evaluation of partial discharges in rotating machines for diagnostic purposes*

***Relatore***

*Ch.mo Prof. Ing. Renato Gobbo*

***Studente***

*Andrea Astolfi 1154456*

*Anno Accademico 2017/2018*



# Sommario

Il presente lavoro ha avuto come oggetto l'utilizzo delle misure di scariche parziali con metodi elettrici come strumento diagnostico per le macchine elettriche rotanti.

Dapprima si è analizzato cosa sono le scariche parziali, come si classificano e quali sono le cause di ogni tipologia.

Sono stati esaminati i metodi di misura classici di tipo elettrico, con particolare attenzione alle raccomandazioni ed indicazioni della normativa di riferimento IEC-60270, ma anche quelli più innovativi, con strumenti a larghissima banda ed i successivi algoritmi di analisi e separazione delle tipologie di scariche parziali.

L'attenzione è stata poi spostata verso l'oggetto di interesse, le macchine rotanti, descrivendone la struttura e le possibili cause di cedimento del sistema isolante, cioè verso i difetti riscontrabili dopo la fase di produzione o di utilizzo e del legame presente con le tipologie di scariche parziali osservabili, grazie anche alla normativa di riferimento IEC-60034-27.

Confrontando le diverse tipologie di sistemi di misura e tecniche di analisi, si sono ricercati quelli più adatti all'utilizzo sulle macchine rotanti, evidenziando nei diversi aspetti del loro funzionamento le possibili criticità e cause di errore.

Sia attraverso brevi simulazioni e considerazioni, sia con prove in laboratorio.

Nella parte sperimentale conclusiva del lavoro, si è voluto verificare se quelle apparecchiature e quei metodi proposti all'interno del lavoro, siano effettivamente idonei ad essere utilizzati nella verifica dello statore e suoi componenti di macchine rotanti, ma ancor più valutare se i dati ricavati, possono effettivamente permettere una distinzione dei fenomeni in atto all'interno del sistema isolante, e quindi predire il loro effetto sulle aspettative di vita della macchina.



# Summary

The aim of this work has been the utilization of partial discharge measurement with electrical methods as a diagnostic instrument for rotating machines.

At first has been analyzed what partial discharges are, how they can be classified and from what they are caused.

It has been examined all the classical electrical methods, with particular attention to recommendations and advices given by the reference norm IEC-60270, but also the newest ones, using ultra large bandwidth instruments and to succeeding algorithms of analysis and separation of the different types of partial discharges.

Next, the attention has moved to the object of interest, rotating machines, describing its structure and possibly causes of failure of its insulation system i.e. to defects that could be observed after the production or the utilization and its relation to the partial discharge phenomena, thanks also by the reference norm IEC 6034-27.

Confronting the different types of measuring systems and analysis techniques, have been researched those most appropriated to the use on rotating machines, highlighting in the different aspects of their work the possible criticalities and sources of errors.

Either by brief simulations and observations, either by laboratory tests.

In the experimental and conclusive part of the work, we wanted to verify if those appliances and methods proposed during the text, are actually able to be used in the verification of the stator and its components of a rotating machine, but even more evaluate if the resulting data, can be effectively permit the distinction of the phenomena in progress inside the insulation system, and then predict them effect on the life expectations of the machine.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Scariche parziali</b>	<b>5</b>
	2.1 Scariche interne	7
	2.1.1 Scariche entro cavità gassose	8
	2.1.2 Scariche ramificate di tipo treeing	10
	2.1.3 Scariche entro cavità con liquido	12
	2.1.4 Circuito equivalente ad una scarica interna	13
	2.2 Scariche superficiali	15
	2.3 Scariche di tipo Corona in aria	17
	2.3.1 Scariche parziali derivanti dall'effetto Corona	20
<b>3</b>	<b>Rilievo e Misura metodi classici</b>	<b>21</b>
	3.1 Schema di principio	22
	3.2 Carica apparente	25
	3.3 Energia dissipata durante la scarica	26
	3.4 Unità di accoppiamento	27
	3.5 Sistemi classici conformi alla IEC 60270	31
	3.6 La normativa IEC 60270 in dettaglio	36
	3.6.1 Definizioni generali	36
	3.6.2 Tensioni di prova applicate	37
	3.6.3 Caratteristiche del sistema di misura	38
	3.6.4 Caratteristiche del sistema di misura	39
	3.6.5 Altri sistemi di misura previsti dalla normativa	43
	3.7 Limiti delle misure eseguite secondo la IEC 60270	47
<b>4</b>	<b>L'isolamento nelle macchine rotanti</b>	<b>49</b>
	4.1 Materiali isolanti nelle macchine rotanti	50
	4.2 Costruzione dell'avvolgimento della macchina	52
	4.3 Problemi dell'isolamento nelle macchine rotanti	55
	4.4 Resistenza di isolamento e indice di polarizzazione	60
	4.5 Fattore di perdita dielettrica	63

<b>5</b>	<b><i>Scariche parziali nelle macchine rotanti</i></b>	<b>67</b>
	5.1 Propagazione degli impulsi entro l'avvolgimento	68
	5.2 Propagazione dell'impulso agli avvolgimenti vicini	72
	5.3 La normativa IEC 60034-27	75
	5.3.1 <i>Definizioni generali</i>	75
	5.3.2 <i>Natura delle scariche parziali nelle macchine</i>	76
	5.3.3 <i>Tecniche e strumenti di misura</i>	78
	5.3.4 <i>Visualizzazione dei risultati</i>	79
	5.3.5 <i>Circuiti di prova</i>	80
	5.3.6 <i>Normalizzazione dei risultati</i>	82
<b>6</b>	<b><i>Misure per scopi diagnostici</i></b>	<b>83</b>
	6.1 I sistemi di acquisizione di tipo UWB	84
	6.2 Elaborazione e analisi dei segnali acquisiti	86
	6.2.1 <i>Analisi nel dominio del tempo</i>	87
	6.2.2 <i>Analisi combinata tempo-frequenza</i>	91
<b>7</b>	<b><i>Strumentazione utilizzata nelle prove</i></b>	<b>93</b>
	7.1 Il sistema di misura James Biddle	93
	7.1.1 <i>Valutazione della risposta in frequenza</i>	95
	7.1.2 <i>Valutazione del tempo di risoluzione</i>	97
	7.1.3 <i>Linearità entro il campo di misura</i>	98
	7.1.4 <i>Misure eseguite con lo strumento James Biddle</i>	100
	7.2 Il calibratore Omicron CAL 542	103
	7.2.1 <i>Verifica della carica apparente del calibratore</i>	104
	7.3 Il sistema Techimp PD Base II	117
	7.3.1 <i>Risposta dell'impedenza di misura Techimp</i>	118
	7.4 Analisi di unità di accoppiamento commerciali	120
	7.5 Il sistema di acquisizione con Buffer	123
	7.5.1 <i>Shunt e filtro passa alto</i>	124
	7.5.2 <i>Inseguitore di tensione a larghissima banda</i>	126



<b>8</b>	<b><i>Risultati delle prove</i></b>	129
8.1	Valutazione del tempo di propagazione	130
8.2	Misura di scariche parziali su una matassa	138
8.3	Misura di scariche parziali su statori completi	146
8.3.1	<i>Statore di fabbricazione BBC <math>U_n=6.25</math> kV</i>	147
8.3.2	<i>Statore di una macchina asincrona con <math>U_n=6</math> kV</i>	158
8.3.3	<i>Statore di fabbricazione ASEA usurato</i>	163
8.3.4	<i>Statore di fabbricazione ASEA riavvolto</i>	172
8.4	Considerazioni sui risultati delle misure	177
<b>9</b>	<b><i>Conclusioni</i></b>	181
<b>10</b>	<b><i>Bibliografia</i></b>	183



# 1

## Introduzione

Le macchine rotanti rivestono un ruolo fondamentale all'interno dei processi industriali e nel settore della produzione di energia elettrica.

In entrambi i casi è richiesta un'elevata affidabilità degli impianti, in modo da garantire durante la loro vita utile, il minor numero possibile di fermi a causa di guasti.

Questa esigenza dovrà essere considerata nella fase di progettazione, prevedendo degli idonei margini nel dimensionamento dei vari elementi, in modo da far fronte a tutte le possibili sollecitazioni a cui verranno sottoposte nel funzionamento.

Si dovrà prestare particolare attenzione durante tutto lo svolgimento del processo produttivo, per evitare che errori in questa fase provochino difetti nella costruzione della macchina, tali da causarne una vita inferiore, rispetto quella di progetto.

Controllando mediante delle procedure di controllo qualità, sia durante, sia al termine della realizzazione.

Infine, prima di poter essere consegnata al cliente, la macchina subirà una serie di test, stabiliti dagli accordi tra le parti e dalla normativa, volti a collaudarne le funzionalità e verificare che essa rispetti tutte le specifiche stabilite all'interno del progetto. Durante la vita della macchina all'interno dell'impianto, saranno necessari interventi periodici di verifica, per accertare che il deterioramento dei vari elementi avvenga secondo quanto ipotizzato nella fase progettuale.

A questo proposito vengono previsti dei fermi programmati degli impianti, in modo da raccogliere in essi tutte le operazioni di manutenzione.

L'attività di manutenzione può essere classificata in diversi modi, a seconda dei criteri adottati:

- **Manutenzione Reattiva:** se questa viene eseguita a seguito di un guasto.
- **Manutenzione Preventiva:** prevede la sostituzione arbitraria di alcuni componenti della macchina giudicati critici, indipendentemente dalle loro condizioni.
- **Manutenzione Predittiva:** attraverso misure e analisi effettuate sulla macchina si cerca di determinare lo stato di salute globale e dei singoli componenti di questa e sulla base di questo pianificare gli interventi necessari.

La Manutenzione di tipo reattivo è un concetto che difficilmente si può adattare alla realtà del mondo industriale o delle varie utilities elettriche, poiché la sua azione è semplicemente quella di ripristino dei danni causati dal guasto di un dato componente, non permettendo in alcun modo di evitare i danni economici legati alla mancata produzione, o, ancor peggio alla necessità di smaltire tutto il materiale in quel momento presente nel ciclo produttivo.

La manutenzione preventiva è invece il metodo tradizionalmente utilizzato, effettuando gli interventi secondo una periodicità fissata a priori sulla base di quanto previsto dal costruttore e dalle caratteristiche del ciclo con cui opera l'impianto.

Oggi, per cercare di ridurre ed ottimizzare le spese sostenute dalle aziende in

interventi di manutenzione, si sta sempre più passando da un'attività manutentiva di tipo predittivo.

Questo però comporta una sempre più intensa attività di diagnostica e monitoraggio sulle macchine al fine di ottenerne un quadro dell'affidabilità in un dato momento.

Attività, che, seppur con un fine comune, presentano significative differenze:

- Diagnostica - Utilizzo di alcune grandezze significative come indice per stabilire se un tipo di guasto è presente all'interno di un impianto e valutarne l'entità. Preferibilmente utilizzando tecniche non invasive.
- Monitoraggio - Continua o Periodica osservazione e registrazione di alcune grandezze significative per controllare la situazione o l'andamento di sistemi anche complessi.

Il monitoraggio Continuo è un processo di tipo integrale, che permette la conoscenza di tutta la storia passata dell'impianto in modo da poter valutare il peso sulla vita del componente di ogni singolo evento.

Tuttavia, la spesa dei sistemi di acquisizione dati possono essere giustificati solamente in impianti di elevato pregio e criticità, per cui, è molto più frequente l'acquisizione delle varie grandezze ad intervalli periodici, senza inglobare la strumentazione nell'impianto dell'utente.

La diagnostica viene invece intrapresa se già si ha riscontrato o si sospetta un'anomalia e se ne vuole quindi approfondire la conoscenza per determinarne la causa.

Uno studio effettuato dall'EPRI (*Electric Power Research Institute*) nel 1983 ha cercato di risalire alle cause di guasto durante la vita di oltre 500 diverse macchine rotanti alimentate in media tensione, è emerso che nel 36% dei casi, il guasto era stato causato da un cedimento dell'isolamento degli avvolgimenti statorici, motivo secondo solo ai guasti di natura meccanica con una percentuale del 41% (Fig. 1-1).

Risulta quindi essenziale trovare parametri per poter valutare le condizioni di salute del sistema isolante della macchina, in modo da intervenire in modo pianificato e puntuale, prima del verificarsi del guasto.

In questo modo è possibile fermare la macchina in un momento in cui questo non vada ad impattare troppo sulla produzione e, soprattutto, prima che il guasto provochi ulteriori danni, rispetto a quelli latenti già presenti.

Le misure correttive possono andare da una semplice pulizia dello statore nel caso di problemi con scariche superficiali, fino ad un completo riavvolgimento della macchina, in questo secondo caso la pianificazione dell'intervento può essere molto utile per

Studied by	Bearing fault (%)	Stator fault (%)	Rotor fault (%)	Others (%)
IEEE	42	28	8	22
EPRI	41	36	9	14

Fig. 1-1 Cause di guasto più frequenti nelle macchine rotanti raccolte da diversi studi  
(fonte: *semanticscholar.org*)

le macchine di grande potenza, per preparare le nuove matasse da inserire nelle cave prima del fermo, in modo da accorciare di molto i tempi di fuori servizio.

Le misure riguardanti le scariche parziali vengono eseguite ormai da lungo tempo su molti dispositivi di tipo elettrico, sia al termine del processo produttivo dell'oggetto, sia durante la vita.

In questi oggetti, la tipologia di valutazione delle scariche parziali è legata al rispetto da parte del dispositivo in prova di un valore massimo di intensità delle scariche parziali presenti fissato dalla normativa di riferimento.

Mentre la loro applicazione nel campo delle macchine rotanti è più recente, anche dal punto di vista normativo.

In quanto, le diverse tipologie di macchine rotanti ed in special modo le diverse tecniche utilizzate nella costruzione, rendono impossibile a priori stabilire delle soglie come negli altri ambiti.

Viene utilizzato un approccio diverso, ovvero quello di cercare di risalire a quali fenomeni danno luogo alle singole scariche parziali e determinarne la pericolosità o meno per gli isolamenti.

Esse rappresentano lo strumento ideale per la diagnostica e monitoraggio, perché sono intrinsecamente non invasive, abbisognando nella forma più tradizionale solo della disconnessione della macchinina dalla rete di alimentazione.

Si tratta poi di una valutazione eseguita nell'intorno della tensione nominale degli isolamenti, quindi non distruttiva e nemmeno troppo stressante anche su elementi ormai invecchiati.

Nella letteratura scientifica, numerosi articoli hanno fornito prova della loro efficacia in questo ambito, che si cercherà di approfondire anche attraverso questo lavoro di tesi.



# 2

## Scariche parziali

Le apparecchiature elettriche necessitano al loro interno della presenza di elementi isolanti per separare le parti attive a diverso potenziale fra loro e verso massa.

A questo scopo possono essere utilizzate sostanze appartenenti a tutti i diversi stati della materia (solidi, liquidi, gas).

Questi mezzi vengono generalmente suddivisi in due categorie:

- *Autoripristinanti* dopo essere stati interessati da una scarica elettrica, sono in grado di ripristinare completamente le caratteristiche isolanti
- *Non Autoripristinanti* il processo di scarica in essi compromette in modo irreversibile le caratteristiche di tenuta dielettrica

Oltre alla funzione puramente elettrica, spesso, l'isolamento ha anche funzioni ausiliarie, come quella di permettere al calore prodotto di essere trasferito verso l'esterno, oppure può assolvere a funzioni di tipo meccanico, mantenendo in posizione le parti attive e proteggendole.

Si delineano quindi una molteplicità di stress a cui esso è sottoposto (termici, elettrici, chimici, meccanici...). Ciascuno di essi contribuisce in modo più o meno marcato all'invecchiamento del materiale, ovvero alla progressiva degenerazione delle prestazioni iniziali.

Le proprietà e la vita di un materiale isolante sono fortemente condizionate dalla presenza all'interno dello stesso di *difetti*, ovvero di particelle indesiderate all'interno della matrice. I difetti possono essere classificati sulla base della dimensione in micro e macro. Quelli di tipo microscopico possono essere: bolle d'aria, cavità gassose, micro cricche, particelle conduttrici. ..

Mentre, quelle di tipo macroscopico possono essere: contatto improprio tra il materiale isolante e il conduttore, delaminazioni del rivestimento negli avvolgimenti, guasti tra spire...

Quello che accomuna tutte queste diverse situazioni è il fatto di andare a produrre delle zone più o meno estese dove il campo elettrico è più intenso, quindi più intensi stress dielettrici. Nella pratica è impossibile realizzare industrialmente un mezzo isolante privo di difetti, ma, si dovrà accertare che questi non impediscano di rispettare le condizioni operative nominali e di prova per cui è stato progettato.

Il numero e l'estensione dei difetti aumenta a seguito del processo di invecchiamento, portando in conclusione alla scarica e ponendo fine alla vita dell'isolamento.

La presenza di numerosi difetti nell'elemento al termine della produzione può fungere da catalizzatore, accelerando notevolmente il processo di invecchiamento.

Ben prima della scarica distruttiva per l'isolamento, avvengono a causa della disuniformità del campo elettrico, delle scariche di più piccola entità, che coinvolgono solo una porzione del mezzo isolante e vengono per questo dette *scariche parziali*.

La normativa IEC 60270, che si occupa di misura delle scariche parziali, nelle prime pagine le definisce come segue:

*“Scarica elettrica localizzata che solo parzialmente attraversa l’isolamento tra conduttori, può essere o no adiacente a questi.”*

A seconda della zona coinvolta e del tipo di difetto che le ha causate, le scariche parziali possono essere classificate in:

- *Interne*, quando avvengono all’interno dell’oggetto considerato.
- *Esterne* se avvengono sulla superficie di interfaccia dell’oggetto
- *Corona* legato alla scarica nei mezzi isolanti gassosi

Ogni scarica parziale libera una quantità di energia, legata all’impatto di elettroni o ioni con elevata energia, in diverse forme (luminosa, acustica, termica, onde elettromagnetiche..).

Più avanti, quando si parlerà di misura e rilevazione, questi fenomeni secondari potranno essere impiegati, in alternativa alle misure di natura strettamente elettrica, per rilevare il fenomeno. Al tempo stesso essi sono la causa del progressivo deterioramento dei mezzi isolanti non autoripristinanti a causa delle trasformazioni chimiche indotte localmente, poiché le scariche parziali vanno a fornire l’energia di attivazione per renderle possibili.

Qualsiasi sistema isolante è formato da una molteplicità di elementi, ciascuno dei quali assolve ad un diverso compito, e per questo realizzato con materiali a se, secondo le proprietà richieste.

Ogni materiale potrà dare luogo a scariche parziali di differente natura, a seconda della struttura e dei difetti presenti, così come presenterà una diversa tolleranza verso il fenomeno.

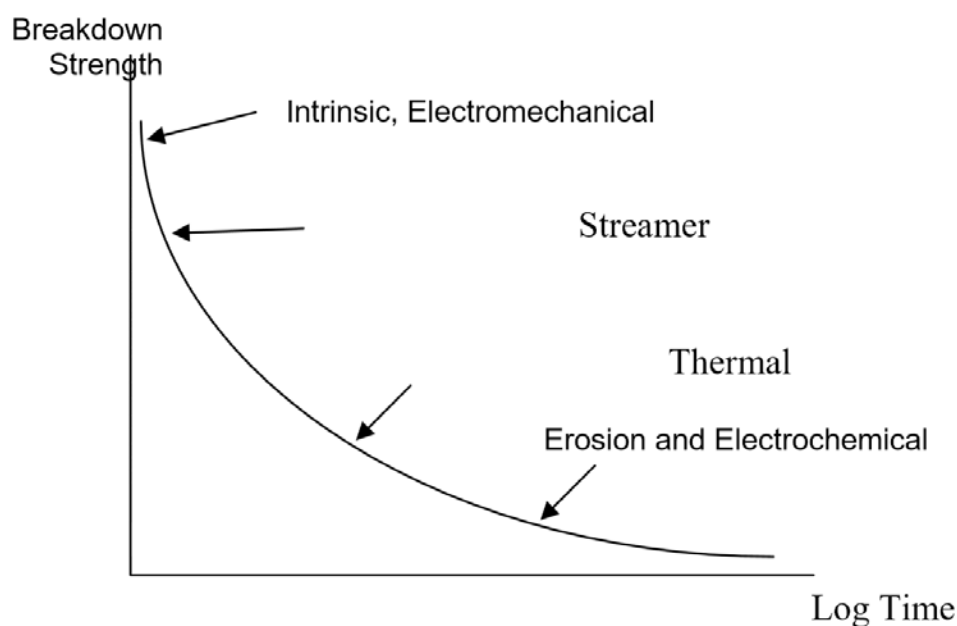


Fig. 2-1 Tensione di scarica in funzione del tempo di applicazione della tensione (fonte: Benha University)



## 2.1 Scariche interne

Il comportamento del materiale in presenza di inclusioni gassose o di altre impurità con rigidità dielettrica inferiore può essere spiegata attraverso il seguente esempio. Disponendo di due elettrodi piani tra loro affacciati e ponendo fra di essi uno strato di materiale isolante, con costante dielettrica  $\epsilon$ , di spessore minore della distanza tra i due, lasciando così uno strato d'aria, si ottiene la struttura mostrata in (Fig. 2-2).

Applicando poi tensione tra le due armature, si ha un'iniqua ripartizione del campo elettrico tra la regione in aria e quella occupata dal dielettrico, legata all'inverso delle costanti dielettriche e delle capacità dei due strati:

$$\frac{E_a}{C_a} = \frac{E_s}{C_s} \quad \text{eq. 2.1}$$

Dall'equazione è possibile notare come la regione in aria, sebbene più debole, sia quella dove il campo elettrico è più intenso.

Per questo, aumentando la tensione tra gli elettrodi, si potrà giungere ad una condizione per cui il campo elettrico supera la rigidità dielettrica dell'aria, provocando una scarica in questa regione.

Questo non pregiudica l'isolamento complessivo tra i due elettrodi, che viene comunque garantito dallo strato di materiale isolante.

Si tratta quindi di una scarica di tipo parziale, infatti il materiale isolante del secondo strato da solo si trova a sopportare l'intera tensione applicata.

In modo analogo possono essere considerati anche schemi più complessi, come quello di (Fig. 2-3), in cui un sottile strato d'aria è interposto tra due strati di materiale isolante, l'unica differenza è questa volta la presenza di tre capacità nella rete equivalente del circuito.

Il caso di (Fig. 2-4) relativo ad una inclusione gassosa all'interno di un materiale isolante è analogo, l'aria presente nella cavità viene maggiormente sollecitata dal campo elettrico, fino a provocarne la scarica.

Il materiale che circonda la cavità ha una propria capacità, che si trova in parallelo rispetto quella della catena direttamente coinvolta dalla corrente di scarica.

La tensione a cui iniziano a manifestarsi questi fenomeni è legata alla geometria ed alle dimensioni della cavità, oltre al tipo di sostanza in essa contenuta.

È necessario distinguere tra cavità con inclusioni gassose e cavità con presenza di liquidi, poiché vi sono differenze nel comportamento.

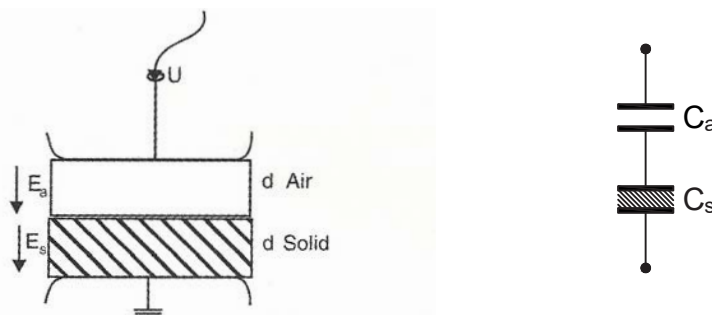


Fig. 2-2 Strato d'aria ed isolante solido  
(Fonte: [10])

## 2.1.1 Scariche entro cavità gassose

Il comportamento di cavità entro cui è presente una miscela gassosa ne è determinato dalla geometria e dalla eventuale presenza di cariche superficiali sulle pareti, oltre certamente alla pressione ed al tipo di gas in essa racchiuso. A causa di fenomeni di diffusione, nel lungo periodo, la composizione del gas e la pressione nelle varie inclusioni entro il materiale andrà ad eguagliare quelle esterne.

Attraverso le curve di Paschen è possibile stimare il valore della tensione di Break-down della cavità (Fig. 2-5), come funzione del prodotto  $pd$  e del tipo di gas, così come il valore critico del campo elettrico secondo l' eq. 2.2 .

$$E_{bd} = \frac{Bp}{\ln(Apd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]} \quad \text{eq. 2.2}$$

I termini A e B sono componenti del primo coefficiente di Townsend, mentre  $\gamma$  è il secondo coefficiente di Townsend.

Occorre poi valutare l'effetto di concentrazione delle linee di campo prodotto dalla presenza della cavità (Fig. 2-6).

Le inclusioni gassose normalmente presenti, hanno la forma di piccole bollicine sferiche, per cui, il campo elettrico al loro interno può essere così ottenuto:

$$E_a = \frac{3\epsilon_r E}{\epsilon_{ra} + 2\epsilon_r} \approx \frac{3E}{2} \quad \text{eq. 2.3}$$

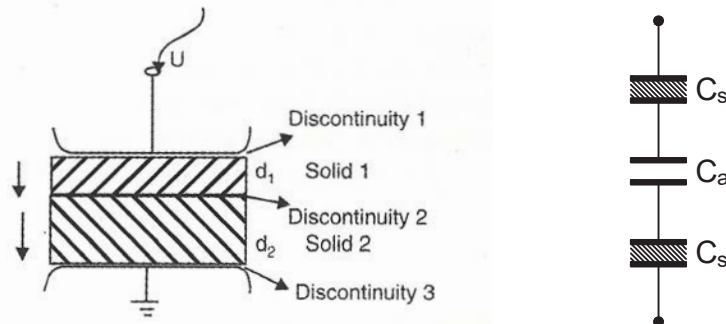


Fig. 2-3 Sottile strato d'aria tra due isolanti solidi  
(fonte: [10])

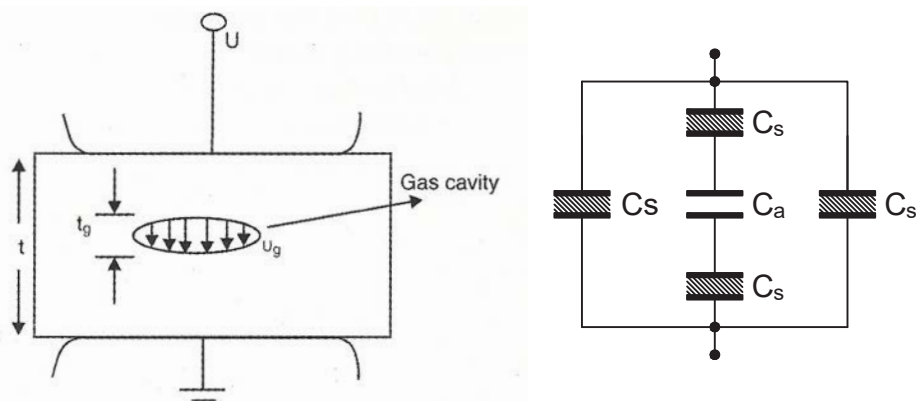


Fig. 2-4 Cavità gassosa entro il mezzo isolante  
(fonte: [10])

Dove la seconda espressione valida se la costante dielettrica del mezzo isolante è molto superiore a quella della miscela gassosa.

Allungamenti della forma della cavità nella direzione delle linee del campo portano ad un miglioramento della situazione, fino ad eguagliare il campo elettrico presente nel materiale isolante nel caso in cui la cavità cilindrica si estenda per tutta la sua lunghezza.

Situazione complementare è quella della cavità piana mostrata in (Fig. 2-3), dove il campo elettrico a cui è sottoposto il gas è pari ad  $\epsilon$  volte quello nel materiale.

La presenza di materia conduttrice sulle pareti della cavità può notevolmente aumentare il valore del campo critico necessario a produrre la scarica, idealmente, se queste ne fossero completamente ricoperte, il campo interno sarebbe nullo.

I ragionamenti fin qui esposti sono validi nel caso di una cavità priva di carica spaziale libera. Le cavità reali presentano invece carica depositata sulle proprie pareti, sia nel processo di fabbricazione, sia da scariche precedenti.

Questi fenomeni fanno notevolmente aumentare la dispersione del valore della tensione di scarica, rendendo meno deterministico il comportamento di un isolante solido. Quanto detto può essere applicabile anche per le bolle di gas presenti negli isolanti liquidi.

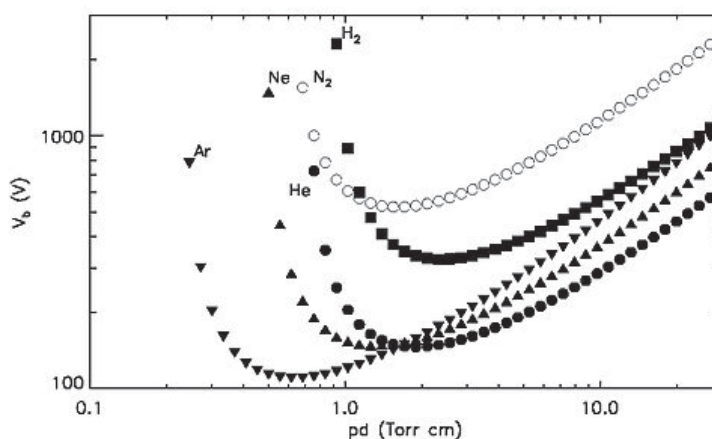


Fig. 2-5 Curve di Paschen per i gas Argon, Neon, Elio, Azoto, Idrogeno  
(fonte: wikipedia.org)

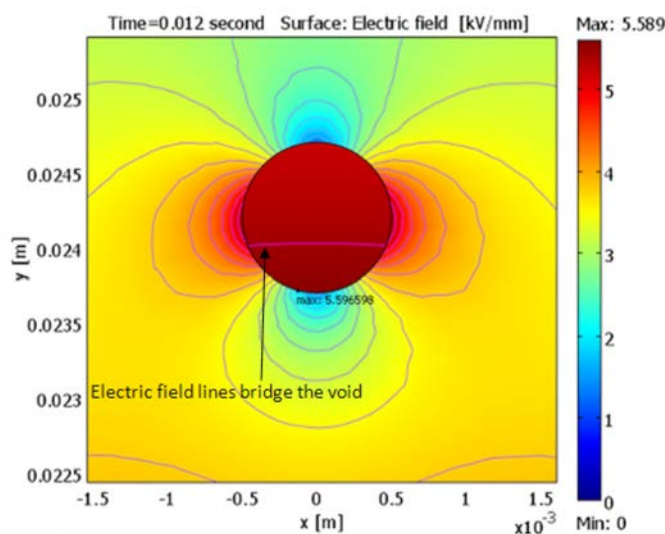


Fig. 2-6 Effetto di concentrazione delle linee del campo elettrico all'interno della cavità  
(fonte: [12])

## 2.1.2 Scariche ramificate di tipo treeing

Il treeing è un fenomeno di tipo elettrico che precede la scarica completa negli isolanti solidi.

Partendo da difetti localizzati in cui il campo elettrico è molto intenso, permette al canale di scarica di propagarsi all'interno del materiale con una caratteristica forma ad albero a cui deve il nome.

Si tratta del risultato dell'erosione e delle trasformazioni chimiche compiute dalle singole scariche parziali, specialmente nei materiali polimerici estrusi, dove l'urto di elettroni e ioni con alta energia sulle pareti della cavità ne aumenta le dimensioni decomponendo le lunghe catene polimeriche e depositando residui carboniosi, che ulteriormente rovinano l'uniformità del campo elettrico.

In questo modo il processo diviene sempre più energetico, rendendo nel tempo la sua evoluzione più rapida, al punto da essere uno dei maggiori motivi di cedimento dei cavi di media e alta tensione.

Il canale conduttore disegna entro il materiale le cosiddette "*figure di Lichtenberg*", le quali possono avere due diverse forme a seconda del tipo di difetto da cui si sono originate.

La ramificazione può essere singola nel caso in cui il canale si propaghi a partire da uno dei due elettrodi "*Vented trees*".

Se invece la propagazione avviene a partire da zone centrali del dielettrico, come cavità gassose, il canale presenta una doppia ramificazione, rivolta verso ciascuno dei due elettrodi "*Bow-tie trees*".

La presenza di zone ad elevato gradiente di potenziale può essere dovuta a impurità conduttrici all'interno del dielettrico (tra cui l'acqua), cavità gassose o asperità e bave sulla superficie degli elettrodi.

L'ingresso di acqua e sali all'interno del materiale isolante nei cavi (specialmente XLPE) è particolarmente temuto, al punto da aver dato nome al fenomeno che ne causa la scarica "*Water tree phenomena*".

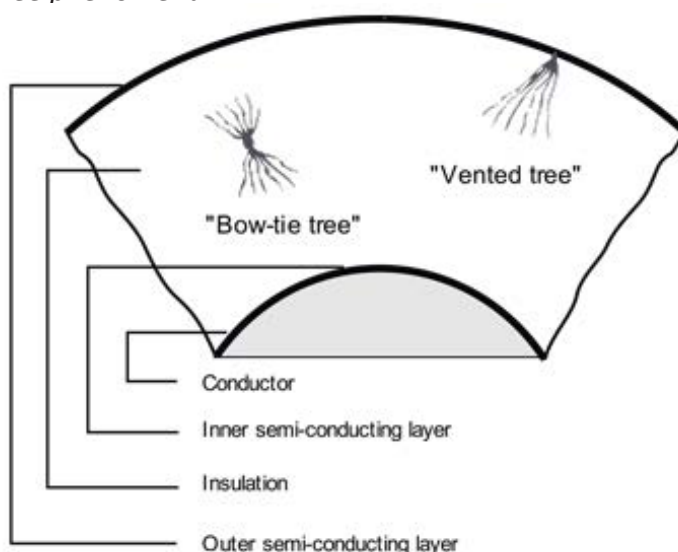


Fig. 2-7 Effetto di concentrazione delle linee del campo elettrico all'interno della cavità  
(fonte: KCI.co.ir)

La dimensione di questi canali d'acqua all'interno della matrice polimerica è veramente microscopica, fino a richiedere l'utilizzo di un microscopio elettronico per accertarne la presenza.

È bene che la durata dell'isolante agli effetti della corrosione da scariche parziali sia superiore alla vita utile dell'apparecchiatura, in modo da evitare l'insorgenza di guasti all'isolamento in condizioni ordinarie.

In figura (Fig. 2-9) è rappresentata la curva di vita per diversi isolanti impiegati in cavi di media tensione al fenomeno, dove l'esponente  $n$  è dettato da proprietà del polimero impiegato, condizioni ambientali e qualità del processo realizzativo.

Un semplice modello empirico, confermato dai grafici sottostanti, per descrivere il processo è:

$$tE_B^n = cost. \quad eq. 2.4$$

Dove  $t$  rappresenta il tempo di applicazione della sollecitazione ed  $E_B$  la sua entità in termini di campo elettrico.

Durante la messa in servizio di cavi, viene effettuata una prova di tenuta dell'isolamento, eventualmente con modalità VLF (very low frequency, tipicamente 0,1 Hz).

Nella quale è raccomandabile l'esecuzione di una misura di scariche parziali.



Fig. 2-8 Figure di Lichtenberg all'interno di un blocco trasparente di materiale acrilico  
(fonte: Wikipedia.org)

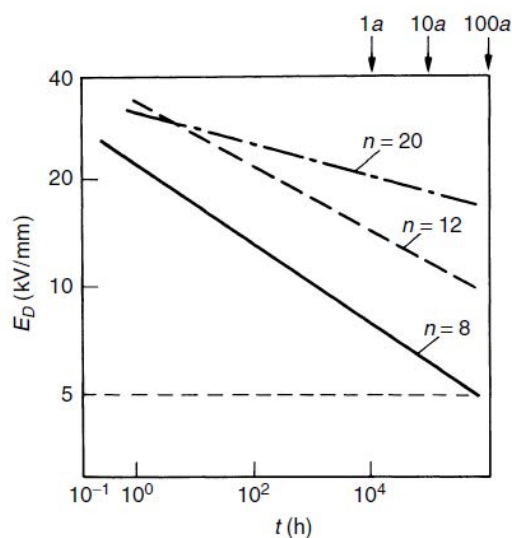


Fig. 2-9 Curva di vita per diversi isolanti polimerici utilizzati in cavi di media tensione  
(fonte: [8])



### 2.1.3 Scariche entro cavità con liquido

Qualora il materiale isolante si trovi immerso in un liquido isolante, oppure ne sia stato a contatto durante il processo di fabbricazione, possono essere presenti in esso bolle di tale sostanza.

Anche in questo caso l'effetto che si ha è la concentrazione delle linee di campo elettrico nella zona del difetto, in misura dipendente dal rapporto fra le costanti dielettriche delle due sostanze.

Nel caso di una bollicina di forma sferica, potrà essere utilizzata la relazione eq. 2.3. È questo il caso dell'isolamento di trasformatori in olio, in cui l'isolamento tra strati viene tipicamente realizzato con carta ricoperta di resina epossidica.

Durante le operazioni di riempimento, grazie alla porosità della carta, l'olio si inserisce negli interstizi presenti tra le varie fibre di cellulosa.

Questo migliora notevolmente le prestazioni del assieme rispetto a quelle dei singoli isolanti. L'azione dell'olio è importante, poiché esso va a riempire le porosità della carta, altrimenti occupate da gas, mentre la carta intrappola tra le fibre le molecole d'olio, ostacolando il movimento che porterebbe poi al processo di scarica.

La carta utilizzata (ad elevato contenuto di cellulosa) ha una costante dielettrica elevata (3.5-4), rispetto l'olio, per cui occorre utilizzare un impregnante con valori simili di costante dielettrica, in modo da ottenere una uguale ripartizione del campo.

Particolarmente critica è la presenza di molecole d'acqua tra le fibre del materiale, queste sono responsabili del degrado delle prestazioni meccaniche ed elettriche della carta, oltre che la contaminazione dell'olio isolante.

Per queste ragioni è bene porre particolari attenzioni durante il processo di essiccazione e riempimento delle macchine in olio.

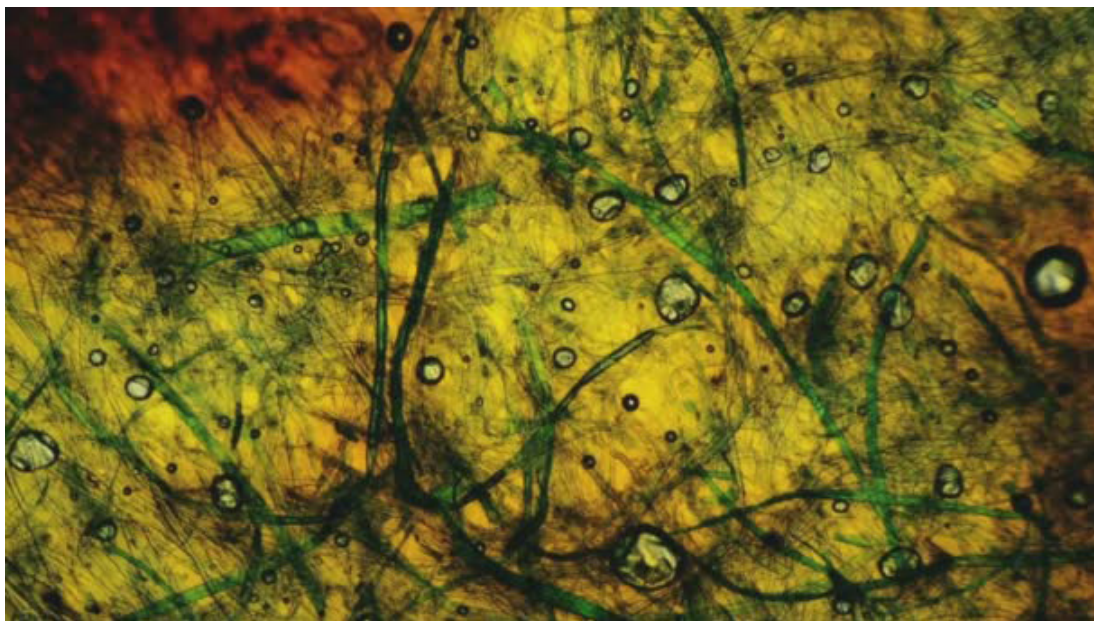


Fig. 2-10 Carta bagnata al microscopio, è possibile notare le bolle di liquido e le fibre  
(fonte: royalty free image on the net)

## 2.1.4 Circuito equivalente ad una scarica interna

Una cavità entro un materiale isolante solido come quella in (Fig. 2-11) può essere schematizzata con la rete equivalente posta a lato, dove la capacità  $C_a$  è quella dovuta alla cavità,  $C_b$  è la capacità degli starti sani di dielettrico che precedono e seguono il difetto e  $C_c$  è la capacità del materiale che non ne è interessato, posto a lato.

Nell'ipotesi in cui  $\epsilon_b$  sia la costante dielettrica del mezzo isolante ed  $\epsilon_a$  quella all'interno della cavità, la quale presenta uno spessore  $t$  molto inferiore a quello dell'intero strato  $d$ . Si avrà:

$$C_c \gg C_a \gg C_b \quad \text{eq. 2.5}$$

Secondo la relazione del partitore capacitivo, la tensione a cui è sottoposta la capacità  $C_a$  della cavità vale:

$$V_a = V_S \frac{\epsilon_b t}{\epsilon_a d} \quad \text{eq. 2.6}$$

Se la tensione  $V_S$  applicata è sinusoidale, la tensione ai capi della cavità escludendo fenomeni di scarica, avrà andamento anch'essa sinusoidale come in (Fig. 2-12).

Quando ai capi del vacuolo viene raggiunta la tensione  $V_{sc+}$ , corrispondente alla tensione di scarica con polarità positiva, si innesca la scarica. Equivalentemente rappresentata dalla chiusura dell'interruttore  $S$  nel modello, fino a che la tensione ai capi della capacità  $C_a$  non scende sotto il valore  $u_e$  di tensione residua di estinzione dell'arco, a quel punto  $S$  viene riaperto.

La tensione ai capi del vacuolo inizia nuovamente a salire, con andamento parallelo a  $V_a$ , fino a quando non viene nuovamente raggiunto il valore di scarica.

La zona di crescita della tensione potrà quindi essere interessata da numerose scariche, tanto più frequenti, tanto più è accentuata la pendenza della sinusoide in quel tratto, mentre la zona del massimo ne è priva.

Questo perché, laddove la tensione è costante, si ha il deposito di cariche sulle pareti

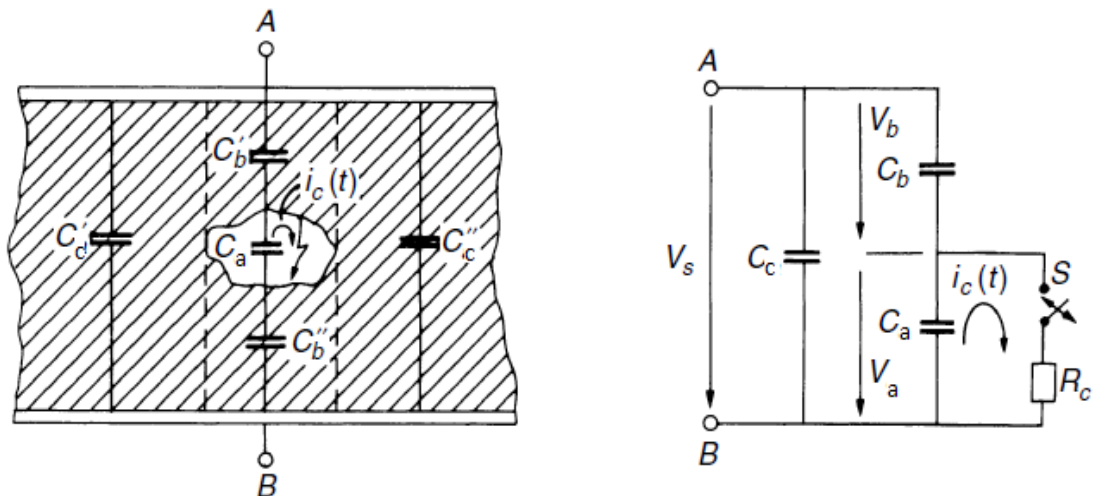


Fig. 2-11 Circuito equivalente a quello di una scarica parziale entro cavità  
(Fonte: [8])

della cavità, che contrastano il campo elettrico esterno.

Analogamente è presente una soglia anche per la tensione di scarica negativa  $V_{sc-}$  della cavità, raggiunta nella fase di decrescita della tensione.

I valori di innesco possono essere o meno simmetrici rispetto lo zero, in base alla presenza o meno di una simmetria geometrica della cavità.

Il raggiungimento delle due tensioni di scarica provocherà un impulso di corrente positivo o negativo, a seconda della soglia raggiunta, il valore della corrente, seppur elevato, sarà limitato dalla resistenza d'arco, rappresentata nel modello con  $R_c$ , di valore tale da portare in qualche ns la capacità  $C_a$  al di sotto della tensione residua d'arco.

Non è sempre necessario che la tensione applicata sia continuamente superiore alla soglia di innesco delle scariche parziali, il fenomeno può essere innescato da una sovratensione e poi può continuare a manifestarsi, anche con tensioni fino a metà del necessario.

Questo perché, la carica accumulata a seguito di una precedente scarica parziale in un semi periodo, va nel semiperiodo successivo ad intensificare il valore del campo elettrico all'interno della cavità, sommandosi a quello imposto dall'esterno dalla tensione del generatore.

La tensione di estinzione del fenomeno, infatti, può essere significativamente più piccola di quella di innesco (dal 10% al 30% di essa).

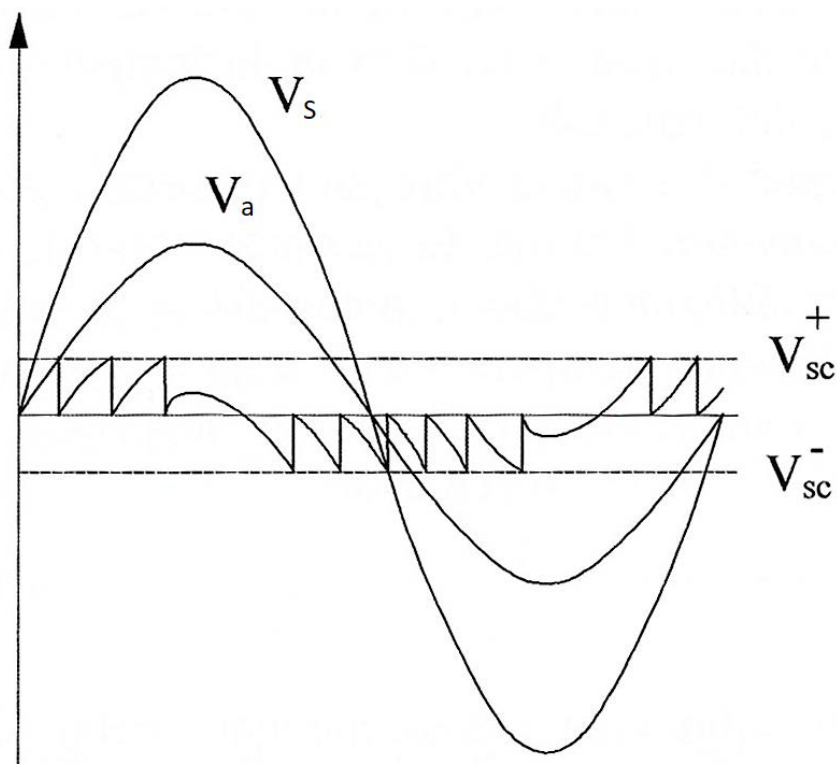


Fig. 2-12 Tensione ai capi del vacuolo con e senza scariche parziali  
(fonte: [2])



## 2.2 Scariche superficiali

La presenza di più elementi e materiali all'interno dei sistemi isolanti comporta la presenza di zone di interfaccia tra le diverse parti. Qui il controllo del campo elettrico diviene particolarmente delicato, specie se il passaggio avviene tra mezzi isolanti con caratteristiche fortemente diverse (es. Isolanti solidi-aria).

In queste zone si può originare il cosiddetto fenomeno di Tracking, ovvero la progressiva creazione di tracce attraverso la deposizione di materiale conduttore o la sua formazione in loco attraverso la rottura di legami nelle catene dei polimeri.

Il materiale conduttore agisce come vera e propria estensione degli elettrodi, con forma particolarmente appuntita.

Si deve prestare attenzione che nel passaggio all'interfaccia il campo elettrico non presenti componenti tangenziali.

A questo proposito, gli isolanti vengono sempre corredati da strati semiconduttivi per il controllo della direzione del campo.

Un' imperfetta installazione di quest'ultimo può essere causa di questo tipo di scarica. Le condizioni ambientali di umidità e sporcizia possono agevolare la formazione sullo strato di inquinanti depositato al di sopra del sistema isolante.

La (Fig. 2-13) riporta un esempio di configurazione elettrodica soggetta al fenomeno, grazie alla quale si può ricavare un modello, solamente esemplificativo, data la complessità delle situazioni reali.

La capacità  $C$  è associata a quello strato d'aria di lunghezza  $\Delta$  che viene poi perforato una volta formatasi la scarica, la capacità  $b$  rappresenta invece lo strato isolante di spessore  $d$ .

Nell'ipotesi in cui lo strato d'aria  $\Delta$  presenti una rigidità dielettrica pari ad  $E_p$ , la corrispondente tensione applicata all'intero sistema  $V_i$  vale:

$$V_i = \Delta E_i + d \frac{E_i}{\epsilon} \quad \text{eq. 2.7}$$

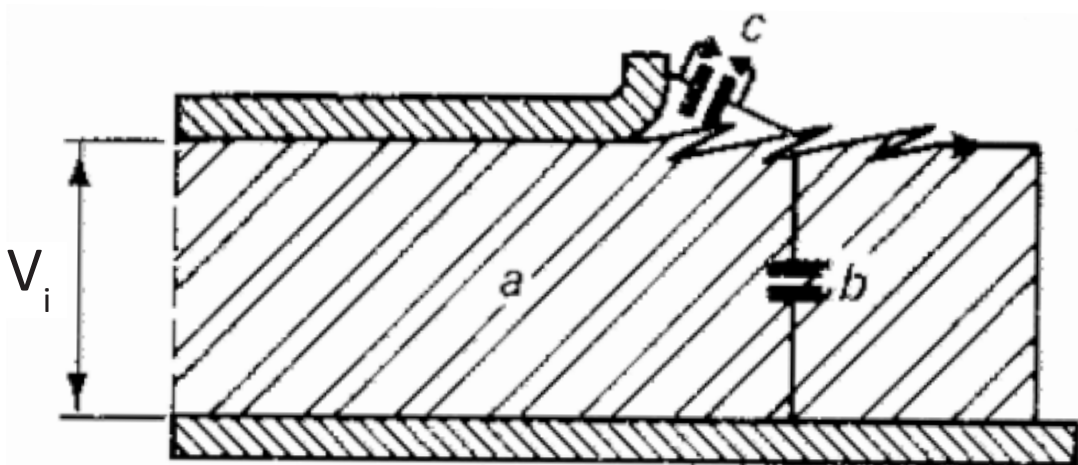


Fig. 2-13 Schematizzazione di un fenomeno di scarica superficiale  
(Fonte: [6])

Chiamando  $U_i$  la tensione necessaria per innescare la scarica sullo strato d'aria, si ottiene:

$$V_i = U_i + \frac{d}{\epsilon \Delta} U_i = U_i \left( 1 + \frac{d}{\epsilon \Delta} \right) \quad \text{eq. 2.8}$$

Stabilito un valore di pressione atmosferica, osservando la curva di Paschen (Fig. 2-5) è possibile trovare uno spessore dello strato d'aria  $\Delta$  a cui corrisponde la minima tensione di scarica. Questo dovrebbe permettere di identificare il più probabile percorso in aria della scarica.

I risultati forniti dal modello, così come quelli riportati in (Fig. 2-14) sono fortemente condizionati dalla configurazione elettrodica utilizzata, oltre che dalle condizioni ambientali di test.

La rigidità dielettrica superficiale con l'aria dei materiali è quasi sempre inferiore, rispetto quella interna. Questo implica che la manifestazione di scariche parziali superficiali avverrà già a tensioni inferiori rispetto a quelle di tipo interno.

Il fenomeno si può prevenire attraverso un idoneo dimensionamento della linea di fuga per le correnti superficiali, interponendo alette ed altri elementi che la allunghino pesantemente senza condizionare troppo le dimensioni dell'oggetto.

Una volta prodotto il canale ionizzato, le scariche possono continuare anche con valori di campo inferiori rispetto la rigidità dielettrica.

Si dovranno assumere opportuni margini per evitare che sovratensioni transitorie di lieve entità possano dare via al processo, in grado poi di mantenersi anche in condizioni ordinarie.

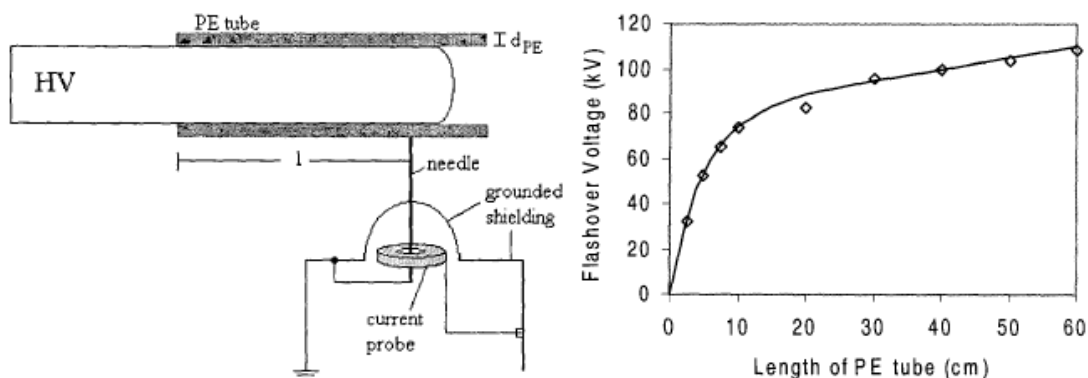


Fig. 2-14 Assetto sperimentale e risultati ottenuti da uno studio di scarica superficiale  
(fonte: [34])

## 2.3 Scariche di tipo Corona in aria

In presenza di campi molto disuniformi in aria o in altro isolante gassoso, alcune zone possono essere sollecitate oltre la rigidità del mezzo isolante, anche per valori di tensione fra gli elettrodi molto inferiori a quelli necessari a provocare una scarica completa.

L'effetto è fortemente dipendente dalla geometria, dalla polarità e forma d'onda della tensione applicata e dalle caratteristiche del mezzo isolante.

I mezzi gassosi sono normalmente autoripristinanti, quindi questo tipo di scariche parziali non può certamente causarne usura, comunque provoca altri effetti indesiderati, come i disturbi nelle radio-frequenze, le perdite di potenza attiva e il rumore. Un semplice caso, che può essere studiato per via analitica, è quello di due elettrodi sferici, tra loro concentrici, come in (Fig. 2-15).

La sfera di raggio  $r$  presenta lo stesso raggio di curvatura di un elettrodo appuntito, come indicato dalla linea tratteggiata, mentre il raggio  $R$  rappresenta la distanza fra la parte attiva ed il piano di massa.

Ipotizzando di disporre di una superficie sferica, posta alla distanza  $\Delta$  dall'elettrodo di alta tensione, è possibile valutare il profilo della tensione tra questa e la sfera  $r$ , per valutare come si distribuiscono le sollecitazioni lungo lo spazio in aria.

Utilizzando la relazione del partitore capacitivo:

$$V_{r-\Delta} = \frac{C_{(r+\Delta-R)}}{C_{(r+\Delta-r)} + C_{(r+\Delta-R)}} V \quad \text{eq. 2.9}$$

Che, ricorrendo alla formula del condensatore sferico diviene:

$$V_{r-\Delta} = \frac{1}{1 + \frac{r}{\Delta} \frac{R-(r+\Delta)}{R}} V \quad \text{eq. 2.10}$$

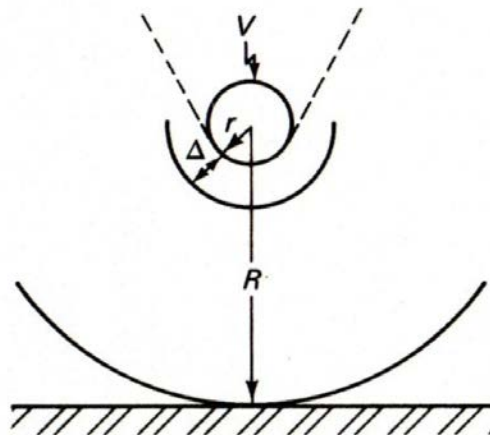


Fig. 2-15 Esempificazione mediante elementi sferici della disuniformità di campo  
(fonte: [6])

Da cui si vede che, la quasi totalità della tensione è applicata ai capi dello strato d'aria che circonda r e man mano che ci si allontana da questo, la crescita è sempre più bassa e l'effetto è tanto più accentuato quanto più r tende a zero.

Questa è una conseguenza del noto effetto delle punte, secondo cui, su due oggetti, a parità di potenziale applicato, il campo elettrico è inversamente proporzionale al raggio delle due sfere.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{eq. 2.11}$$

In prossimità dell'elettrodo con il raggio inferiore, dove il campo elettrico è molto intenso, cause esterne possono ionizzare alcune delle molecole presenti, creando una coppia ione-elettrone.

Le due particelle vengono accelerate in direzioni opposte dal campo elettrico, gli elettroni diretti verso l'anodo e gli ioni verso il catodo.

L'elettrone, di massa molto inferiore, è quello che raggiunge le velocità più elevate. Nel suo percorso urta le altre molecole presenti, fornendo l'energia di prima ionizzazione e creando così altre coppie elettrone-ione.

Questo processo a catena è detto "electron avalanche".

La tipica luminescenza dell'effetto Corona è dovuta alla ricombinazione delle cariche per tornare allo stato neutro, che porta all'emissione di un fotone.

Oltre una certa distanza dall'elettrodo il campo elettrico non è abbastanza intenso da permettere la ionizzazione di nuove particelle, per questo l'effetto si limita ad una piccola porzione dello spazio, senza provocare la scarica completa.

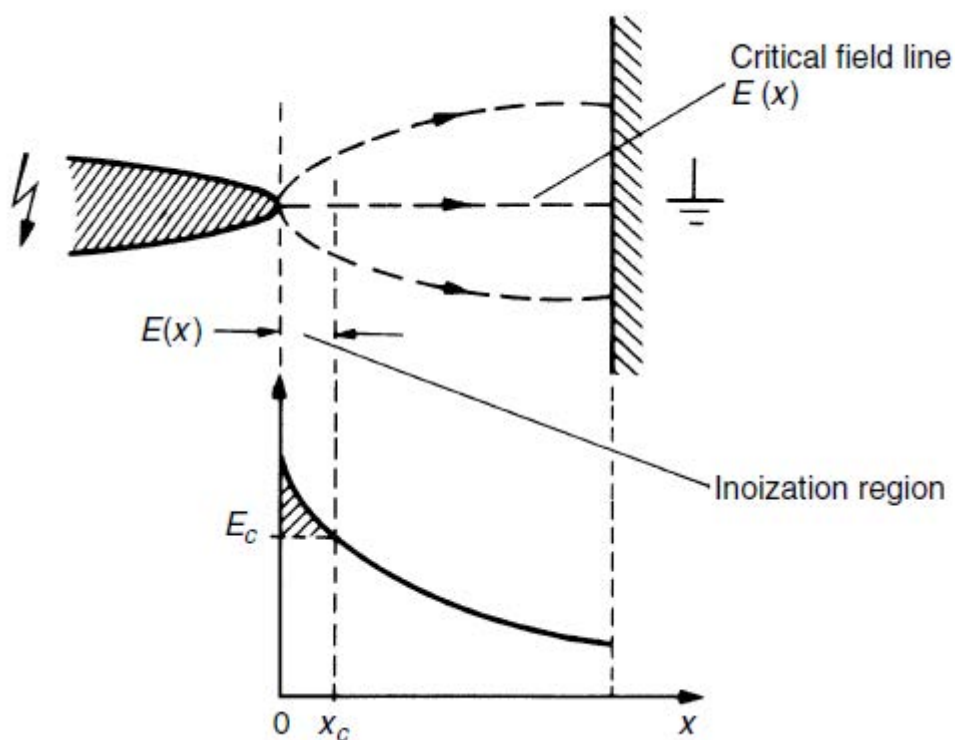


Fig. 2-16 Distribuzione del campo elettrico per una geometria punta piano  
(fonte: [8])

La geometria a due sfere concentriche non è comune nei dispositivi elettrici utilizzati nella pratica, osservando la (Fig. 2-16) relativa ad una configurazione punta-piano si dimostra che, almeno qualitativamente, il ragionamento esposto rimane valido.

Per una geometria cilindrica coassiale, il valore del campo critico per innescare il fenomeno secondo la relazione empirica ricavata da Peek:

$$\frac{E_c}{\delta} = 31.53 + \frac{9.63}{\sqrt{\delta r}} \quad \text{eq. 2.12}$$

Dove  $r$  è il raggio del conduttore interno e  $\delta$  è la densità relativa dell'aria calcolata come segue:

$$\delta = \frac{p}{760} \frac{293}{273 + T} = 0.386 \frac{p}{273 + T} \quad \text{eq. 2.13}$$

Di per se il Corona non è pericoloso per il mezzo isolante interessato, tuttavia la sua attività può essere all'origine di reazioni chimiche che portano in aria alla formazione di ozono ( $O_3$ ), ossido nitrico (NO), diossido di azoto ( $NO_2$ ) e acido nitrico ( $NO_3$ ), gas che possono nel tempo corrodere e rendere fragili alcuni materiali o parti in gomma.

Per questo motivo, la presenza di tale effetto viene comunque evitata nelle apparecchiature di media e alta tensione con buona qualità realizzativa.

Al fine di accertarne la presenza, oltre alle misure di scariche parziali, può essere eseguita una misura del disturbo in radiofrequenza (RIV) prodotto, oppure verifiche di tipo ottico basate sulla rilevazione della luminescenza prodotta (Fig. 2-17).



Fig. 2-17 Il fenomeno corona sugli armamenti di un elettrodotto in alta tensione  
(fonte: wikimedia)

### 2.3.1 Scariche parziali derivanti dall'effetto Corona

L'effetto Corona assume contorni diversi a seconda della polarità assunta dall'elettrodo acuminato. Con polarità positiva, oltre un certo valore di tensione applicata, un elettrodo libero può dare origine ad uno streamer, dove, vista la disuniformità del campo, il canale si propaga solo per un breve tratto (pre-onset streamer). Le cariche libere formatesi si spostano sotto l'azione del campo elettrico, che ritorna verso la configurazione originaria. Nella fase di ripulimento, se la carica messa in gioco dallo streamer è abbastanza grande, si può arrivare ad una situazione di regime dove una guaina di cariche negative avvolge l'elettrodo e la corrente assorbita è costante (Hermstein glow). Aumentando ancora la tensione, si ripresenta la formazione di streamer di maggiore ampiezza e durata (prebreakdown streamer), fino al raggiungimento della scarica completa.

In caso di polarità negativa, vi sono ancora tre fasi distinte del fenomeno.

Nella zona dell'elettrodo (catodo), un elettrone libero crea una valanga, che si propaga nella zona dove il campo elettrico è più intenso, estraendo altri elettroni dal catodo tramite processi di fotoionizzazione, cosicché la corrente aumenta in tempi molto rapidi. La valanga di elettroni si lascia alle spalle una quantità di carica positiva, che si muove verso l'elettrodo, aumentando localmente il campo, ma bloccando la possibilità di estrarre altri elettroni. La dinamica descritta è molto breve, e genera rapidi impulsi di corrente (Trichel Corona).

A differenza degli streamer positivi, il fenomeno avviene in maniera ben cadenzata, secondo una regolarità dettata dal tempo necessario ad allontanare le cariche prodotte. Oltre una certa frequenza di ripetizione, il fenomeno perde l'intermittenza, formando una luminescenza stabile (pulseless Corona).

Anche in questo caso, prima della scarica completa, si ha la ricomparsa di streamer di prescarica (prebreakdown streamer).

Quanto detto è vero nel caso in cui la tensione applicata sia continua.

In caso di tensione alternata le cose cambiano, perché si ha l'inversione della polarità quando ancora vi sono cariche libere nel canale, senza contare che il campo elettrico imposto dalla tensione non è costante nel semiperiodo.

Generalmente il Corona negativo è l'unico a presentare comportamento impulsivo, il corona positivo a causa della presenza di cariche dal semiperiodo precedente passa direttamente alla fase Glow.

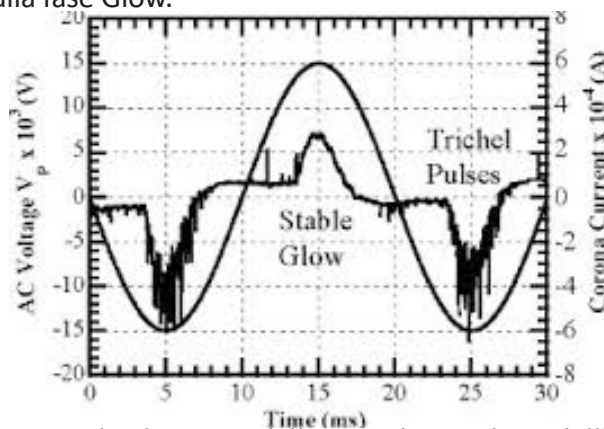


Fig. 2-18 Phase resolved pattern delle scariche prodotte dall'effetto Corona in AC  
(fonte: reasearchagte.net)

# 3

## Rilievo e Misura metodi classici

Per attestare la presenza di scariche parziali e quantificarne l'entità è fondamentale definire delle procedure standard di test e dei requisiti per la strumentazione di misura.

Le misure di scariche parziali possano costituire un valido strumento per il controllo qualità e la diagnostica in esercizio a patto che i valori ottenuti tra diverse misure nel tempo e nello spazio siano tra loro confrontabili.

Le diverse modalità di misura e rilevazione vengono classificate in:

- Elettriche, se la strumentazione è elettricamente connessa all'oggetto in prova
- Non elettriche, se sfruttano fenomeni secondari associati alla scarica

Quali ad esempio le emissioni luminose, acustiche, trasformazioni chimiche indotte, elettromagnetiche o termiche.

Un'ulteriore classificazione avviene distinguendo se la modalità di misura richieda l'arresto e la disalimentazione della macchina (offline), oppure no (online).

Il lavoro qui presentato si è occupato solamente delle metodologie elettriche di tipo offline, ovvero quelle per prime si sono presentate in ordine cronologico fra quelle oggi esistenti.

Ogni oggetto è diverso in termini di materiali che lo costituiscono e di tecniche che ne hanno portato alla realizzazione, le singole norme di prodotto IEC stabiliscono il limite massimo accettabile per l'entità delle scariche, oltre a stabilire se le caratteristiche dell'oggetto in prova richiedano schemi o metodologie di misura diverse ed ulteriori accortezze rispetto quanto previsto dalla normativa base.

La normativa IEC 60270 detta le linee guida sulle modalità con cui eseguire le misure di scariche parziali di natura elettrica, i requisiti della strumentazione di misura e la loro calibrazione.

Per le macchine rotanti, la normativa IEC 60034-27-1 detta le procedure e le definizioni per la verifica offline delle scariche parziali negli statori.

Oggigiorno sono molto apprezzate in ambito industriale anche le tecniche online, perché permettono di eseguire l'analisi degli isolamenti della macchina senza rimuoverla dall'esercizio nell'impianto in cui opera, a questo campo è dedicato il fascicolo IEC 60034-27-2.

Qualora l'oggetto di interesse venga alimentato da un convertitore elettronico, quindi sottoposto a regolari stress da tensioni impulsive, la normativa IEC 61934 presenta dei metodi di rilevazione di tipo ottico o basati sugli ultrasuoni.

La nuovissima normativa IEC 62478 affronta il tema delle misure condotte sulla base di rilevazioni acustiche od elettromagnetiche.

Metodologie di tipo chimico sono introdotte dalla normativa IEC 61181 per i trasformatori in olio, dove un'analisi dei gas disciolti può indicare la presenza di scariche parziali.



### 3.1 Schema di principio

Con una sorgente di tensione alternata a frequenza industriale priva internamente di scariche parziali, o eventualmente filtrate verso il carico, si ipotizzi di alimentare un campione di materiale isolante che presenta scariche parziali interne a causa di cavità, così come indicato in (Fig. 3-1).

Così come visto in par. 2.1.4, la presenza di scariche parziali crea rapidi impulsi di corrente dentro la cavità, che provocano una rapida discesa della tensione ai suoi capi. La cavità è inglobata all'interno del materiale, per cui la tensione e la corrente associate alla scarica non sono direttamente misurabili, se non tramite grandezze correlate ai morsetti dell'oggetto.

Se, al momento della scarica, l'oggetto si trovasse staccato dall'alimentazione, la carica persa all'interno della capacità  $C_a$  verrebbe compensata dalla capacità  $C_c$  ad essa in parallelo, provocando una caduta di tensione ai morsetti di valore:

$$\delta V_s = \frac{C_b}{C_c + C_b} \delta V_a \quad \text{eq. 3.1}$$

La variazione di tensione  $\delta V_s$  ai capi dell'oggetto ha un'entità veramente piccola se confrontata con il valore assoluto della tensione di alimentazione, rendendo la misura estremamente difficile e suscettibile ad errori.

Il riequilibrio a seguito della scarica delle cariche all'interno dell'oggetto provoca la circolazione di correnti impulsive sia interne, che, secondo le sue caratteristiche, nel circuito di alimentazione.

Il filtro interposto in (Fig. 3-1) tra il trasformatore di alimentazione e il carico impedisce che queste correnti si richiudano sulla rete di alimentazione o sulle capacità del trasformatore stesso.

La modifica del circuito di misura così come presentato in (Fig. 3-2), permette agli impulsi derivanti dall'attività di scariche parziali di richiudersi sulla capacità  $C_k$  (detta di accoppiamento).

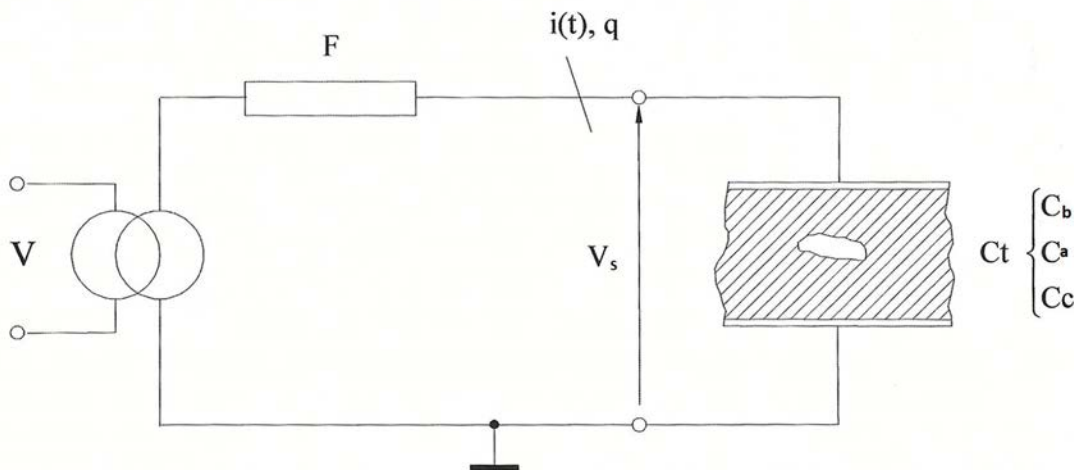


Fig. 3-1 Circuito per l'alimentazione a frequenza industriale del componente in prova  
(fonte: [2])



Si può procedere alla misura della corrente che attraversa il condensatore di accoppiamento utilizzando un'impedenza, che fornisca un segnale in tensione da essa derivato. Si parla in questa configurazione di misura indiretta, poiché la corrente vista dalla strumentazione ha segno opposto rispetto quella effettivamente richiamata dall'oggetto in prova.

In alternativa potrebbe essere possibile porre l'impedenza di misura direttamente in serie all'oggetto in test, ottenendo così una misura diretta, tuttavia la scelta è sconsigliabile perché in caso di cedimento l'intera tensione si verrebbe a trovare ai capi della strumentazione.

L'utilizzo di un'impedenza di accoppiamento per interfacciare la strumentazione di misura con l'oggetto in prova presenta alcuni problemi relativi alla mancanza di isolamento galvanico tra la strumentazione ed il lato alta tensione.

Per questo motivo oggi sono disponibili dei trasformatori di impulsi che attraverso l'accoppiamento induttivo offrono il vantaggio dell'isolamento.

Lo schema di principio qui riportato è comune nella sua struttura a tutti i metodi di tipo elettrico online ed offline ed utilizzabile per la quasi totalità degli oggetti su cui si eseguono questo tipo di prove.

Questo tipo di misure richiedono di poter apprezzare segnali molto piccoli (mV) spesso in ambienti disturbati dal punto di vista elettromagnetico.

Assume quindi un ruolo cruciale la schermatura dei cavi di segnale e delle apparecchiature di misura per limitare l'influenza dei disturbi irradiati.

Oltre al filtraggio delle alimentazioni per limitare l'azione di disturbi condotti.

La connessione dei vari componenti ad un nodo di terra è fondamentale, questa deve essere unica per tutto il circuito di misura e realizzata in modo da evitare la formazione di spire chiuse dove potrebbero essere captati disturbi irradiati nello spazio elettromagnetico.

In particolar modo quando la misura viene eseguita on-site, all'interno di siti industriali o stazioni elettriche, è frequente imbattersi in disturbi di cospicua entità dovuti ad altre apparecchiature operanti nello stesso luogo, sistemi elettronici di potenza oppure altri dispositivi interessati da scariche parziali, ma connessi alle stesse sbarre di alimentazione dell'oggetto in prova.

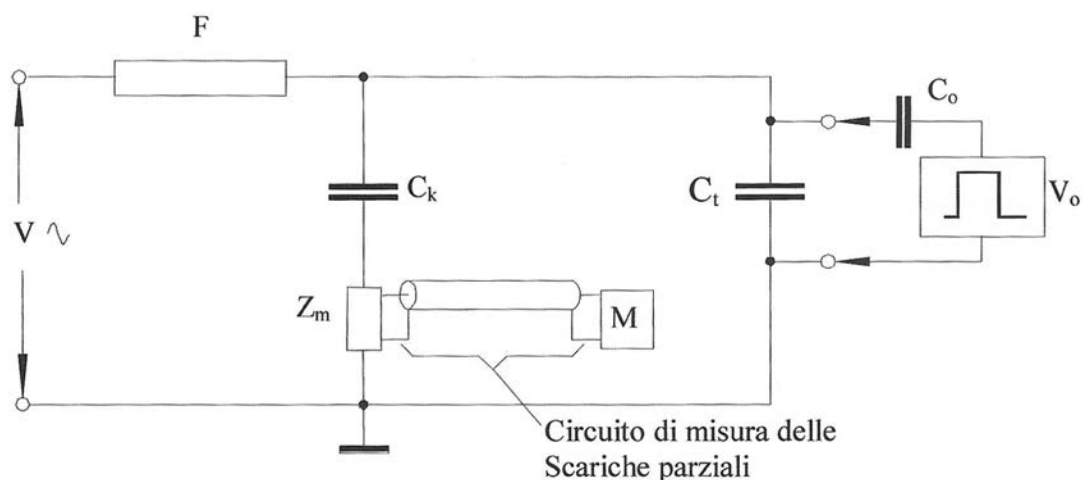


Fig. 3-2 Circuito per la misura delle scariche parziali con capacità di accoppiamento  
(Fonte: [2])

Nel corso degli anni la strumentazione per la misura delle scariche parziali ha subito una notevole evoluzione, dapprima con il perfezionamento dei circuiti di tipo analogico, poi con l'introduzione dei sistemi di acquisizione ed elaborazione digitale.

Lo schema di principio visto in (Fig. 3-2) è valido per molti sistemi oggi disponibili.

Occorre distinguere fra strumenti di tipo tradizionale definiti secondo la IEC 60270, che mirano principalmente alla valutazione della carica apparente relativa agli impulsi di corrente e strumenti pensati per operazioni di diagnostica, dove è importante anche la forma d'onda dei singoli eventi di scarica parziale, per effettuarne una classificazione.

Le componenti di un sistema di misura di tipo tradizionale sono:

- *Sorgente di alimentazione*, un trasformatore di alta tensione opportunamente filtrato e possibilmente esente da scariche parziali. Per alcune tipologie di oggetti questo compito può essere assolto dallo stesso oggetto in prova, per esempio i trasformatori, che vengono normalmente alimentati a tensioni modeste dal secondario per eseguirne la verifica.
- *Unità di accoppiamento*, che nella sua forma più tradizionale si presenta come un'impedenza di misura. Come si vedrà fra poco, la scelta di questo elemento condiziona il tipo di informazioni rilevabili dagli impulsi, ci si può accontentare di una descrizione sintetica tramite alcuni parametri, piuttosto che esigere una fedele riproduzione della forma d'onda.
- *Capacità di accoppiamento* per permettere la richiusura delle rapidi componenti impulsive prodotte dalle scariche parziali.
- *Amplificazione* a banda larga o stretta, a seconda della tipologia di strumento
- *Misuratore ed unità di visualizzazione* per quantificare la carica apparente e la posizione in termini di fase degli impulsi

Uno strumento con fini diagnostici, deve preservare la forma d'onda dei singoli impulsi ed effettuarne la registrazione in modo digitale, per permettere poi l'elaborazione numerica dei dati acquisiti. Si ha quindi:

- *Amplificatore* a larghissima banda per non distorcere la forma d'onda del segnale
- *Convertitore analogico digitale* per effettuare il passaggio al discreto del segnale
- *Memoria di acquisizione*
- *Unità di elaborazione e visualizzazione* dei risultati spesso Personal Computer

Ad ogni modo la strumentazione dovrà terminare con un'unità di osservazione e misura per permettere all'operatore di interagire con essa.

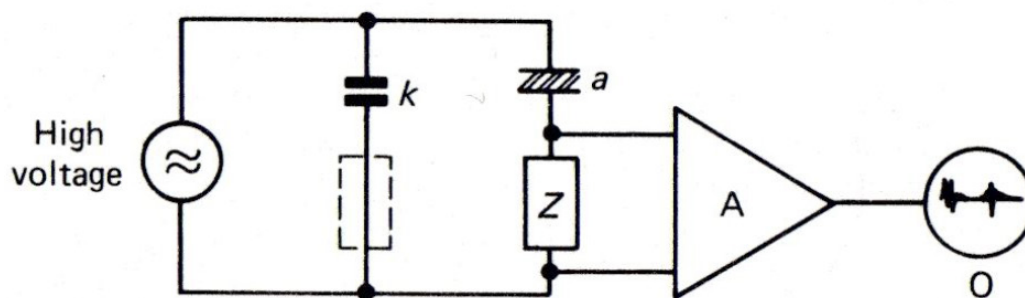


Fig. 3-3 Schema di base per la rilevazione e misura con metodo elettrico  
(fonte: [7])

### 3.2 Carica apparente

Quando all'interno di una cavità si ha una scarica la tensione ai capi di questa passa da un valore  $U_i$  di innesco ad un valore  $U_e$  di estinzione in tempi dell'ordine del centinaio di nanosecondi.

Riferendosi allo schema equivalente di (Fig. 2-11) e in (Fig. 3-4), in questo tempo la capacità associata alla cavità perde una carica di valore:

$$q_a = C_a \delta V_a \quad \text{eq. 3.2}$$

La carica acquisita dalla capacità in serie  $C_b$ , nell'ipotesi di tensione applicata costante vale:

$$q = C_b \delta V_a \quad \text{eq. 3.3}$$

Questa carica corrisponde a quella in assenza di altre vie di richiusura per la corrente impulsiva fornita dalla capacità  $C_c$  in parallelo dovuta al resto del dielettrico.

Lo stesso approccio può essere utilizzato per ricavare la quantità di carica visibile dall'esterno. Nelle situazioni reali si ha:

$$d_a \ll d_b \simeq d_c \quad \text{eq. 3.4}$$

Che, unitamente ad una permittività relativa del dielettrico, di valore contenuto porta alla seguente relazione verso la carica rilevabile esternamente:

$$\frac{q}{q_a} \simeq \epsilon_r \frac{d_a}{d_c} \ll 1 \quad \text{eq. 3.5}$$

Questa carica rilevabile dai terminali dell'oggetto è nota come "carica apparente", secondo la IEC 60270 la carica apparente non è uguale alla quantità di carica messa in gioco internamente laddove si verifica la scarica, poiché questa non può essere direttamente misurata, ma è ad essa proporzionale.

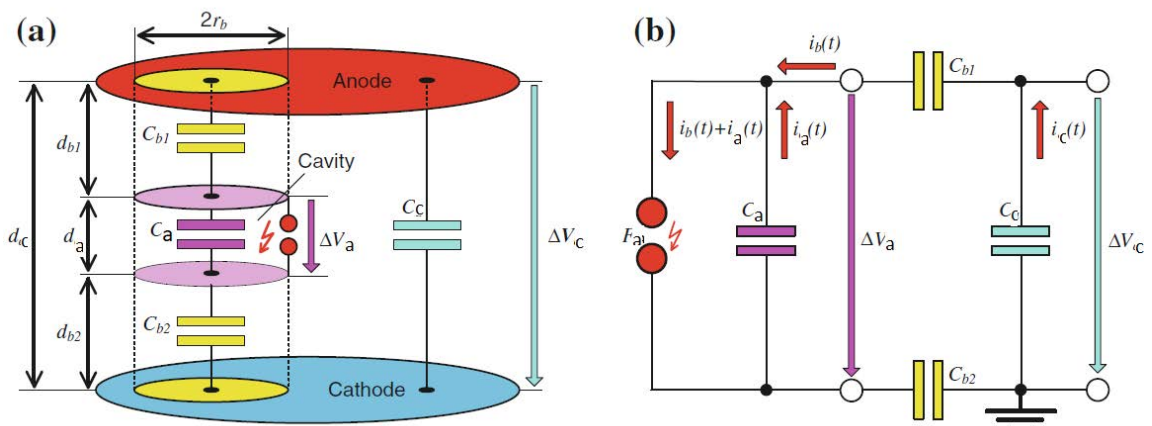


Fig. 3-4 Schema equivalente ad un dielettrico con scariche parziali entro cavità  
(Fonte: [4])

### 3.3 Energia dissipata durante la scarica

L'energia associata al processo di scarica all'interno della cavità di capacità  $C_a$  può essere valutata pensando alla quantità di energia associata al campo elettrico presente prima e dopo.

La scarica provoca la rapida discesa della tensione da un valore di innesco ad uno di estinzione del fenomeno:

$$\delta V_a = u_i - u_e \quad \text{eq. 3.6}$$

Il salto energetico sarà quindi corrispondente a:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2}C_a u_i^2 - \frac{1}{2}C_a u_e^2 = \frac{1}{2}C_a(u_i^2 - u_e^2) \quad \text{eq. 3.7} \\ &= \frac{1}{2}C_a(u_i - u_e)(u_i + u_e) = \frac{1}{2}C_a \delta V_a (u_i + u_e) \\ &= \frac{1}{2}C_a \delta V_a u_i \left(1 + \frac{u_e}{u_i}\right) \\ &= \frac{1}{2}q_a u_i \left(1 + \frac{u_e}{u_i}\right) \end{aligned}$$

Che, nell'ipotesi in cui la tensione residua d'arco abbia valore trascurabile porta a:

$$W = \frac{1}{2}q_a u_i \quad \text{eq. 3.8}$$

Si vede quindi come la quantità di carica spostata dalla scarica parziale sia una stima della quantità di energia da essa prodotta localmente.

La carica trovata nel computo dell'energia di scarica è in realtà quella effettiva nel vacuolo, ma la carica apparente esteriormente misurabile è ad essa legata da un rapporto di proporzionalità.

Le quantità di energia messe in gioco da un singolo impulso sono generalmente molto piccole, basti pensare al fatto che la carica ha normalmente ordine di grandezza dei pC, ma occorre considerare due ulteriori aspetti prima di pensare erroneamente che il fenomeno possa essere innocuo:

La durata dell'impulso di corrente raggiunge qualche centinaio di nanosecondi, quindi la potenza dissipata raggiunge al minimo il valore di qualche W, concentrato su regioni molto piccole, producendo quindi importanti riscaldamenti localizzati.

Inoltre il fenomeno generalmente si ripresenta anche decine e decine di volte per ogni ciclo della frequenza di rete, quindi l'effetto sul materiale isolante è cumulativo rispetto tutti gli impulsi di scarica parziale che lo hanno interessato.

A questo proposito, la misura della sola carica messa in gioco dall'evento di scarica interna non è bastevole, è bene acquisire informazione anche sulla periodicità con cui esso si manifesta.

### 3.4 Unità di accoppiamento

Il primo elemento di un sistema di misura è costituito dall'impedenza di misura, che serve ad interfacciare la strumentazione vera e propria di misura ed acquisizione con il lato alta tensione del circuito.

Essa ha lo scopo di effettuare una conversione corrente tensione degli impulsi, trasportati poi tramite cavo coassiale fino alla strumentazione.

La via più semplice per effettuare questo tipo di operazione può essere uno shunt resistivo, ma, per ottenerne sufficiente sensibilità la corrente a frequenza industriale drenata dalla capacità vi potrebbe portare ad una notevole dissipazione di potenza. Inoltre, le resistenze pure non sono realizzabili nella pratica, poiché si ha sempre la presenza di parametri parassiti induttivi e capacitivi.

Dato l'elevato contenuto in frequenza degli impulsi il primo parametro da considerare è la capacità parassita associata al resistore, ovvero considerare il caso in cui l'impedenza di misura sia costituita da una rete RC parallelo.

La cui risposta ad un impulso di Dirac di area  $q$  vale:

$$V_{out} = \left[ \frac{q}{C_t + C_d + \left( \frac{C_t C_d}{C_k} \right)} \right] e^{\left\{ \frac{-t}{R_d \left[ C_d + \left( \frac{C_t C_k}{C_t + C_k} \right) \right]} \right\}} \quad \text{eq. 3.9}$$

Dove gli elementi contrassegnati con pedice  $d$  sono relativi alla stessa impedenza di misura.

Si tratta di una risposta smorzata del primo ordine, dove  $q$  rappresenta la carica apparente dell'impulso.

Spesso viene posta in parallelo alla rete RC una induttanza, dimensionata in modo tale da drenare verso terra le componenti a frequenza industriale, senza interessare il sistema di misura.

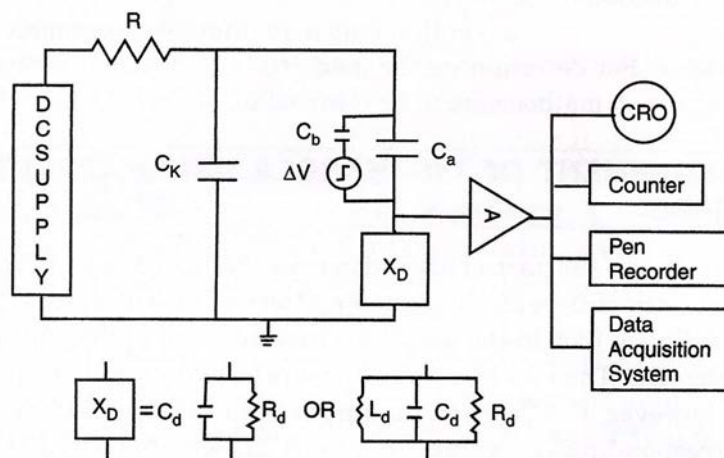


Fig. 3-5 Circuito di misura e possibili configurazioni dell'impedenza di misura  
(Fonte: [10])

In questo caso, la risposta che si ottiene è di tipo oscillante smorzato:

$$V_{out} = \left[ \frac{q}{C_t + C_d + \left( \frac{C_t C_d}{C_k} \right)} \right] \cos(\omega t) e^{\left\{ \frac{-t}{2R_d \left[ C_d + \left( \frac{C_t C_k}{C_t + C_k} \right) \right]} \right\}} \quad \text{eq. 3.10}$$

Dove  $\omega$  vale:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_d \left( C_d + \frac{C_t C_k}{C_t + C_k} \right)} - \left( \frac{1}{2R_d \frac{C_t C_k}{C_t + C_k}} \right)^2} \quad \text{eq. 3.11}$$

In entrambi i casi il valore della resistenza non intacca l'ampiezza del segnale rilevato, quindi la sensibilità, ma solamente la durata della coda della risposta.

Si dovrà prestare attenzione al tipo di risposta del successivo sistema di amplificazione e misura, cercando di fare in modo che la coda della risposta relativa ad un impulso sia estinta prima dell'arrivo del successivo, si avrebbe altrimenti una sovrapposizione che altererebbe il valore della carica rilevabile.

La sensibilità di misura è condizionata dal valore delle capacità dell'oggetto in prova e della capacità di accoppiamento e potrà quindi essere necessario un cambio dell'impedenza di misura in funzione di queste per cercare sempre di ottenere un segnale di ampiezza ottimale rispetto al range di valori accettabili dal sistema di misura.

Si deve infatti garantire un buon rapporto segnale rumore per la trasmissione del segnale e la sua successiva elaborazione, senza però esagerare, altrimenti si provocherebbe la saturazione dello stadio di amplificazione.

Il circuito di misura viene sempre realizzato ponendo l'impedenza di misura sul ramo del circuito a più bassa tensione verso terra, facendo sì che l'eventuale terminale della rete di accoppiamento che presenta continuità galvanica verso la strumentazione sia posto a terra.

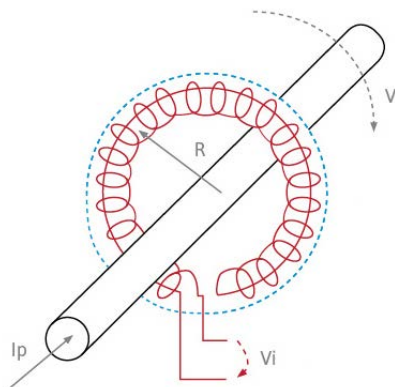


Fig. 3-6 Struttura di un trasduttore di corrente di tipo Rogowski  
(fonte: AGW electronics)

Specie quando si eseguono misure on-site vi può essere qualche criticità nell'eseguire questo collegamento, in quanto non si conosce a pieno l'affidabilità dell'impianto disperdente.

A questo proposito possono essere utilizzati degli HF T posti in cascata rispetto all'impedenza di misura, trasformatori con speciale nucleo in ferrite che assicurano linearità per ampi intervalli di frequenze.

O in alternativa degli HF CT, che a differenza dei precedenti, sono dei trasformatori di corrente, ponendo questa volta l'impedenza di misura a secondario.

Visto che si deve operare una trasformazione corrente-tensione, un dispositivo oggi molto apprezzato in sostituzione delle impedenze di misura è la sonda di Rogowski. Esso si presenta con un nucleo in materiale non magnetico attorno al quale è posto un avvolgimento, con una particolare costruzione secondo cui la fine viene fatta passare al centro delle spire formatesi, per uscire parallelamente al terminale di inizio, secondo quanto visibile in (Fig. 3-6).

Nella sua costruzione classica il dispositivo fornisce una tensione in uscita proporzionale alla derivata della corrente che lo attraversa:

Per ricavare l'originale impulso di corrente visto dal trasduttore, si dovrebbe quindi

$$v_i = M \frac{di}{dt} \quad \text{eq. 3.12}$$

effettuare una integrazione del segnale per via analogica o numerica.

Sono disponibili dei rocchetti che effettuano autonomamente l'operazione di integrazione attraverso un accurato dimensionamento che consente di trasformare gli elementi parassiti presenti nel modello equivalente in una rete pseudo-integratrice. Nello schema equivalente di (Fig. 3-7)  $R_c$  ed  $L_c$  rappresentano la resistenza e l'induttanza del conduttore che forma l'avvolgimento per unità di lunghezza e  $C_c$  è la capacità unitaria presente tra i due conduttori nel loro percorso.  $Z$  è invece l'impedenza su cui è caricato il dispositivo.

Nell'ipotesi in cui il flusso di corrente all'interno del dispositivo sia assial-simmetrico rispetto l'asse del rocchetto, cioè il conduttore sia in esso ben centrato e perpendicolare rispetto al piano della bobina, la funzione di trasferimento complessiva del dispositivo considerando l'impedenza di carico  $Z$  diviene:

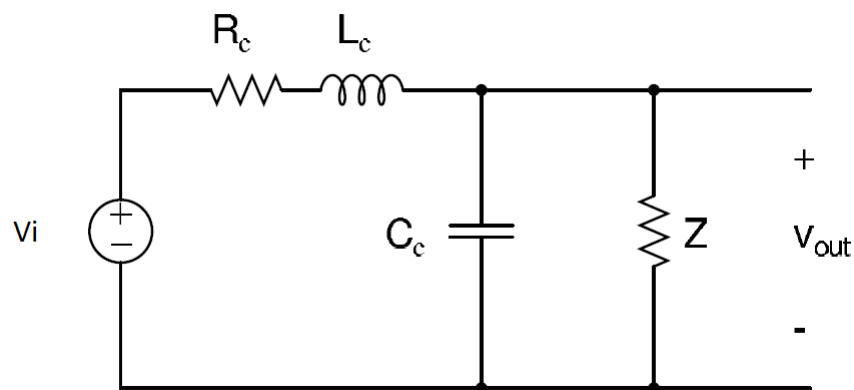


Fig. 3-7 Circuito equivalente di un trasduttore di corrente di tipo Rogowski  
(Fonte: [14])

Dove  $Z_0$  è l'impedenza caratteristica legata alle costanti del modello e  $\gamma$  indica il tem-

$$v_{out} = \frac{\frac{Z}{sL_d + R_d}}{1 + \frac{Z}{Z_0} \frac{1+e^{-2\gamma l}}{1-e^{-2\gamma l}}} \cdot v_i \quad \text{eq. 3.13}$$

po di propagazione all'interno dell'avvolgimento:

Qualora l'impedenza di terminazione  $Z$  sia molto minore dell'impedenza caratteristi-

$$Z_0 = \sqrt{\frac{sL_d + R_d}{sC_d}} \quad \text{eq. 3.14}$$

$$\gamma = \sqrt{sC_d (sL_d + R_d)} \quad \text{eq. 3.15}$$

ca  $Z_0$ , la funzione di trasferimento può essere così semplificata:

Si tratta quindi di una rete passa basso del primo ordine, dove, se la costante di tempo

$$v_{out} = \frac{Z}{sL_d + R_d} \cdot v_i \quad \text{eq. 3.16}$$

$\tau$  è molto più grande della lunghezza temporale dell'impulso di corrente,  $R_d$  può essere trascurata, ottenendo:

Ricordando l'espressione della tensione indotta nell'avvolgimento e nell'ipotesi in cui

$$v_{out} = \frac{Z}{sL_d} \cdot v_i \quad \text{eq. 3.17}$$

l'impedenza di carico sia una semplice resistenza:

La costante  $H$  è definita come sensibilità per unità di lunghezza del conduttore.

$$v_{out} = \frac{R_{out}}{sL_d} M s i = H i \quad \text{eq. 3.18}$$

Perché questo ragionamento sia valido, occorre che la resistenza di carico  $R_{out}$  sia di valore molto piccolo, dell'ordine di  $1\Omega$ .

Questo dispositivo permette di acquisire informazioni non solo sulla carica apparente transitata, così come visto nel caso dell'impedenza di misura, ma anche sulla forma dell'impulso di corrente relativo alla scarica parziale, permettendo in questo modo ulteriori analisi e classificazioni basate anche su queste considerazioni.



### 3.5 Sistemi classici conformi alla IEC 60270

La strumentazione conforme alla IEC 60270 ha come scopo principale la valutazione della carica apparente messa in gioco dai treni di impulsi dovuti alle scariche parziali, prendendo a riferimento il più grande valore di carica che si ripete.

La prima versione della normativa è apparsa nel 1968, definendo le modalità e le grandezze rilevanti nella misura di scariche parziali, tuttavia questo tipo di misura era già nota fin dai primi anni del 1940.

I primi strumenti conformi alla normativa introdotti sul mercato facevano uso di circuiti interni completamente analogici, secondo lo schema di (Fig. 3-8).

Il segnale proveniente dall'unità di accoppiamento ha subito una pseudo-integrazione ad opera della caratteristica di tipo passa-basso o passa-banda in frequenza della stessa. Gli impulsi in ingresso non sono più assimilabili ad un delta di Dirac, ma presentano comunque uno spettro in frequenza piatto entro le frequenze di taglio dell'unità di accoppiamento.

Tali valori sono definiti dalla norma come i valori di frequenza per cui l'impedenza di misura si è ridotta di 20dB rispetto al valore di centro banda (dove essa mostra la sola componente resistiva).

I segnali così raccolti vengono portati tramite un cavo coassiale adeguatamente lontano dalle apparecchiature di alta tensione, dove è posta la strumentazione di misura.

Il primo stadio di occupa proprio di adattare l'impedenza di ingresso dello strumento a quella caratteristica del cavo, per evitare la formazione di componenti riflesse entro la linea di trasmissione.

Vi può essere anche un filtro per eliminare o separare componenti a frequenza industriale e sue armoniche e disturbi captati in alta frequenza dal segnale utile.

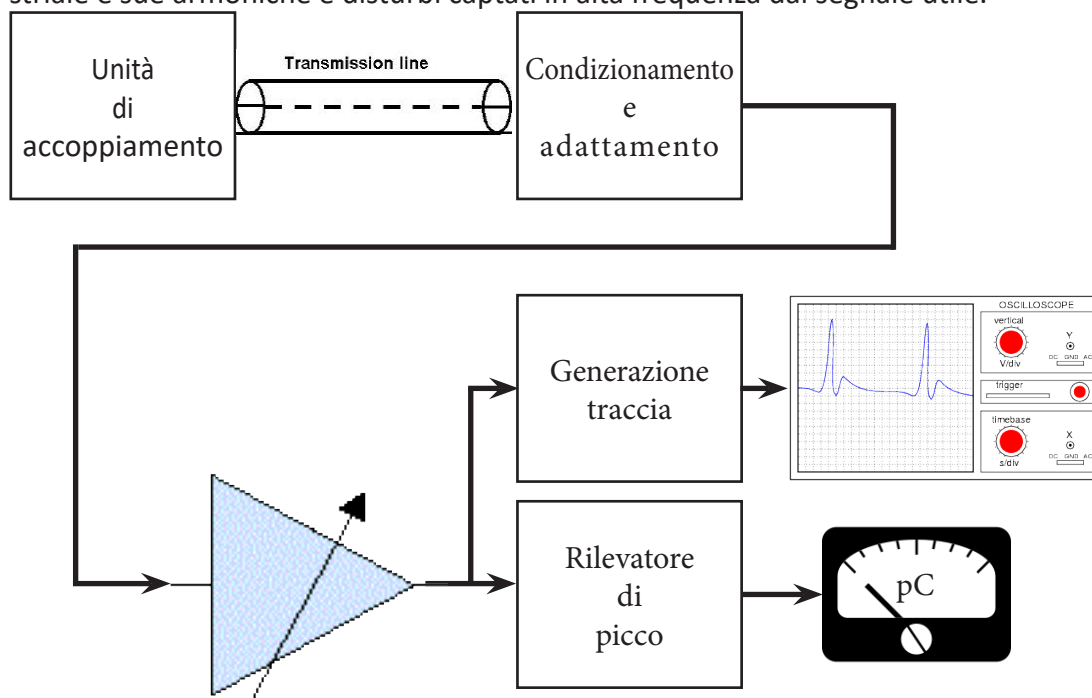


Fig. 3-8 Schema a blocchi di un misuratore di scariche parziali IEC 60270 compliant  
(fonte: realizzazione propria)

Successivamente si ha l'amplificazione del segnale ad opera di un amplificatore a guadagno molto elevato e variabile, che nel complesso presenta anch'esso una caratteristica in frequenza di tipo passa banda.

I circuiti amplificatori presentano nella pratica una relazione tra guadagno e larghezza di banda secondo la relazione:

$$A_v B_w = k \quad \text{eq. 3.19}$$

Gli elevati valori di guadagno richiesti per rendere il segnale sufficientemente robusto negli ulteriori stadi di elaborazione vanno a penalizzare la banda utile, che per queste tipologie di circuiti non supera i 250 kHz.

La frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore viene scelta solitamente almeno dell'ordine di qualche Khz, per evitare di amplificare disturbi legati alle grandezze di rete e sue armoniche, considerando che per alcuni oggetti le prove possono richiedere l'alimentazione a frequenze doppie o triple rispetto la frequenza industriale.

Allo stesso modo, la frequenza superiore di taglio deve essere scelta coerentemente alla risposta in frequenza dell'unità di accoppiamento, in modo da coprire tutto il range in cui la sua risposta è piatta, evitando però valori troppo elevati, dove potrebbero diventare importanti i disturbi irradiati captati dal circuito di misura.

Come graficamente spiegato in (Fig. 3-9).

Vengono definite dalla norma le frequenze di centro banda e banda passante:

$$f_c = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad \text{eq. 3.20}$$

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad \text{eq. 3.21}$$

La norma definisce due diverse famiglie di strumenti, classificati in base al valore della larghezza di banda passante:

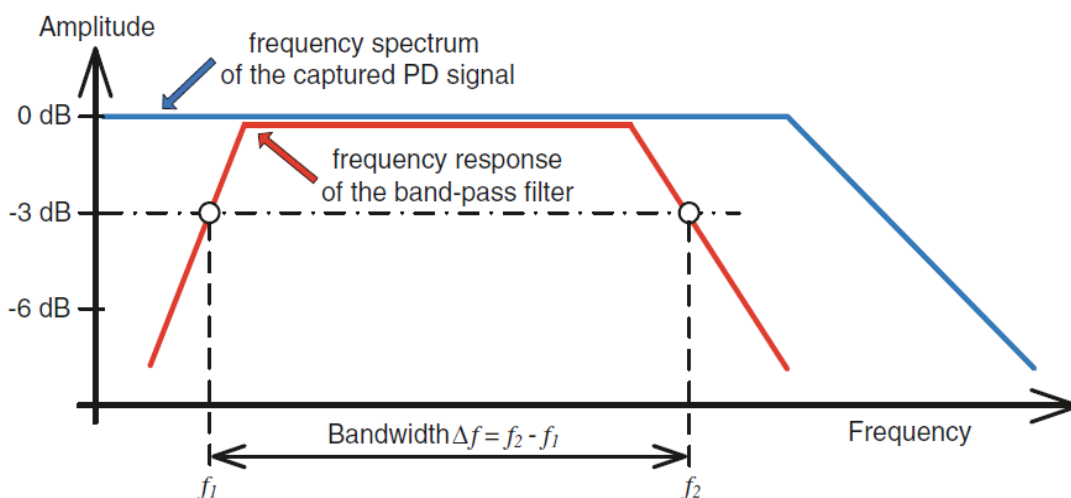


Fig. 3-9 Risposta in frequenza dell'amplificatore e filtro sovrapposto allo spettro del segnale  
(fonte: [4])

- Banda larga, i valori sono fissi e appartengono al range:

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 900 \text{ kHz}$$

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$$

$$f_2 \leq 1 \text{ MHz}$$

*eq. 3.22*

- Banda stretta, il valore di centro banda  $f_m$  è mobile nel seguente intervallo:

$$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$$

$$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$$

*eq. 3.23*

L'applicazione di un segnale pressoché piatto in frequenza entro la banda passante dell'amplificatore fa sì che questo in uscita ponga un segnale indipendente dalla forma d'onda dell'impulso di corrente originale, la risposta impulsiva, scalata secondo il valore dell'originale carica apparente.

In questo modo l'unica informazione conservata dell'impulso originale è la quantità di carica ad esso associata, tutto il resto dipende dalle caratteristiche dell'impedenza di misura e dello stadio amplificatore.

In particolar modo la larghezza di banda di questo determina l'andamento della risposta osservabile all'uscita: un sistema a banda larga presenta una risposta unidirezionale smorzata che si estingue in tempi dell'ordine di qualche decina di  $\mu\text{s}$  (Fig. 3-10), mentre un sistema a banda stretta produce risposte fortemente oscillanti per qualche centinaia di  $\mu\text{s}$  (Fig. 3-11).

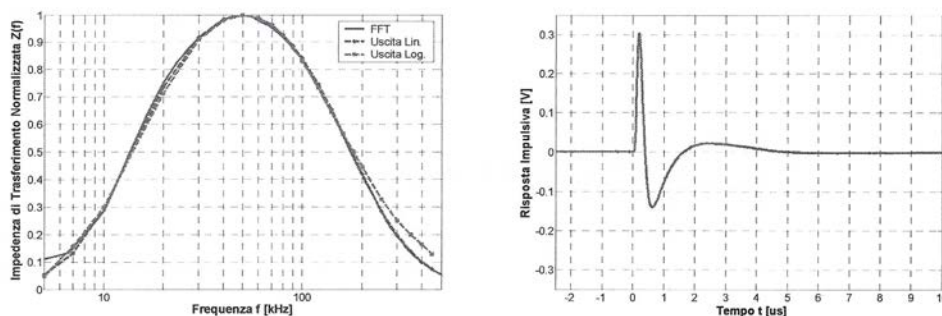


Fig. 3-10 Risposta nel tempo e in frequenza di un sistema di misura a banda larga  
(fonte: [2])

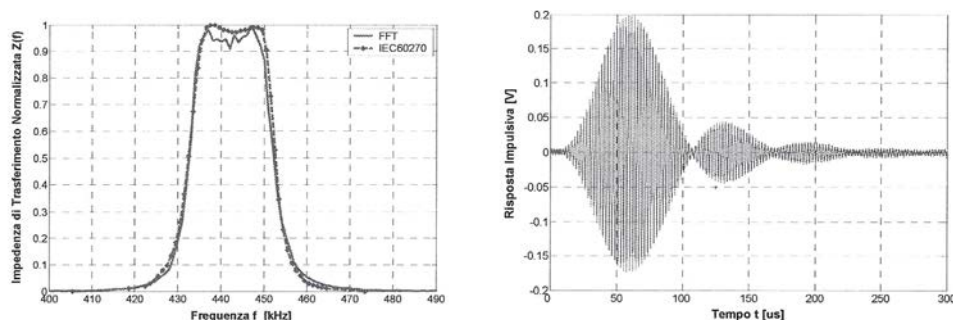


Fig. 3-11 Risposta nel tempo e in frequenza di un sistema di misura a banda stretta  
(fonte: [2])

Questo fa sì che nei sistemi a banda stretta sia persa anche l'informazione sul segno della carica apparente, oltre a presentare risoluzioni temporali piuttosto basse a causa della elevata probabilità di sovrapposizione delle risposte relative a due impulsi vicini.

In entrambi i sistemi, un circuito esegue il modulo del segnale utilizzando un raddrizzatore di precisione, poiché si è interessati al solo valore assoluto della carica, per poi fornirlo ad un rilevatore di picco, che ne conserva il massimo per un periodo della tensione di rete.

In questo modo il valore di tensione in uscita è così proporzionale al valore della carica apparente del più grande impulso di scarica parziale che si ripete ogni periodo di rete e può quindi essere visualizzato da un voltmetro con scala tarata in pC.

Per agevolare l'operatore nell'esecuzione delle misure, aiutandolo a classificare le tipologie di scariche parziali, oltre ad individuare impulsi dovuti a disturbi captati dalla strumentazione, è spesso utilizzato un oscilloscopio.

È quindi presente nel sistema di misura un circuito generatore di traccia, che preleva dal segnale proveniente dall'impedenza di misura la componente a frequenza industriale residua ed attraverso un circuito sfasatore ne genera una copia sfasata di 90° con ampiezza regolabile.

L'applicazione di questi due segnali su un oscilloscopio predisposto per mostrare le figure di Lissajous (XY) fornirà l'immagine di un'ellisse.

Al segnale applicato all'ingresso Y viene sommato il segnale relativo alle scariche parziali all'uscita dello stadio amplificatore, mostrando così sullo schermo dello strumento delle linee verticali in corrispondenza di ogni impulso rilevato.

Come visibile in (Fig. 3-12).

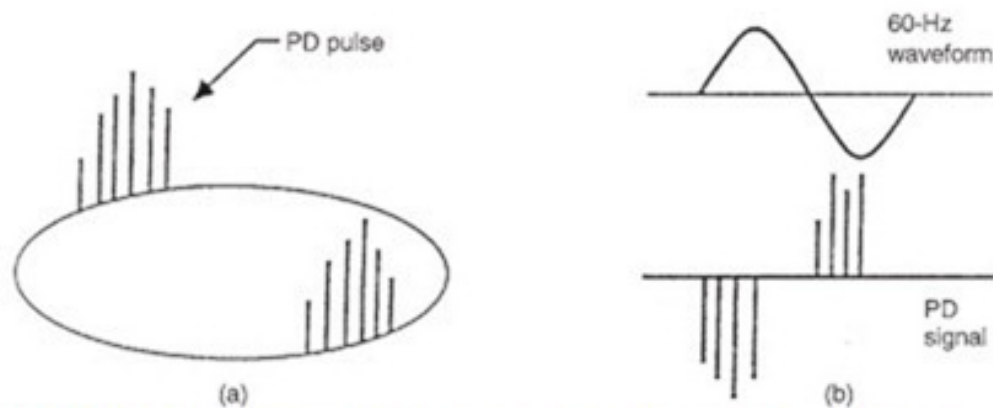


Fig. 3-12 Immagine su oscilloscopio XY in corrispondenza degli impulsi di scarica parziale  
(fonte: *machineryequipmentonline*)

La misura di carica apparente non può essere riferita ad un campione inserito all'interno della strumentazione, perché non è possibile determinare a priori il fattore di scala presente fra la carica apparente rilevata e quella che effettivamente è presente ai capi dell'oggetto di test.

Si è visto al termine del par. 3.4 come la sensibilità di misura è legata al rapporto tra la capacità di accoppiamento e quella dell'oggetto in prova, quindi il fattore di scala è univoco per ogni prova e deve essere impostato mediante un processo di calibrazione. Anche nel caso di oggetti identici, la diversa struttura dei collegamenti di alta tensione può portare ad una diversa attenuazione del segnale rilevato.

La normativa IEC 60270 stabilisce che il processo di calibrazione debba essere effettuato per ogni oggetto la cui capacità si scosti del 10% o più dal precedente o per ogni variazione della configurazione della strumentazione di misura, iniettando un impulso di corrente di carica nota ai capi dell'oggetto in prova (Fig. 3-2).

Lo strumento utilizzato per realizzare quest'operazione è il calibratore, realizzato ponendo in serie un generatore di gradini di ampiezza  $U_0$  a fronte molto ripido ed un condensatore di capacità  $C_0$ .

Ipotizzando che il trasferimento di carica tra la capacità interna al calibratore e il resto del circuito sia totale, si ha:

$$q_0 = C_0 U_0 \quad \text{eq. 3.24}$$

Considerazione che può essere ritenuta valida nell'ipotesi in cui la capacità interna al calibratore sia minore o uguale al 10% della capacità dell'oggetto in test.

Il calibratore crea una serie di impulsi di carica nota con un'incertezza del 5% o 1pC secondo una certa frequenza di ripetizione, nota secondo un'incertezza dell'1%.

Per fare questo la sorgente di clock può essere interna, oppure utilizzare segnali provenienti dall'esterno, come la pulsazione a frequenza di rete della luce prodotta dagli apparecchi di illuminazione tradizionali.

È raccomandato eseguire la calibrazione con un valore di carica dello stesso ordine di grandezza rispetto al valore limite a cui l'oggetto deve sottostare per porre rimedio ad eventuali errori dovuti alla non linearità della strumentazione su tutto il range di misura.

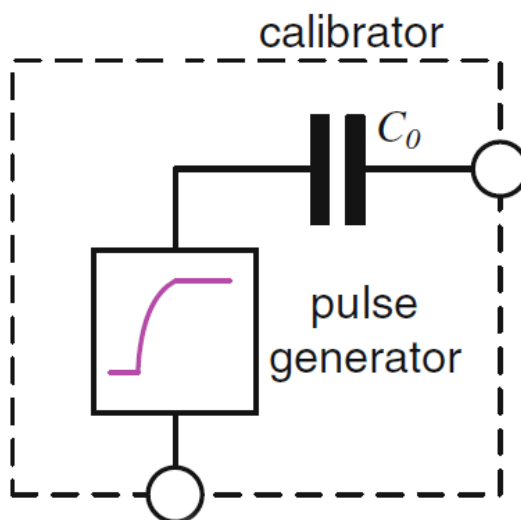


Fig. 3-13 Schema di principio di un apparecchio calibratore  
(fonte: [4])

## 3.6 La normativa IEC 60270 in dettaglio

Alcune definizioni fornite dalla normativa sono già state presentate nei paragrafi di questo capitolo, altre ritenute significative lo saranno qui di seguito.

### 3.6.1 Definizioni generali

- *Impulso di scarica parziale*: impulso di tensione o di corrente risultante da una scarica parziale entro l'oggetto in prova. L'impulso viene misurato utilizzando opportune configurazioni circuitali, con lo scopo di convogliare questi segnali nella strumentazione di misura per effettuare il test.
- *Velocità di ripetizione degli impulsi n*: rapporto fra il numero totale di *impulsi di scarica parziale* registrati in un certo intervallo di tempo T e la durata di questo.
- *Frequenza di ripetizione*: numero di scariche parziali per secondo, nel caso di impulsi equidistanti.
- *Angolo di fase  $\phi_i$  e tempo  $t_i$  di apparizione di un impulso di scarica parziale*: dove  $t_i$  è il tempo misurato tra l'ultimo passaggio per lo zero della tensione con derivata positiva e l'*impulso di scarica parziale*, e T è il periodo relativo ad un ciclo di rete.

$$\phi_i = 360 \frac{t_i}{T} \quad \text{eq. 3.25}$$

- *Corrente media di scarica I*: quantità derivata dalla somma dei valori assoluti della *carica apparente  $q_i$*  entro un certo intervallo di tempo  $T_{ref}$ , rapportati alla durata di questo. La corrente può essere espressa in (C/s) o in (A).

$$I = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^n |q_i| \quad \text{eq. 3.26}$$

- *Potenza di scarica P*: quantità derivata corrispondente alla potenza media fornita ai terminali dell'oggetto in prova durante il periodo  $T_{ref}$  a causa dei valori della *carica apparente  $q_i$*  associata agli impulsi.

Dove  $u_i$  rappresenta il valore istantaneo della tensione nell'istante relativo al singolo impulso di *carica apparente  $q_i$* , considerando il segno di entrambi i termini.

$$P = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^n (q_i u_i) \quad \text{eq. 3.27}$$

- *Valore quadratico D*: grandezza derivata come somma dei quadrati dei singoli valori di *carica apparente* entro un certo intervallo di tempo  $T_{ref}$ , rapportati alla durata di questo. L'unità di misura è il (C<sup>2</sup>/s).

$$D = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^n q_i^2 \quad \text{eq. 3.28}$$

- *Ampiezza della più grande scarica parziale ripetitiva*: Più grande ampiezza registrata dal sistema di misura la cui risposta ad un treno di impulsi è conforme a quanto specificato in 4.3.3 dalla normativa stessa. (riportato di seguito)

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

- *Ampiezza di scarica parziale specificata*: Massimo valore permesso ad una quantità relativa all'*impulso di scarica parziale* per l'oggetto in prova ad uno specifico valore di tensione, secondo precise condizioni e modalità di test. Per tensioni alternate, tale requisito è riferito al valore della *carica apparente  $q$*  della *più grande scarica parziale ripetitiva*.
- *Rumore di fondo*: Segnale rilevato dalla strumentazione di misura, non causati da scariche parziali entro l'oggetto in prova. ( ad esempio dovuto a rumore nel sistema di misura, trasmissioni radio o altri segnali continui o impulsivi.)

### 3.6.2 Tensioni di prova applicate

- *Tensione di innesco delle scariche parziali  $U_i$* : Tensione applicata alla quale si osservano per la prima volta scariche parziali ripetitive, quando la tensione viene gradualmente aumentata da un valore inferiore al quale non erano state osservate scariche parziali. Nella pratica, la tensione di innesco  $U_i$  è la più bassa tensione applicata alla quale una certa grandezza legata all'*impulso di scarica parziale* diviene maggiore o uguale ad un valore basso stabilito.
- *Tensione di estinzione delle scariche parziali  $U_e$* : Tensione applicata alla quale le scariche parziali cessano di apparire all'interno dell'oggetto in prova, quando la tensione applicata all'oggetto è gradualmente diminuita da un valore superiore al quale si osservavano impulsi di scariche parziali. Nella pratica  $U_e$  è il più basso valore di tensione applicata alla quale una certa grandezza legata all'*impulso di scarica parziale* diviene minore o uguale di un valore basso stabilito.
- *Tensione di prova delle scariche parziali*: tensione stabilita, applicata in una specifica procedura di test delle scariche parziali, durante la quale l'oggetto in prova non deve esibire scariche parziali superiori un'*ampiezza specificata di scariche parziali*.

### 3.6.3 Caratteristiche del sistema di misura

- *Impedenza di trasferimento  $Z(f)$* : rapporto tra l'ampiezza della tensione in uscita e l'ampiezza costante della corrente in ingresso, in funzione della frequenza  $f$ , quando l'ingresso è un segnale sinusoidale.
- *Frequenze limite inferiore e superiore  $f_1$  e  $f_2$* : frequenze alle quali l'impedenza di trasferimento  $Z(f)$  è diminuita di 6dB rispetto al valore massimo assunto all'interno della banda passante.
- *Frequenza di centro banda  $f_m$  e larghezza di banda  $\Delta f$* : vedi eq. 3.20 e eq. 3.21
- *Errore di sovrapposizione*: causato dalla sovrapposizione dei transitori di risposta agli impulsi quando l'intervallo di tempo tra loro è minore alla durata della risposta ad un singolo impulso. Gli errori di sovrapposizione possono essere additivo o sottrattivi, in base alla velocità di ripetizione degli impulsi del segnale in ingresso. Nei circuiti reali, entrambi i tipi di errore appariranno, a causa della natura casuale della velocità di ripetizione degli impulsi. Tuttavia, visto che la misura è basata sull'*ampiezza della più grande scarica parziale ripetitiva*, normalmente solo la sovrapposizione additiva viene misurata.
- *Tempo di risoluzione dell'impulso  $T_r$* : più piccolo intervallo temporale tra due impulsi in ingresso successivi di brevissima durata, stessa forma, polarità e stesso valore di carica, per i quali il valore della risposta risultante non cambia di oltre il 10% rispetto quella per un impulso singolo. Il tempo di risoluzione dell'impulso è in generale inversamente proporzionale alla *larghezza di banda* del sistema di misura. È un'indicazione dell'abilità del sistema di misura di risolvere eventi di scarica parziale consecutivi.
- *Errore di integrazione*: errore nella misura della carica apparente che si manifesta quando il limite in frequenza superiore dello spettro dell'impulso di corrente è minore della frequenza di taglio superiore di un sistema di misura a banda larga o della frequenza di centro banda di un sistema a banda stretta.



### 3.6.4 Caratteristiche del sistema di misura

La normativa IEC 60270 presenta tra le altre cose le configurazioni circuitali basilari ritenute valide per la misura della carica apparente dovuta ai fenomeni di scariche parziali.

Gli elementi presenti sono quelli già visti in par. 3.1 parlando dello schema di principio relativo alla rilevazione e misura di scariche parziali con metodo classico.

Per ogni possibile schema si ha:

- $U_{\sim}$  Sorgente di alta tensione alternata
- $C_a$  Capacità indicante l'oggetto in prova
- $C_k$  Capacità di accoppiamento
- CD Unità di accoppiamento
- $Z_{mi}$  Impedenza di ingresso del sistema di misura
- CC Cavo di collegamento
- OL Collegamento Ottico
- MI Sistema di misura
- Z Filtro antidistrurbo sull'alta tensione

Lo schema di (Fig. 3-14) è lo schema classico, utilizzato fin dal principio in una grande varietà di misure.

L'unità di accoppiamento è attraversata anche da una componente a frequenza industriale di corrente, tuttavia qualsiasi possibile cedimento dell'oggetto in prova non sottopone ad alcuna sollecitazione ulteriore il sistema di misura.

Sulla destra viene mostrata la situazione riscontrabile con moderni sistemi di misura, dove, per aumentare ancor di più la sicurezza della strumentazione, questa viene connessa al lato di alta tensione con un collegamento in fibra ottica, dielettrico per sua stessa natura, in sostituzione del comune cavo coassiale CC.

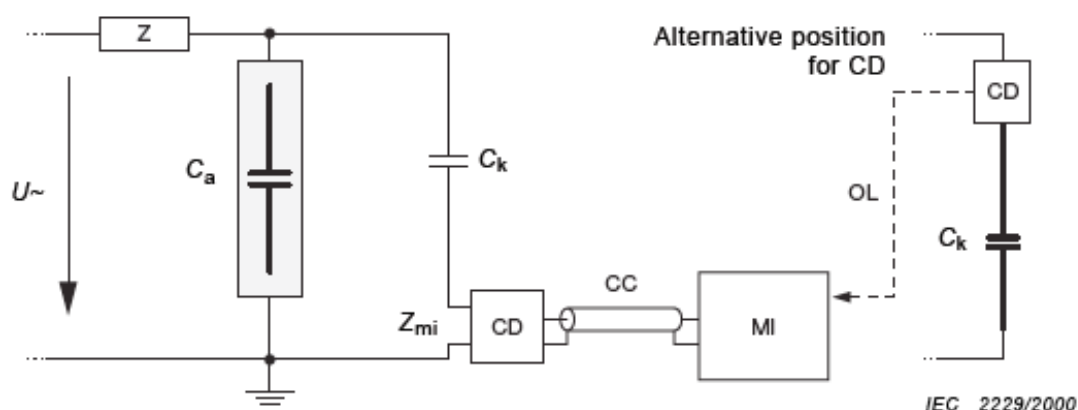


Fig. 3-14 Schema classico con impedenza di misura in serie al condensatore di accoppiamento  
(Fonte: [64])

Altra possibilità, egualmente valida sul piano funzionale e misuristico è quella riportata in (Fig. 3-15), dove la connessione l'unità di accoppiamento è posta in serie all'oggetto in prova.

Questo sottopone l'apparecchiatura di misura ad elevati rischi in caso di cedimento dell'oggetto, tuttavia nel caso vi siano capacità di elevato valore in parallelo all'oggetto in prova (per esempio nel caso di un oggetto provato on-site connesso ad una rete con molti metri di cavo) gli impulsi di scariche parziali potrebbero richiudersi su queste piuttosto che sulla capacità di accoppiamento, quindi con lo schema di (Fig. 3-14) si potrebbe non avere abbastanza sensibilità.

In figura (Fig. 3-16) viene riportato uno schema nato per permettere il gating dei segnali sulla base del riconoscimento del segno della carica apparente in transito. Per fare questo vengono utilizzate due unità di accoppiamento, una connessa all'oggetto in prova ed una al condensatore campione, collegate al medesimo misuratore, il quale opera un confronto tra i segnali, ritenendo validi solo quegli impulsi con opposta carica apparente su due rami.

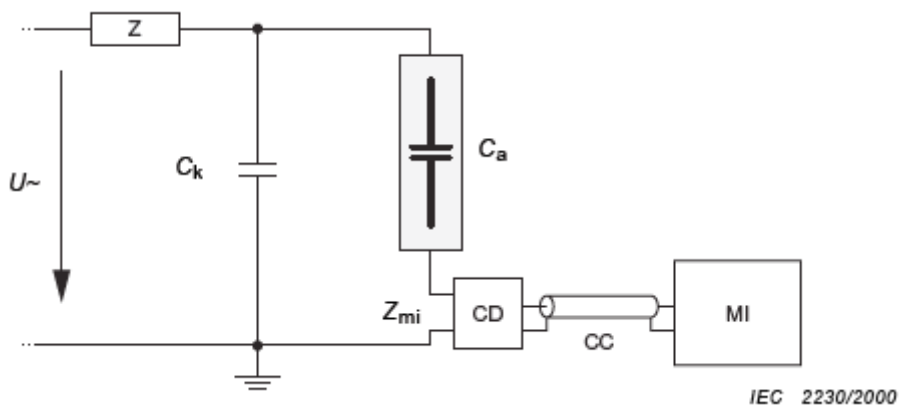


Fig. 3-15 Schema con impedenza di misura in serie all'oggetto in prova  
(fonte: IEC 60270)

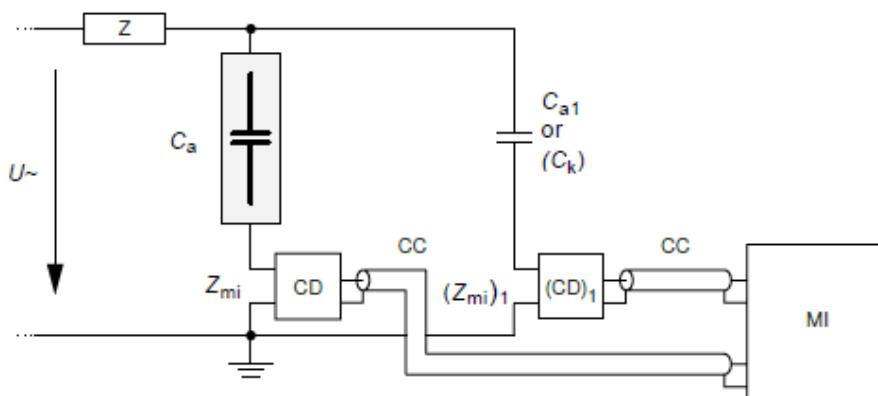


Fig. 3-16 Schema per effettuare il riconoscimento della polarità dell'impulso  
(fonte: [64])

Uno schema nato appositamente per aumentare il grado di reiezione della strumentazione verso disturbi provenienti dal mondo esterno è quello di (Fig. 3-17) raffigurante un circuito di tipo bilanciato.

In questa configurazione sono utilizzate due impedenze di misura, una inserita nel ramo dell'oggetto in prova, l'altra in serie con un elemento ad esso simile in termini di valore di capacità e angolo di perdita, ma certamente privo di scariche parziali.

Il circuito amplificatore insito nella strumentazione è sensibile ai segnali di tipo differenziale, presenti in uno solo dei due rami, mentre è quasi insensibile verso i segnali di modo comune, che li attraversano entrambi.

L'idea di base è che le scariche parziali siano presenti solamente nel ramo dell'oggetto in test, mentre ciò che li interessa entrambi è un disturbo proveniente dall'esterno.

Si dovrà effettuare una doppia calibrazione del circuito, al fine di assicurare la corretta misura del valore di carica apparente delle scariche presenti entro l'oggetto ed al contempo trovare le regolazioni dei parametri della strumentazione che assicurano la massima reiezione dei disturbi di modo comune.

Il miglioramento della reiezione è tanto più accurato tanto più le caratteristiche dell'oggetto campione e dell'oggetto in prova sono simili, nel caso in cui si abbiano due oggetti perfettamente identici, il rapporto di reiezione ai disturbi può salire fino a due ordini di grandezza rispetto al circuito semplice.

Lo schema in questione viene spesso usato per oggetti prodotti in serie, quindi con caratteristiche nominalmente identiche.

Un oggetto viene realizzato con particolare cura al fine di rendere trascurabile la presenza di difetti in esso, giacché verrà utilizzato come campione su uno dei due rami del circuito.

Dall'altra parte vengono di volta in volta posti i singoli elementi che hanno terminato il processo produttivo per effettuare la verifica.

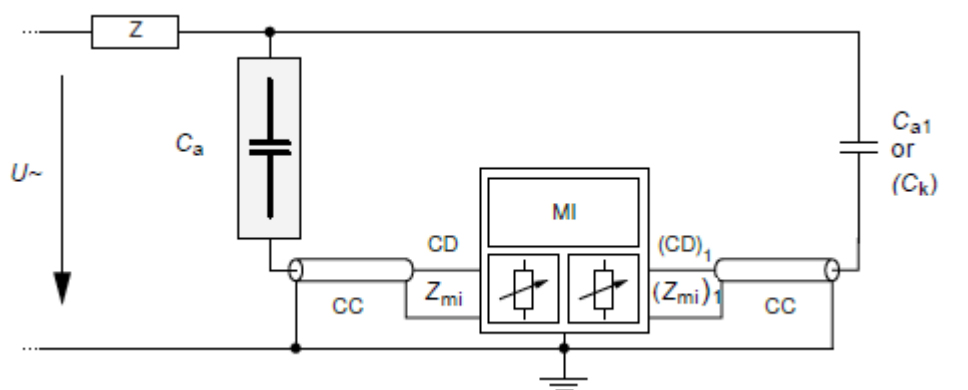


Fig. 3-17 Schema di misura con configurazione circuitale bilanciata  
(Fonte: [64])

Quelli presentati in (Fig. 3-18) e (Fig. 3-19) sono schemi particolari, riservati prevalentemente ai trasformatori di potenza. Nel primo, se gli isolatori passanti sono dotati di prese capacitive, è possibile prelevare il segnale relativo agli impulsi di scariche parziali, evitando la capacità di accoppiamento, che potrebbe essere non disponibile per valori molto elevati di tensione. Perdendo però in sensibilità a causa dei piccoli valori di  $C_k$  (pF). Nel secondo caso, si sostituisce alla sorgente di alta tensione la macchina stessa in prova, alimentata dal lato a più bassa tensione.

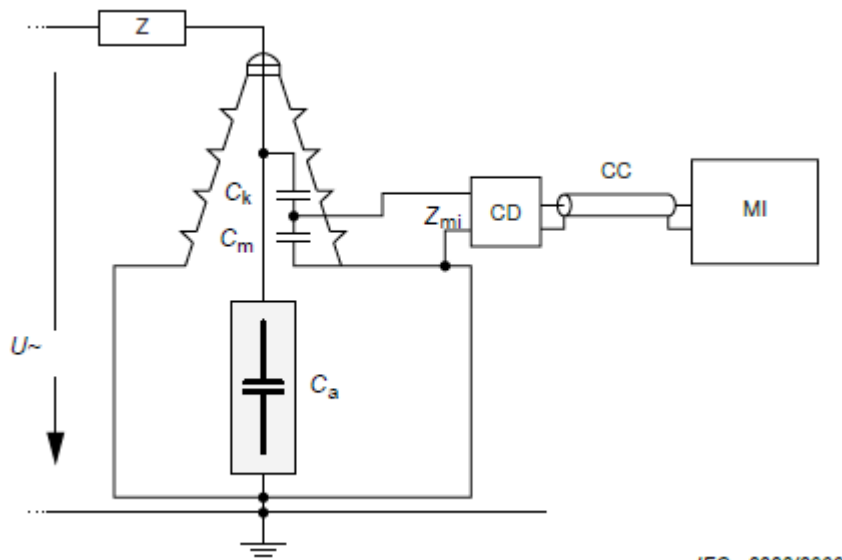


Fig. 3-18 Schema di misura per isolatori dotati di presa di accoppiamento capacitivo  
(fonte: [64])

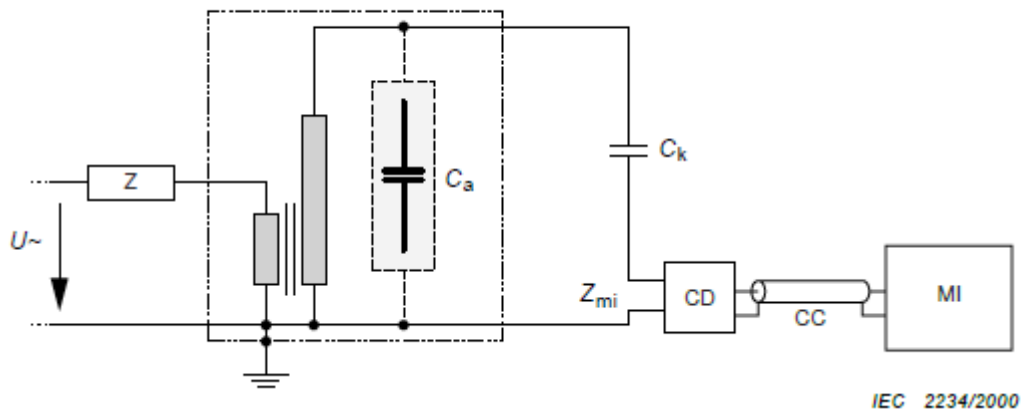


Fig. 3-19 Schema di misura nel caso di oggetti in grado di auto-eccitarsi  
(fonte: [64])

### 3.6.5 Altri sistemi di misura previsti dalla normativa

Il sistema di misura analogico presentato ad inizio capitolo è stato il primo ad essere utilizzato per le misurazioni di scariche parziali, nel tempo, grazie ai progressi dell'elettronica, sono state introdotte configurazioni circuitali diverse, prima analogiche, poi digitali. Permettendo alla strumentazione di eseguire altre valutazioni oltre alla sola carica apparente.

Per questo nel 2016 la IEC 60270 è stata integrata con un ulteriore capitolo, nel quale vengono descritte le nuove tipologie di strumenti ed i requisiti a cui questi devono sottostare.

Per la corretta elaborazione degli impulsi di scarica parziale è molto importante evitare o ridurre il più possibile i fenomeni di sovrapposizione di impulsi consecutivi, indipendentemente dal tipo di processamento, vengono utilizzati stadi amplificatori con risposte che si estinguono in tempi molto brevi, quindi con larghissime larghezze di banda.

Allo stesso modo le unità di accoppiamento devono effettuare un trasferimento dell'impulso verso la strumentazione cercando di preservarne le componenti spettrali su bande molto estese, si utilizzano quindi elementi quanto più vicini possibile ad una resistenza ideali, eventualmente seguita da un filtro passa alto per evitare i disturbi provenienti dalla rete di alimentazione.

Viene stabilito che queste tipologie di strumenti che eseguono un processing del segnale analogico o digitale, devono anche acquisire il segnale relativo alla tensione di rete, per visualizzare il pattern delle scariche parziali sulla base della fase della tensione di rete, come visibile in (Fig. 3-20).

Questa deve presentare nel valore istantaneo un errore non superiore al 5% del valore di picco, garantendo poi un errore inferiore ai 5° sul valore della fase calcolata. Viene quindi raccomandato nel caso di conversione analogico digitale l'utilizzo di un convertitore ad almeno 8 bit, con una velocità di campionamento tale da permettere 100 campioni per ogni ciclo di rete.

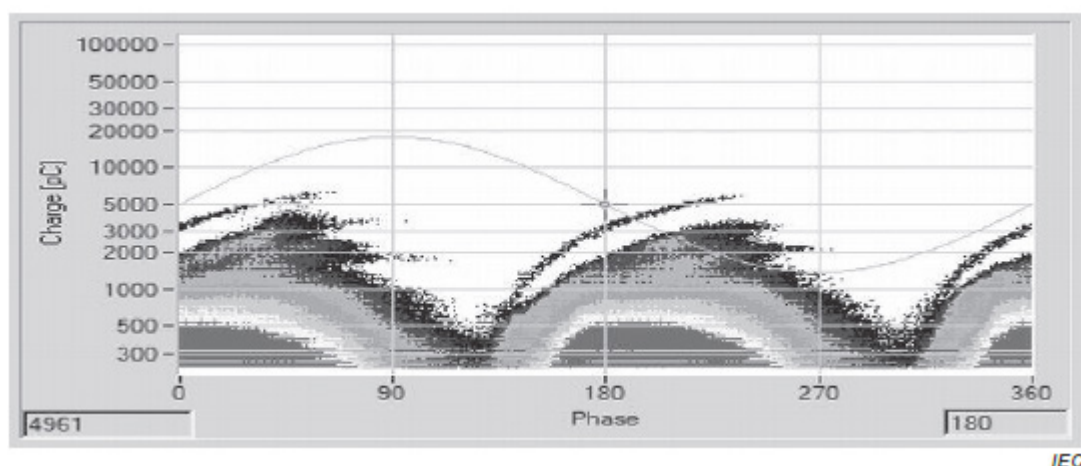


Fig. 3-20 Esempio di Phase resolved partial discharge pattern  
(fonte: [64])

Il primo passo in questa evoluzione fu quello di sostituire il meccanismo di pseudo-integrazione con un'integrazione vera e propria, operata da un circuito integratore analogico (Fig. 3-21).

In questo schema il segnale, dopo aver subito un'amplificazione con circuiti a larghissima banda, viene inviato ad uno stadio integratore costituito generalmente da amplificatori operazionali.

In uscita è presente un circuito rivelatore di picco, poiché al valore di picco della grandezza integrata è proporzionale la carica apparente dell'impulso che sarà poi visualizzata su un voltmetro.

La presenza di offset in DC o componenti a bassa frequenza sul segnale in ingresso possono portare in tempi brevissimi alla saturazione dell'integratore, si dovrà prevedere un sistema di reset che vada ciclicamente ad azzerarne il valore.

In alternativa sarebbe possibile filtrare con un filtro passa alto il segnale proveniente dall'unità di accoppiamento.

Il fatto di avere a disposizione entro il sistema di misura la vera forma d'onda del segnale da integrare può essere utile per inserire nel mezzo della catena metodologie per la riduzione del rumore.

Sarebbe infatti possibile, dato che gli impulsi reali di scarica sono molto simili ad impulsi di Dirac e quindi piatti in frequenza, tramite l'impiego di filtri elimina banda molto selettivi eliminare disturbi presenti su un limitato range di frequenza (gating frequency). L'errore derivante nella valutazione della carica apparente dalla mancanza di una porzione limitata di spettro, sarebbe risolvibile con la semplice procedura di calibrazione.

L'analisi nel dominio del tempo del segnale, potrebbe invece suggerire come certi disturbi si presentino solamente in precisi istanti temporali, è il caso degli impulsi prodotti alla commutazione di circuiti elettronici di potenza. In quel caso si potrebbe scollegare la catena di elaborazione del segnale per quel breve lasso di tempo (gating time).

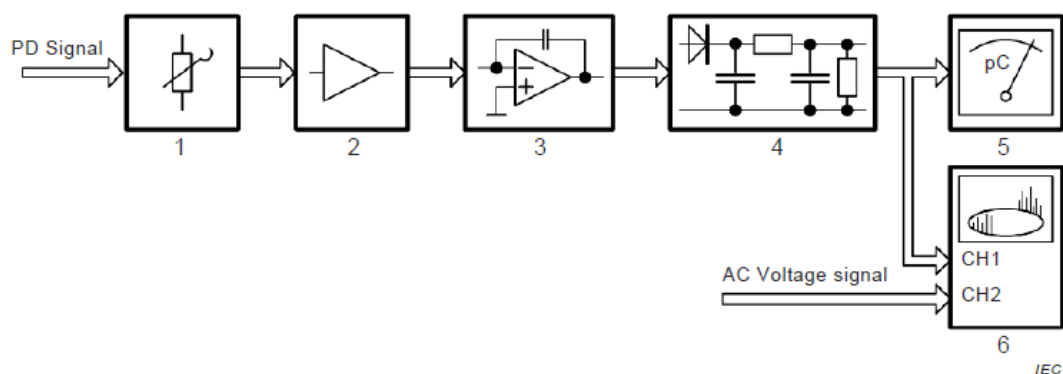


Fig. 3-21 Schema di principio di un misuratore con circuito integratore attivo  
(fonte: [64])

I progressi mostrati nel tempo da parte dei convertitori analogico digitale e in particolar modo delle memorie, in termini di velocità, portarono alla realizzazione di sistemi con elaborazione completamente digitale.

Utilizzando schemi per la parte di acquisizione derivati da quanto disponibile per gli oscilloscopi digitali.

Il convertitore utilizzato per acquisire il segnale delle scariche parziali ha una velocità di campionamento elevata, almeno 100 Ms/s.

Nonostante l'elevata velocità di campionamento e il funzionamento per lunghi periodi dell'apparecchiatura, la memoria richiesta per stoccare i dati non è abnorme, poiché il processo di acquisizione viene avviato da un evento di trigger, per una durata di qualche  $\mu$ s.

Vengono quindi utilizzate tecniche di segmentazione della memoria, salvando le varie finestre temporali in sequenza, accompagnate da un identificativo numerico relativo al tempo di inizio assoluto.

Il segnale acquisito viene processato, eseguendo una pseudo-integrazione o un'integrazione vera e propria per via numerica. A seconda del tipo di strumento questa può avvenire in real-time o al termine del lavoro di acquisizione.

Un secondo canale di conversione si occupa dell'acquisizione della tensione di alimentazione, qui la velocità è molto meno importante, anche perché in questo caso il salvataggio dei dati può essere continuo.

Al termine dell'acquisizione vengono calcolati i valori della carica apparente dei singoli impulsi, tramite il fattore di scala ottenuto con la procedura di calibrazione.

In alternativa è possibile eseguire la conversione digitale dopo aver effettuato la quasi integrazione per via analogica (Fig. 3-23).

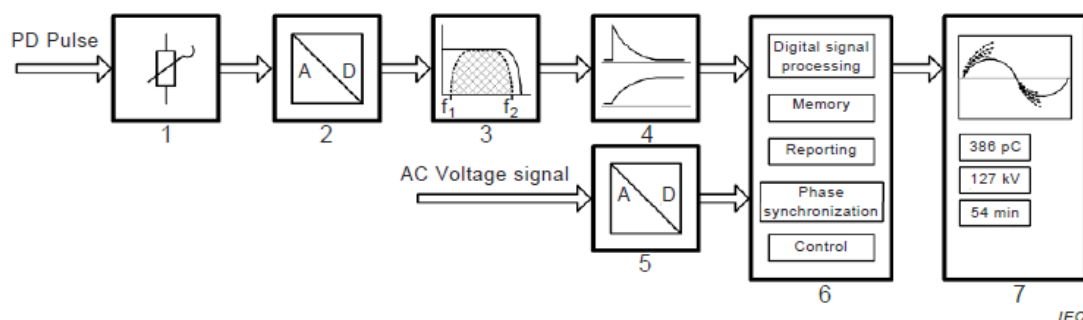


Fig. 3-22 Schema di principio di un misuratore con conversione diretta digitale  
(fonte: [64])

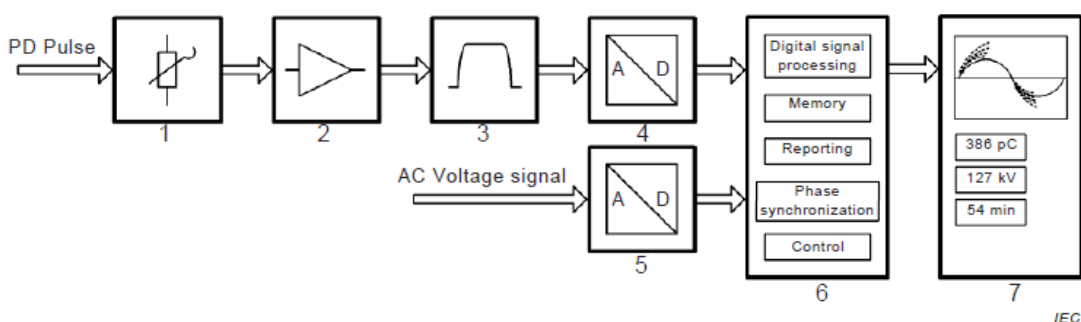


Fig. 3-23 Schema di principio di un misuratore con conversione dopo l'integrazione  
(fonte: [64])

Questo però peggiora la flessibilità dello strumento, perché utilizzando un filtro digitale passa banda per la pseudo integrazione è possibile di volta in volta variare i parametri di questo in base alle caratteristiche dello spettro degli impulsi rilevati, mentre per via analogica è più complesso eseguire una simile operazione, si tratterebbe di andare a variare i valori di resistenze e capacità nel circuito.

Per questo motivo lo schema di (Fig. 3-22) è quello utilizzato per quasi tutti i sistemi di misura di moderna concezione.

Alcuni di essi, disponendo della vera forma d'onda degli impulsi di scarica possono eseguire raffinati algoritmi volti alla classificazione del contenuto in frequenza e dell'andamento temporale di questo per fornire informazioni relative al tipo di scarica in corso.

In particolar modo oggi sono molto frequenti i sistemi basati su personal computer, che permette, oltre alla misura della carica apparente stabilita nella IEC 60270 la realizzazione di un più completo quadro inerentemente all'attività di scariche parziali presenti nel dispositivo in test ed eventualmente un suo confronto durante la vita per monitorarne l'invecchiamento.

Non si tratta più in questi casi di una semplice misura volta a verificare se l'oggetto soddisfa o no un determinato requisito, ma si effettua una vera e propria attività di analisi dei segnali per avere informazioni diagnostiche sull'oggetto in prova.

Al fine di capire, oltre se in esso sono in corso fenomeni di scariche parziali, che impatto avranno sulla vita del sistema isolante.



### 3.7 Limiti delle misure eseguite secondo la IEC 60270

La normativa IEC 60270 individua come principale obiettivo della misura delle scariche parziali la stima della carica apparente.

Intesa come intensità della più grande scarica parziale ripetitiva, ovvero quella che si ripresenti almeno ogni ciclo della tensione di rete.

Questa convenzione non sembra legittimamente motivata dal fenomeno fisico di degrado a cui le scariche parziali sottopongono i materiali isolanti.

La stima della carica associata al singolo impulso di corrente si è visto essere un valido indicatore del danno da esso provocato, poiché l'energia da esso dissipata è a questo proporzionale.

Quello che non è tenuto in considerazione dal concetto di carica apparente è quante volte un impulso di scarica tale entità si manifesta entro il materiale isolante danneggiandolo.

Il fatto che la carica apparente misurata sia inferiore ad un certo valore di soglia non è bastevole per stabilire se la vita dell'elemento in prova potrà essere quella stabilita in fase progettuale oppure no.

Una scarica parziale con una certa carica associata può ripetersi una sola volta nel ciclo di rete, oppure centinaia, eppure portare alla stessa lettura della strumentazione in termini di carica apparente.

Ben diverso è invece il danno in termini di erosione del mezzo isolante da essa provocato.

La normativa IEC 60270 è infatti nata prevalentemente per standardizzare i metodi e la strumentazione destinati a scopi principalmente di controllo qualità, i metodi di misura e le grandezze significative per scopo diagnostico dovranno essere ricercati altrove.

In particolar modo nelle macchine rotanti, la complessità del sistema isolante fa sì che una semplice misura della carica apparente non sia significativa, poiché l'intensità della scarica parziale, oltre a dover essere pesata con la frequenza di ripetizione, deve essere considerata alla luce del luogo in cui essa si manifesta.

Alcune tipologie di isolanti sono tipicamente immuni agli effetti di degrado portati dalle scariche parziali, mentre per altri essi sono terribilmente dannosi.



# 4

## L'isolamento nelle macchine rotanti

In questo capitolo si introdurrà brevemente la struttura e le modalità realizzative del sistema isolante delle macchine rotanti in corrente alternata.

Si cercheranno di evidenziare le problematiche e gli stress a cui esso è sottoposto, fino a giungere ai difetti che possono abbreviare la vita della macchina se non correttamente rilevati e risolti .

Il sistema di isolamento di una macchina rotante è cruciale per la sua affidabilità nel tempo, per questo, già prima dell'introduzione dell'analisi delle scariche parziali, venivano eseguiti test mirati a valutarne la qualità e l'integrità.

Se ne fornirà una breve descrizione in termini di modalità di esecuzione della prova e del tipo di difetto che essi possono portare alla luce.

Essi non sostituiscono le misure di scariche parziali, ma piuttosto servono a definire un quadro completo delle condizioni iniziali per poter determinare la qualità del prodotto finito nel caso di macchine appena costruite, oppure lo stato di degrado quando si eseguono misure con fine diagnostico.

Si tratta infatti di misure "integrali", che non sono in grado di mettere in evidenza anomalie localizzate come le cavità gassose entro il materiale o la delaminazione e lo sfaldamento del materiale ancora agli stadi iniziali.

I valori rilevabili con le singole prove, spesso non hanno un significato assoluto, perciò, il semplice confronto con un valore di riferimento non è significativo nello stimare la bontà o meno della macchina. In considerazione delle molteplici tipologie realizzative esistenti o diverse condizioni ambientali.

A questo proposito la normativa europea sulle macchine IEC 60034 dedica diversi fascicoli per stabilire delle procedure di test unificate, dei fattori di conversione, agevolare il confronto di tipologie diverse di avvolgimento e l'adeguamento dei valori limite da rispettare.

## 4.1 Materiali isolanti nelle macchine rotanti

I materiali utilizzati per l'isolamento delle parti attive nelle macchine rotanti devono presentare buone caratteristiche dielettriche, termiche e meccaniche per continuare a sopportare gli stress a cui sono sottoposti per tutta la vita utile della macchina.

I tre fenomeni agiscono contemporaneamente sul materiale, ma la sollecitazione ritenuta preponderante per caratterizzare l'invecchiamento del sistema isolante è quella termica.

Perché un'elevata temperatura di lavoro agisce come un catalizzatore nei confronti degli effetti di invecchiamento prodotti da tutte le altre sollecitazioni.

Nel dimensionamento termico della macchina è fondamentale conoscere la massima temperatura ammissibile dai materiali utilizzati, viene definita la temperatura massima di servizio come quella temperatura che applicata permanentemente al materiale per tutta la durata della vita operativa, determina un tempo di vita pari a quello di progetto  $t_p$ .

In (Fig. 4-1) sono riportate le varie classi termiche previste secondo la normativa IEC 60085, che, nell'attuale versione, ha eliminato la lettera identificativa, utilizzando direttamente il valore di temperatura massimo ammesso per garantire una vita utile dell'isolante di 20'000 ore.

Usualmente le macchine rotanti vengono realizzate con materiali di classe E o B per realizzazioni di piccola taglia, mentre è usuale l'impiego della classe F per potenze medie e grandi, o comunque macchine a cui è richiesta una certa affidabilità.

Le classi Y ed A sono ormai in disuso, ad esse appartenevano materiali fibrosi basati su celluloidi, cotone e seta. Che, nella classe A potevano essere immersi in liquido isolante o impregnati, per ottenere un miglioramento delle prestazioni.

La classe E contiene i fili smaltati con resina epossidica o poliuretana, mentre la B include i materiali inorganici come mica e fibra di vetro, impregnate o incollate fra loro a mezzo di sostanze organiche.

La classe F riguarda sempre materiali inorganici come fibra di vetro o mica, ma impregnati o incollati con resina epossidica o resina poliuretana.

Resine con una migliore stabilità termica rispetto a quanto normalmente utilizzato per la classe B.

Nel tempo i materiali costituenti l'isolamento divengono fragili e tendono a ritirarsi, formando piccole crepe entro le quali possono infiltrarsi agenti inquinanti presenti

<i>Temperatura massima ammissibile in regime permanente <math>T_m</math></i>									
Classe termica precedente	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Classe termica $T_m$ (°C)	90	105	120	130	155	180	200	220	250

CEI 15-26

Fig. 4-1 Temperature associate alle varie classi termiche previste dalla normativa  
(fonte: [www.unipv.it/dmae](http://www.unipv.it/dmae))

nell'ambiente, nel complesso questo rappresenta l'invecchiamento del materiale ed è fortemente legato alla temperatura di lavoro.

Si stima infatti che ogni variazione positiva della temperatura di lavoro prevista dalla classe di 10°C, porti ad un dimezzamento della vita del sistema isolante, viceversa un raddoppio.

Per questo motivo il dimensionamento termico della macchina viene normalmente svolto in modo che il sistema isolante sia in tutti i suoi punti in condizioni ordinarie a temperature ben inferiori rispetto a quelle previste dalla classe termica adottata.

Oggigiorno è abbastanza comune utilizzare materiali di classe B o F, ma fare in modo che la temperatura non superi il valore ammesso per la classe A.

In (Fig. 4-2) è rappresentata la curva di vita di diversi materiali isolanti, raggruppati sulla base della classe termica di appartenenza.

La durata fornita dal diagramma è relativa ad un funzionamento continuo della macchina ed in uguali condizioni di lavoro.

Volendo effettuare una stima della durata del sistema isolante, noto il ciclo di lavoro a cui la macchina è sottoposta, si potrebbe utilizzare il metodo di Miner, a patto si tratti di un ciclo termico rettangolare.

$$\frac{t_1}{t_v(T_1)} + \frac{t_2}{t_v(T_2)} + \dots + \frac{t_n}{t_v(T_n)} \geq 1 \quad \text{eq. 4.1}$$

Dove  $t_v$  rappresenta la vita utile associata al materiale per l' i-esima temperatura  $T_i$  attraverso la curva di vita.

La condizione di "rottura" del materiale isolante è ipotizzata quando la somma dei singoli rapporti produce un valore superiore o uguale ad 1.

Per alcuni periodi del ciclo di lavoro la temperatura  $T_m$  associata alla classe termica può essere superata.

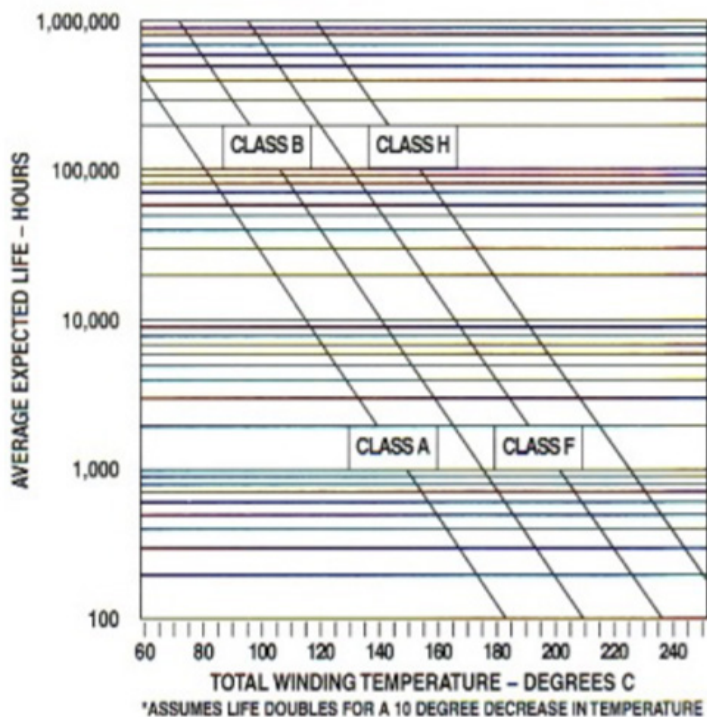


Fig. 4-2 Curva di vita per materiali isolanti con diversa classe termica di appartenenza  
(fonte: [www.unipv.it/dmae](http://www.unipv.it/dmae))

## 4.2 Costruzione dell'avvolgimento della macchina

La costruzione degli avvolgimenti statorici è effettuata in modo diverso in base alla potenza della macchina.

Per motori di taglia modesta, in bassa tensione, l'avvolgimento è realizzato in filo smaltato o piattina.

I lati delle singole matasse vengono inseriti all'interno delle cave presenti all'interno del pacco di lamierini statorico, interponendo della carta isolante fra queste ed il ferro per realizzare l'isolamento verso massa.

Nel caso in cui la realizzazione della macchina preveda la presenza di più starti entro le cave, tra i singoli lati di matassa è posto un ulteriore strato di carta isolante.

Le singole matasse vengono tra loro collegate in serie e/o parallelo fino a formare gli interi avvolgimenti di fase della macchina, collegando gli estremi ai conduttori che poi verranno portati alla morsettiera.

La parte frontale o posteriore della matassa forma le "testate" che vengono legate con filo di nylon, in modo da risultare più compatte e poi protette ricoprendole con un nastro isolante.

Al termine lo statore viene impregnato con vernice isolante sintetica o con resina epossidica per preservarlo dall'inquinamento ambientale e dall'umidità.

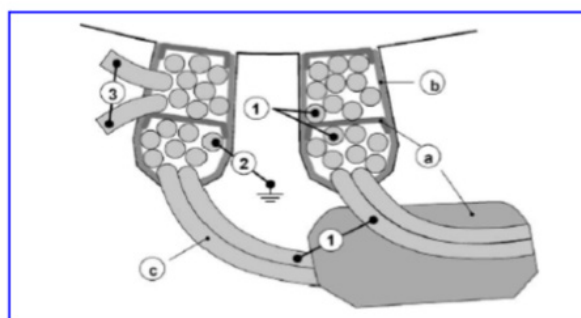
Sulla base dell'affidabilità richiesta alla macchina possono essere realizzati più cicli di impregnazione/verniciatura e cottura in forno, in modo da aumentare lo spessore del materiale protettivo che ricopre l'avvolgimento.

In (Fig. 4-3) è mostrato un particolare della costruzione di un avvolgimento di bassa tensione realizzato con filo smaltato avvolto su matasse.

A lato è riportato una schematizzazione delle tensioni a cui sono sottoposti i singoli elementi.

Fra le cave statoriche e la massa è applicata la tensione di fase, mentre tra le testate di avvolgimenti di fasi diverse può essere applicata la tensione concatenata.

Queste due sono le zone più critiche dell'isolamento della macchina, mentre la tensione fra spira può essere tranquillamente sopportata dallo smalto isolante.



- 1) Tensione fase-fase
- 2) Tensione fase-terra
- 3) Tensione spira-spira

- a) Isolamento di fase
- b) Isolamento di terra
- c) Isolamento di spira



Fig. 4-3 Particolare della costruzione di un avvolgimento di bassa tensione

(fonte: [www.unipv.it/dmae](http://www.unipv.it/dmae))

Per potenze superiori, ma sempre con macchine alimentate in bassa tensione, vengono utilizzate le costruzioni con matasse pre-formate.

Il conduttore smaltato viene avvolto secondo il numero di spire stabilito, con un perimetro della spira stabilito dalla lunghezza dei lati attivi in cava e dalla formatura che verrà poi realizzata.

Successivamente viene effettuata la sagomatura delle testate in modo da porre i due lati attivi su piani sfalsati e regolare l'apertura della matassa.

Spesso questo tipo di avvolgimento è embricato, in modo da presentare matasse uguali per tutto l'avvolgimento.

Il materiale isolante utilizzato è generalmente nastro in fibra di vetro o mica.

Viene effettuata una cottura in forno per rimuovere sporco ed umidità intrappolata e poi impregnata in vernice isolante, con processi che possono andare dalla semplice immersione, fino all'impregnazione sotto vuoto (VPI).

Il metodo VPI è certamente più affidabile, ma richiede attrezzature specifiche, per ora è utilizzato solamente in macchine di notevole pregio.

L'impregnazione e verniciatura delle singole matasse prima dell'inserimento in cava rende le macchine così costruite particolarmente apprezzate in fase di riparazione, perché è possibile sostituirne una singola matassa danneggiata.

Addirittura sarebbe possibile conservarne alcune di scorta per un eventuale intervento futuro di ripristino.

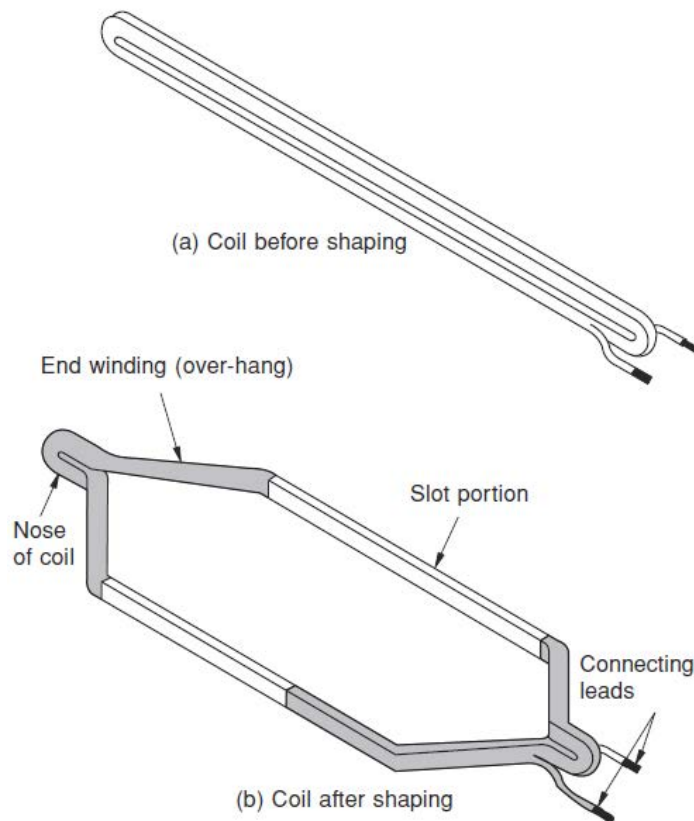


Figure 9.2 View of a formed coil

Fig. 4-4 Geometria di una matassa prima e dopo il processo di formatura  
(fonte: [1] )



Per potenze molto elevate, oltre qualche centinaio di kW, l'avvolgimento della macchina viene alimentato in media tensione.

Per la costruzione dell'avvolgimento di statore sono possibili due diverse vie:

Il metodo tradizionale è molto simile a quanto descritto sopra per le matasse pre-formate di bassa tensione.

Ogni matassa, dopo essere stata formata ed isolata, viene impregnata in resina epossidica, solo dopo aver applicato lo strato per graduare il campo elettrico all'uscita della cava e lo strato semi conduttivo esterno.

Successivamente l'isolamento di ogni matassa viene singolarmente testato prima di essere inserita nelle cave statoriche.

Il fatto di essere già stata impregnata in resina, rende la matassa dura e fragile, per cui essa deve essere posta entro le cave di statore senza applicarvi sforzi per non danneggiarla.

In alternativa il sistema VPI prevede l'inserimento delle matasse nelle cave di statore ancora flessibili e poi l'impregnazione sotto vuoto dell'intero statore della macchina. Una volta completato l'intero statore della macchina, questo viene posto in autoclave, dove viene essiccato sotto vuoto, per rimuovere l'umidità.

Successivamente viene immerso in un bagno di resina, pur mantenendo il vuoto nell'autoclave, in fine viene applicata pressione in modo da far penetrare la resina in profondità attraverso le porosità e fessure.

Sicuramente il tempo impiegato per la realizzazione di uno statore VPI è inferiore ad uno con metodo tradizionale, quindi la grande industria elettromeccanica lo ha adottato con grande favore, tuttavia essendo l'intero statore inglobato in resina l'attività di riparazione è complessa.

Sembra che le minori criticità incontrate nella fase realizzativa portino le macchine realizzate con questo sistema ad avere un minore tasso di guasto a breve termine rispetto a quelle realizzate con sistema tradizionale, quindi la difficoltà di riparazione sia compensata auspicabilmente da una migliore affidabilità.

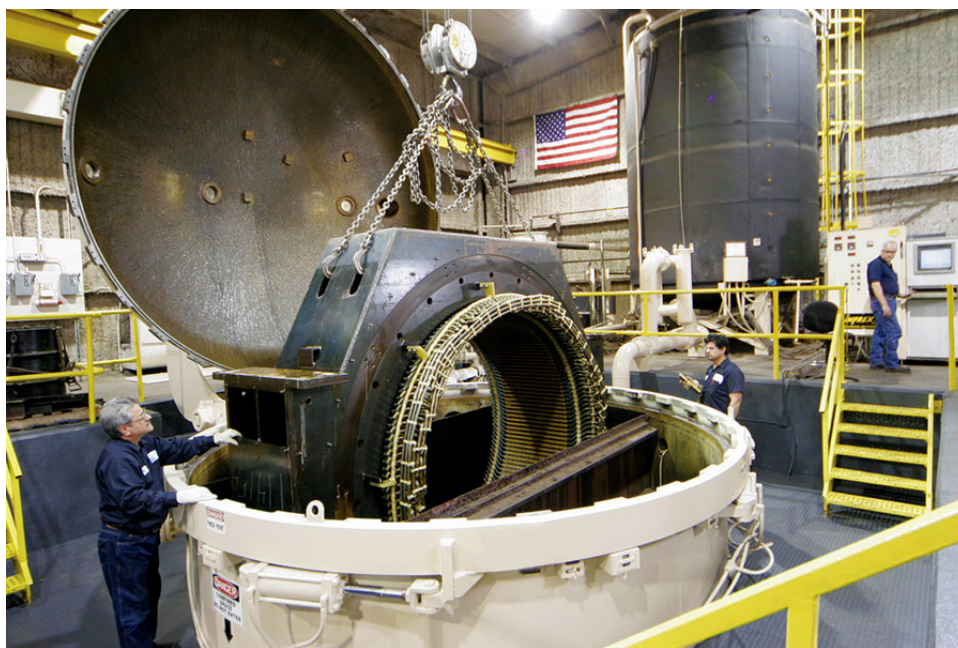


Fig. 4-5 Processo di impregnazione sotto vuoto e in pressione di uno statore  
(fonte: [www.ips.us](http://www.ips.us))



## 4.3 Problemi dell'isolamento nelle macchine rotanti

Molteplici sono le tipologie di difetti che possono affliggere gli isolamenti degli avvolgimenti delle macchine rotanti.

Alcuni di essi sono presenti fin dalla costruzione ed eventualmente possono aggravare la loro entità durante la vita della macchina, altri si presentano nel tempo a causa di imperfette condizioni di lavoro.

Per quanto si cerchi di fare in modo che ogni fase del processo realizzativo avvenga nelle migliori condizioni, migliorando nel tempo le tecniche e le metodologie sulla base dell'esperienza accumulata, non è comunque possibile realizzare un isolamento privo di difetti.

L'utilizzo della tecnica VPI per l'impregnazione in resina ha certamente comportato un notevole miglioramento per quel che riguarda la presenza di inclusioni gassose.

Infatti questa tecnologia prevede, dopo la fase di essiccazione e pulizia dello statore avvolto, questo venga subito immerso in un bagno di resina precedentemente degassata e poi fatta penetrare all'interno tramite l'applicazione di pressione.

Nonostante questo, potrebbe rimanere tra gli strati di nastro isolante qualche piccola cavità non riempita dalla resina.

Lo statore viene normalmente passato più volte in autoclave, ma eccetto la prima fase, non si tratta di un trattamento di impregnazione, quanto piuttosto di rivestimento, per permettere alla superficie esterna della resina di non presentare asperità ed avere uno spessore idoneo per resistere alle sollecitazioni elettriche.

Le cavità nell'isolamento principale possono essere presenti in tre differenti regioni di questo: nel mezzo, o agli estremi (in prossimità del ferro o del conduttore).

Come visibile in (Fig. 4-6), prima nel dettaglio, e poi in forma macroscopica.

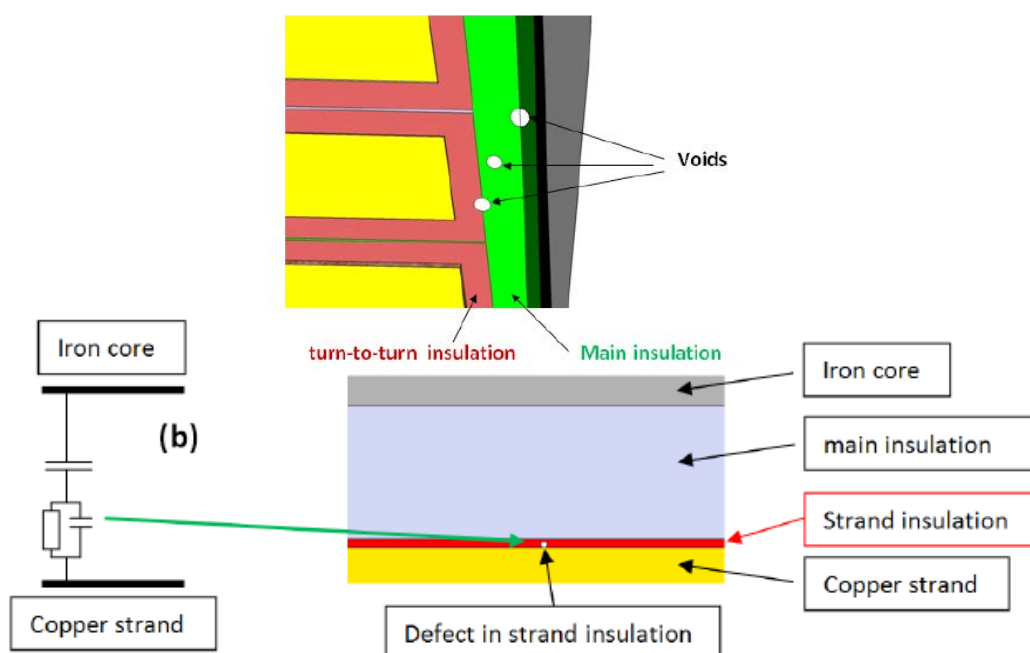


Fig. 4-6 Cavità gassosa nell'isolamento principale a causa di una non perfetta impregnazione  
(Fonte: [15])

Queste possono dare luogo a scariche parziali interne, le quali nel lungo periodo possono portare al danneggiamento per treeing dell'isolamento.

Per accrescere la resistenza all'erosione da treeing della resina epossidica è possibile aggiungere una piccola percentuale di  $\text{SiO}_2$ , in modo da avere una più equa ripartizione della tensione all'interno dello strato isolante, e in particolar modo all'interno delle cavità eventualmente presenti in esso.

L'azione di erosione provocata dalle scariche parziali riguarda solamente la resina epossidica, trascurando praticamente la mica e la fibra di vetro, per questo motivo il percorso compiuto dalla scarica parziale prima di portare ad un guasto è quello mostrato in (Fig. 4-7). La lunghezza da percorrere è molto superiore alla larghezza dello strato isolante, e, per questo motivo, in avvolgimenti ben realizzati i tempi di guasto sono dell'ordine di diverse decine d'anni.

Fenomeno molto pericoloso per la vita dell'isolamento è quello della delaminazione, l'utilizzo della macchina secondo cicli di lavoro non continuativi provoca una dilatazione termica dei conduttori nella fase di lavoro e poi una loro contrazione nella fase di raffreddamento.

Questo può provocare crepe all'interno della resina epossidica e sfaldamento dei nastri isolanti, creando nel tempo nuove fessure e cavità, sede di ulteriori scariche parziali.

Nel cavo di avvolgimenti realizzati con matasse singolarmente impregnate in resina, (come nel caso dei grandi alternatori), le matasse sono mantenute ferme dall'azione di compressione esercitata dalla cava stessa e da una bietta che realizza la chiusura della cava collegando i due denti di statore vicini.

Non sempre questo bloccaggio è efficace, e, nel caso in cui la macchina sia sottoposta a carichi meccanici variabili, le vibrazioni indotte sulle matasse potrebbero dar luogo ad una loro abrasione a contatto con il nucleo ferromagnetico (Fig. 4-8).

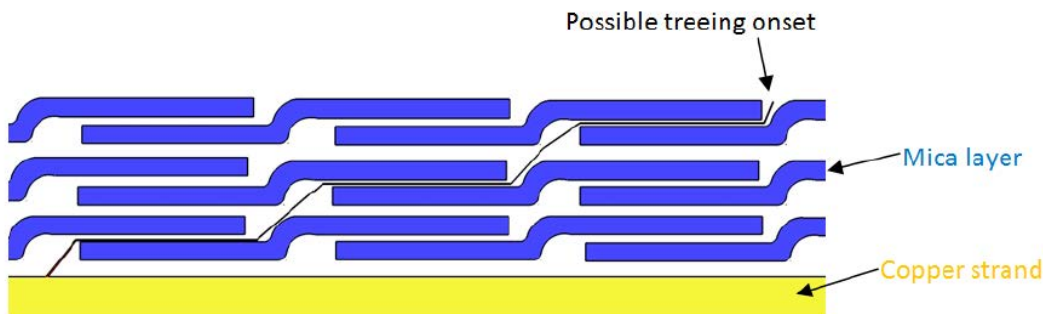


Fig. 4-7 Possibile percorso di treeing tra gli strati dell'isolamento principale  
(fonte: [15])



Fig. 4-8 Danno su una matassa di un avvolgimento statorico dovuta a sfregamento  
(fonte: sciencepublishinggroup.com)

Non è possibile inserire entro la cava materiale per la protezione meccanica dell'avvolgimento, perché si deve lasciare lo strato anti-corona esterno a contatto con il nucleo.

Questo viene previsto per evitare che l'aria che inevitabilmente circonda il lato della matassa possa essere sede di effetto corona, specie in caso di asperità sulla superficie esterna.

La protezione anti-corona è generalmente realizzata a mezzo di un nastro di materiale semiconduttore, o in alternativa possono essere utilizzati nastri di materiale conduttore.

In (Fig. 4-9) è riportato uno schema equivalente atto a schematizzare la ripartizione della tensione tra lo strato isolante l'aria all'interfaccia.

Ipoteticamente lo stesso fenomeno potrebbe avvenire anche all'interno della matassa fra il conduttore e lo strato isolante, con conseguenze ben peggiori, visto che la potenza qui dissipata sarebbe localizzata su una superficie piccola e non ventilata. Per evitare la presenza d'aria e quindi di scariche superficiali all'interno, i nastri isolanti devono essere ben tesati durante la realizzazione e allo stesso tempo è bene accertare che la resina iniettata nel processo VPI scenda in profondità fino al conduttore. Inoltre può essere previsto uno strato "anti-corona" anche all'interno della matassa, per garantire il controllo del campo elettrico anche in questa zona.

Zona critica per la realizzazione e la durata della macchina è quella delle testate, dove il potenziale esterno delle matasse non è più vincolato a terra.

Esse possono presentare una geometria piuttosto complessa, dove l'operazione di nastatura del conduttore è resa difficile, al punto da richiederne spesso l'esecuzione manuale.

È sempre in questa parte della macchina che si realizzano le saldature tra matasse diverse, creando quindi un'irregolarità nella forma del conduttore.

L'applicazione del nastro isolante in mica, anche se svolta da impianti automatizzati, non è così regolare come nelle zone rettilinee ed omogenee poste entro le cave.

L'esposizione in aria delle matasse, richiederebbe invece una elevata regolarità della superficie esterna dell'isolante, in modo che non vi siano asperità da cui possa innescarsi il fenomeno corona, specialmente nel caso in cui vi sia la vicinanza fra testate relative ad avvolgimenti di fasi diverse, quindi zone con campo elettrico elevato.

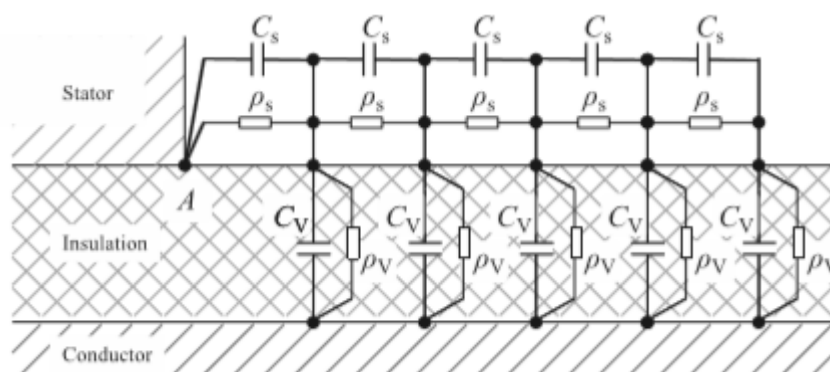


Fig. 4-9 Schema equivalente dell'isolamento della matassa all'interfaccia  
(Fonte: [40])

Delicata è la transizione tra l'interno della cava e l'esterno, qui le linee di campo elettrico non più concentrate solamente entro l'isolante, possono creare zone in cui questo è particolarmente intenso, mettendo a rischio l'integrità dielettrica dell'aria circostante.

Occorre quindi prevedere un sistema per graduare il campo elettrico, fino a portarlo a raggiungere valori tollerabili anche dall'aria.

Viene realizzato un manicotto in materiale semiconduttore, tipicamente SiC, con caratteristiche diverse rispetto a quanto fatto entro le cave.

Un provino di questo materiale ha una caratteristica non lineare della corrente nei confronti della tensione, presentando una rapida diminuzione della resistenza, oltre un certo valore di tensione applicata.

Per questo motivo, uno strato di questo materiale presenta localmente una resistività inferiore laddove il campo elettrico è più intenso. Realizzando così un'opera di mitigazione ed equalizzazione del campo elettrico, riducendone in particolar modo la pericolosa componente tangenziale.

Alcuni studi hanno evidenziato come la presenza di questo elemento provochi un notevole incremento della corrente drenata, quindi delle perdite dielettriche, in alcuni casi aumentate di un fattore 10.

Tuttavia, osservando i risultati della simulazione riportata in (Fig. 4-11), è innegabile la sua necessità per scopi di tenuta dielettrica.

Sono comunque in atto studi per comprendere l'effetto della potenza in esso dissipata nel lungo periodo, anche se al momento non sono state rilevate particolari criticità.

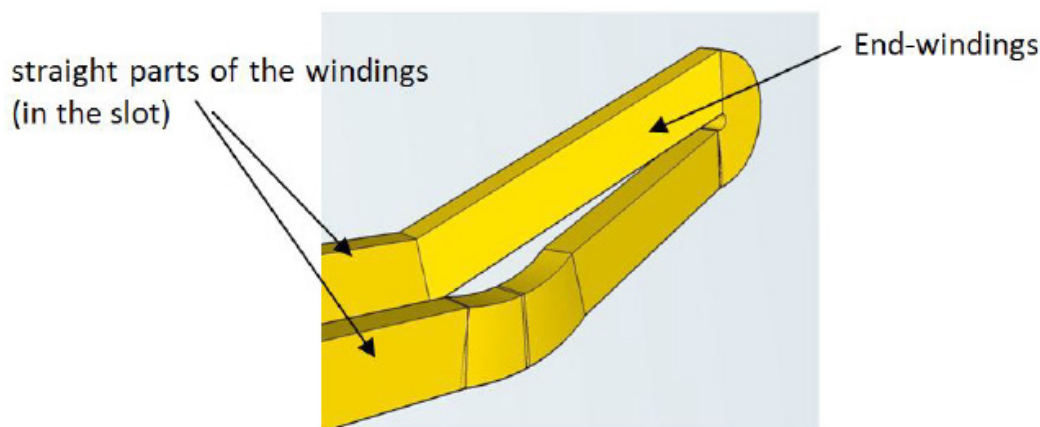


Fig. 4-10 Tipica forma assunta da una matassa in corrispondenza delle testate  
(fonte: [15])

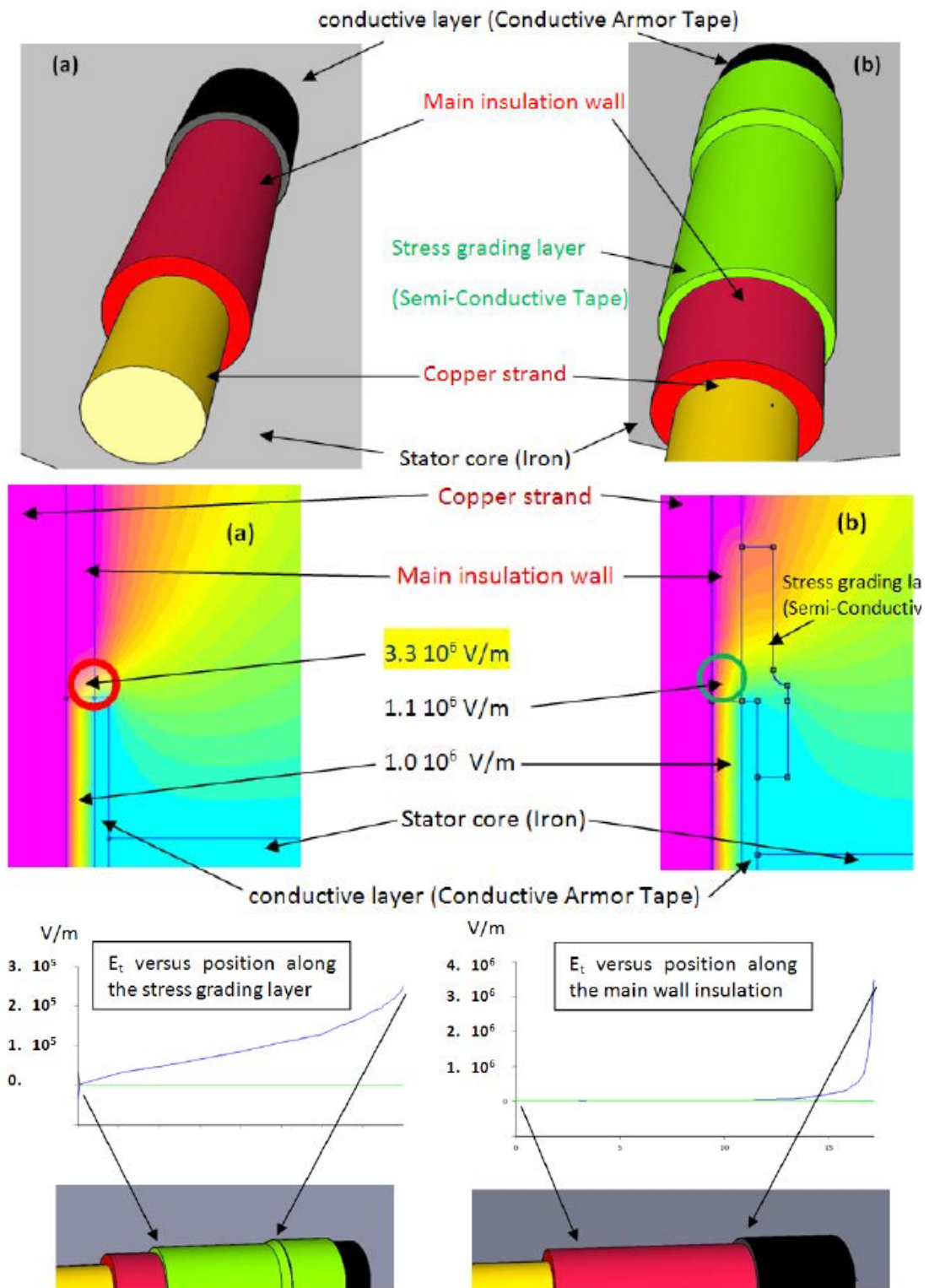


Fig. 4-11 Simulazioni riguardanti il semiconduttore di graduazione del campo elettrico  
(fonte: [15])

## 4.4 Resistenza di isolamento e indice di polarizzazione

La misura della resistenza di isolamento consiste nell'applicare una tensione continua di prova con valore noto (ed inferiore al valore di prova dielettrica) ai capi dell'isolamento principale della macchina, valutando la corrente assorbita e quindi stimando il valore della resistenza.

Dato l'elevato ordine di grandezza del valore atteso, lo strumento impiegato è il Megohmetro, noto talvolta anche con il nome commerciale di megger.

Esso integra il circuito di alimentazione, in grado di erogare fino a 500 V per provare macchine di bassa tensione, o, per tensioni superiori, fino a 10 kV, come stabilito dalla normativa IEC 60034-27-4 (Fig. 4-12).

Nonostante i valori di tensione possano sembrare non trascurabili ai fini dello stress dielettrico prodotto, si tratta di una prova non distruttiva, in quanto lo strumento di misura ha una resistenza di uscita del circuito di alimentazione interno molto elevata, in modo da limitare la corrente a pochi mA, facendo crollare la tensione applicata ben prima di una scarica.

Inoltre l'isolamento deve aver già superato una prova a tensione applicata con valore  $2 U_n + 1$ , che dovrebbe fornire garanzia circa le capacità di tenuta dielettrica.

Lo strumento di misura integra un morsetto di guardia, utile per drenare correnti disperse dalla conduzione superficiale dei materiali o dall'umidità atmosferica. Questo morsetto permette alla corrente di richiudersi con il circuito interno di alimentazione, senza interessare la strumentazione di misura, quindi senza deteriorare il valore di resistenza letto.

Dopo aver applicato tensione all'isolamento di cui si vuole valutare la resistenza, osservando la corrente da esso assorbita nel tempo, se ne noterà una vistosa diminuzione del valore, a causa dei fenomeni capacitivi e di polarizzazione entro l'isolante. Per ricavare il vero valore di resistenza di isolamento, si dovrà aspettare che l'isolamento si sia "caricato", (Fig. 4-13).

La normativa definisce il valore di resistenza di isolamento assieme all'istante temporale di valutazione, rispetto quello di applicazione della tensione.

Il valore di resistenza indicato con  $R_{it}$  sarà relativo all'isolamento dopo un tempo  $t$  dall'inizio della prova.

Tra questi assumono un significato particolare i valori  $R_{11}$  ed  $R_{110}$ .

In corrispondenza del primo il contributo capacitivo della corrente assorbita si è ormai estinto, perciò esso ingloba i contributi resistivi e di polarizzazione (Fig. 4-14).

Al secondo, la corrente di polarizzazione ha ormai raggiunto un valore pressoché

Rated voltage V	DC voltage magnitude V
< 1 000	500
1 000 to 2 500	500 to 1 000
2 501 to 5 000	1 000 to 2 500
5 001 to 12 000	2 500 to 5 000
> 12 000	5 000 to 10 000

Fig. 4-12 Valore di tensione DC da utilizzare durante la misura di resistenza di isolamento  
(fonte: [65] )



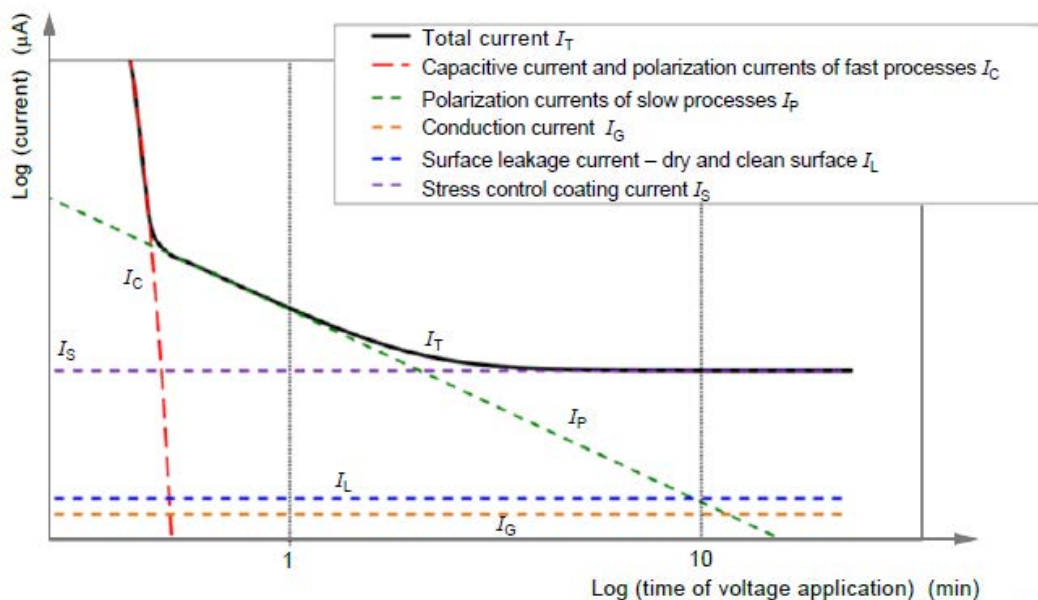
uguale ai contributi di conduzione, di dispersione superficiale e di conduzione (Fig. 4-13).

Il valore  $R_{11}$  è significativo per valutare le condizioni dell'isolamento in termini di umidità, sporcizia depositata o crepe. Valore minimo di tale parametro a 40°C è 100 MΩ. Un aumento della temperatura provoca un aumento delle cariche libere, quindi una diminuzione di resistenza, comunque la normativa fornisce dei coefficienti per effettuare una correzione della temperatura, così come dell'umidità, che influenza la corrente di dispersione superficiale.

Il valore limite minimo sopra indicato è valido per la maggior parte delle macchine, con alcune eccezioni nel caso di design o materiali utilizzati non standard.

I meccanismi di polarizzazione interna in un dielettrico sano, possono impiegare fino a qualche ora di tempo prima di estinguersi completamente.

Le sole misure eseguite dopo un minuto o dieci, certamente non possono aver ancora raggiunto il valore finale di resistenza.



IEC

Fig. 4-13 Andamento nel tempo dei singoli contributi alla corrente di isolamento  
(fonte: [65] )

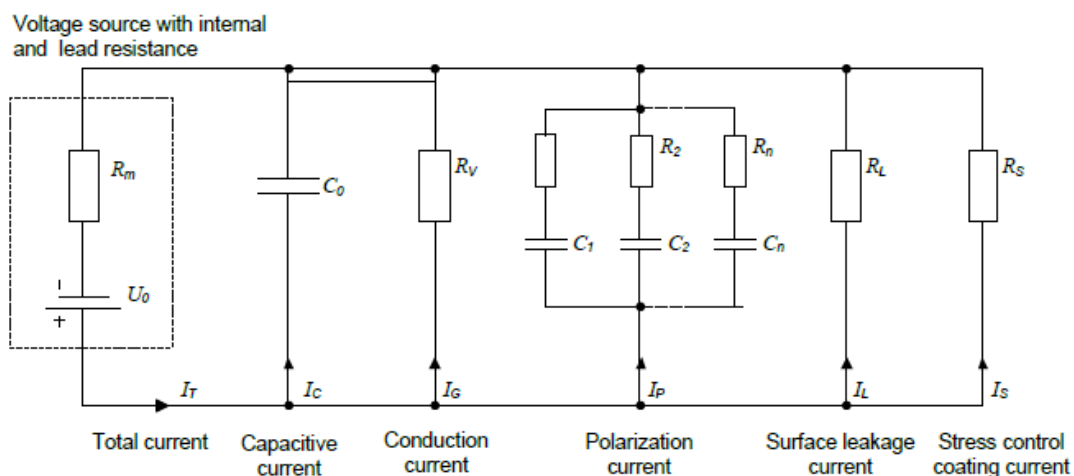


Fig. 4-14 Circuito equivalente rispetto all'isolamento della macchina sottoposta a prova  
(fonte: [65] )

A questo cerca di rimediare l'indice di polarizzazione dell'isolante.

Il secondo valore di resistenza misurato dopo 10 minuti viene rapportato al primo misurato ed il valore così ottenuto costituisce l'indice.

In un isolamento sano, le correnti disperse e di conduzione sono di piccola entità, e nel breve termine, la corrente di polarizzazione risulta preponderante.

Essa si estingue con legge esponenziale con resistenza  $R_j$  e costante di tempo  $\tau_j$  diverse

$$i_p(t) = \Delta U_0 \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j} e^{-\frac{t}{\tau_j}} \quad \text{eq. 4.2}$$

per ciascuno dei fenomeni elementari agenti.

Tuttavia, i meccanismi di polarizzazione più veloci si estinguono in alcuni millisecondi, lasciando in atto nei tempi di misura delle resistenze di isolamento solo quelli lenti, prevalentemente la polarizzazione interfacciale, legata al movimento lento di ioni che si accumulano alle superfici di interfaccia interna ed in prossimità agli elettrodi.

$$i_p(t) = \beta \Delta U_0 C_0 t^{-n} \quad \text{eq. 4.3}$$

Una espressione empirica per la totale corrente di polarizzazione è:

Dove  $\beta$  ed  $n$  sono coefficienti legati alla natura e alle condizioni dell'isolante,  $C_0$  è la capacità geometrica.

In un dielettrico in buone condizioni, entro qualche minuto dall'applicazione della tensione, è preponderante la corrente per polarizzazione interna, la quale può essere graficata nel tempo su un piano log-log, come una retta discendente, per la quale la pendenza è rappresentata dal rapporto tra due valori distanziati di un certo  $\Delta$ .

Per questo motivo un dielettrico sano presenta un andamento della resistenza nel tempo di prova in continua crescita, dove il valore dell'indice di polarizzazione è certamente maggiore di 1 (Fig. 4-15).

Mentre nel caso di un dielettrico in cattive condizioni, l'elevato valore delle correnti di conduzione ohmica, porteranno il valore di resistenza misurato ad assestarsi a valori inferiori e molto prima nel tempo, portando il valore dell'indice di polarizzazione circa ad 1.

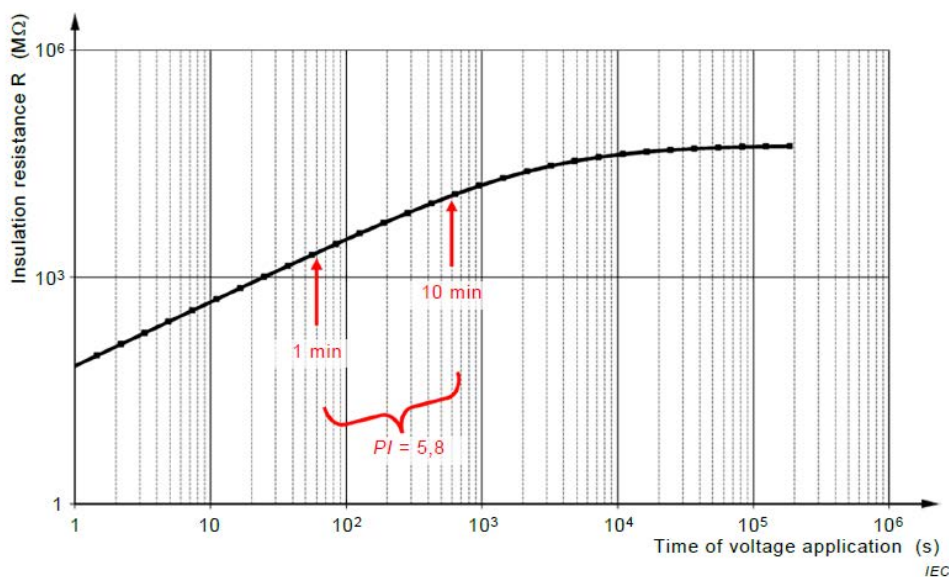


Fig. 4-15 Andamento del valore di resistenza di isolamento nel tempo per un isolante sano (fonte: [65] )



## 4.5 Fattore di perdita dielettrica

La misura del fattore di perdita dielettrica consiste nell'eseguire la prova in corrente alternata dell'intero avvolgimento della macchina rotante o di una singola matassa. La tensione applicata tra la parte attiva e terra è compresa fra zero e quella nominale della macchina  $U_N$ , secondo una serie di valori intermedi tra loro spazati di  $0,2 U_N$ . Così come stabilito dal fascicolo 27-3 della normativa IEC 60034.

Un dielettrico ideale, sottoposto ad una tensione alternata, verrebbe visto dal circuito di alimentazione come una capacità, assorbendo una corrente in anticipo di  $90^\circ$  rispetto alla tensione impressa.

I dielettrici reali presentano al loro interno anche fenomeni dissipativi di polarizzazione dielettrica e conducibilità del materiale, oltre ai fenomeni di scariche parziali, che s'instaurano se la tensione supera il valore di innesco.

Le perdite dielettriche sono quindi funzione della tensione applicata, come mostrato in (Fig. 4-16).

La corrente assorbita, potrà quindi essere in quadratura con la tensione, ma lievemente in ritardo rispetto a quella ideale.

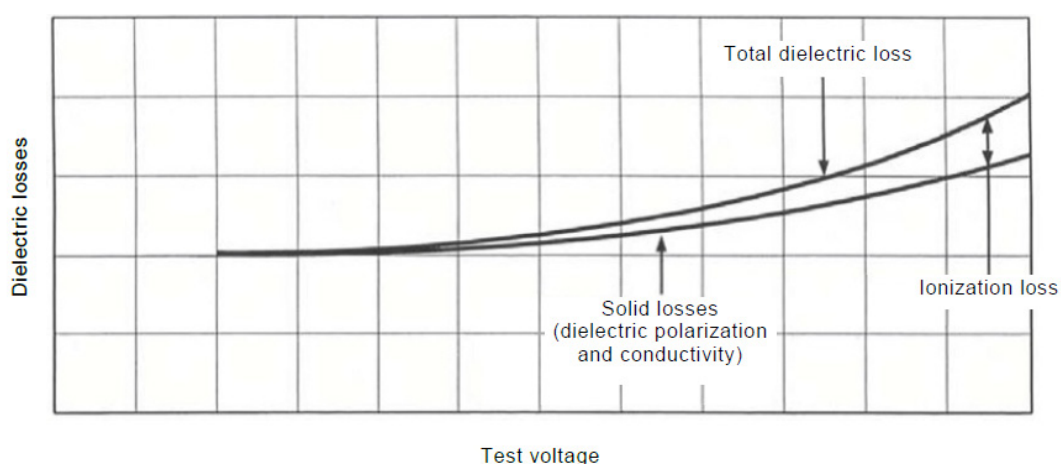


Fig. 4-16 Potenza dissipata nelle perdite dielettriche in funzione della tensione applicata (fonte: [661]) IEC

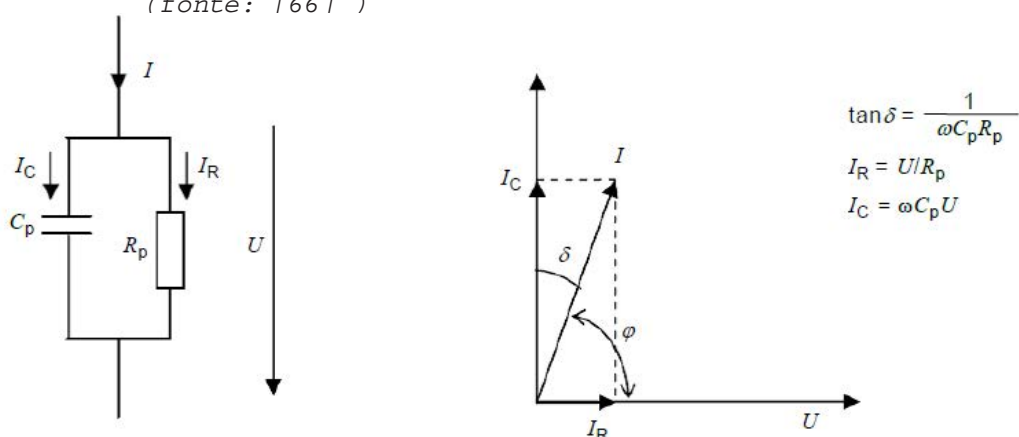


Fig. 4-17 Circuito equivalente modello di un dielettrico reale e diagramma vettoriale (fonte: [661]) IEC

Un modello semplice per considerare questo comportamento è quello di inserire una resistenza, di valore ohmico tale da farle dissipare l'equivalente delle perdite dielettriche alla tensione nominale, in parallelo alla capacità equivalente che da sola caratterizzerebbe l'isolamento ideale (Fig. 4-17).

L'angolo  $\delta$  riportato sul diagramma vettoriale è l'angolo di perdita, la cui tangente è il valore del fattore di perdita, il quale moltiplicato per la potenza reattiva assorbita dal dielettrico, fornisce la potenza in esso dissipata:

$$P_{diel} = Q_c \tan \delta = U^2 \omega C_P \tan \delta \quad \text{eq. 4.4}$$

La rappresentazione parallelo di (Fig. 4-17) non è l'unica possibile, per rappresentare gli isolamenti reali, a volte si utilizza anche un modello serie.

Il valore misurato del fattore di perdita può essere ritenuto significativo, solo se accompagnato dalla tensione e frequenza applicata, e dalle condizioni ambientali di misura.

Lo strumento tradizionalmente utilizzato per questo tipo di misura è il ponte di Schering (Fig. 4-18), si tratta di un metodo di zero, dove attraverso la regolazione dei parametri degli altri lati del ponte si cerca di far annullare la corrente entro il galvanometro. Quindi raggiunta questa condizione di equilibrio, noti i valori di tutti gli altri elementi del ponte, si può ricavare l'impedenza complessa dell'isolamento in prova. Secondo la relazione:

$$\frac{\dot{Z}_x}{\dot{Z}_1} = \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_2} \quad \text{eq. 4.5}$$

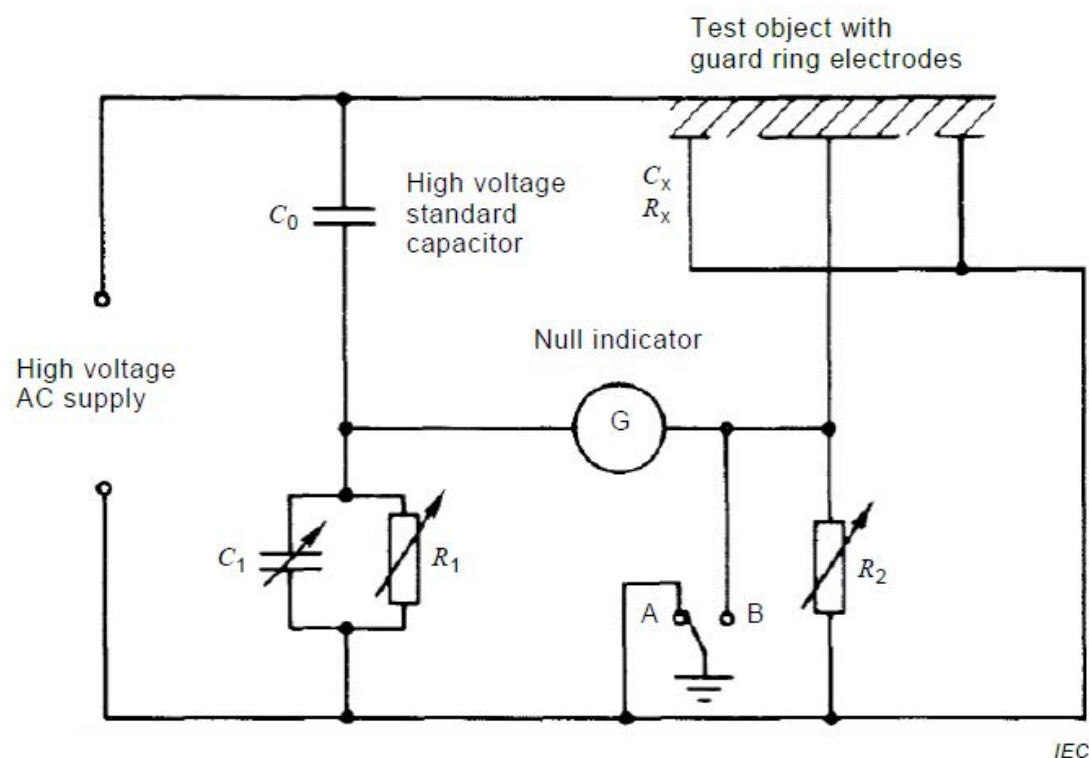


Fig. 4-18 Ponte di Schering per la misura del fattore di perdita dielettrica  
(fonte: [66] )

L'oggetto in prova è indicato nello schema con gli elementi  $C_x$  ed  $R_x$ , mentre la capacità sul lato attiguo,  $C_0$  è di valore fisso, e realizzata in modo da essere tanto più possibile priva di perdite dielettriche, solitamente si tratta di una capacità in gas compresso. Gli altri elementi presenti sono una cassetta a decade di resistori, per permettere una regolazione a step, più un reostato per permettere una variazione continua del valore ed una cassetta a decade di capacità eventualmente anch'essa corredata da una capacità variabile.

Il vero ponte di Schering prevedrebbe il collegamento del lato inferiore del ponte a terra, per esigenze di sicurezza dell'operatore e di controllo del potenziale di schermo. Specie quando si effettuano test in situ, la macchina è già vincolata a terra tramite la cassa e le parti meccaniche, quindi tramite il commutatore A-B è possibile isolarvi il ponte di misura.

In passato la regolazione fino all'equilibrio veniva eseguita a mano tramite azione sulle decadi, mentre oggi può essere eseguita da un microprocessore.

Un'evoluzione ancora più consistente è rappresentata dalla tecnica "digital phase shifting", il cui schema di principio è riportato in (Fig. 4-19).

In questa moderna tipologia di strumento, le cassette decadiche non sono più previste, i due terminali provenienti dall'oggetto in prova e dal condensatore campione, vengono portati a due diversi shunt di misura, che eseguono una conversione corrente-tensione.

Successivamente un convertitore analogico-digitale, provvede alla conversione del segnale in forma campionata.

La valutazione del ritardo temporale nello zero crossing tra la corrente nel ramo campione e nel ramo di prova, eseguita dal microprocessore, consente, nota la velocità angolare delle rete di alimentazione, di ricavare direttamente l'angolo  $\delta$ .

In alcuni casi, lo strumento stesso è anche fonte di alimentazione per il circuito di prova e sede della capacità campione  $C_0$ , riducendo di molto le dimensioni del circuito,

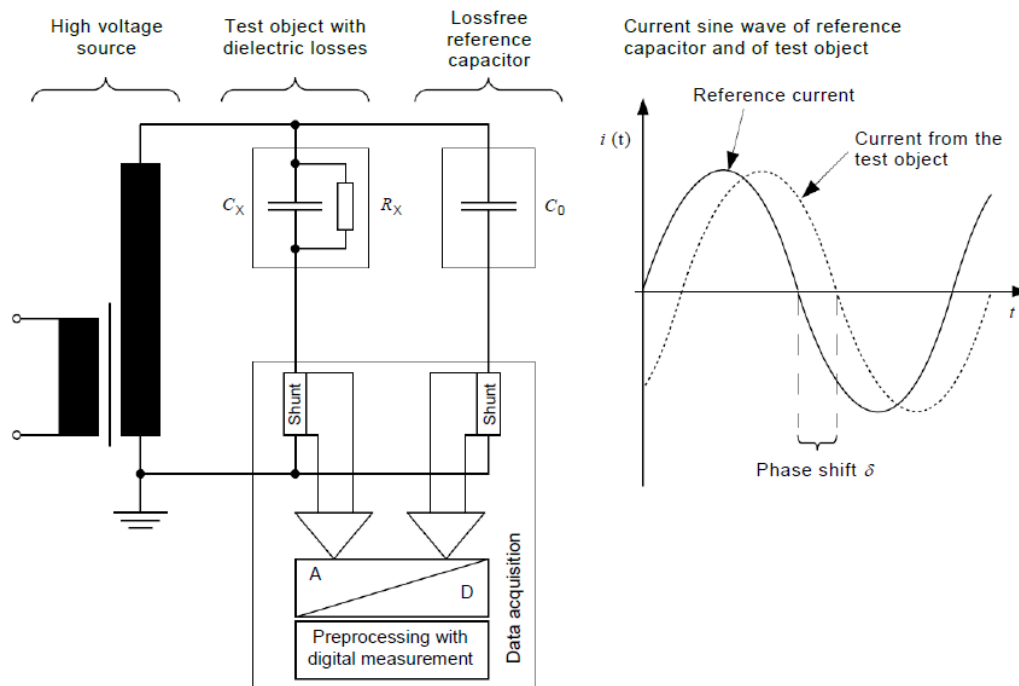


Fig. 4-19 Schema di un moderno Ponte per la misura del fattore di perdita dielettrica  
(Fonte: [66] )

generando internamente la corrente in quadratura.

In questi casi, la sorgente di alimentazione a bordo dello strumento è un convertitore statico, che consente ampia libertà in termini di tensione e frequenza da utilizzare per le prove.

L'alimentazione viene in ogni caso eseguita con tensione sinusoidale quanto più pura possibile, con valori compresi tra  $0,2 U_N$  ed  $U_N$ .

Normalmente in questo range si eseguono misure intermedie ogni  $0,2 U_N$ , portando a cinque valori del fattore di perdita distribuiti come in (Fig. 4-20).

I risultati forniti dalla prova sono:

- Il valore del fattore di perdita a bassa tensione ( $0,2 U_N$ ), fornisce un'indicazione dello stato di essiccazione dell'isolamento e il tipo di materiale utilizzato per la realizzazione dell'isolamento
- Se l'isolamento non è stato correttamente essiccato, il valore  $\delta_{0,2}$  sarà più elevato per via delle perdite dielettriche per polarizzazione.
- Il valore dell'incremento del fattore di perdita ( $\Delta \tan \delta$ ) fra due valori di tensione, fornisce un'indicazione circa la presenza di cavità entro il materiale, delaminazioni umidità, inquinamento o imperfezione nell'accoppiamento all'interfaccia con gli elettrodi.
- L'incremento del fattore di perdita dielettrica con la tensione è inevitabile anche per isolamenti ben impregnati con tecnica VPI, poiché essi includeranno piccole delaminazioni a causa dell'anisotropia del materiale. Qualora le delaminazioni siano più consistenti, la crescita del fattore di perdita con la tensione diviene molto più importante.
- Per test su macchine invecchiate, una ripida salita del fattore di perdita con la tensione può essere sintomo di notevoli delaminazioni, ovvero che l'isolamento è stato stressato termicamente in modo eccessivo attraverso i cicli termici di funzionamento e riposo della macchina.

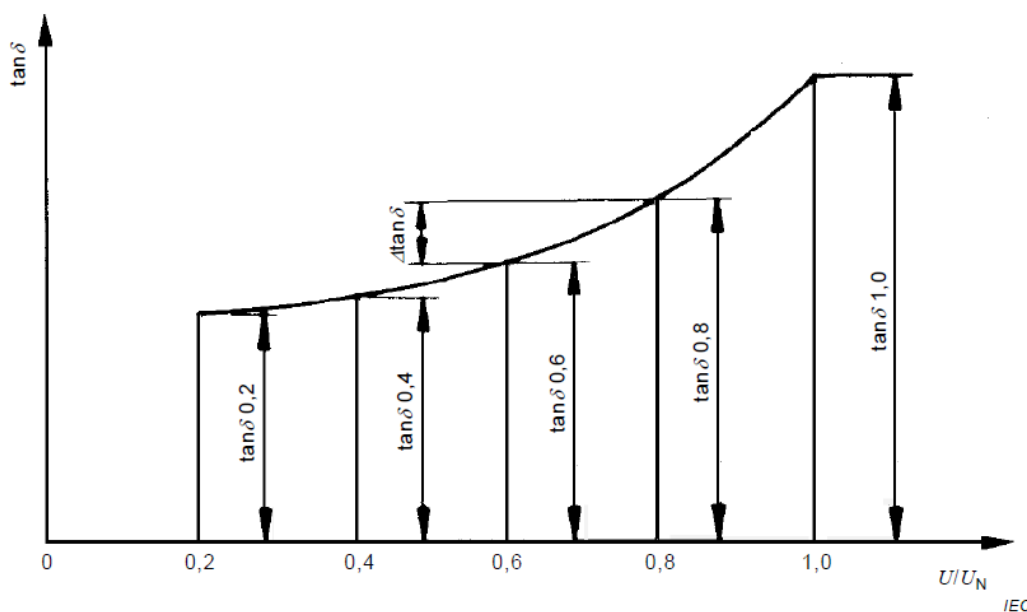


Fig. 4-20 Andamento tipico del fattore di perdita in funzione della tensione applicata  
(fonte: [66] )

# 5

## Scariche parziali nelle macchine rotanti

Per le macchine rotanti la valutazione delle scariche parziali tramite misure eseguite ai morsetti possono essere particolarmente critiche per una serie di aspetti, che concorrono fino a rendere in alcune situazioni la misura eseguita poco rappresentativa della situazione interna.

Un primo aspetto da tenere in considerazione è quello relativo alla bassa sensibilità che è possibile ottenere con una misura convenzionale eseguita tramite capacità di accoppiamento. La capacità interna alla macchina complessiva presente tra un avvolgimento e massa può per grandi macchine raggiungere diversi nF, rendendo secondo quanto espresso dalla eq. 3.9 difficile la rilevazione degli impulsi di scarica parziale, specie nel caso di ambienti rumorosi.

Allo stesso tempo, la propagazione dell'impulso all'interno dell'avvolgimento provoca una sua attenuazione e distorsione, valutabile conoscendone la risposta in frequenza. L'ampiezza dell'impulso rilevabile e la sua forma sono condizionate dalla posizione entro l'avvolgimento a cui si verificano le scariche parziali. L'ampiezza sarà massima e lo spettro molto ampio per una scarica che metta in gioco un certo valore di carica  $q$  nei pressi dei terminali di prova, mentre si vedrà un segnale fortemente attenuato e modificato nello spettro per attività di scarica di pari valore di carica  $q$ , ma posta vicino all'altro estremo.

I fenomeni di propagazione dell'onda divengono importanti non solo all'interno del singolo avvolgimento, ma anche fra essi, alimentando tutti gli avvolgimenti posti sullo statore ed eseguendo su uno di essi una misura di scariche parziali, è possibile rilevarne l'attività anche nel caso in cui queste interessino solamente un avvolgimento limitrofo.

La carica apparente misurata con strumentazione di tipo convenzionale potrebbe non essere proporzionale alla carica effettivamente spostata dalla corrispondente scarica, e, per questo, non più un indice affidabile del danno prodotto internamente.

Dovrà quindi essere sviluppata strumentazione pensata specificatamente per questo tipo di prova, oltre ad algoritmi e metodi di esecuzione che permettano di eseguire misure più rappresentative di quel che avviene all'interno della macchina.

A questo proposito la normativa IEC 60034-27 tratta approfonditamente il tema, dedicando il fascicolo 1 alle misure offline ed il fascicolo 2 a quelle eseguite online.

Nonostante i problemi evidenziati, le misure di scariche parziali possono comunque essere un utile strumento diagnostico, a patto di valutarne in modo critico i risultati e confrontandoli con quanto rilevato dagli altri tipi di misurazione a cui è possibile sottoporre la macchina.

## 5.1 Propagazione degli impulsi entro l'avvolgimento

Per poter dare una corretta interpretazione ai risultati letti sulla strumentazione di misura di scariche parziali nelle macchine rotanti è necessario conoscere come gli impulsi si trasmettono dal luogo di origine al punto di accoppiamento.

Il modello utilizzato per definire la carica apparente in 3.2, non può essere ritenuto valido per quegli oggetti la cui struttura complessiva non è quella assimilabile ad una capacità a parametri concentrati.

Gli avvolgimenti delle macchine rotanti si discostano molto da questo schema circuitale equivalente, per via dei numerosi accoppiamenti capacitivi ed induttivi tra le varie spire del singolo avvolgimento.

In (Fig. 5-1) è rappresentata la struttura di una singola matassa costituente l'avvolgimento statorico di una macchina. Attraverso le linee tratteggiate sono distinte le due diverse zone di questa, la regione 1 è inserita all'interno delle cave statoriche, quindi immersa nel ferro del circuito magnetico, la regione 2 è quella che compete alle testate poste in aria.

Dal punto della propagazione di onde elettromagnetiche, le due zone hanno comportamento molto diverso.

Nelle testate si ha solamente un accoppiamento dovuto alla capacità e alla conduttanza dell'isolamento tra spire.

Mentre le zone immerse nel ferro sono responsabili anche dell'accoppiamento induttivo del flusso prodotto dal conduttore di ciascuna spira con se stesso e le altre contenute nella stessa matassa.

Alla regione inserita nel materiale magnetico, competono anche le grandezze trasversali del modello che collegano il conduttore a massa attraverso la capacità e la conduttanza dell'isolamento principale.

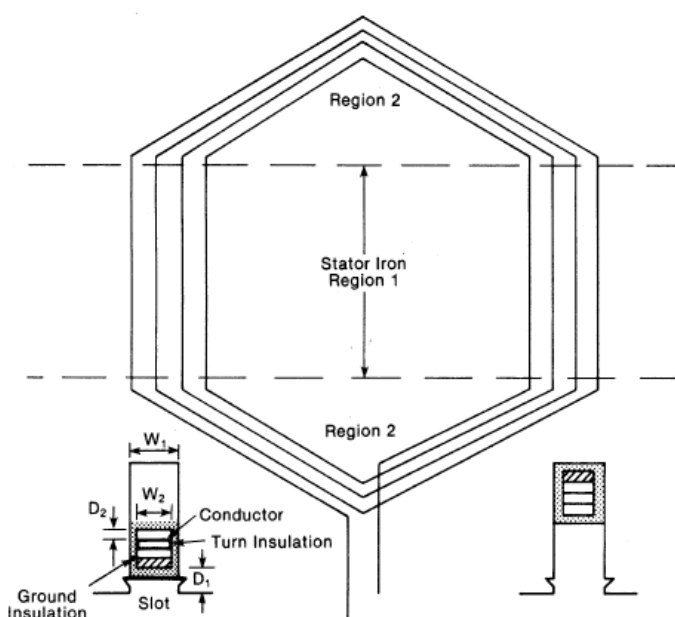


Fig. 5-1 Struttura di una matassa sagomata inserita entro cave statoriche  
(fonte: [54])

In (Fig. 5-2) è schematizzato il circuito equivalente per un avvolgimento costituito da matasse preformate ipotizzando la presenza di 4 spire per matassa.

I parametri più complessi da valutare nel modello presentato sono quelli di natura induttiva, poiché, per effettuare una valutazione rigorosa, si dovrebbe considerare la reazione del rotore al transito dell'impulso nell'avvolgimento e del circuito magnetico statorico stesso. Vengono quindi poste alcune ipotesi semplificative:

- Data l'alta frequenza delle componenti spettrali dell'impulso in transito, si considerano superficiali le linee di corrente ad esso dovuto, quindi il flusso da esse prodotto non penetra entro i conduttori.
- Il rotore si oppone al flusso generato dall'impulso in transito, che per questo non lo concatena.
- Il flusso non concatena l'altro lato della matassa immersa nella stessa cava statorica.
- I flussi dispersi entrano liberamente entro ai lati della cava.
- Alle testate l'accoppiamento induttivo tra spire è trascurabile.

Ipotesi semplificative vengono applicate anche al calcolo delle capacità:

- Il circuito magnetico è posto a potenziale nullo
- Le matasse non interessate nella propagazione dell'onda sono a potenziale zero
- Le capacità tra spire sono presenti sono tra spire adiacenti

Vi sono due forme di propagazione entro l'avvolgimento: una veloce ed una lenta.

La propagazione veloce è legata al transito dell'impulso attraverso gli accoppiamenti induttivi e capacitivi tra spire prevalentemente nelle testate.

La propagazione lenta invece, vede l'intero avvolgimento della macchina agire come una linea di trasmissione per tutta la sua lunghezza, provocando attraverso una serie di riflessioni una significativa deformazione dell'impulso originale.

In particolar modo, questo secondo fenomeno, lascia propagarsi senza significativa attenuazione solamente le componenti a più bassa frequenza, secondo una frequenza di taglio rilevabile nella risposta in frequenza della macchina.

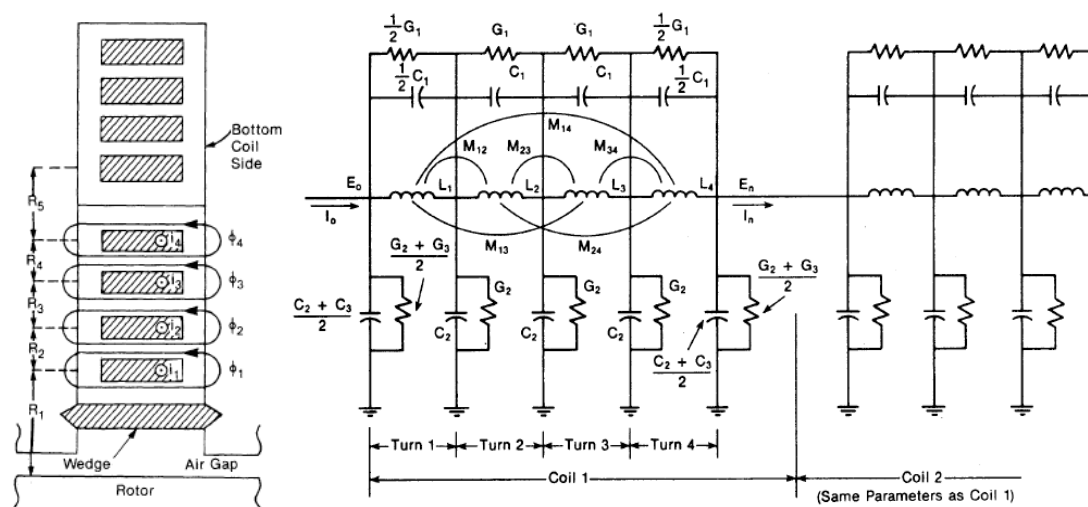


Fig. 5-2 Circuito equivalente di un avvolgimento statorico costituito da più matasse  
(Fonte: [54])



La pubblicazione [9] indaga approfonditamente questo aspetto, grazie anche alle prove sperimentali eseguite su uno statore di un generatore sincrono da 35MVA fuori esercizio.

Sono state create una serie di prese sull'avvolgimento della macchina, che hanno permesso loro di iniettare un impulso di calibrazione su una porzione sempre più lunga di avvolgimento, valutando contemporaneamente il segnale ai morsetti.

Le forme d'onda rilevate sono riportate in (Fig. 5-3), quando il segnale iniettato era un impulso di ampiezza 1 V, durata 50 ns e tempo di salita <1 ns.

In essa la presenza di due diverse forme di propagazione è evidente, e ben distinguibili, specie sulle ultime prese, la componente ad alta frequenza con ritardo trascurabile rispetto alla porzione più bassa dello spettro.

Secondo gli autori dell'articolo, nella situazione da essi analizzata, la frequenza che segna la transizione tra l'uno e l'altro è posta a 450 kHz.

Entrambe le componenti vengono attenuate lungo la trasmissione tra le diverse spire dell'avvolgimento, in particolare quella veloce, già dopo aver transitato entro poche spire, presenta un'ampiezza pari a pochi % di quello originale.

A causa delle capacità trasversali poste tra le spire e il nucleo magnetico, e della corrente da loro drenata.

Mentre la componente lenta dell'impulso, pur venendo anch'essa degradata, perde meno rapidamente energia.

Valori indicativi per la velocità di propagazione riportati nell'articolo sono: 81.6 m/μs per la propagazione veloce, cioè il 27% della velocità della luce, mentre per la componente lenta 9.1 m/μs, circa il 3%.

L'effetto di attenuazione nella maggior parte dei casi non risulta particolarmente critico.

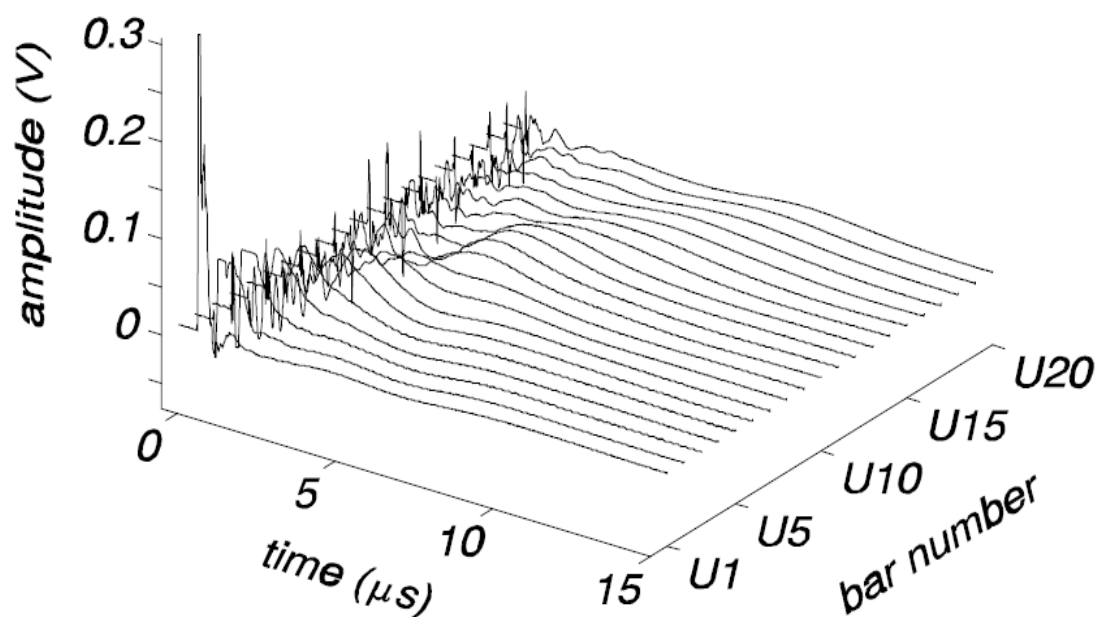


Fig. 5-3 Impulso rilevato al terminale di alta tensione iniettando il segnale sulle prese  
( fonte: [9] )



A questo proposito l'articolo esamina anche il problema della veridicità della calibrazione effettuata ai morsetti per la rilevazione di impulsi di scarica parziale, verificando se vi è corrispondenza tra la carica apparente iniettata in diversi punti dell'avvolgimento e quella riscontrabile dalla strumentazione di misura.

In (Fig. 5-4) (a) è rappresentata la quantità di carica rilevata a seguito del processo di integrazione considerando l'intero impulso rilevato (componente lenta e veloce), mentre nel diagramma (b) viene considerata la sola componente veloce.

La seconda figura mostra una rapida diminuzione del valore rilevato, a riprova di come lo spettro dell'impulso venga fortemente attenuato sulle componenti ad elevata frequenza, mentre il diagramma (a) relativo all'intero segnale non mostra importanti variazioni nel valore misurato.

Si denota quindi l'importanza dell'utilizzo di sistemi a larga o larghissima banda per catturare tutta l'energia spettrale dell'impulso.

Gli strumenti di uso comune, non rispecchiano quest'esigenza, anche gli strumenti a larga banda, così come definiti dalla IEC60270 eq. 3.22 non considerano lo spettro del segnale per le componenti a frequenza inferiore a 30 kHz, per evitare l'influenza della tensione di rete e sue armoniche, oltre ai disturbi che possono essere condotti. Nell'attività di diagnostica in situ, la soppressione del rumore è ancora più importante, al punto che spesso vengono utilizzati rilevatori a banda stretta, che dopo una regolazione della frequenza di centro banda a valori ottimali, ne possono risultare particolarmente insensibili.

Sono ormai disponibili sul mercato strumenti a larghissima banda, che eseguono l'acquisizione del segnale e sua integrazione su una banda molto estesa, dalla decina di kHz, fino ed oltre 50 MHz, affidando la soppressione del rumore ad elaborazioni di tipo digitale.

Con questi accorgimenti si può considerare comunque attendibile il valore della carica apparente misurato.

Proprio a causa di questo dubbio sull'attendibilità o meno della calibrazione, le normative americane eseguono la valutazione basandosi sull'ampiezza in mV gli impulsi di scarica parziale, rendendo difficile la riproducibilità della misura, giacché in questo modo non si hanno riferimenti per poter effettuare misure eseguite da due diversi sistemi di acquisizione.

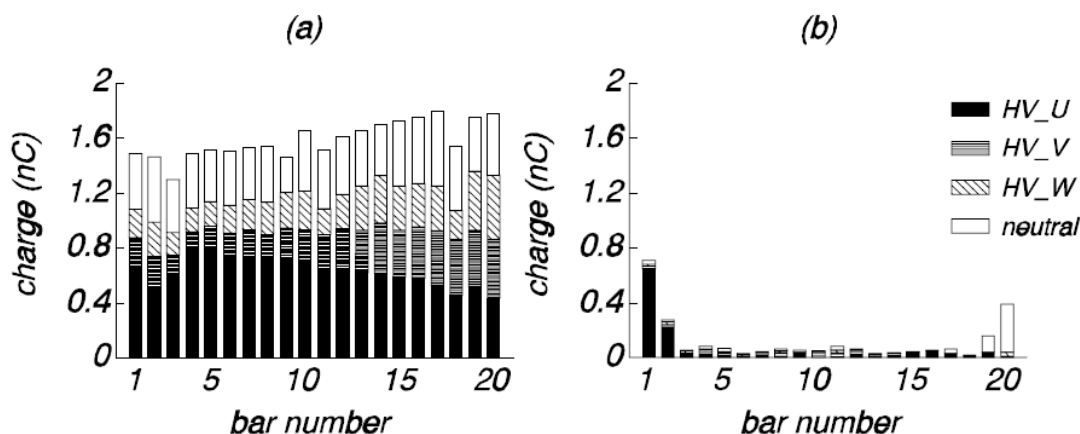


Fig. 5-4 Carica apparente rilevata dalle diverse prese a)segnale completo b)componente veloce  
(Fonte: [9] )

## 5.2 Propagazione dell'impulso agli avvolgimenti vicini

Il modo di propagazione veloce, giacché agisce per mezzo degli accoppiamenti capacitivi ed induttivi alle testate, non riguarda solo le barre di statore appartenenti alla stessa fase dell'avvolgimento.

Questo fenomeno è detto crosstalk, il nome deriva dal fatto che è stato osservato ed ampiamente studiato nelle linee di telefoniche, dove appunto causa una propagazione del segnale audio su circuiti adiacenti al canale di comunicazione.

Nell'oscillogramma di (Fig. 5-5) si può osservare la propagazione sugli altri due avvolgimenti della macchina, quando l'impulso di calibrazione viene iniettato nel mezzo dell'avvolgimento della fase U.

Si può notare come le ampiezze dei segnali rilevati siano assolutamente confrontabili, nonostante una sola fase della macchina sia in realtà interessata dal fenomeno di scarica parziale.

L'entità del disturbo dipende dal luogo in cui si origina o si inietta il segnale di impulso. Un indice per valutare l'entità del fenomeno è il rapporto tra il valore di picco del segnale originato, rispetto quello iniettato.

Lo studio effettuato in [9] ha cercato di caratterizzare questo problema, nella macchina da essi analizzata si è visto che, fintanto che l'impulso è applicato nel primo 20% dell'avvolgimento, vicino cioè ai morsetti di misura, tra le varie fasi è ancora distinguibile quella dove l'impulso ha avuto luogo.

Man mano che questo trae origine ad una profondità maggiore, si può arrivare alla situazione in cui le fasi sane presentino valori di picco fino al doppio del valore rilevabile ai terminali dell'avvolgimento che ne è effettivamente interessato.

Come visibile dal grafico in (Fig. 5-6), dove in ascissa è posto il numero della cava utilizzata per l'immissione del segnale, a partire dal punto di misura.

Questo effetto, se non debitamente considerato, può portare ad una completamente errata localizzazione del danneggiamento entro la macchina, una volta rilevata in essa un insolita attività di scariche parziali.

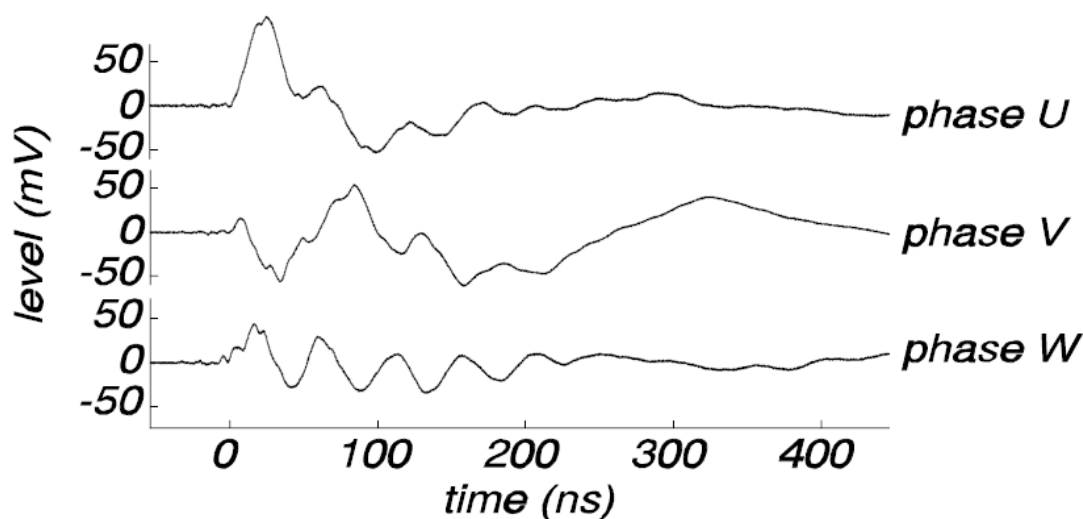


Fig. 5-5 Cross-talking nella propagazione di un impulso di scarica parziale sulle fasi vicine  
( fonte: [9] )

Tuttavia, esso si manifesta principalmente se il danno si trova in profondità, mentre la maggior probabilità di guasto si ha in prossimità dei terminali di alimentazione, dove la tensione verso terra e tra le fasi è più alta.

A riprova del fatto che la propagazione veloce dell'onda entro lo stesso avvolgimento e in quelli adiacenti, abbia luogo solamente nelle testate, gli stessi ricercatori hanno rimosso completamente le barre dalla zona delle testate, sostituendole con sottilissimi fili di rame.

Vedendo in questo modo la presenza del solo modo di propagazione lento, rispetto al quale l'avvolgimento si comporta come una linea di trasmissione con impedenza caratteristica  $Z_0$ :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{eq. 5.1}$$

Nel caso della macchina da 35 MW dell'articolo, considerando i valori di L dovuti alle sole testate dell'avvolgimento e di C relative alla capacità tra conduttori e nucleo magnetico, si ottiene il valore di impedenza caratteristica di 56  $\Omega$ , ed una velocità di propagazione di 7.52 m/ $\mu$ s, valore simile alla velocità dedotta per la propagazione lenta.

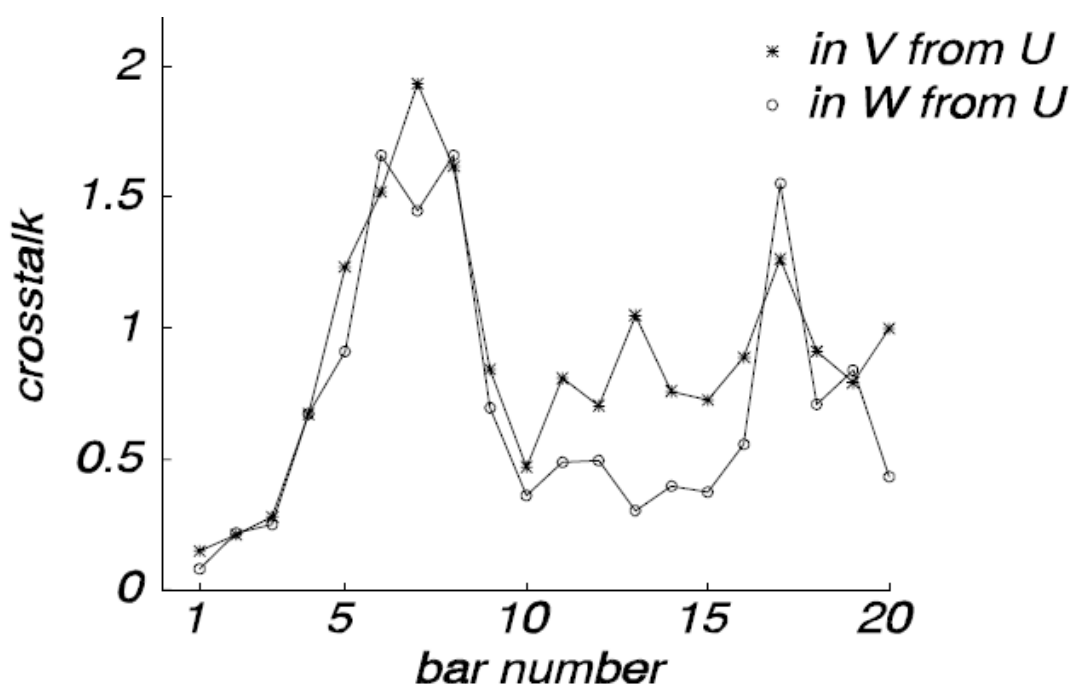


Fig. 5-6 Cross-talking in funzione del punto di iniezione all'interno dell'avvolgimento (fonte: [9] )

Quando si genera un impulso tra un conduttore dell'avvolgimento e terra, e l'avvolgimento si comporta come una linea di trasmissione, ci si potrebbe chiedere quale sia il secondo conduttore per permettere la richiusura della corrente ad esso associata. La risposta a questa domanda è che il secondo conduttore della linea è il circuito magnetico statorico, vincolato a terra.

Questo contrasta con la nozione secondo cui il nucleo magnetico è laminato per evitare la circolazione di correnti parassite ed ulteriormente interrotto galvanicamente dalla presenza di canali di raffreddamento (Fig. 5-7).

Visto che le correnti messe in gioco dai fenomeni di scarica parziale sono impulsive, esse non troverebbero grande ostacolo nella laminazione del pacco statorico, ma riuscirebbero ad attraversarlo tramite le capacità presenti tra un lamierino e l'altro, sotto forma di corrente di spostamento.

In realtà, i circuiti magnetici, seppur laminati, presentano comunque dei percorsi con continuità elettrica, generalmente sul lato esterno del pacco, dove le correnti indotte a frequenza industriale non li interessano.

Essi vengono previsti per vincolare al potenziale di terra tutti i singoli lamierini, ed in particolare in caso di un guasto fase terra, fornire una via di richiusura a bassa impedenza alla corrente di guasto, in modo da far intervenire le protezioni.

Rispetto quanto visto in queste pagine, la realizzazione dell'avvolgimento impiegando più strati per ogni cava renderebbe non più vera l'assunzione che la propagazione tra fasi diverse avvenga solo nelle testate dell'avvolgimento.

Questo per dire che, la descrizione fornita del processo di trasferimento dell'impulso di scarica parziale dal luogo di origine ai morsetti è tutt'altro che semplice, in particolar modo non è possibile fornire un modello di calcolo per conoscere come si presenterà all'uscita un impulso applicato su una certa porzione dell'avvolgimento, senza prima aver effettuato uno studio approfondito della macchina per ricavarne i vari parametri.

La propagazione su fasi adiacenti invece, mette in luce un'altra necessità, quella di eseguire contemporaneamente l'analisi su tutte e tre le fasi statoriche della macchina, in modo da poter discriminare tramite appositi algoritmi, quale sia effettivamente interessata da scariche parziali.

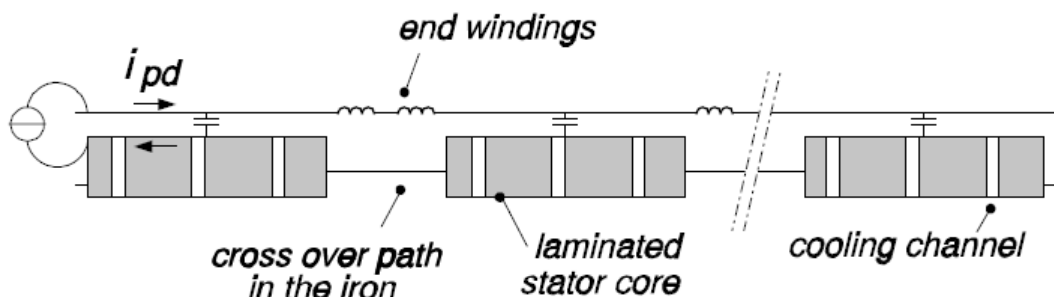


Fig. 5-7 Avvolgimento come linea di trasmissione, percorso dell'impulso di corrente  
(fonte: [9] )

## 5.3 La normativa IEC 60034-27

La normativa IEC 60034-27 nasce, come riporta la prefazione, per rispondere al bisogno urgente di standardizzare i metodi di misura, le apparecchiature ed l'analisi dei risultati nelle misure di scariche parziali su macchine rotanti.

Questo tipo di misura era già ampiamente diffuso ed accettato prima della diffusione della normativa, che ha fornito delle linee guida ufficiali per rendere più agevole l'esecuzione delle prove e più significativa la comparazione dei risultati.

In questo fascicolo della normativa si parla solamente di metodi di misura offline applicati a singole matasse o interi avvolgimenti di macchine rotanti.

Viene ribadita la non trasferibilità delle misure fra diverse tipologie di strumentazione, prevalentemente a causa della deformazione degli impulsi nella propagazione.

Il rischio di guasto alla macchina dipende dal luogo in cui si originano le scariche parziali, quindi non è possibile definire a priori un limite al valore di carica apparente.

Sarà più utile un confronto con valori empirici determinati sulla base della struttura e dei materiali isolanti utilizzati, oltre ad un confronto delle misure con macchine con stessa struttura elettromeccanica e del sistema isolante, nelle stesse condizioni ambientali.

In ogni caso, la stessa norma, precisa che non tutti i problemi all'isolamento sono diagnosticabili a mezzo di misure di scariche parziali (ad esempio nel caso in cui questi provochino una dispersione di corrente continuativa, dovuta a percorsi conduttivi tra diverse parti dell'isolamento).

Nel caso in cui il test venga eseguito su singole parti di avvolgimento (es. matasse) non occorre considerare gli effetti della propagazione dell'impulso.

### 5.3.1 Definizioni generali

- *Misura off-line*: Misura eseguita con la macchina in fase di arresto e scollegata dal sistema di alimentazione.
- *Misura on-line*: Misura eseguita con la macchina rotante in condizioni di normale esercizio.
- *Rivestimento per il controllo del campo*: Vernice o nastro sulla superficie esterna dell'isolante che si estende oltre la porzione di *rivestimento conduttivo* sulle barre e matasse di statori in alta tensione.
- *Rivestimento conduttivo di cava*: Strato di vernice conduttiva o nastro in intimo contatto con la parete esterna dell'isolante nella parte inserita entro le cave delle matasse, spesso chiamato rivestimento semiconduttivo.
- *Scariche entro cava*: scariche che avvengono tra la superficie esterna di matasse inserite entro cava e i lamierini del nucleo messi a terra.
- *Scariche interne*: Scariche che avvengono all'interno del sistema isolante
- *Scariche superficiali*: scariche che avvengono sulla superficie dell'isolante o sulla superficie di altre componenti dell'avvolgimento nelle testate o nella parte attiva.

- *Distribuzione in ampiezza degli impulsi*: Il numero di impulsi entro una serie di finestre equi spaziate in termini di ampiezza durante un periodo predefinito di misura.
- *Distribuzione in fase degli impulsi*: Il numero di impulsi entro una serie di finestre equi spaziate in termini di fase di apparizione durante un periodo predefinito di misura.
- *Pattern di scariche parziali*: Mappa di distribuzione delle scariche parziali in termini di intensità rispetto la fase istantanea del ciclo di rete, per la visualizzazione del comportamento delle scariche parziali durante un periodo di misura predefinito, dove specifici parametri delle scariche parziali sono utilizzati per la rappresentazione grafica.
- *Dispositivo di accoppiamento*: normalmente una rete a quattro terminali attiva o passiva che converte il segnale in corrente in uno in tensione.
- *Unità di accoppiamento delle scariche parziali*: un condensatore di alta tensione progettato per presentare bassa induttanza e posto in serie al *dispositivo di accoppiamento* di bassa tensione.
- *Ampiezza della più grande scarica parziale ripetitiva*: ripresa dalla IEC 60270.

### 5.3.2 Natura delle scariche parziali nelle macchine

In questa sezione vengono presentati alcuni concetti basilari sulle scariche parziali e sulla loro formazione, similmente a quanto fatto nel capitolo 2, tuttavia sono interessanti alcune considerazioni relative agli effetti del fenomeno nelle macchine.

Viene detto come, le scariche parziali possano presentarsi in luoghi dove le proprietà dielettriche dei materiali isolanti sono disomogenee quindi dove il campo elettrico può essere localmente intensificato, spesso all'interno di volumi di gas.

La quantità di carica trasferita nella scarica è strettamente correlata a specifiche caratteristiche della disomogeneità, tra cui la dimensione, la tensione di scarica e caratteristiche dei materiali coinvolti, come le loro proprietà superficiali, il tipo di gas e la pressione.

Gli avvolgimenti di statore delle macchine ad elevata tensione normalmente presentano dell'attività di scariche parziali, ma sono intrinsecamente resistenti a questo grazie alla presenza di materiale inorganico come la mica.

In ogni caso, se il fenomeno presenta notevole intensità, solitamente questo è un sintomo di carenze nell'isolamento, come difetti realizzativi o deterioramento in servizio, senza però essere direttamente causa del cedimento.

Nonostante ciò, in base ai materiali ed ai fenomeni coinvolti, le scariche parziali possono affliggere l'isolamento e quindi influenzare i fenomeni di invecchiamento, anche se il tempo prima del guasto non è correlabile con l'intensità delle scariche rilevate, ma dipende prevalentemente da altri fattori, come la temperatura di lavoro, dalle condizioni di rugosità e dal grado di contaminazione.

La misura e l'analisi specifica del comportamento delle scariche parziali può essere efficacemente utilizzata per controllo qualità di nuovi avvolgimenti e componenti, o per precoce rilevazione di carenze nell'isolamento causate da fenomeni elettrici, termici, ambientali o meccanici, che possono portare ad un cedimento di questo.

Vengono poi presentate le cause più comuni di scariche parziali rilevabili nelle macchine rotanti:

- *Cavità gassose* nel caso di statori isolati da nastri di mica e successivamente impregnati in resina. In realtà, la presenza della mica, evita la formazione di una scarica completa, sicché, se le cavità non sono particolarmente estese, l'affidabilità non è ridotta.
- *Delaminazioni interne* causate da un imperfetto trattamento del sistema isolante durante la realizzazione, o eccessivi stress termici o meccanici nel funzionamento. La delaminazione riduce la conduttività termica dell'isolamento, accelerando i fenomeni di invecchiamento termici localmente. Tra le attività rilevabili attraverso le scariche parziali, questa sicuramente merita attenzione.
- *Delaminazioni tra conduttore ed isolamento* normalmente dovute a troppi intensi stress termici, è pericoloso perché può portare al danneggiamento dell'isolamento tra spire o del singolo conduttore nel caso di più conduttori in parallelo.
- *Scariche entro cava*, si verificano qualora lo strato semiconduttivo sia danneggiato a causa di movimenti del conduttore o della matassa all'interno della cava o all'uscita di questa. Se il danneggiamento meccanico è di notevole entità, anche le scariche che si svilupperanno presenteranno energia elevata, aggravando ulteriormente lo stato dell'isolamento. Questo tipo di scariche si possono sviluppare anche in punti dell'avvolgimento a basso potenziale, come ad esempio vicino al centro stella.
- *Scariche superficiali nelle testate*: possono avvenire in diversi luoghi, specialmente alle interfacce tra elementi diversi. Si tratta di un meccanismo di danneggiamento molto lento. Questo tipo di scariche può coinvolgere il sistema isolante fase-terra, o quello tra fasi adiacenti.
- *Particelle conduttive*, specialmente se piccole, per esempio dovute alla contaminazione dell'avvolgimento, possono portare a forti concentrazioni di scariche parziali. Che possono portare alla perforazione dell'isolamento.
- *Propagazione dell'impulso entro gli avvolgimenti*: In origine l'impulso di corrente può essere visto come un transitorio impulsivo il cui tempo di salita si attesta su pochi nanosecondi. Per questi segnali lo statore rappresenta un oggetto a costanti distribuite nel quale l'impulso si propaga come onda viaggiante attraverso complessi accoppiamenti induttivi e capacitivi e provocando fenomeni di risonanza. Ciò deve essere considerato. Per via dell'attenuazione, distorsione, riflessione ed accoppiamento delle onde viaggianti, l'ampiezza e la forma dell'impulso possono essere variate, rispetto al punto di origine. Si devono quindi tenere a mente i seguenti punti:
  - » La funzione di trasferimento delle scariche parziali dal luogo di origine al sensore di misura è ignota e dipende dal design della macchina, il quale determina la risposta in frequenza dell'avvolgimento di statore.
  - » Gli impulsi rilevabili ai morsetti sono funzione del tipo di macchina analizzata e della posizione in cui avvengono gli impulsi di scarica parziale.
  - » Le componenti a più elevata frequenza degli impulsi sono soggette a considerevole attenuazione, fino a poter non essere rilevabili ai morsetti di misura.

In conclusione i fenomeni sopra descritti non riguardano solo il tipo di avvolgimento statorico, ma anche la particolare risposta in frequenza del sistema di misura utilizzato, tra cui l'unità di accoppiamento, che influenzerà pesantemente il tipo di segnale rilevato.



### 5.3.3 Tecniche e strumenti di misura

In linea con quanto fatto dalla IEC60270, questa norma parla solamente dei metodi di misura elettrici, che rientrano tra quelli maggiormente utilizzati, pur dedicando l'appendice B ai metodi ai non elettrici.

Riguardo l'influenza della risposta in frequenza del sistema di misurazione viene detto che:

- La misura nel range a più bassa frequenza assicura buona sensibilità, non solo per scariche parziali in sbarre e matasse vicino al punto di misura, ma anche per quelle originate più lontano nell'avvolgimento.
- La misura nelle frequenze più elevate permette di acquisire solo una piccola porzione dell'energia della scarica parziale, tuttavia può essere meno suscettibile dal rumore e disturbi esterni.

Per ottenere un adeguata sensibilità lungo l'intero avvolgimento, viene raccomandato l'uso di un sistema di misura a larga banda. La cui frequenza di taglio inferiore deve essere non più di qualche decina di kHz in accordo con la IEC60270.

Sempre che la costruzione dell'avvolgimento non presenti fenomeni di risonanza in corrispondenza della banda utile dello strumento.

La serie costituita dal condensatore di accoppiamento e l'impedenza di misura, rappresenta un filtro passa alto, per questo valori maggiori di capacità consentono di aumentare la sensibilità del sistema.

La (Fig. 5-8) mostra lo spettro in frequenza di un impulso di scarica parziale ideale, confrontato con la risposta in frequenza di diversi sistemi di misura al variare del valore della capacità di accoppiamento.

Tanto maggiore è l'area dell'intersezione tra le due curve, tanto più grande è l'energia effettivamente catturata dell'impulso.

Il ragionamento può essere esteso nel caso in cui la rete di accoppiamento non sia un semplice resistore, ma una rete RLC, quindi con una risposta passa banda.

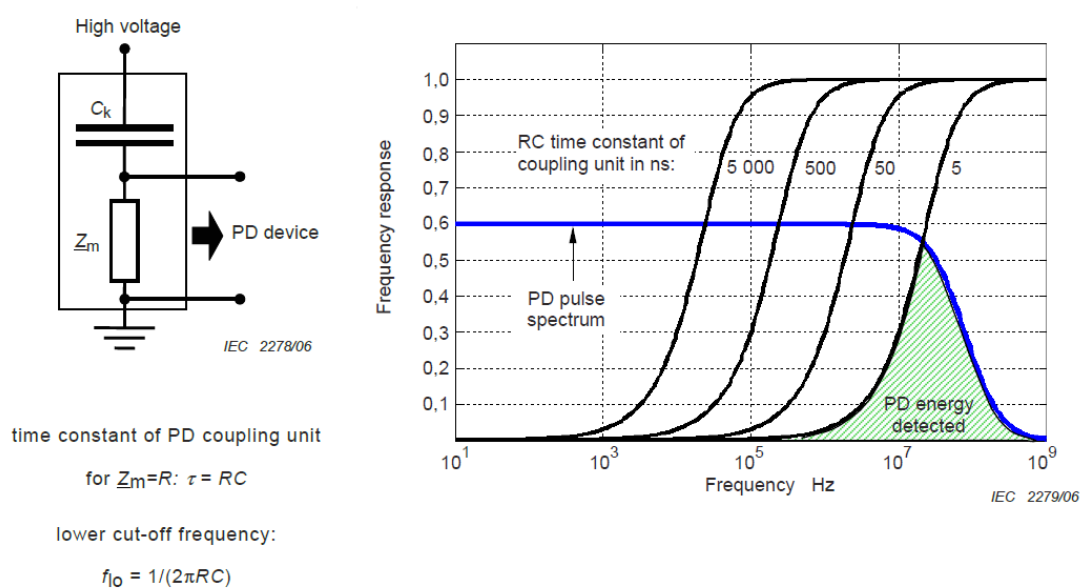


Fig. 5-8 Comportamento in frequenza della rete e della capacità di accoppiamento  
(fonte: [67])



Viene poi ripresa una classificazione dei sistemi di misura in base alla loro banda passante in: sistemi a banda larga e a banda stretta, in accordo a quanto già detto per la IEC 60270.

Viene evidenziato come nei sistemi isolanti con presenza di mica, la probabilità di impulsi molto vicini è elevata, al punto che diviene importante un tempo di risoluzione contenuto, per evitare la sovrapposizione degli impulsi.

Per questo motivo, i sistemi utilizzati per effettuare la misura su macchine rotanti sono tipicamente a banda larga, con frequenza limite superiore fino ad 1 MHz, tuttavia sono disponibili anche sistemi con banda più estesa, fino a 500MHz.

La frequenza limite inferiore è invece tipicamente superiore ai 10 kHz per evitare interferenze da parte del sistema di alimentazione.

Alcuni sistemi di misura hanno banda di alcune centinaia di MHz e possono includere oscilloscopi digitali. Le misurazioni da essi eseguite sugli impulsi, non sono calibrate o normalizzate in termini di carica, come sarebbe stabilito dalla IEC 60270, ma valutate in mV.

### 5.3.4 Visualizzazione dei risultati

Visto che lo scopo della misura è rilevare la condizione del sistema isolante della macchina, i dati sulle scariche parziali registrati con uno dei dispositivi descritti nel capitolo 5, devono essere debitamente processati. Il grado di danneggiamento, quindi il rischio di rottura, è direttamente correlato alla particolare tipologia di sorgente di scariche parziali, che deve essere identificata in modo affidabile sulla base delle grandezze misurate. Sono disponibili diverse metodologie di elaborazione e presentazione dei dati.

Le grandezze minime richieste dalla norma da far visualizzare all'operatore sono: l'intensità delle scariche parziali ed il valore RMS della tensione di prova.

L'intensità delle scariche parziali, come intensità più grande ripetuta, può essere espressa in mV o in termini di carica apparente, come descritto dalla IEC 60270.

L'intensità delle scariche parziali  $Q_m$  in funzione della tensione applicata  $U$  all'avvolgimento è vista come una funzione  $Q_m=f(U)$  per valori crescenti e discendenti.

La tensione di prova viene aumentata fino a raggiungere un valore massimo, in modo continuo o discontinuo, prima di essere ridotta al valore minimo.

La curva  $Q_m$  consente di ricavare i valori della tensione di innesco  $U_i$  e di estinzione

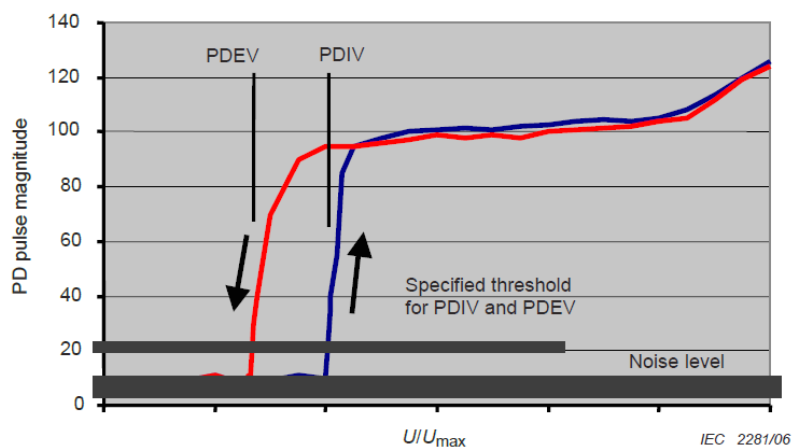


Fig. 5-9 Esempio di curva  $Q_m=f(U)$  e determinazione dei valori di innesco ed estinzione  
(Fonte: [67])

$U_e$ , ponendo una soglia minima al valore di intensità di scariche parziali considerate attive.

Quando vengono utilizzati sistemi digitali di misura, l'intensità della scarica parziale  $q_i$  è acquisita all'interno del treno di impulsi per ciascun evento durante il tempo di acquisizione ed associato al valore della tensione istantanea  $u_i$  al tempo  $t_i$ , oppure nel caso di tensione di rete con andamento periodico, la fase istantanea del sistema di alimentazione a frequenza industriale.

Altre quantità possono essere ricavate a posteriori dai dati salvati, come la corrente di scarica, la potenza delle scariche parziali e l'energia ed altre grandezze definite dalla IEC 60270.

Per l'analisi dei dati possono essere utilizzati diagrammi adatti o analisi statistiche delle distribuzioni dei parametri delle scariche parziali.

I pattern di scariche parziali possono essere visti come una mappa di distribuzione di queste, nelle quali le quantità di ogni evento sono inserite in un diagramma a dispersione, normalmente di tipo 2D.

Un tipo di diagramma raccomandato per identificare le cause di scariche parziali nel sistema isolante è il cosiddetto  $\phi$ -q-n, nel quale l'entità dei singoli eventi sono poste in ordinata attraverso la carica apparente  $q_i$ , mentre in ascissa è posta la fase istantanea  $\phi_i$ . La rappresentazione del numero di eventi di scarica per ogni finestra fase/intensità, avviene mediante l'impiego di un'adatta scala di colori, similmente a quanto già mostrato in (Fig. 3-20).

### 5.3.5 Circuiti di prova

Il compito essenziale del circuito di prova è quello di creare condizioni appropriate per la rilevazione delle scariche parziali entro l'oggetto in prova. Questo è maggiormente verificato se, in assenza dell'oggetto in test, i restanti componenti del circuito sono sufficientemente privi di scariche parziali.

Per provare l'efficacia del circuito, si deve, prima di inserire l'oggetto in prova, testarne la configurazione, per accertare che, alla massima tensione richiesta dalla prova, la carica apparente rilevata non ecceda i 100 pC.

Gli elementi del circuito vengono descritti dalla normativa, ma sono essenzialmente quelli già visti nel capitolo 3.

Nel caso vengano provate singole matasse o sbarre parte di avvolgimenti, le configurazioni di prova rimangono quelle canoniche esaminate nel Capitolo 3.

Mentre nel caso di statori completi, sulla base dell'accessibilità o meno del centro stella e del tipo di connessione scelta per il sistema di misura saranno possibili altre modalità.

Viene raccomandato di inserire la sorgente di alimentazione di alta tensione, sul lato opposto dell'avvolgimento rispetto al sistema di misura, in modo da utilizzare l'effetto smorzante dell'avvolgimento per sopprimere eventuali interferenze provenienti dalla rete di alimentazione.

Il sistema di misura deve essere installato più vicino possibile ai terminali di connessione ed il nucleo magnetico deve essere posto a terra.

Come visibile in (Fig. 5-10).

A seconda che la fine degli avvolgimenti sia aperta, o chiusa nel centro stella, sono fornite dalla normativa due tabelle circa le connessioni da effettuare nella sessione di test (Fig. 5-11), fornendo un particolare identificativo S.x.x per ciascuno schema dei collegamenti.

La misura S.1.4 in molte situazioni potrebbe non essere eseguibile, a seconda della sorgente di alimentazione disponibile, infatti energizzare l'intera capacità del sistema isolante potrebbe essere troppo impegnativo in termini di potenza reattiva richiesta, in questi casi la normativa consiglia di escludere la prova.

Mentre nel caso di macchine di taglia contenuta, essa potrebbe essere, secondo un metodo semplificato, l'unico test eseguito.

In aggiunta a questi la norma fornisce degli schemi addizionali, identificati con E.x.x

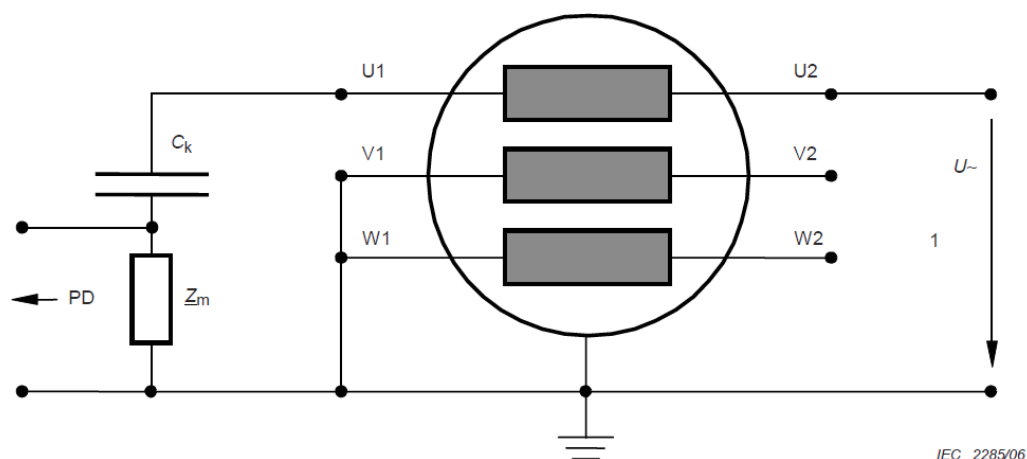


Fig. 5-10 Circuito di prova proposto dalla normativa per la prova di uno statore completo  
(fonte: [67])

**Table 1 – Connection diagram S1 for open star point**

ID number	HV	Ground	$C_K$
S1.1	U2	V1W1	U1
S1.2	V2	U1W1	V1
S1.3	W2	U1V1	W1
S1.4	U2V2W2	-	U1V1W1

**Table 2 – Connection diagram S2 for closed star point**

ID number	HV	Ground	$C_K$
<b>Accessible star point</b>			
S2.1	U2V2W2	-	U1V1W1
<b>Inaccessible star point</b>			
S2.2	U1V1W1	-	U1V1W1

Fig. 5-11 Connessioni raccomandate dalla normativa durante i test  
(fonte: [67])

### 5.3.6 Normalizzazione dei risultati

La normativa sostiene che, a causa dei fenomeni di propagazione, riflessione e accoppiamento negli avvolgimenti statorici, la calibrazione in senso stretto non sia possibile.

Si tratta piuttosto di un processo di normalizzazione, iniettando un impulso ben definito di riferimento ai terminali a cui è collegato l'intero circuito di test.

La normalizzazione ha come scopo quello di assicurare che il sistema di misura possieda sufficiente sensibilità per misurare uno specifico valore di intensità di scarica parziale correttamente.

La normalizzazione viene effettuata iniettando un impulso di corrente di breve durata di intensità nota, con l'ausilio di un generatore di impulsi di riferimento (calibratore) conforme alla IEC 60270.

I punti messi in evidenza per comprendere la differenza tra le due filosofie sono:

- La normalizzazione non definisce la funzione incognita di trasferimento associata alla macchina tra la sorgente di scariche parziali entro l'avvolgimento e il punto di misura.
- La normalizzazione ai terminali non rappresenta adeguatamente l'impulso di scarica parziale che avviene in un luogo ignoto all'interno dell'avvolgimento. Quindi la misura effettuata non fornisce una misura dello stato dell'isolamento in termini di quantità assolute.
- La normalizzazione non può fornire un metodo per la comparazione diretta dei risultati di diverse macchine.

Sono stati riportati in questa sezione i punti più utili per questo lavoro, rispetto la grande quantità di indicazioni fornite dalla normativa, che in ogni caso si consiglia di consultare per ulteriori informazioni.

# 6

## Misure per scopi diagnostici

Visti i limiti delle misure classiche condotte con la strumentazione prevista dalla IEC 60270, specifica strumentazione di misura ed algoritmi di analisi dei risultati sono stati sviluppati per scopi diagnostici.

In questo ambito, le procedure di misura sono spesso non standardizzate, così come la strumentazione offre spesso tecnologie, algoritmi, e funzionalità variabili da un costruttore all'altro.

Lo scopo principale di questo tipo di misure di scariche parziali, è quello di estrarre quante più informazioni dal terno di impulsi che avviene all'interno della macchina, non limitandosi alla sola carica apparente, per cercarne di stabilire le cause, quindi la pericolosità nei confronti della vita del sistema isolante.

I dati ottenuti con l'acquisizione vengono poi processati tramite algoritmi derivati dall'analisi numerica dei segnali e dalla statistica, per cercare di estrarre ulteriori informazioni sul loro comportamento d'insieme, e se possibile, classificarne le diverse tipologie.

Il passaggio ultimo è quello più delicato, di interpretazione dei risultati al fine di giungere ad un quadro complessivo circa lo stato di salute del sistema isolante.

Per questo genere di operazione, il ruolo dell'esperienza maturata dall'operatore su macchine analoghe è fondamentale, al punto che, oggi alcuni sistemi informatici basati sulle reti neurali e sul machine learning, cercano di replicarla su sistemi di misura industriali.

Non necessariamente i metodi utilizzati per questa tipologia di misura sono di tipo elettrico, anche il ramo delle misure ottiche ed acustiche è oggi molto sviluppato, se l'applicazione è particolarmente critica, tutte e tre le misure possono essere effettuate, per poi incrociare i risultati alla ricerca di ulteriori dettagli e maggiore affidabilità nella misura.

## 6.1 I sistemi di acquisizione di tipo UWB

L'idea alla base dei sistemi di misura a banda ultra larga è quella di acquisire in modo fedele l'andamento temporale della corrente relativa al singolo impulso di scarica parziale, poiché esso contiene informazioni sul tipo di fenomeno che ha portato alla scarica, ma anche sul percorso compiuto dall'impulso per giungere dal luogo di origine, fino al luogo di misura.

La necessità di strumenti a banda passante molto ampia è dovuta anche a ragione della tendenza dei sistemi isolanti in mica, di sviluppare scariche parziali molto ravvicinate, sicché il tempo di risoluzione dell'impulso deve essere il più piccolo possibile. Il funzionamento di questi dispositivi è più simile a quello di un oscilloscopio digitale, che non a quello dei sistemi di misura visti nel capitolo 3, difatti con questi sono stati effettuati i primi tentativi di applicazione delle teorie alla base di questo campo.

Successivamente, vista la validità in esse riscontrata, sono stati creati sistemi industriali pensati per questo scopo, mantenendo però di base la struttura inalterata.

La prima differenza sostanziale nel sistema di misura è nell'unità di accoppiamento, che deve in questo caso, effettuare una conversione corrente-tensione del segnale, introducendone la minima deformazione.

Allo scopo, vengono impiegati degli shunt, posti in serie alla capacità di accoppiamento, progettati per presentare effetti parassiti molto ridotti.

In alternativa, filtri passa alto per permettere la libera circolazione delle componenti a frequenza industriale e sue armoniche, e poi, dopo la trasmissione dell'impulso di corrente su cavo coassiale, la sua conversione in un segnale di tensione sulla resistenza di terminazione della scheda di acquisizione adattata in modo da evitare riflessioni lungo la linea.

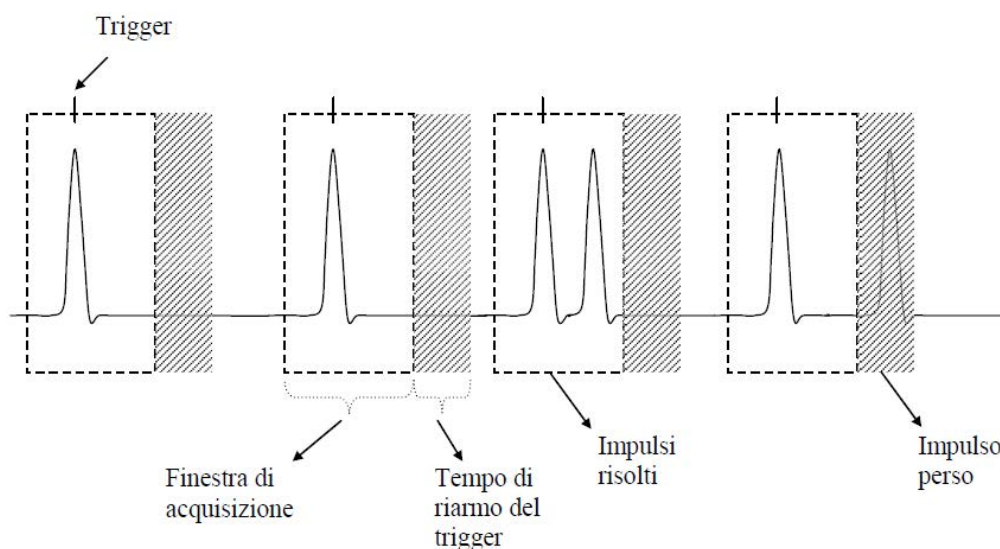


Fig. 6-1 Funzionamento di un sistema di acquisizione a memoria segmentabile  
(fonte: [69])

Le scariche parziali sono segnali caratterizzati da una durata temporale molto breve ( $\mu\text{s}$ ), ma al contempo un contenuto in frequenza molto ricco (decine o centinaia di Mhz).

È indispensabile che, la sezione di acquisizione, oltre alla banda passante molto spinta, presenti una velocità di campionamento tale da soddisfare il teorema di Shannon entro questa:

$$f_c \geq 2 f_{max} \quad \text{eq. 6.1}$$

La velocità di campionamento utilizzata per questo tipo di applicazione ha avuto in principio valori di qualche centinaio di MS/s, ma oggi può superare tranquillamente il GS/s, al pari di quanto avvenuto negli oscilloscopi digitali.

Velocità molto spinte di lavoro del convertitore A/D, portano una gran quantità di dati da gestire, che, vista la durata brevissima degli impulsi di scarica, è per lo più inutile. A questo si rimedia con l'introduzione di una gestione di memoria segmentabile. In questa modalità il convertitore analogico digitale lavora in modo continuo, alla sua massima velocità.

La memoria contiene i valori numerici prodotti, che vengono però sovrascritti fino a quando non viene raggiunto dal segnale il livello di trigger fissato dall'operatore.

Questo fa scattare la registrazione, quindi il salvataggio, dei valori acquisiti entro una data finestra temporale, che può avere un inizio anche precedente all'evento di trigger, durate consigliabili per registrare eventi di scarica parziale sono (1-4  $\mu\text{s}$ ).

Come visibile in (Fig. 6-1), il trigger necessita di essere riarmato, alla fine di un periodo di acquisizione, questo tempo morto può portare la strumentazione a perdere un evento, che altrimenti avrebbe prodotto un nuovo innesco del trigger.

Al termine del processo di acquisizione la memoria sarà completamente riempita dai campioni in forma numerica catturati all'interno delle varie finestre di osservazione.

Dati che verranno poi trasferiti agli stadi successivi, per l'elaborazione e l'analisi dei risultati.

L'acquisizione è un processo particolarmente critico nella catena di misura, perché in essa si ha la conversione delle grandezze analogiche a cui è sottoposto l'oggetto in prova, in valori numerici che le rappresentano. Perché questo avvenga correttamente, è necessaria l'attenzione dell'operatore, nel fissare il livello del trigger a valori non troppo sensibili, altrimenti riempirebbe la memoria acquisendo rumore esterno, ma al contempo non troppo elevati, per non perdere eventi di scarica parziale.

Anche la finestra di osservazione deve essere scelta con cautela, per garantire che gli impulsi si siano estinti completamente entro la fine dell'osservazione.

Generalmente, in parallelo al canale per l'acquisizione degli impulsi, ve n'è un secondo dedicato alla tensione di rete, questo opera con velocità di campionamento e banda passante molto inferiori.

Esistono anche sistemi multicanale, dove l'acquisizione può riguardare contemporaneamente segnali prelevati da diversi punti della macchina, come è il caso del test simultaneo dei tre avvolgimenti statorici di una macchina trifase.

Anche se, i moderni sviluppi nella velocità dell'elettronica digitale e dei DSP, hanno consentito lo sviluppo di sistemi di misura, dove l'elaborazione dei dati non avviene più offline, ma in real-time, ovvero parallelamente alla fase di acquisizione stessa.

## 6.2 Elaborazione e analisi dei segnali acquisiti

L'elaborazione dei campioni numerici ottenuti è diversa a seconda del tipo di analisi che successivamente si vuole effettuare.

Alcuni passaggi comuni sono il filtraggio per via numerica, per cercare di separare il segnale effettivamente dovuto alle scariche parziali, dai disturbi provenienti dall'esterno.

E in molti casi, analogamente a quanto fatto dalla strumentazione convenzionale, si vuole determinare il valore della carica apparente legata a ciascun impulso registrato. Dopo una rimozione di eventuali componenti continue presenti, si esegue una integrazione o una pseudo integrazione dell'impulso.

Il cui valore massimo andrà poi rapportato all'integrale di un impulso analogo di calibrazione con carica nota.

L'elaborazione e la classificazione delle scariche parziali possono avvenire sfruttando la rappresentazione in diversi domini degli stessi fenomeni, attualmente vengono usate tecniche di analisi delle distribuzioni nel tempo, nella frequenza o combinate.

L'analisi delle distribuzioni può avvenire sulla base di pattern, quindi mappe dove viene rappresentata la distribuzione di una certa proprietà dei singoli impulsi, oppure con operatori statistici, che descrivono numericamente proprietà della distribuzione.



## 6.2.1 Analisi nel dominio del tempo

L'analisi della distribuzione nel tempo dei fenomeni di scarica parziale basa le proprie radici sul fatto che impulsi legati a fenomeni completamente diversi si presentino in diversi istanti della tensione di rete.

Così come già presentato nel par. 2.3.1, i fenomeni legati all'effetto Corona, quindi non particolarmente rilevanti ai fini del deterioramento del sistema isolante, avvengono in corrispondenza dei massimi e minimi della tensione di rete, in base alla polarità.

Mentre gli impulsi di scarica legati alle cavità gassose interne, sono molto più probabili attorno ai passaggi per lo zero, dove è massima la derivata, par. 2.1.4.

Dopo aver ricavato il valore della carica apparente di ogni singolo impulso, legandolo al valore della fase istantanea della tensione di rete è possibile costruire un pattern di distribuzione come descritto dalla normativa IEC 60270 e IEC 60034-27-1 e riportato qui in par. 5.3.4.

Si è osservato che le varie tipologie di scariche parziali presentano pattern tra loro diversificati, quindi un operatore esperto è in grado da una loro osservazione di intuire il tipo di difetto che li possa aver originati.

L'informazione contenuta in queste figure non è solo legata alla distribuzione in termini di fase degli eventi di scarica parziale, dalla valutazione della simmetria o meno del comportamento nei due semiperiodi è possibile cercare di capire se il fenomeno di scarica avviene all'interno dell'isolamento, all'interfaccia con il circuito magnetico o con il conduttore dell'avvolgimento.

Nei due semiperiodi della tensione di rete la configurazione elettrodica del sistema isolante è opposta (Fig. 6-2).

A seconda del ciclo di rete, ogni qual volta l'isolante affacciato ad una piccola cavità interfacciale si trova a fare da catodo, è maggiore la probabilità di una scarica.

Per questo, se le scariche parziali di carica negativa sono più numerose e più intense nel semiperiodo positivo, allora la scarica dovrebbe essere posta fra il conduttore e e

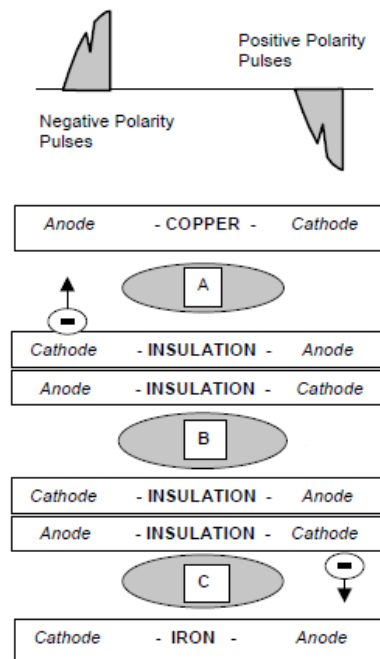


Fig. 6-2 Configurazione elettrodica all'interno del sistema isolante nei due semiperiodi  
(Fonte: [52])

l'isolante, mentre nel caso in cui siano predominanti le scariche di carica positiva nel semiperiodo negativo, la scarica dovrebbe essere posta all'interfaccia tra l'isolante e il nucleo ferromagnetico.

Non sempre è possibile disporre di un operatore con esperienza con un particolare tipo di macchina e della tecnologia costruttiva in essa impiegata, quindi, per limitare l'intervento umano nel processo, sono stati introdotti degli algoritmi di riconoscimento automatico dei pattern dei vari difetti.

Nelle loro forme più semplici, questi impiegano degli indici e degli operatori statistici per descrivere la distribuzione degli eventi di scarica parziale, che vengono poi confrontati con dei valori di riferimento.

Gli indici a loro volta possono essere di tipo diretto, se direttamente provenienti dalle operazioni di misura, indiretti, se ricavati tramite elaborazioni di questi.

Partendo dalla distribuzione della carica apparente in funzione della fase, possono essere ottenute altre tre distribuzioni:

- $H_n(\phi)$  *Pulse count distribution*, distribuzione ottenuta eseguendo il conteggio degli impulsi di scarica parziale rilevati per ogni intervallo di fase.
- $H_{qn}(\phi)$  *Mean pulse height distribution*, ovvero l'intensità media degli impulsi rilevati per ogni intervallo di fase corrispondente.
- $H_{qmax}(\phi)$  *Maximum pulse height distribution*, ricavata assegnando ad ogni intervallo di fase, l'ampiezza dell'impulso della più grande scarica parziale.

Queste tre ulteriori distribuzioni, in aggiunta a quella originale dell'intensità dei singoli impulsi di scarica parziale rilevati, assumono caratteristiche diverse in funzione del tipo di difetto evidenziato.

Delle distribuzioni ottenute è possibile rappresentarne la forma attraverso l'uso di operatori statistici (Fig. 6-3).

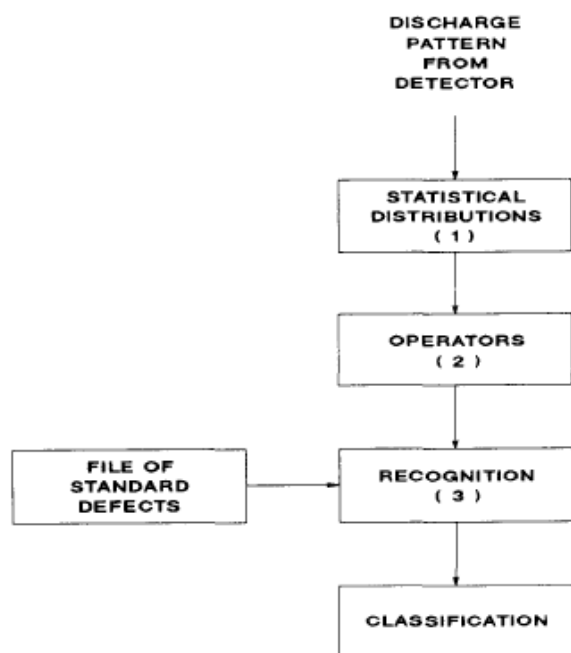


Fig. 6-3 Diagramma di flusso esplicativo di un metodo di classificazione automatica  
(fonte: [30])

Quelli utilizzati comunemente sono:

- Media ( $\mu$ ): valore medio (spesso di tipo aritmetico  $p_i=1/N$ ) dell'intensità dei singoli impulsi

$$\mu = \sum_1^N p_i x_i \quad \text{eq. 6.2}$$

- Varianza ( $\sigma$ ): indice della variabilità dei valori assunti dalla variabile  $x_i$

$$\sigma^2 = \sum_1^N p_i (x_i - \mu)^2 \quad \text{eq. 6.3}$$

- Asimmetria ( $S_k$ ): attraverso la valutazione della somma degli scarti della media aritmetica, elevati ad una potenza dispari. Nel caso dell'analisi dei pattern di scariche parziali, in molti casi è stato usato un momento statistico del 3° ordine. Esso presenta valore nullo, nel caso in cui la distribuzione presenti simmetria attorno al valore medio. Valutandone il segno, si può stabilire il tipo di dissimmetria.

$$S_k = \sum_1^N \frac{(x_i - \mu)^3 p_i}{\sigma^3} \quad \text{eq. 6.4}$$

- Kurtosi ( $Ku$ ): Si tratta di un parametro descrivente la forma della distribuzione, esso esprime il grado di diversità della distribuzione osservata rispetto quella teorica normale. In particolare in termini di piattezza della distribuzione, valori dell'indice ( $>0$ ) evidenziano un ipernormalità, quindi una distribuzione più concentrata attorno al valor medio e quindi più appuntita, rispetto quella normale, viceversa nel caso essa sia più piatta, si parla di iponormalità ( $<0$ ).

$$\gamma = \sum_1^N \frac{(x_i - \mu)^4 p_i}{\sigma^4} - 3 \quad \text{eq. 6.5}$$

- Fattore di dissimmetria ( $A_{sm}$ ): questa volta inteso nei confronti dei due semiperiodi negativo e positivo del ciclo di rete. Per ricavarlo, occorre scindere nelle distribuzioni dei valori trovate i valori appartenenti al semiperiodo positivo  $x_i^+$  e quelli relativi al negativo  $x_i^-$ .

$$A_{sm} = \frac{\sum x_i^+ - \sum x_i^-}{\sum x_i^+ + \sum x_i^-} \quad \text{eq. 6.6}$$

- Fattore di correlazione incrociata ( $cc$ ): analogamente al fattore di dissimmetria, fornisce informazioni sul comportamento della distribuzione nei due diversi semiperiodi. i termini  $x_{qi}^+$  ed  $x_{qi}^-$  sono estratti dalla distribuzione  $H_{qn}(\phi)$  per le varie finestre di fase.

$$cc = \frac{\sum x_{qi}^+ x_{qi}^- - \sum x_{qi}^+ \sum x_{qi}^- / n}{\sqrt{\left[ \sum x_{qi}^{+2} - (\sum x_{qi}^+)^2 / n \right] \left[ \sum x_{qi}^{-2} - (\sum x_{qi}^-)^2 / n \right]}} \quad \text{eq. 6.7}$$

- Fattore di asimmetria delle scariche (Q): definito come il rapporto tra l'intensità media delle scariche parziali nel semiciclo positivo e negativo:

$$Q = \frac{\sum x_{qi}^- / n^-}{\sum x_{qi}^+ / n^+} \quad \text{eq. 6.8}$$

- Fattore di correlazione incrociato modificato (mcc):

$$mcc = Q \cdot cc \quad \text{eq. 6.9}$$

Gli indici statistici presentati fino all'asimmetria, sono assolutamente generali, quindi applicabili su qualsiasi delle distribuzioni proposte, tipicamente su  $H_n(\phi)$  ed  $H_{qn}(\phi)$ .

Questi usano come riferimento teorico la distribuzione normale gaussiana, tuttavia alcuni strumenti oggi disponibili, in aggiunta a questi, hanno introdotto ulteriori parametri ricavabili descrivendo il fenomeno con la distribuzione statistica di Weibull, definita su due coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$ .

Una volta trovati i parametri delle varie distribuzioni di intensità delle scariche parziali, la fase più critica è quella del riconoscimento del tipo di fenomeno in atto.

Sono necessarie delle banche dati, con registrazioni effettuate su macchine analoghe, nelle quali è noto il tipo di difetto che affligge l'isolamento.

La bontà di un sistema di questo genere, è tanto maggiore, quanto più è esteso l'archivio di informazioni su cui può effettuare il confronto.

Per disporre di un sempre maggiore quantitativo di pattern e valori con cui effettuare il confronto sarebbe auspicabile la standardizzazione anche di questo aspetto della misura, che ad oggi è lasciato alla libertà decisionale dei singoli produttori di strumentazione.

Nel corso della presentazione delle distribuzioni e degli indici statistici, si è sempre parlato di intensità di scarica parziale, e non di carica apparente, perché gli strumenti ad uso diagnostico, molte volte, forniscono direttamente il valore di picco dell'impulso rilevato, senza determinare l'equivalente valore di carica apparente.

Questa tecnica si presta bene al riconoscimento della tipologia di scarica parziale, nel caso in cui all'interno dell'oggetto in prova ve ne sia un unico tipo, od eventualmente un numero molto limitato, perché strumenti che valutano la distribuzione degli impulsi nel suo insieme, valutandone caratteristiche complessive.

Specialmente nelle macchine rotanti, questo metodo non sembra molto adatto, vista la grande quantità di impulsi da processare, ognuno potenzialmente dovuto ad un diverso fenomeno in un diverso punto della macchina.

## 6.2.2 Analisi combinata tempo-frequenza

Lo studio combinato nel dominio del tempo e della frequenza, nasce proprio per permettere una efficace classificazione dei segnali sulla base del loro comportamento temporale e spettrale.

Per questo motivo, parallelamente al segnale campionato nel dominio del tempo, proveniente dallo stadio di acquisizione, utilizzando la FFT (Fast Fourier Transform) se ne determina il contenuto in frequenza per ciascuna finestra di osservazione.

Si ha una rappresentazioni delle singole finestre temporali costituita da  $N+1$  campioni, distribuiti su un periodo di osservazione  $T$ , con una certa spaziatura temporale  $t_s$ . Dopo l'esecuzione dell'algoritmo FFT, anche nel dominio della frequenza, si avranno  $N+1$  coefficienti, appartenenti al range di frequenze fra zero e la frequenza di Nyquist del segnale originale, con una spaziatura pari al reciproco del periodo di osservazione  $T$ .

Gli  $N+1$  coefficienti di Fourier, con l'eccezione del termine rappresentativo della componente continua, saranno a due a due complessi coniugati fra loro, trattandosi di un segnale appartenente al mondo reale.

Sicché, la vera informazione sul modulo del contenuto spettrale del segnale potrà essere estratta solamente dai primi  $N/2$  coefficienti più il coefficiente rappresentativo della componente continua.

A questo punto, gli elementi  $s_i$  associati ai rispettivi valori  $t_i$  e le ampiezze delle varie componenti spettrali  $S_i$  associate alle singole frequenze  $f_i$  vengono immesse in algoritmo di elaborazione, dove vengono ricavati i seguenti valori:

$$t_0 = \frac{\sum_0^N t_i s_i^2(t_i)}{\sum_0^N s_i^2(t_i)} \quad \text{eq. 6.10}$$

- Baricentro temporale del segnale ( $t_0$ ):

$$T_{eq} = \frac{\sum_0^N (t_i - t_0)^2 \cdot s_i^2(t_i)}{\sum_0^N s_i^2(t_i)} \quad \text{eq. 6.11}$$

- Tempo equivalente del segnale ( $T_{eq}$ ):

$$W_{eq} = \frac{\sum_0^N f_i^2 \cdot |S_i(f_i)|^2}{\sum_0^N |S_i(f_i)|^2} \quad \text{eq. 6.12}$$

- Banda equivalente del segnale ( $W_{eq}$ ):

Le coppie di valori  $T_{eq}$  e  $W_{eq}$  ottenute per ciascuna finestra temporale di acquisizione, vengono rappresentate su un piano cartesiano detto tempo-frequenza.

L'idea di base contenuta in questo metodo è che la forma d'onda dell'impulso contenga informazioni sulla tipologia di scarica parziale messa in atto, mentre le diverse componenti spettrali contengano informazioni sul percorso di propagazione dell'impulso entro la macchina, quindi sulla posizione.

Da un'analisi della posizione dei gruppi di punti presenti nel piano, dovrebbe essere possibile classificare gli impulsi sulla base del fenomeno di scarica che li ha prodotti

ed in quale punto della macchina.

Questa operazione di raggruppamento, può essere eseguita manualmente dall'operatore o in automatico tramite algoritmi di automatic clustering.

Dopodiché si dovrà cercare di capire ogni cluster rilevato concretamente a quale evento è correlato all'interno della macchina per cercare di comprenderne la pericolosità sulla vita utile.

La tecnica di analisi combinata nel dominio del tempo e della frequenza non è una novità, essa è stata per la prima volta pensata da Gabor, che nel 1947 introdusse la trasformata di fourier su brevi intervalli temporali.

Studi successivi avvennero per applicazioni in oceanografia nel riconoscimento dei suoni delle balene per il miglioramento delle tecniche di riconoscimento vocale, ad opera di Leon Cohen.

L'innovazione dell'algoritmo presentato in [20] è quella relativa all'assunzione delle deviazioni standard del segnale nel dominio del tempo e della frequenza, rispetto ad un valore medio, come parametri rappresentativi per la classificazione della forma e della durata di un segnale.

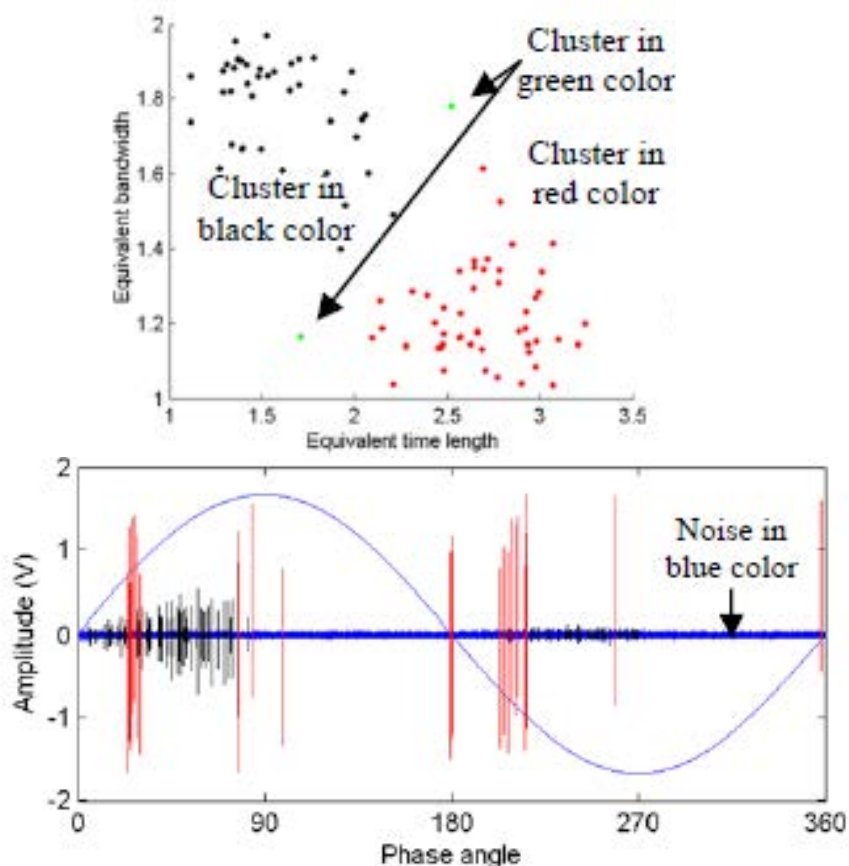


Fig. 6-4 Esempio di applicazione di un algoritmo di analisi combinata Time-Frequency  
(fonte: [18])

# 7 Strumentazione utilizzata nelle prove

## 7.1 Il sistema di misura James Biddle

Il misuratore di scariche parziali James Biddle 66-2J presente in laboratorio è uno strumento, che rispetta i requisiti minimi stabiliti dalla normativa IEC 60270, effettuando la sola misura della carica apparente ai terminali dell'oggetto in prova.

Il valore viene letto su uno strumento indicatore analogico, che presenta una scala graduata di tipo logaritmico, in modo da far sì che l'apparecchio nel suo insieme presenti un campo di misura esteso, senza penalizzare la sensibilità di misura su piccoli valori.

All'interno è presente anche un circuito calibratore, che permette di iniettare sui terminali dell'oggetto in prova impulsi con carica da 1 a 1000 pC.

Un circuito generatore di traccia, permette la visualizzazione degli impulsi rilevati dallo strumento su oscilloscopio, sovrapposti ad un'ellisse che descrive l'andamento della tensione di rete, come visibile in (Fig. 3-12).

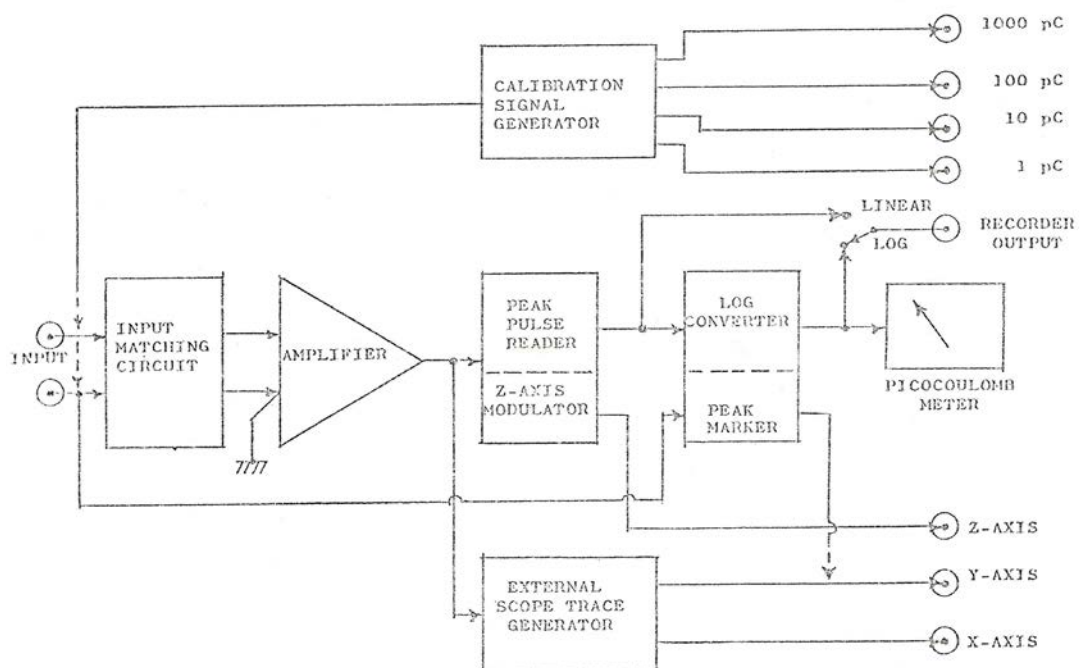


Fig. 7-1 Schema a blocchi dello strumento di Misura e Rilevazione James Biddle  
(fonte: manuale)



In aggiunta era possibile interfacciare uno strumento registratore a pennino, per la registrazione su carta dei diagrammi X-Y visualizzati sullo schermo dell'oscilloscopio. Lo strumento si compone di due unità: "Partial Discharge bridge" e "Partial Discharge Detector" .

Il Partial Discharge Bridge (cat.665702) è un elemento completamente passivo, sul quale è possibile variare il valore della componente resistiva dell'impedenza di misura ed eventualmente aggiungere un'ulteriore componente capacitiva su uno dei due rami di misura.

Lo strumento nasce infatti per permettere la misura delle scariche parziali secondo uno schema bilanciato, presenta quindi due ingressi di segnale, per i quali è previsto un circuito di accoppiamento assolutamente speculare.

In realtà, nelle misure tipicamente eseguite in laboratorio, il valore della componente resistiva non viene quasi mai variato, poiché esso è condizionato dalla capacità dell'oggetto in prova (1-3 nF) o della capacità di accoppiamento, attraverso il valore della massima corrente ammissibile in valore efficace.

La vera strumentazione di rivelazione e misura è presente nell'unità "Partial Discharge Detector" (cat.66526-01).

In questa sezione è presente il trasformatore di accoppiamento, che effettua la separazione della componente comune da quella differenziale nelle misure con schema bilanciato, e, con la variazione della porzione di avvolgimento utilizzato, permette di scegliere la frequenza di risonanza dello strumento.

Questa regolazione, insieme a quella della componente resistiva dell'impedenza di misura, va ad agire sul range di frequenze di banda passante dello strumento, la cui ampiezza può variare da circa 16 kHz, fino a 180 kHz, secondo le specifiche del produttore.

La variazione del guadagno dello stadio di amplificazione può essere effettuata agendo su due diverse regolazioni, una grossolana a scatti di 20dB ed una fine di tipo continuo, sulla quale si va ad agire per impostare la costante di calibrazione ad inizio misura.

In (Fig. 7-1) è riportato lo schema di principio.

Sono state svolte alcune analisi volte a caratterizzare alcuni parametri dello strumento, e la verifica di quanto dichiarato dal costruttore.



Fig. 7-2 Lo strumento James Biddle e l'oscilloscopio utilizzato per la visualizzazione



## 7.1.1 Valutazione della risposta in frequenza

La determinazione della risposta in frequenza del sistema di misura è una delle prove che la normativa IEC 60270 prescrive con cadenza periodica per verificare la funzionalità dell'insieme.

Questa verifica va eseguita iniettando all'interno dello strumento un segnale di corrente con forma d'onda sinusoidale e frequenza variabile mediante l'uso di un generatore di funzioni.

La frequenza viene impostata manualmente, e, per ogni valore impostato si verifica sull'oscilloscopio l'ampiezza dei due segnali in ingresso ed in uscita al sistema di misura.

Il rapporto tra questi è proporzionale alla  $Z(f)$  di cui la norma richiede la valutazione. La banda passante viene definita come quell'intervallo di frequenze entro cui il valore della  $Z(f)$  è compresa entro i 6 dB del valore assunto alla frequenza di centro banda, dove assume il valore massimo.

Tuttavia, per la verifica delle prestazioni viene richiesta la valutazione del range di frequenze entro i 20 dB rispetto al valore massimo.

La caratteristica rilevata andrebbe poi confrontata con quella trovata nelle precedenti verifiche dell'apparato di misura.

Il generatore di funzioni eroga un segnale in tensione, per questo motivo, si è voluto approssimare un generatore di corrente, inserendo in serie un resistore di valore ben più elevato dell'impedenza di ingresso dello strumento da verificare, ponendo poi in una resistenza da 50  $\Omega$  per terminare correttamente il cavo coassiale utilizzato ed evitare in questo riflessioni.

Come visibile in (Fig. 7-3).

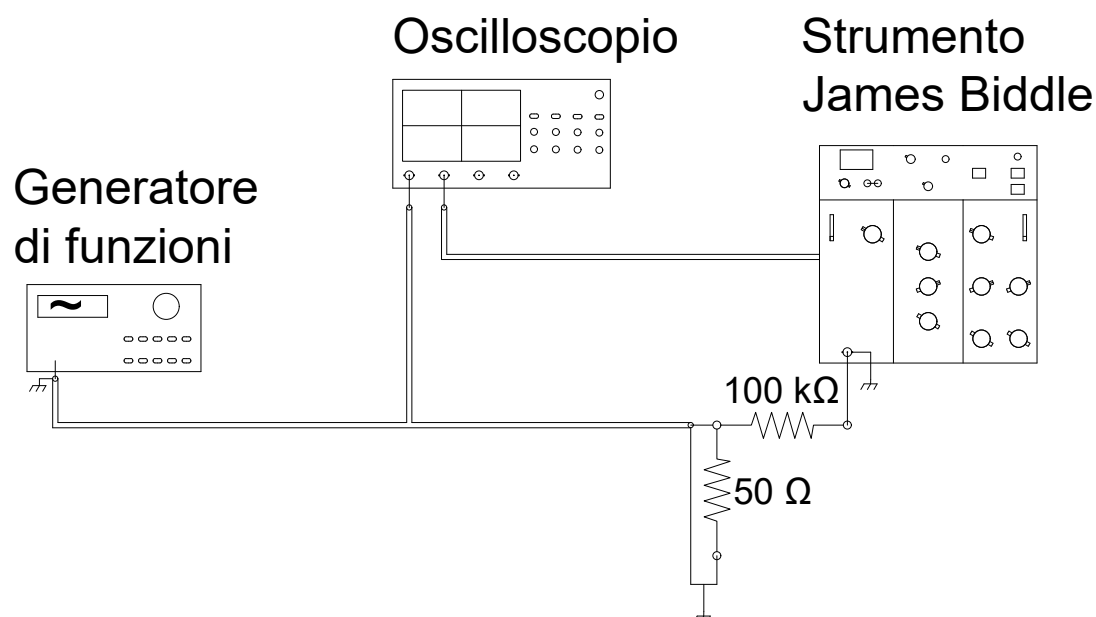


Fig. 7-3 Schema circuitale utilizzato per valutare la banda passante

La valutazione è stata eseguita ponendo il commutatore "input matching" nella posizione 2, quella poi effettivamente utilizzata nello svolgimento delle misure.

Un altro metodo per eseguire la valutazione consiste nello sfruttare la relazione presente fra la risposta impulsiva di un sistema e la sua risposta in frequenza.

Pur essendo l'impulso di Dirac non realizzabile nella pratica, poiché con ampiezza non limitata, mediante l'uso del calibratore è possibile generare un impulso di energia finita e durata brevissima, la cui ampiezza spettrale è costante nel range in cui è collocata la banda passante del sistema di misura.

Registrata poi la risposta impulsiva, se ne effettua la trasformata di Fourier numerica basandosi sull'algoritmo FFT, ottenendone lo spettro.

Normalizzando i dati rilevati con i due metodi, rispetto al loro valore massimo, si ottiene il diagramma rappresentato in (Fig. 7-4).

Si può notare una buona corrispondenza dei risultati nella zona in cui il sistema opera all'interno della banda passante (definita a -6 dB), mentre vi è una lieve discrepanza di risultato nella zona iniziale, amplificata dalla rappresentazione logaritmica.

Questa è probabilmente spiegabile attraverso l'incertezza di misura dell'oscilloscopio su segnali con ampiezze di pochi mV e la contemporanea presenza di rumore sovrapposto, che si è cercato di attenuare attraverso l'uso di tecniche di averaging delle acquisizioni.

In questa modalità di lavoro, lo strumento sembra avere una banda passante compresa tra 20 e 110 kHz, quindi con una larghezza di banda di circa 90 kHz.

La modalità scelta ponendo il commutatore "input matching" nella posizione 1, dovrebbe permettere di raggiungere la piena larghezza promessa dal costruttore, pari a 180 kHz.

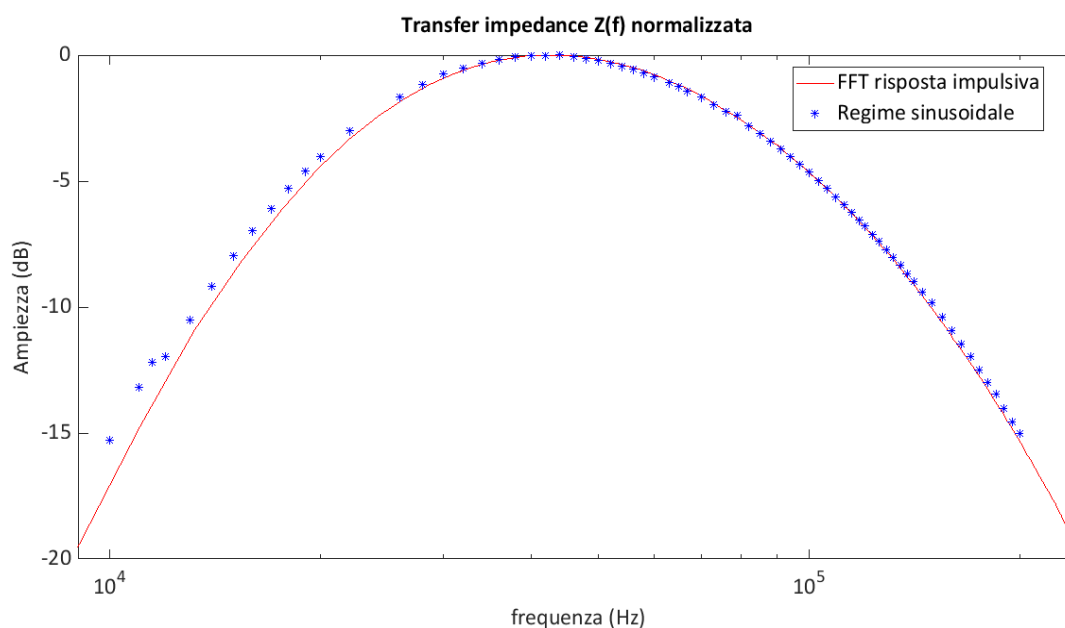


Fig. 7-4 Risposta in frequenza rilevata del sistema di misura

## 7.1.2 Valutazione del tempo di risoluzione

Parametro di importante conoscenza, per poter analizzare in modo critico i dati forniti dal sistema di misura è quello del tempo di risoluzione tra due impulsi vicini.

La normativa IEC 60270 lo prescrive come uno dei test di tipo a cui deve essere sottoposto ciascun progetto di sistema di misura, al fine di constatarne la rispondenza rispetto ai dati nominali dichiarati.

Iniettando all'ingresso degli impulsi di calibrazione con carica nota e distanza temporale variabile a piacere, il tempo di risoluzione viene raggiunto quando il valore di carica letto sul sistema di misura si scosta del 10% rispetto a quello letto nel caso in cui si fornisce al sistema un singolo impulso.

Nel caso dello strumento James Biddle, presente in laboratorio, la valutazione è stata eseguita in modo indiretto.

Ovvero è stata registrata la risposta impulsiva dello strumento sottoposto ad un singolo impulso di calibrazione, successivamente, tramite elaborazione numerica, è stata sovrapposta una copia della risposta stessa traslata temporalmente dalla fine della registrazione, verso l'inizio, fin quando non è stato raggiunto un errore del 10% nell'ampiezza.

In (Fig. 7-5) è riportata in rosso la registrazione della singola risposta impulsiva del sistema, mentre in blu, la sovrapposizione che da luogo ad un errore del valore letto del 10%.

La traslazione temporale che porta a questo risultato, quindi il tempo di risoluzione è pari a 27  $\mu$ s.

Questo valore è di poco superiore al range suggerito dalla norma per la strumentazione a banda larga, compreso fra i 5 e i 20  $\mu$ s.

Al contempo la banda passante in questa condizione non è tale da poter definire il sistema di misura effettivamente a banda larga, e questo incide anche sul valore del tempo di risoluzione.

In conclusione, lo strumento non è molto adatto per l'esecuzione di misure su macchine rotanti, dove l'isolamento in mica potrebbe dar luogo a fitti treni di impulsi.

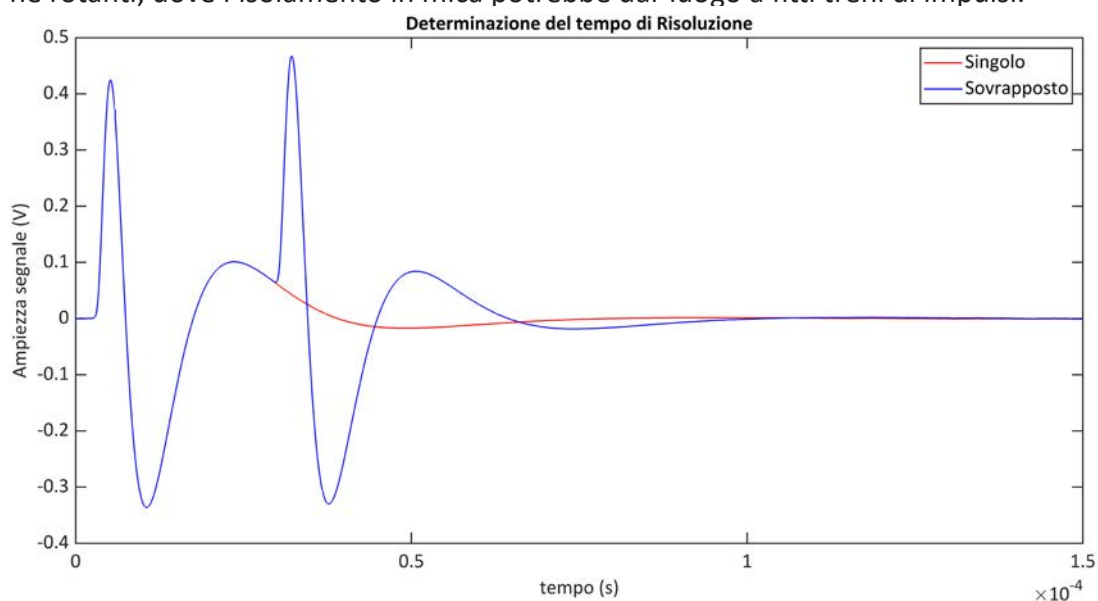


Fig. 7-5 Risposta del sistema ad un impulso di calibrazione e a due sovrapposti

### 7.1.3 Linearità entro il campo di misura

Nella misura delle scariche parziali, l'operazione di calibrazione fissa un riferimento nel valore di carica apparente letta sullo strumento.

Per effettuare una misura con bassi valori di incertezza è essenziale che il calibratore utilizzato fornisca un impulso di carica nota con una tolleranza il più possibile contenuta (secondo la normativa il 5% o 1pC).

La normativa consiglia un valore di carica utilizzato al momento della calibrazione dello stesso ordine di grandezza rispetto quanto fissato dal limite massimo ammissibile sull'oggetto in prova.

La misura effettuata è quindi di tipo relativo, dove fissato un riferimento, la bontà del valore letto è in gran parte determinata dalla linearità del sistema.

Per questo motivo viene fissato un limite del 5 % sulla tolleranza ammessa per l'errore di non linearità.

Allo stesso modo è importante che lo strumento risponda in modo uguale ad impulsi con stessa carica apparente, ma segno opposto.

Per verificare questa caratteristica è stato utilizzato lo schema di (Fig. 7-6).

Il generatore di funzioni è stato impostato per erogare un segnale composto da un fronte di salita, seguito da una discesa lenta esponenziale, per generare un impulso di carica positiva, viceversa il contrario.

La capacità posta in serie all'ingresso dello strumento è attraversata per ogni fronte da una carica:

$$Q = C \cdot \Delta V \quad \text{eq. 7.1}$$

Analogamente a quanto visto per i calibratori.

È stata eseguita la calibrazione dello strumento con impulsi positivi di carica 10 pC, corrispondenti ad un'ampiezza picco-picco del segnale erogato dal generatore di funzioni pari a 200 mV.

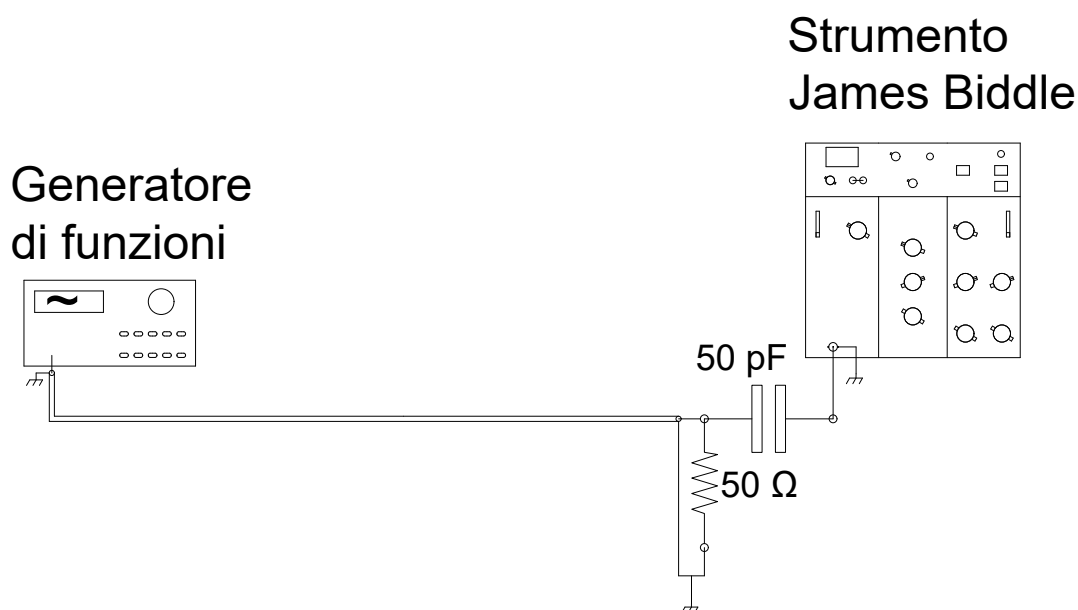


Fig. 7-6 Schema circuitale utilizzato per la valutazione della linearità dello strumento

Successivamente, si è regolata l'ampiezza del segnale in uscita dal generatore di funzioni, fino a far raggiungere dall'indice dello strumento analogico le varie posizioni presenti sulla scala graduata.

Registando ciascuna delle ampiezze picco-picco utilizzate e rapportandole ai 200 mV di calibrazione, è possibile conoscere la vera carica apparente messa in gioco dal circuito, rispetto quelle indicate dal sistema di misura.

Ponendo questi punti su un piano, i cui assi indicano la carica apparente messa in gioco e la carica apparente misurata, si vede come essi si dispongono lungo due rette. Osservando la (Fig. 7-7), si può notare una lieve discrepanza tra i valori forniti con impulsi positivi e negativi, sia a causa di un lieve offset, sia di un diverso guadagno per le due polarità.

Tracciando la retta di regressione ai minimi quadrati e valutando lo scarto massimo tra essa ed i punti sperimentali e rapportandolo al fondo scala dello strumento, è possibile ricavare il valore relativo dell'errore di non linearità.

Nel caso dello strumento in esame, questa stima fornisce il valore del 6,5 %.

Valore superiore a quanto consigliato dalla normativa attuale, ma trattandosi di uno strumento di concezione un po' vetusta è del tutto tollerabile.

In particolar modo, l'errore relativo è quasi del 100 % nel caso di piccoli valori misurati, dell'ordine di qualche pC, mentre la misura è ben più precisa, con un errore di qualche % nell'intorno del valore di calibrazione.

Il fatto che lo strumento abbia un range di misura così esteso, non significa che essa sia completamente utilizzabile con le incertezze dichiarate da costruttore.

Qualora debbano essere misurati valori di carica apparente particolarmente piccoli, lo strumento dispone di una regolazione grossolana a scatti, che va ad agire sullo stadio attenuatore posto in ingresso.

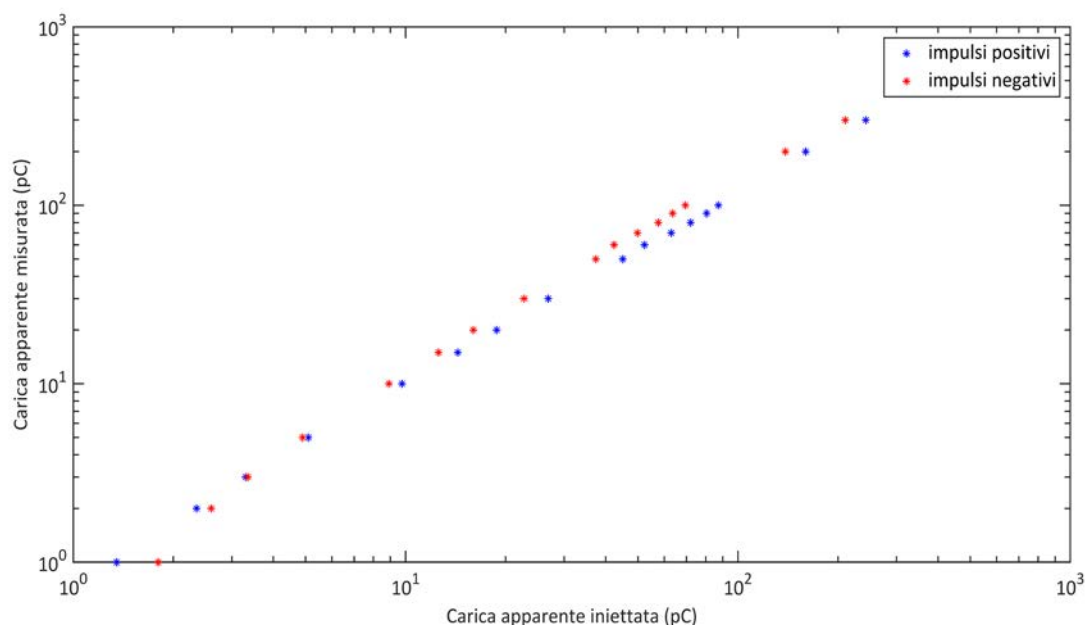


Fig. 7-7 Valore misurato dal sistema iniettandovi impulsi di diversa carica e segno

## 7.1.4 Misure eseguite con lo strumento James Biddle

Dopo aver brevemente descritto la struttura ed aver valutato alcune caratteristiche salienti di questo strumento, è stata eseguita qualche misura di scariche parziali per valutarne le prestazioni ed i limiti sul campo.

È stato utilizzato il circuito di (Fig. 7-8), dove lo strumento viene utilizzato per valutare l'entità delle scariche parziali prodotte da uno spezzone di fil di rame posto sull'elettrodo di alta tensione del trasformatore elevatore, sagomato in modo tale da presentare effetto Corona in corrispondenza delle punte sporgenti.

La tensione applicata sul provino viene regolata tramite un regolatore ad induzione, che fornisce alimentazione al primario del trasformatore elevatore.

Il valore della capacità di accoppiamento è di 2,5 nF, essa è posta in serie all'impedenza di misura, tramite un elemento di interfaccia con il cavo coassiale di collegamento. La calibrazione è stata effettuata utilizzando uno strumento calibratore OMICRON CAL 542 ad un valore di 20 pC.

L'oscilloscopio posto sull'uscita dello strumento James Biddle consente di visualizzare e registrarne la risposta ai singoli impulsi di carica rilevati, per sottoporli poi ad una successiva elaborazione.

Parallelamente si è letto il valore dello strumento indicatore presente, che riporta il valore della massima carica apparente rilevata nel ciclo.

La tensione presente sul lato AT della macchina è stata stimata dal valore misurato al primario, noto il rapporto di trasformazione.

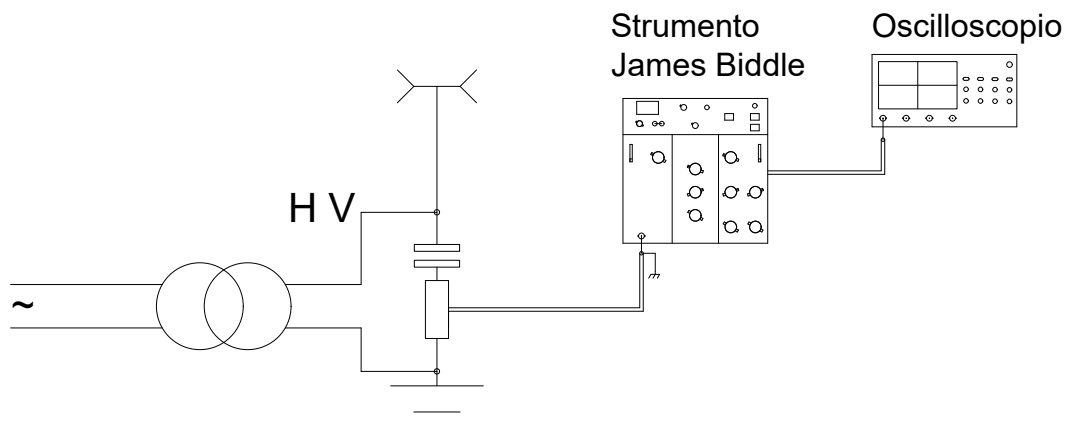


Fig. 7-8 Schema circuitale utilizzato per eseguire le misure di scariche parziali su Corona

In (Fig. 7-9) è riportato il risultato delle misure effettuate applicando 12 kV efficaci tra l'elettrodo di alta tensione e la terra.

Nel Phase Pattern degli impulsi rilevati si può notare una concentrazione nella zona del picco negativo della tensione di rete, si è in presenza solamente del fenomeno Corona negativo, contraddistinto dagli impulsi di Trichel.

Si possono distinguere due diverse tipologie di scariche, con diversa carica apparente, generate in diversa posizione dell'apparato sperimentale.

L'elaborazione numerica, per la determinazione della carica apparente di ciascun evento, è effettuata valutando per ciascuna risposta dello strumento Biddle il valore di picco, e scalandolo rispetto alla costante trovata in fase di calibrazione.

Si può notare come a questo livello di tensione, gli impulsi siano sufficientemente radi, così facendo, il tempo di risoluzione dello strumento, è bastevole ad evitare errori di sovrapposizione.

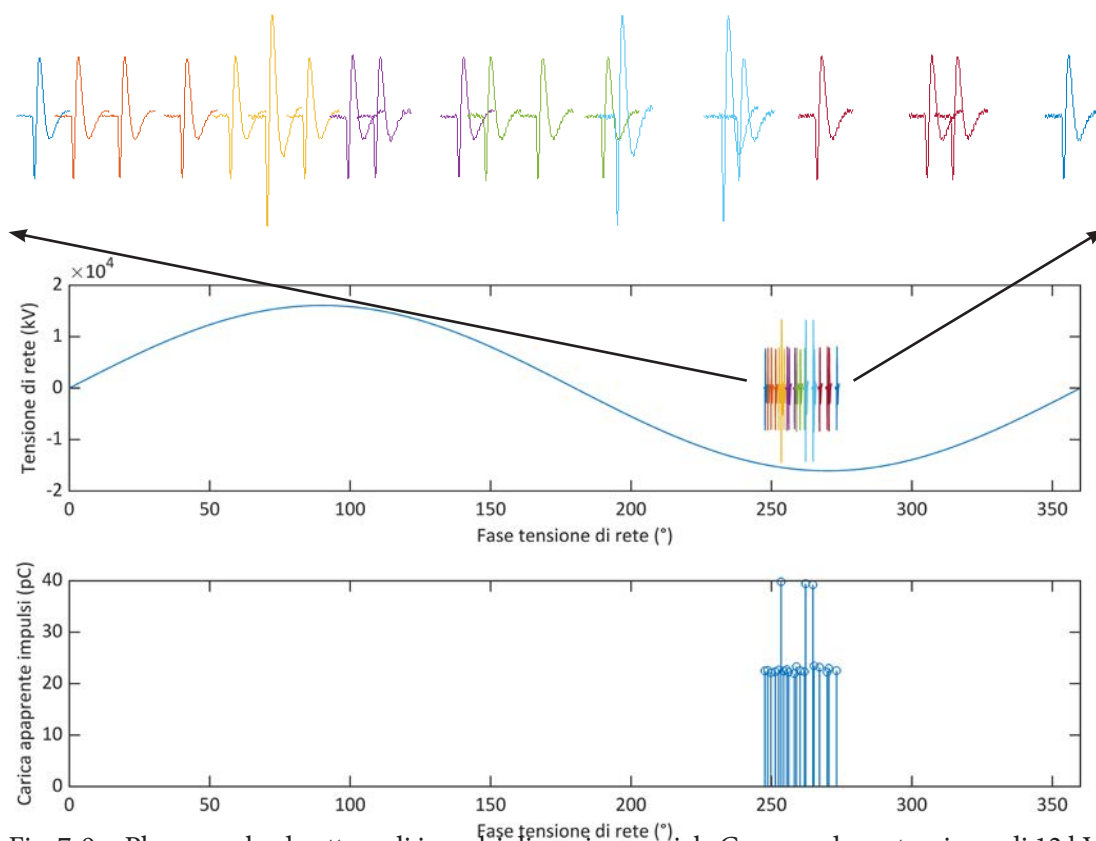


Fig. 7-9 Phase resolved pattern di impulsi di scarica parziale Corona ad una tensione di 12 kV

Al livello di tensione di 13 kV, si è ancora in presenza solamente di Corona negativo, ma gli impulsi di Trichel presentano una frequenza di ripetizione più elevata, rispetto al caso precedente.

Osservando in (Fig. 7-10) il Phase Pattern di questi impulsi, in termini di carica apparente, si può notare in più di qualche caso una sovrapposizione delle risposte impulsive dello strumento, originate da impulsi di scarica diverse.

Questo porta ad un errore di sovrapposizione, tale da sovrastimare pesantemente il valore di carica apparente dell'evento di scarica parziale, oltre in qualche caso a comportare un errore nella determinazione del segno della carica apparente transitata. Infatti, in presenza di Corona negativo, gli impulsi di scarica parziale, dovrebbero portare con se una carica apparente positiva, tutti quelli di segno opposto, visibili sul Pattern, sono frutto di sovrapposizioni.

Da qui, si può apprezzare come, in presenza di scariche parziali molto vicine nel tempo, come sono quelle presenti in alcuni materiali organici, come la mica, è opportuno disporre di sistemi di misura a larghissima banda, dove il tempo di risoluzione è decisamente più contenuto, fino ad un ordine di grandezza.

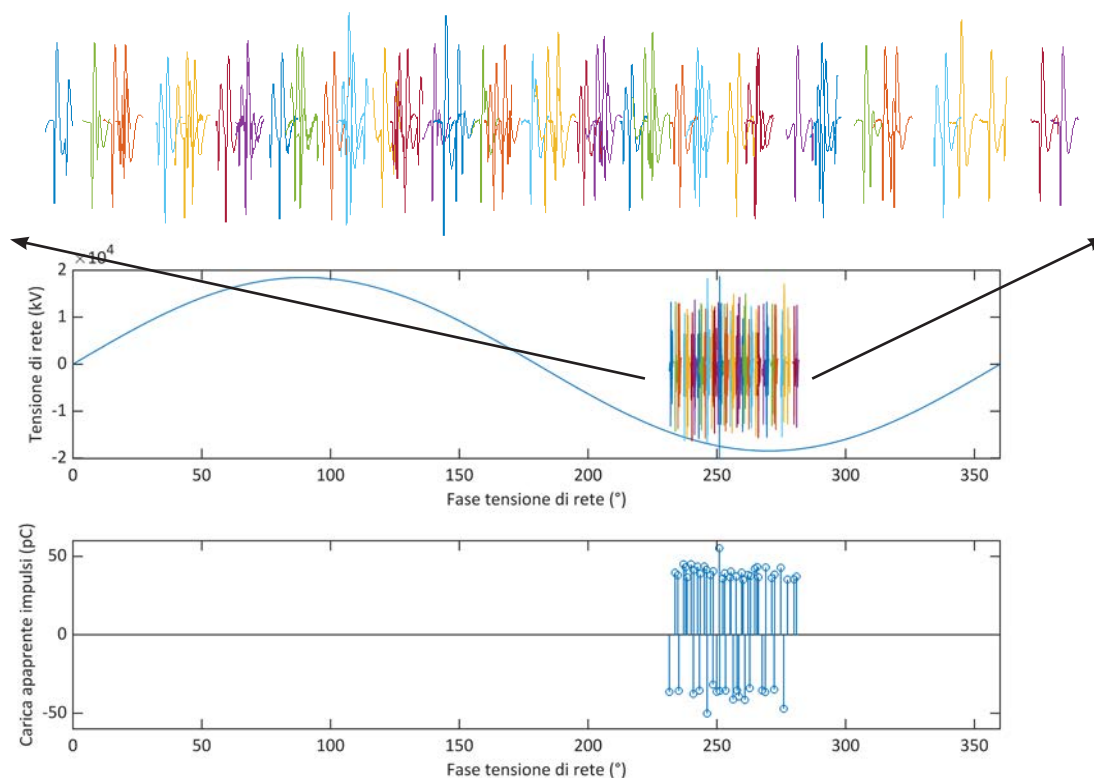


Fig. 7-10 Phase resolved pattern di impulsi di scarica parziale Corona ad una tensione di 13 kV



## 7.2 Il calibratore Omicron CAL 542

Il calibratore è un elemento fondamentale nell'esecuzione delle misure di scariche parziali, perché fissa un riferimento nel valore di carica apparente, rendendo assoluto il valore fornito dal sistema di misura.

In laboratorio è presente un calibratore Omicron CAL 542, perfettamente conforme all'attuale normativa IEC 60270.

Esso genera treni di impulsi unipolari, di segno e carica apparentate selezionabili dall'operatore a mezzo dei due pulsanti e del display presenti sull'oggetto.

Sul lato superiore è presente un connettore BNC femmina, dove viene erogato il segnale prodotto internamente.

Sono disponibili diverse versioni dello strumento descritto, contraddistinte dal range di valori di carica apparente degli impulsi erogati, il modello in nostro possesso è etichettato con la lettera B, quindi con un range di carica apparente fra 1 e 100 pC a step discreti (1-2-5-10).

La ripetizione degli impulsi avviene grazie ad un segnale di Clock generato internamente alla frequenza di 300 Hz, o, in alternativa, in sincrono con la tensione di rete, grazie ad un fotorivelatore presente sul frontale, che sfrutta la pulsazione a frequenza di rete del sistema di illuminazione della sala prove.

L'alimentazione avviene mediante batterie per agevolare la portabilità del dispositivo.



Fig. 7-11 Il Calibratore Omicron CAL 542  
(fonte: *omicronenergy.com*)

## 7.2.1 Verifica della carica apparente del calibratore

In virtù dell'importanza del valore di carica apparente messa in gioco dal calibratore sul circuito, la normativa IEC 60270 stabilisce che questa debba essere verificata in più occasioni, sia al termine della produzione dello strumento, che durante la vita.

Per chi produce tale dispositivo, questa verifica rappresenta, sia una prova di tipo, da eseguire quindi su un singolo esemplare per ogni tipologia di prodotto, sia una prova di routine, da eseguire per ogni esemplare nella fase di controllo qualità.

Per l'utente finale, la verifica è raccomandata sia in forma di "Performance test", sia di "Performance check", la cui esecuzione periodica può essere eseguita dall'operatore stesso, per verificare l'integrità dello strumento in uso.

La tolleranza ammessa sulla carica apparente è del 5% o 1 pC, scegliendo il più grande tra i due vincoli, a seconda della portata in uso.

La stessa norma propone due possibili metodi, per eseguire la valutazione della carica apparente.

Il primo metodo consiste nel far circolare l'impulso di corrente prodotto dal calibratore su un resistore di valore noto  $R_m$ , la cui tensione ai capi  $u_r$  potrà essere osservata e registrata su un oscilloscopio digitale, per eseguire successivamente l'integrazione per via numerica, fino a giungere al valore della carica apparente:

$$u_r(t) = R \cdot i(t) \quad \text{eq. 7.2}$$

$$\int_{t_0}^{t_0+\delta} u_r(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+\delta} R \cdot i(t) dt = R \cdot q_0 \quad \text{eq. 7.3}$$

Il valore della resistenza  $R_m$  deve essere di valore non troppo piccolo, in modo da rendere agevole la misura del segnale da parte dell'oscilloscopio, ma al contempo non troppo elevata, in modo da non allungare eccessivamente la coda dell'impulso. Al contempo, il valore della resistenza  $R_m$ , condiziona l'entità delle oscillazioni seguenti l'impulso, che, con la loro presenza, potrebbero provocare ulteriori errori di integrazione sul segnale.

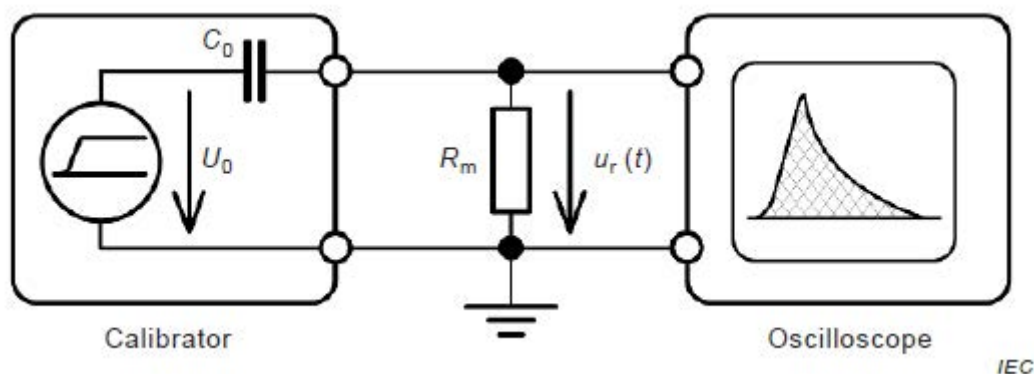


Fig. 7-12 Circuito per la verifica del calibratore mediante integrazione numerica  
(fonte: [64])

Nel nostro caso è stata usata una resistenza da 50  $\Omega$  nominali (51.9  $\Omega$  misurati). La norma prescrive inoltre che la banda passante dell'oscilloscopio utilizzato non sia inferiore a 50 MHz, pur essendo oggi piuttosto semplice ottemperare a questa prescrizione, con uno strumento con larghezza di banda inferiore, pur non osservando la vera forma d'onda, si avrebbe comunque una corretta misura della carica apparente messa in gioco.

Generalmente il tempo di salita dell'onda quadra interna al calibratore è circa uguale alla durata del primo impulso osservabile nel segnale.

In (Fig. 7-13) è riportato un impulso di corrente prodotto dal calibratore Omicron CAL 542 impostato a 100 pC positivi ed il suo integrale di carica, computato per via numerica, con un risultato di circa 99,2 pC.

In (Tab. 7-1) sono stati riportati i valori rilevati, per ogni misura eseguita sulle diverse portate disponibili sul calibratore.

Per ridurre l'effetto del rumore, si è scelto di utilizzare sull'oscilloscopio la modalità di acquisizione average, su un numero di acquisizioni pari a 100.

Osservando i dati ottenuti dalle varie misurazioni, si può concludere che, dai dati rilevati con questa metodologia di misura, il dispositivo è ampiamente entro tolleranza, per quel che riguarda la carica apparente.

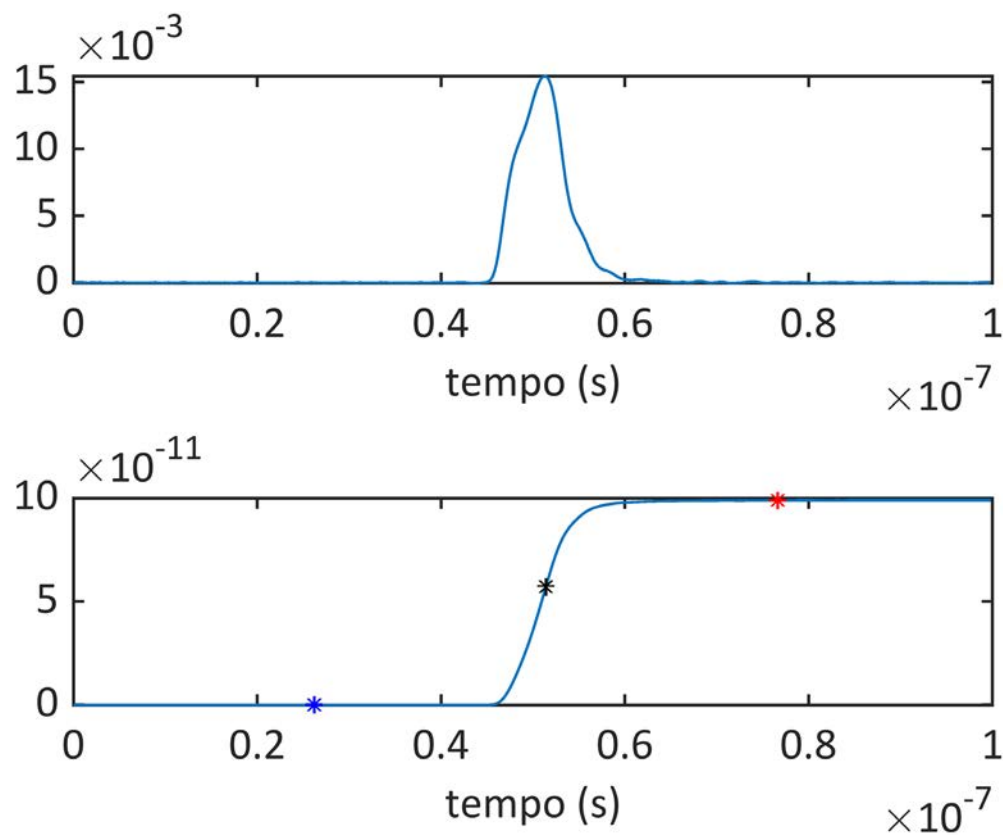


Fig. 7-13 Impulso positivo prodotto dal calibratore a 100 pC e suo integrale

Carica Impostata (pC)	Polarità (pos-neg)	Carica misurata (pC)	Errore relativo (%)
1	pos	0,992	-0,8 %
		0,996	-0,4 %
2	pos	1,99	-0,7 %
		1,99	-0,7 %
5	pos	4,94	-1,3 %
		4,93	-1,4 %
10	pos	9,92	-0,8 %
		9,93	-0,7 %
20	pos	19,9	-0,6 %
		19,9	-0,6 %
50	pos	49,4	-1,2 %
		49,4	-1,1 %
100	pos	99,2	-0,8 %
		99,2	-0,8 %
1	neg	0,999	-0,1 %
		0,991	-0,9 %
2	neg	1,98	-0,9 %
		1,99	-0,7 %
5	neg	4,93	-1,4 %
		4,93	-1,4 %
10	neg	9,88	-1,2 %
		9,88	-1,2 %
20	neg	19,8	-0,9 %
		19,8	-0,9 %
50	neg	49,3	-1,4 %
		49,3	-1,4 %
100	neg	98,4	-1,6 %
		98,4	-1,6 %

Tab. 7-1 Valori di carica rilevati con il metodo ad integrazione numerica

Il secondo metodo contemplato dalla normativa prevede che l'integrazione sia svolta per via analogica, attraverso una semplice rete passa basso (Fig. 7-14).

Riversando l'intera carica apparente messa in gioco dal calibratore su una capacità di valore noto, si può osservare un gradino di tensione di ampiezza  $\Delta U$ , direttamente proporzionale al valore di carica secondo la eq. 7.1.

La resistenza posta in serie alla capacità,  $R_s$  serve a smorzare eventuali oscillazioni e deve essere posta quanto più vicino possibile all'uscita del calibratore da verificare.

La tensione  $u_c(t)$  è legata alla tensione  $U_0(t)$  interna al calibratore secondo il rapporto di partizione tra le due capacità  $C_0$  e  $C_m$ :

$$u_c = U_0 \cdot \frac{C_0}{C_0 + C_m} \quad \text{eq. 7.4}$$

Allo stesso modo, la carica trasferita dal calibratore al condensatore di misura, vale:

$$q_c = \frac{q_0}{1 + \frac{C_0}{C_m}} \quad \text{eq. 7.5}$$

Che, nel caso in cui  $C_m \gg C_0$ , può essere semplificata in:

$$q_c = q_0 \cdot \left(1 - \frac{C_0}{C_m}\right) \quad \text{eq. 7.6}$$

Questo significa che, per avere un trasferimento del 99% della carica, occorre che  $C_m$  sia almeno due ordini di grandezza più grande di  $C_0$ .

La maggior parte dei calibratori commerciali utilizza valori di  $C_0$  attorno ai 100 pF, per cui la normativa IEC 60270 raccomanda di utilizzare un valore di  $C_m$  di circa 10 nF.

Il fatto di preservare il trasferimento di carica, contrasta con l'esigenza di avere un segnale di tensione sufficientemente ampio per la misura.

Per esempio, nel nostro caso in cui la capacità  $C_0$  vale 100 pF e la capacità  $C_m$  10 nF, sull'oscilloscopio si potrà vedere un segnale di qualche decina di mV, se il gradino originale  $U_0$  aveva ampiezza di qualche V.

Il metodo non è quindi adatto a misurare cariche apparenti di piccolo valore, indicativamente non sotto i 100 pC per mantenere un incertezza di misura del 3%.

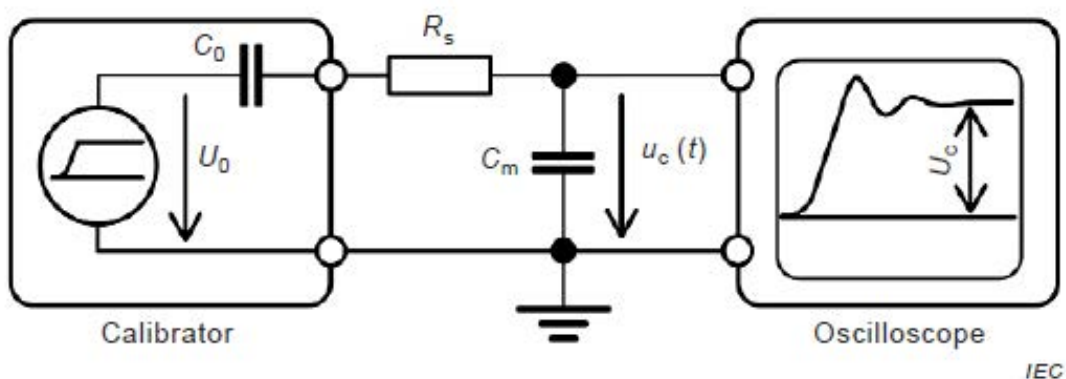


Fig. 7-14 Circuito per la verifica del calibratore mediante integrazione analogica  
(Fonte: [64])

Per valori di carica inferiori, dove l'ampiezza del gradino sarebbe difficilmente valutabile, viene consigliato l'impiego di un circuito integratore attivo.

Questo sistema permette di ricostruire esternamente i gradini che all'interno del calibratore generano i vari impulsi di carica e valutarne la rispondenza o meno ad alcune specifiche dettate dalla norma in merito al tempo di salita, di assestamento ed al tempo di permanenza del livello.

Pur essendo il nostro strumento operante in un range di carica apparente non consigliato per l'impiego del metodo, se n'è comunque voluta provare l'efficacia, riuscendo a valutare in modo discreto i quantitativi di carica prodotti dal calibratore CAL 542, fino ai 5 pC, più sotto dei quali l'ampiezza del gradino era talmente piccola da non poter essere rilevata.

La capacità di misura  $C_m$  inserita presentava un valore di 10 nF e la resistenza di smorzamento in serie 120  $\Omega$ .

Carica Impostata (pC)	Polarità (pos-neg)	Carica misurata (pC)	Errore relativo (%)
1	pos	\	\
2	pos	\	\
5	pos	5,02	1,4 %
10	pos	10,03	0,3 %
20	pos	20,0	0,1 %
50	pos	50,2	0,4 %
100	pos	100,2	0,7 %
1	neg	\	\
2	neg	\	\
5	neg	5,07	1,4 %
10	neg	100,3	0,3 %
20	neg	20,0	0,1%
50	neg	50,2	0,4 %
100	neg	100,7	0,7 %

Tab. 7-2 Valori di carica rilevati con il metodo della tensione del gradino

L'utilizzo del metodo di valutazione della carica apparente tramite integrazione analogica con componenti passivi su altri calibratori oltre a quello presente in dotazione al laboratorio, già presentato, ha messo in luce in alcuni casi la presenza di una componente oscillante sovrapposta al gradino.

In special modo, eseguendo la prova su di uno strumento Tettex KAL 9520, in grado di fornire impulsi di calibrazione su un vastissimo range di carica, questi fenomeni divenivano particolarmente rilevanti, consigliando di eseguire ulteriori analisi per capire se le difformità affliggevano il segnale generato dal calibratore in prova o l'asset di misura.

Chiudendo il calibratore su uno shunt ed osservando l'andamento della tensione, questa non presentava deformazioni tali da giustificare il fenomeno.

In particolare, negli oscillogrammi riportati in (Fig. 7-15) relativi al funzionamento del circuito integratore analogico sul calibratore Tettex, si nota la presenza di una vistosa componente oscillante.

Il canale 1 rappresenta la tensione prelevata all'ingresso del circuito integratore, mentre il canale 2 ai capi del condensatore di misura.

La frequenza dell'oscillazione stimata si aggira attorno ai 150 MHz.

In questa configurazione circuitale, la capacità utilizzata dal calibratore è di 10 pF, che, posta in serie ai 10 nF del circuito integratore, porta ad un valore equivalente che si può ritenere comunque di 10 pF.

La frequenza di oscillazione di un circuito LC vale:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{eq. 7.7}$$

Che, inserendovi il valore della frequenza riscontrata e della capacità equivalente della rete, porta ad un valore di induttanza di 170 nH, dovuto sia alla resistenza a film metallico utilizzata, sia ai collegamenti in aria realizzati nel nostro strumento, e forse in parte, in quello in prova.

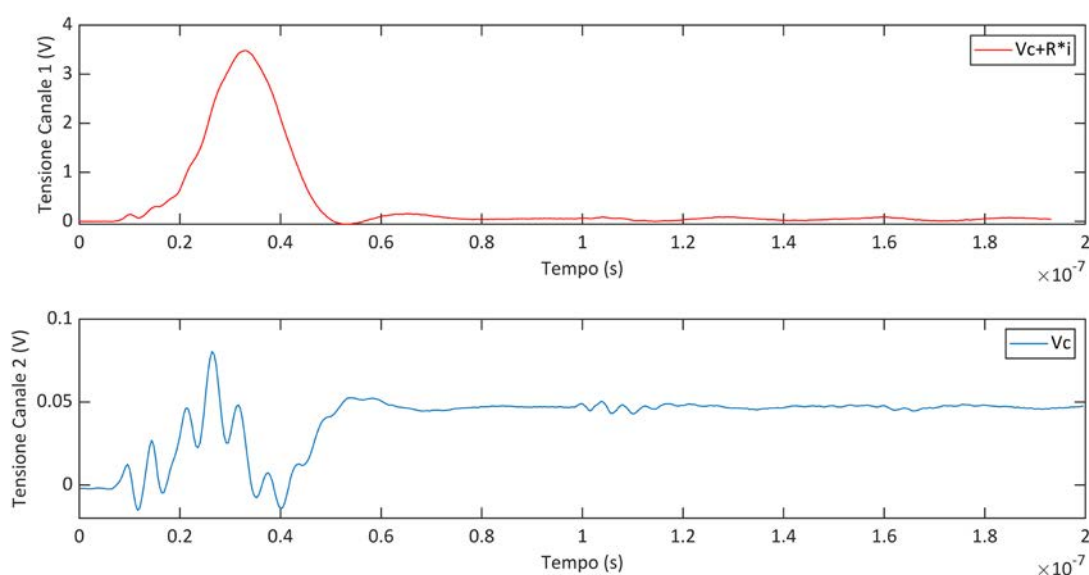


Fig. 7-15 Oscillogrammi relativi al calibratore Tettex KAL 9520 nella portata + 500pC

È stato allora ripreso il calibratore auto-costruito presentato nel par. 7.1.3, costituito da un generatore di funzioni che eroga un onda quadra e da una rete passiva per la generazione dell'impulso di carica nota e la terminazione del cavo, come raffigurato in (Fig. 7-16).

Sui due canali dell'oscilloscopio utilizzati, è possibile visualizzare: la tensione ai capi del condensatore di integrazione da 10 nF sul canale 2 e il segnale di corrente erogato dal calibratore, sovrapposto al gradino di integrazione, per utilizzare lo stesso riferimento di massa, sul canale 1.

L'ingresso del canale 1 dell'oscilloscopio è stato accoppiato al circuito attraverso una sonda x10, per limitare l'effetto di carico dello strumento sul circuito ed al contempo ridurre il valore di tensione effettivamente presente sul canale.

La presenza di 1,5 metri di cavo per sonde solo su uno dei due segnali, ha richiesto l'utilizzo della funzione deskew per compensare il ritardo di propagazione, che ammonta a circa 7 ns con sonda ben compensata in alta e bassa frequenza.

Per così come è costituito il calibratore, la carica apparente prodotta è direttamente proporzionale all'ampiezza del gradino di tensione del generatore.

Un gradino di  $1 V_{pp}$  produce una carica apparente di 50 pC, di segno positivo o negativo, a seconda che si tratti di un fronte di salita o di discesa applicato.

La capacità del generatore di funzioni utilizzato, Agilent 332220 A, di generare gradini con fronte di salita molto ripido, minore di 13 ns è in questo ambito fondamentale, per simulare al meglio possibile gli impulsi di scarica parziale.

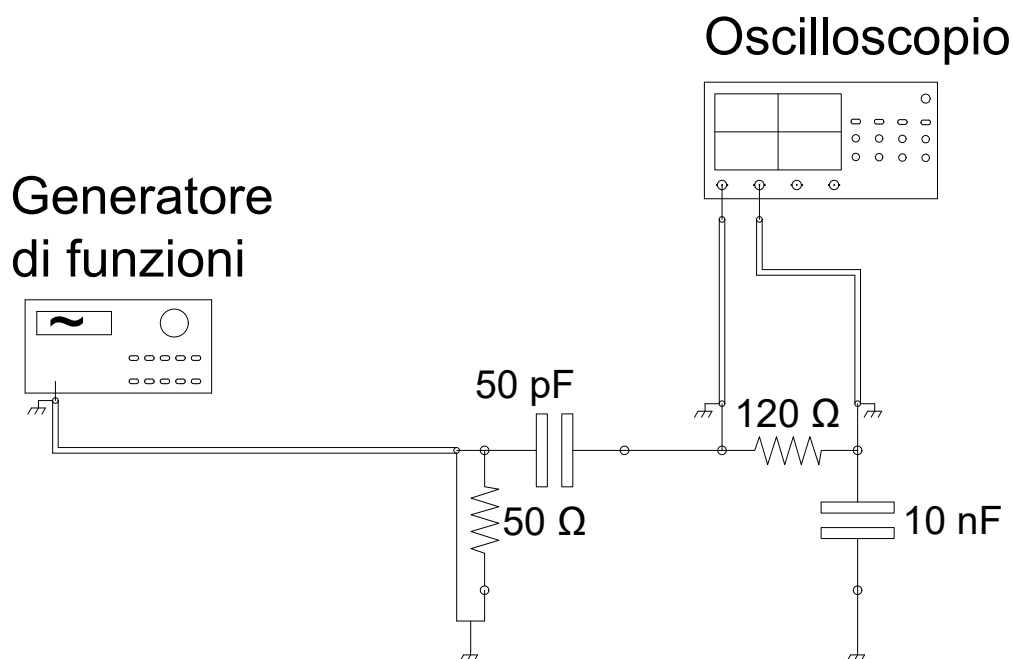


Fig. 7-16 Schema circuitale utilizzato per valutare il gradino del calibratore auto-costruito



Confrontando gli oscillogrammi di (Fig. 7-17) con quelli di (Fig. 7-15), si nota in essi comunque la presenza di una componente oscillante sovrapposta al segnale, ma con entità ben minore e frequenza inferiore, rispetto al caso precedente.

Al contrario, la durata dell'impulso di corrente è quasi doppia, nonostante le buone prestazioni del generatore di funzioni.

Potrebbe quindi essere che lo spettro dell'impulso prodotto dal calibratore sia molto più ricco di quello ottenuto con il nostro circuito, andando così ad eccitare la frequenza di risonanza propria della rete.

Questa semplice verifica porta alla conclusione che, il metodo tramite integrazione analogica della carica prodotta è valido per grandi valori di carica, così come consigliato dalla normativa ( $> 100$  pC), tuttavia il segnale fornito difficilmente da informazioni sulla qualità del gradino prodotto all'interno dello strumento, poiché i parametri parassiti del circuito introducono una serie di effetti di deformazione.

Su strumenti più datati veniva reso disponibile all'operatore che esegua la verifica anche il segnale a gradino internamente utilizzato, sugli strumenti odierni, a meno di non poterne seguire lo smontaggio, si può utilizzare la configurazione circuitale proposta dalla normativa, con particolare attenzione alla qualità dei componenti passivi utilizzati ed ai loro parametri parassiti.

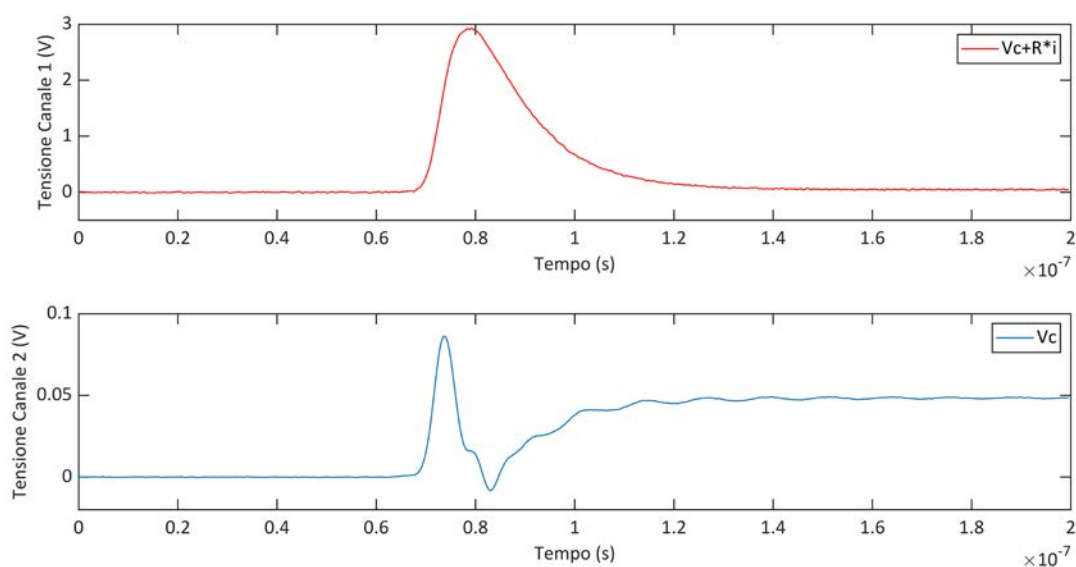


Fig. 7-17 Oscillogrammi relativi al calibratore auto-costruito nella portata + 500pC e capacità di 10 nF con tensione di lavoro di 1500 V

Per valutare l'entità dei parametri parassiti è stata realizzata anche una simulazione in Multisim (© National Instruments) del circuito, variando i valori delle induttanze parassite della resistenza e della capacità, fino a raggiungere le forme d'onda di (Fig. 7-18), che ben riproducono gli andamenti trovati nella realtà nell'ultimo caso.

Per fare ciò, i due parametri parassiti, sono stati inseriti sotto forma di due induttanze concentrate, poste in serie alla resistenza da  $120 \Omega$  ed alla capacità di integrazione, con valori di  $150\text{nH}$  a rappresentare l'induttanza della resistenza e dei collegamenti e  $25\text{nH}$  per la capacità.

Dati perfettamente verosimili a quanto riportato in qualche manuale di progettazione elettronica e nei datasheet di componenti simili.

Si tratta di induttanze, specialmente per la capacità, molto contenute, probabili anche solo pensando all'ingombro dei componenti, in particolare il condensatore utilizzato, data la tensione di lavoro di  $1500\text{V}$ , ha un notevole sviluppo nella dimensione assiale. Si è così sostituito tale elemento con una capacità dello stesso valore, ma con tensione di lavoro di  $63\text{V}$ , comunque più che bastevole per l'applicazione.

Stimando per esso un'induttanza parassita di circa  $10.5 \text{ nH}$ .

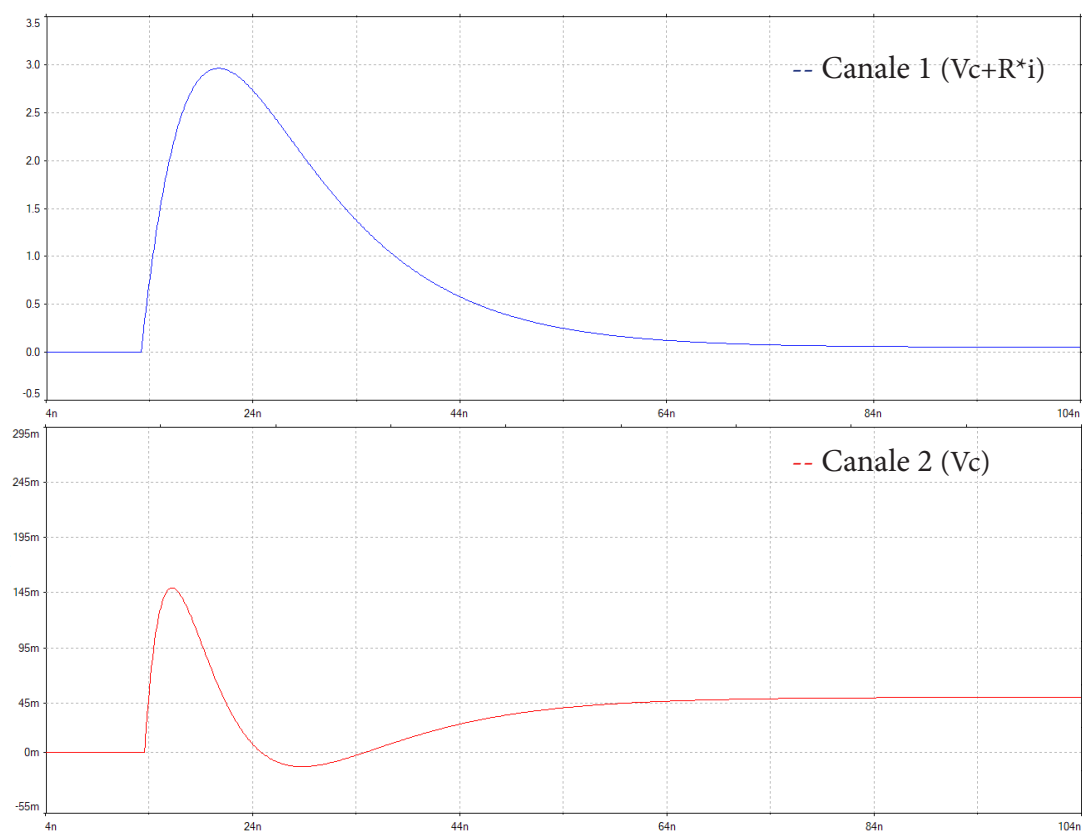


Fig. 7-18 Oscillogrammi relativi alla simulazione del circuito integratore analogico con capacità  $10\text{nF}$  e tensione nominale  $1500 \text{ V}$

Osservando gli oscillogrammi presentati in (Fig. 7-19), rispetto ai precedenti si nota un netto miglioramento della situazione, l'overshoot iniziale è pressoché scomparso, pareggiando praticamente il valore a regime.

Anche l'undershoot seguente ha ridotto la sua entità.

La dinamica temporale rispetto a quanto presentato in (Fig. 7-17) è pressoché immutata, in termini di tempo necessario per raggiungere il valore di regime, quindi di assestamento.

È stata anche in questo caso eseguita una simulazione, grazie alla quale, per via iterativa confrontando i risultati, sono stati stimati i due valori di induttanza parassita.

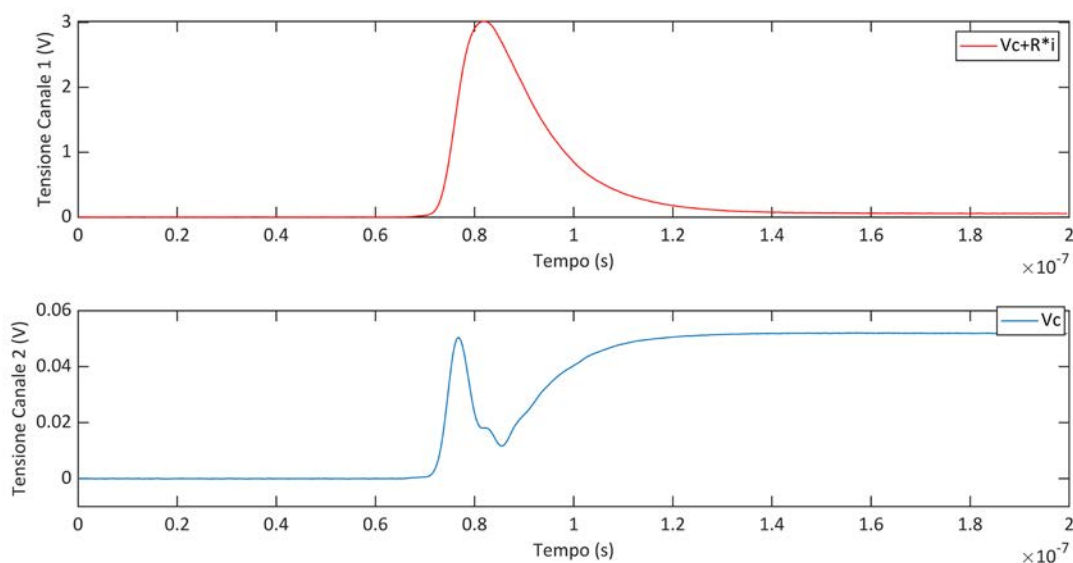


Fig. 7-19 Oscillogrammi relativi al calibratore auto-costruito nella portata + 500pC con la nuova capacità di 10 nF e tensione di lavoro 63 V.

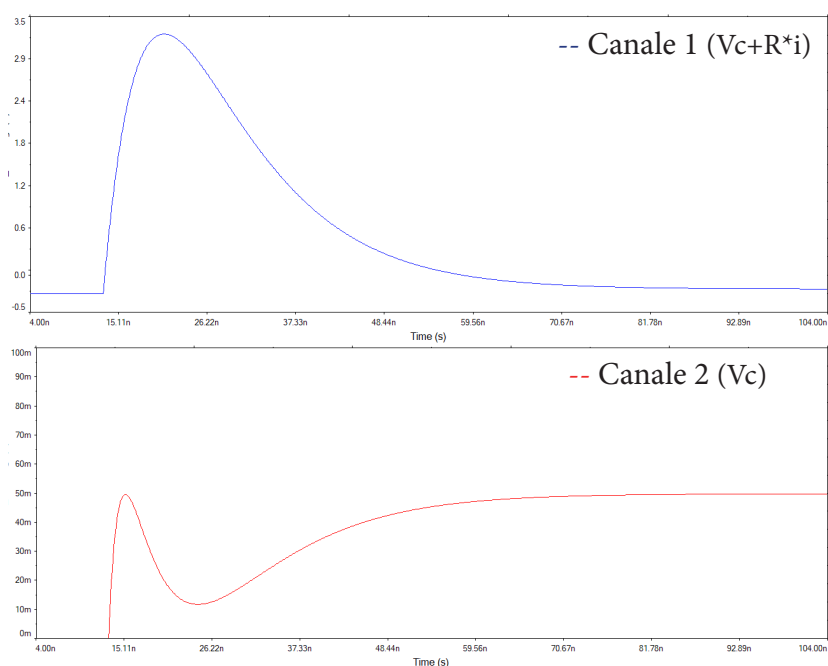


Fig. 7-20 Oscillogrammi relativi alla simulazione del circuito con minor induttanza nella capacità da 10 nF, vista la minor dimensione di questa

Successivamente si è provato a sostituire la capacità di integrazione con una di valore più contenuto, pari a 1 nF.

Questo penalizza il trasferimento di carica tra il calibratore e il dispositivo di test, portandolo, nel caso in cui la capacità interna al calibratore sia di 100 pF, al 90%, tuttavia dovrebbe consentire una maggior ampiezza del gradino di tensione rilevabile, a parità di parametri parassiti presenti nel circuito, quindi entità di oscillazioni.

Eventualmente, conoscendo l'esatto valore della capacità in uso nel calibratore, si potrebbe pensare ad una correzione dell'errore introdotto con l'incompleto trasferimento di carica.

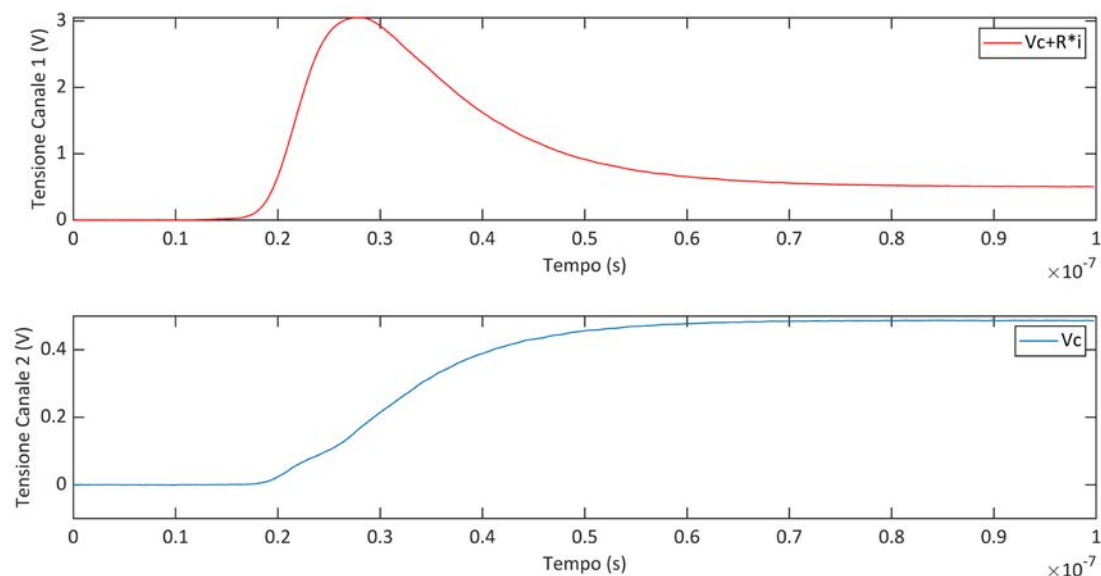


Fig. 7-21 Oscillogrammi relativi al calibratore auto-costruito nella portata + 500pC con la nuova capacità di 1 nF e tensione di lavoro 63 V.

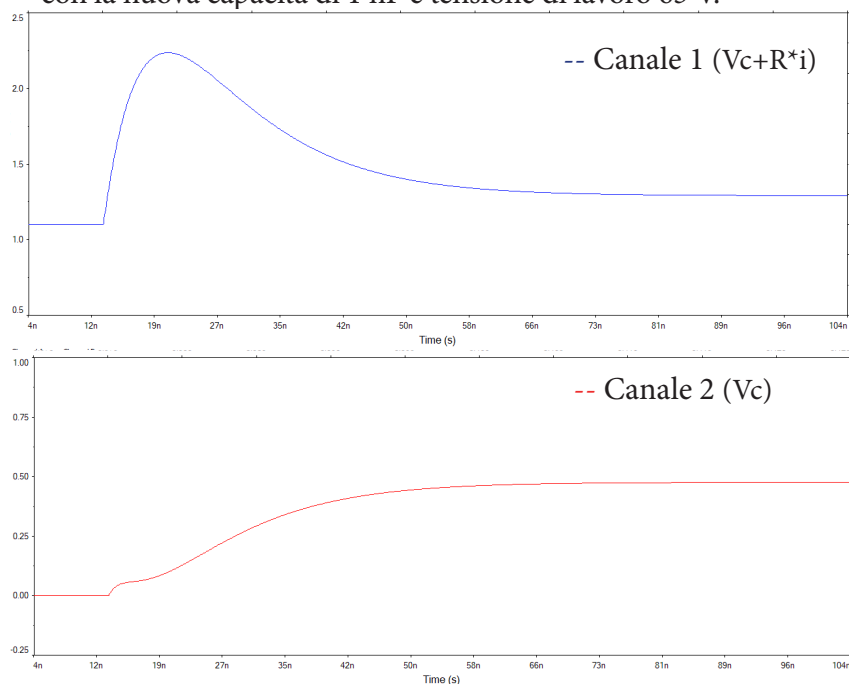


Fig. 7-22 Oscillogrammi relativi alla simulazione del circuito con una capacità di 1 nF ed induttanza pari al caso precedente

Dalle immagini di (Fig. 7-21) e (Fig. 7-22) si vede un netto miglioramento del profilo del gradino di tensione nella fase di salita, eliminando completamente l'undershoot e l'overshoot precedentemente presenti nella fase di salita, ed al contempo velocizzando la dinamica del sistema, dato il minor valore della costante di tempo del sistema RC.

Questo almeno con l'utilizzo del circuito calibratore auto-costruito e del generatore di funzioni.

In (Fig. 7-23) è riportato l'esito della prova eseguita con il calibratore Omicron sul dispositivo, nella sua portata di 50 pC.

La forma del gradino è comunque più che accettabile, ma comunque peggiore rispetto a quella vista precedentemente, a causa di alcune non idealità presenti anche nel dispositivo calibratore.

In particolar modo esso ha una resistenza interna molto ridotta, per permettere il trasferimento di carica nel minor tempo possibile, quindi l'effetto delle induttanze parassite sulla costante di tempo viene amplificato, portando alla formazione di quel lieve undershoot visibile.

Viste comunque le buone performance dimostrate da questa configurazione, si è pensato di cercare di ridurre la costante di tempo del sistema RC, riducendo il valore ohmico della resistenza, a 22  $\Omega$ .

Ciò comporta una lieve riduzione del tempo di salita del segnale, senza però permettere la ricostruzione fedele del gradino interno al calibratore.

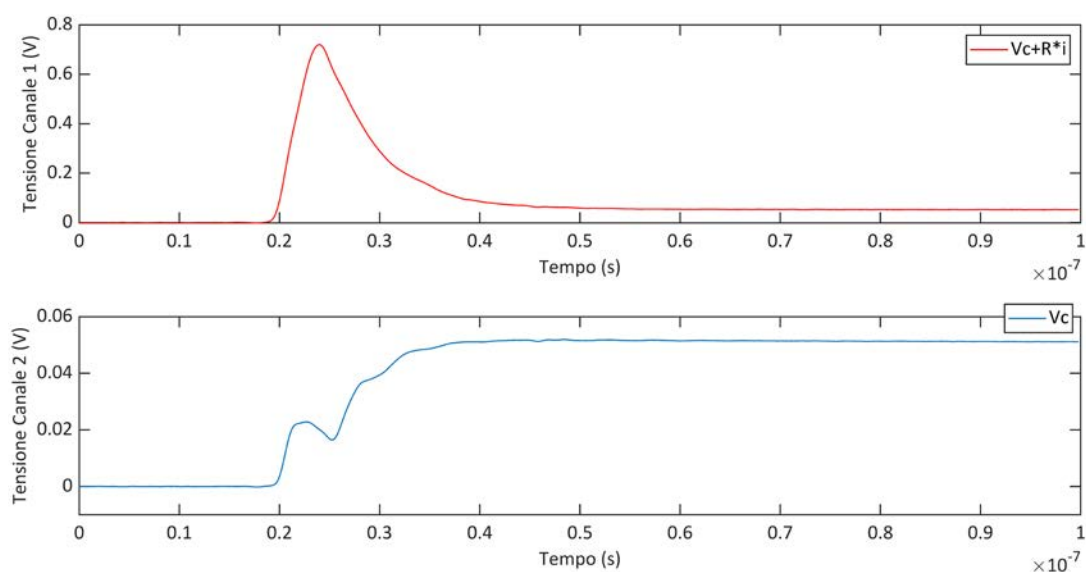


Fig. 7-23 Oscillogrammi relativi al calibratore Omicron CAL 542 nella portata + 50pC

Il risultato della simulazione in questo caso non rispecchia i risultati delle prove sperimentali, in esse il circuito dovrebbe mostrare un lieve andamento oscillatorio, che non si attua probabilmente a causa dell'impedenza interna del generatore e dei cavi di collegamento, oltre all'effetto di carico dell'oscilloscopio.

Nell'ottica di un'ottimizzazione del dispositivo, sarebbe possibile pensare di ridurre gli ingombri e utilizzare più capacità in parallelo per diminuirne l'induttanza, oltre a curare in modo scrupoloso il percorso e la lunghezza dei collegamenti.

Tuttavia, tra i due metodi visti, sembra consigliabile l'impiego del metodo ad integrazione numerica, che consente di raggiungere buoni risultati, comportando minori criticità durante la realizzazione del circuito di misura.

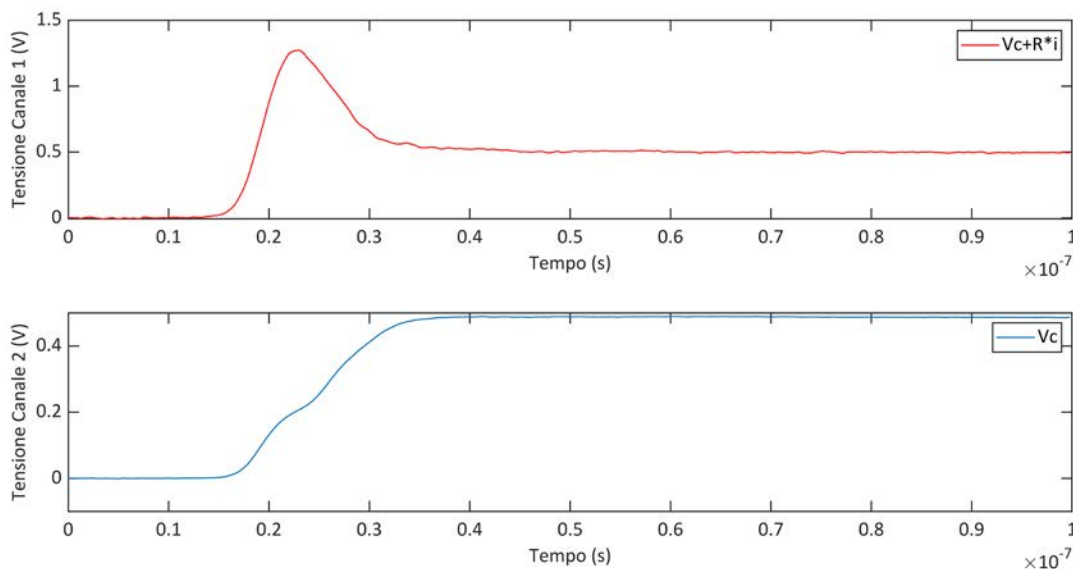


Fig. 7-24 Oscillogrammi relativi al calibratore auto-costruito nella portata + 500pC con la nuova capacità di 1 nF e tensione di lavoro 63 V e resistenza di 22  $\Omega$ .

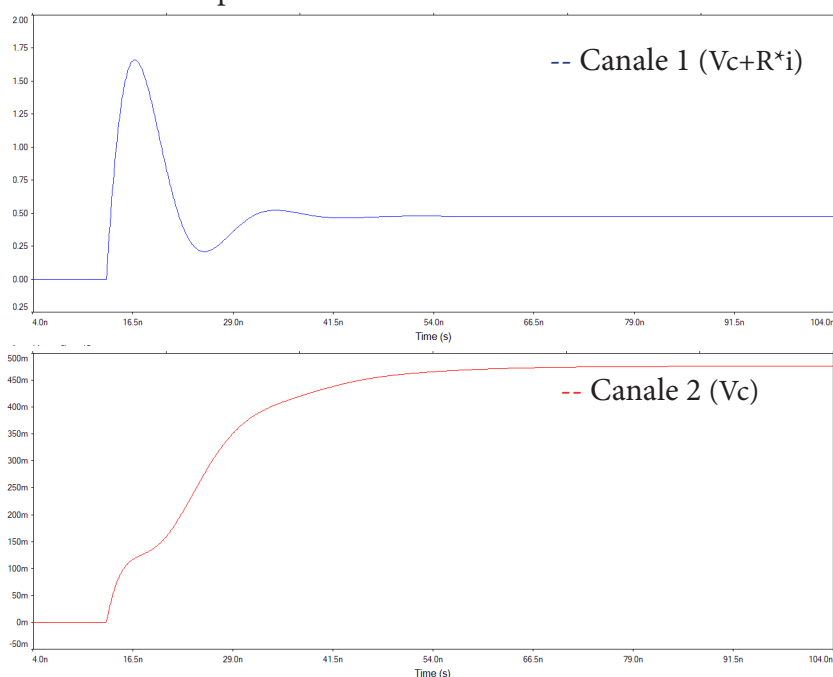


Fig. 7-25 Oscillogrammi relativi alla simulazione del circuito con una capacità di 1 nF e resistenza di 22  $\Omega$

## 7.3 Il sistema Techimp PD Base II

Il sistema PD base II è un sistema di acquisizione a banda ultra larga, che permette quindi di acquisire l'andamento della corrente dell'impulso di scarica parziale.

La scheda di acquisizione prevede 4 canali di ingresso, ciascuno con banda passante di 48 MHz ed una velocità di campionamento di 200 Ms/s ed un'ampiezza dei segnali accettabili fra 1 mVpp e 5 Vpp.

Nella configurazione a larghissima banda, lo strumento non è conforme alla norma IEC 60270, la valutazione dell'entità delle scariche parziali avviene in Volt.

È invece selezionabile una modalità a larga banda (115 ÷ 440 kHz), che permette allo strumento di essere calibrato ed eseguire la misura di carica apparente secondo la IEC 60270.

Le due modalità a larghissima banda (16 kHz ÷ 48 MHz) e (2.5 MHz ÷ 48 MHz) sono pensate per eseguire valutazioni diagnostiche, in quanto permettono di eseguire tools di analisi statistica e di classificazione mediante l'analisi tempo-frequenza dei segnali acquisiti.

La registrazione avviene nella scheda di acquisizione utilizzando la tecnica della segmentazione della memoria, rendendo possibile all'operatore la scelta della finestra temporale più idonea per catturare l'intero impulso.

Per correlare ciascun impulso all'angolo di fase corrispondente, sono presenti sulla scheda di acquisizione altri 4 ingressi dai quale viene acquisito un segnale proporzionale alla tensione di rete, qui l'acquisizione avviene in continuo, con una banda passante non superiore ad 1 kHz, ed un'incertezza tale da garantire, alla fine dell'elaborazione, un'incertezza d'angolo < di 1°.

L'interfaccia con l'operatore avviene tramite PC, al quale la scheda di acquisizione è connessa mediante fibra ottica, in modo da avere un'assoluta separazione galvanica fra l'operatore ed il lato alta tensione.

Il principale problema dello strumento, è quello di essere un sistema particolarmente chiuso, dal quale si possono estrarre i risultati delle elaborazioni, ma non direttamente i segnali acquisiti.



Fig. 7-26 Il sistema di acquisizione del sistema di misura Techimp PD base II  
(fonte: *techimp.com*)

### 7.3.1 Risposta dell'impedenza di misura Techimp

Assieme al sistema di misura viene fornita una impedenza di misura per permettere il collegamento del sistema di acquisizione con il circuito di alta tensione.

In essa avviene la separazione del segnale relativo alle scariche parziali dalla componente a frequenza industriale, inviate ai diversi ingressi del sistema di acquisizione.

All'interno è contenuto il circuito di (Fig. 7-27), si possono notare i due scaricatori in gas, li posti per proteggere l'elettronica della scheda di acquisizione da erronei collegamenti.

Il segnale di sincronismo viene prelevato attraverso un filtro passa basso del secondo ordine di tipo RLC.

Gli impulsi di scarica parziale, vengono separati dal resto, attraverso un filtro passa alto a tre celle, che può garantire una pendenza nella fase di transizione, fino a 60 dB/decade.

La resistenza finale da 50  $\Omega$  posta all'interno della scheda di acquisizione per terminare il cavo coassiale di collegamento è a tutti gli effetti parte del circuito di filtraggio.

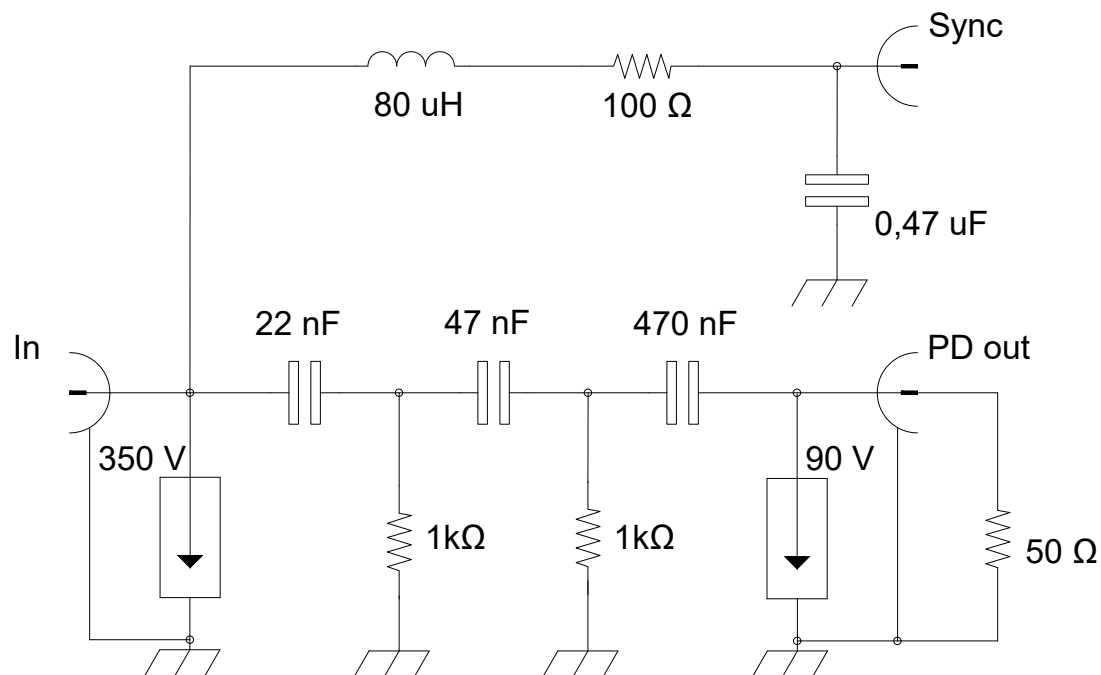


Fig. 7-27 Schema interno dell'unità di accoppiamento dello strumento



La valutazione della risposta in frequenza è stata eseguita per la sola uscita dedicata all'estrazione degli impulsi di scarica parziale.

Si è utilizzato un generatore di funzioni impostato per erogare una forma d'onda sinusoidale ed un oscilloscopio digitale per la valutazione congiunta dell'ampiezza del segnale in ingresso ed in uscita al circuito.

La variazione della frequenza è stata eseguita manualmente per step, mantenendo invece costante l'ampiezza picco-picco a circa 5 V.

Eseguendo il rapporto tra i due valori di ampiezza si ottiene il guadagno del filtro ad una data frequenza, poi espresso in dB per comodità di rappresentazione nel diagramma, al pari della scala logaritmica verso la frequenza.

Successivamente, per verificare l'esattezza della caratteristica trovata, noti i valori dei componenti del circuito, si è calcolata la risposta impulsiva della rete, quindi la risposta in frequenza.

Nel confronto tra le due, riportate in (Fig. 7-28), si nota un ottimo accordo.

La frequenza di taglio stimata a -6 dB ha portato ad un valore di circa 135 kHz.

Valore, che contrasta con le specifiche tecniche con cui viene accompagnato l'intero sistema di misura, in quanto il limite inferiore di frequenza a 16 kHz non sembra verosimile, data la limitazione posta dall'impedenza di misura.

Tuttavia, essendo le informazioni fornite piuttosto ridotte, potrebbe essere che quei valori siano riferiti alla sola scheda di acquisizione, e poi condizionate dal tipo di impedenza di misura con cui il sistema viene attrezzato.

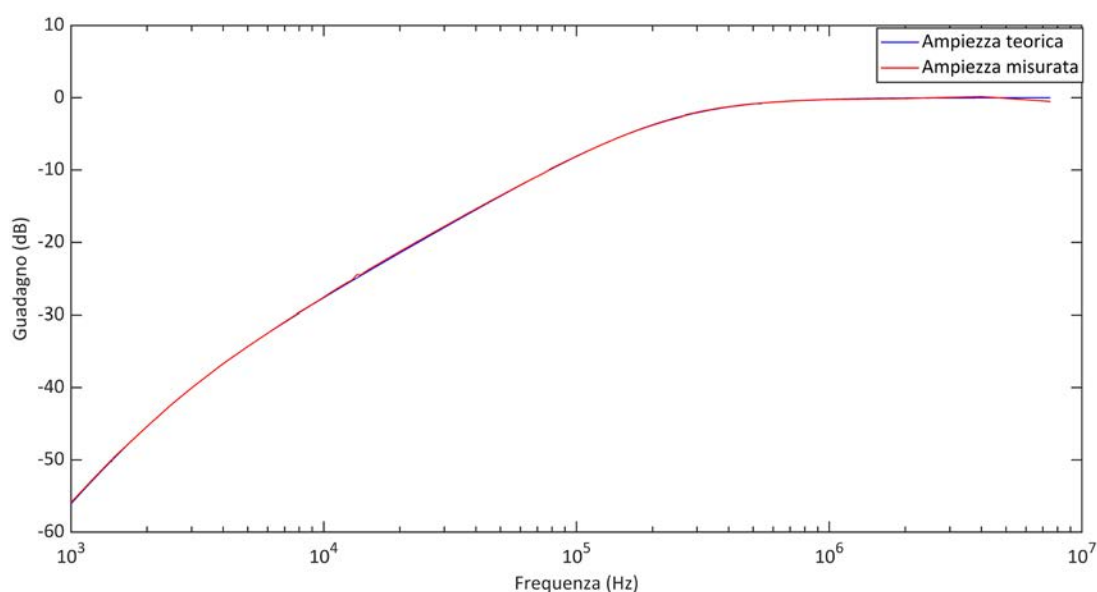


Fig. 7-28 Risposta in frequenza simulata e misurata dell'unità di accoppiamento Techimp

## 7.4 Analisi di unità di accoppiamento commerciali

Vista la disponibilità in laboratorio di alcune unità di accoppiamento di diversi sistemi di misura, si è pensato di studiarne brevemente la struttura, per comprenderne meglio le caratteristiche e il funzionamento.

Quella riportata in (Fig. 7-29) è lo schema circuitale di un unità di accoppiamento prodotta da Tettex per interfacciare un sistema di acquisizione digitale di sua produzione, con il circuito di alta tensione.

Essa, secondo lo schema classico, va a collegarsi con il circuito di alta tensione attraverso la capacità di accoppiamento.

Tutti gli ingressi e le uscite dell'unità sono protetti tramite scaricatori in gas, in modo da preservare i componenti interni e la strumentazione a valle, anche in caso di connessioni errate cedimento del componente in prova o della capacità di accoppiamento. L'unità in questione, attraverso la realizzazione di un partitore capacitivo con la capacità di accoppiamento stessa, consente di prelevare un segnale di sincronizzazione in fase con l'alta tensione applicata al circuito, per acquisire informazioni sull'angolo della tensione di rete.

Un commutatore permette di variare il rapporto di partizione dell'intero setup, agendo sul valore della capacità di bassa del divisore.

È importante che i condensatori inseriti per questo scopo non vengano visti dalle

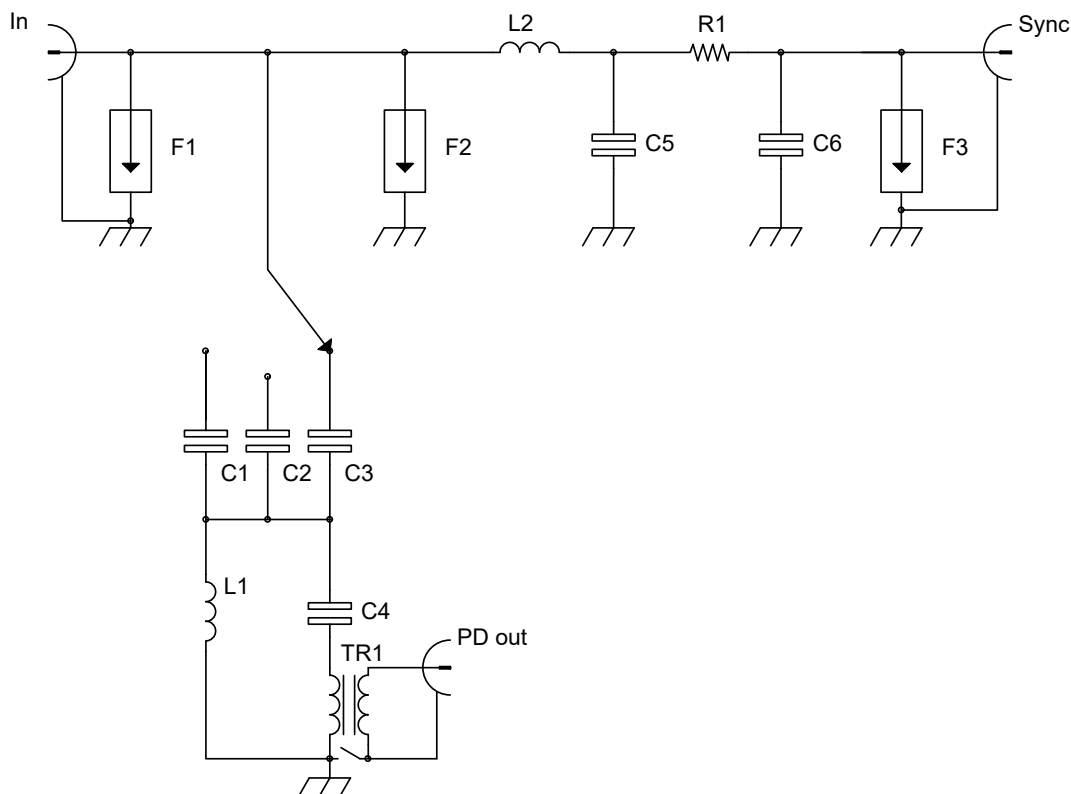


Fig. 7-29 Schema elettrico interno dell'unità di accoppiamento dello strumento

componenti in alta frequenza relative agli impulsi di scarica parziale, per evitare che, vista l'impedenza notoriamente bassa ad elevate frequenze, il segnale di corrente si richiuda interamente qui.

Viene attuata una separazione delle due diverse informazioni, ad opera del parallelo L1 e C4, che mostra una bassa impedenza attraverso l'induttore alla componente a frequenza industriale, mentre attraverso il ramo capacitivo permette agli impulsi di scarica parziale di raggiungere l'uscita ad essi destinata tramite il trasformatore d'impulso, progettato in modo tale da consentire al segnale impulsivo di transitarvi senza eccessiva distorsione, cioè in modo da presentare una larghissima banda passante. Questa è stata valutata in regime sinusoidale, con i risultati di (Fig. 7-30).

La banda passante propria della  $Z(f)$ , tenendo conto della valutazione tipicamente eseguita a -6 dB, va da circa 17 kHz a 6 MHz, estensione notevole, sfruttabile a pieno solamente dai sistemi di misura a larghissima banda.

Vista la contemporanea presenza di elementi L e C nella rete di filtraggio, la risposta mostra un overshoot prima della frequenza di taglio.

Il segnale di sincronismo è invece prelevato tramite un filtro passa-basso del terzo ordine, composto da due celle filtranti, una di secondo ordine ed una di ordine uno.

Uno switch permette di vincolare lo schermo del cavo di uscita a massa, oppure lasciarlo flottante, in modo da risolvere eventuali problemi di disturbi indotti tramite grand loop.

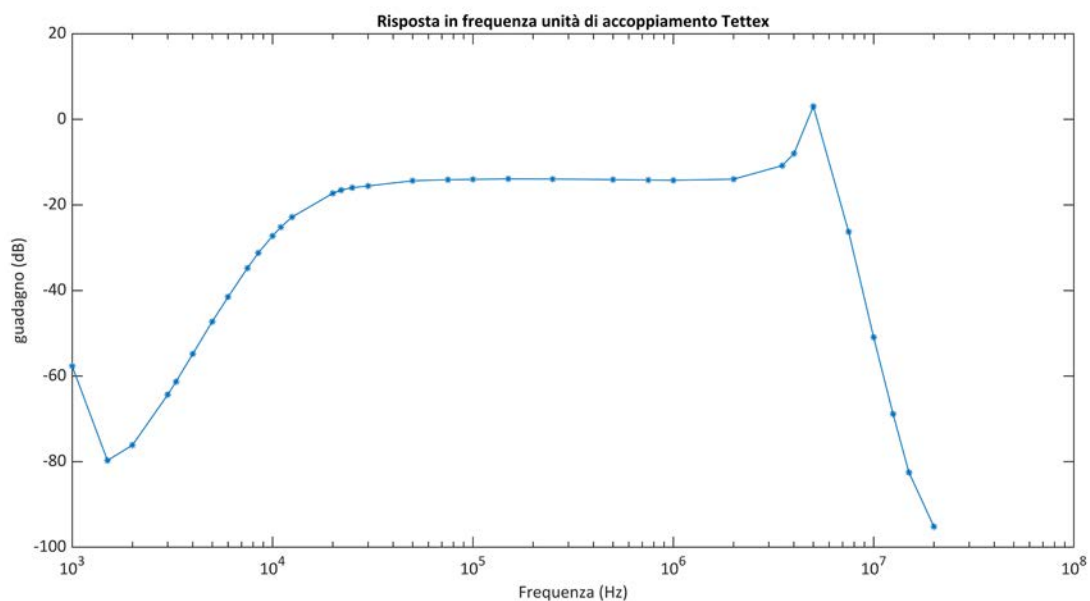


Fig. 7-30 Risposta in frequenza simulata e misurata dell'unità di accoppiamento Tettex

Una seconda unità di accoppiamento esaminata è stata prodotta da Pesco AG, questa, a differenza della precedente, utilizza un unico cavo per interfacciarsi alla strumentazione di misura.

All'interno il segnale relativo alle scariche parziali e quello relativo alla sincronizzazione con la tensione di rete, vengono nuovamente miscelati in uscita attraverso la circuiteria rappresentata in (Fig. 7-31).

Può sembrare strano realizzare un'unità per dividere e poi miscelare i due segnali.

Il motivo per cui questa tecnica viene utilizzata è quello di fare in modo che l'impedenza di ingresso vista dalle due diverse componenti sia molto diversa.

La componente in bassa frequenza deve vedere un'impedenza fondamentalmente capacitiva, legata al valore di C1, in modo da formare un divisore capacitivo con la capacità di accoppiamento sul lato alta tensione.

La componente in alta frequenza passa attraverso il filtro a due celle L-C, fino a giungere al trasformatore d'impulso che la porta verso l'uscita.

A secondario, viene sommata l'informazione relativa alla sincronizzazione della tensione di rete, filtrata attraverso un filtro passa banda di tipo RLC.

In (Fig. 7-32) è rappresentata la risposta in frequenza della rete.

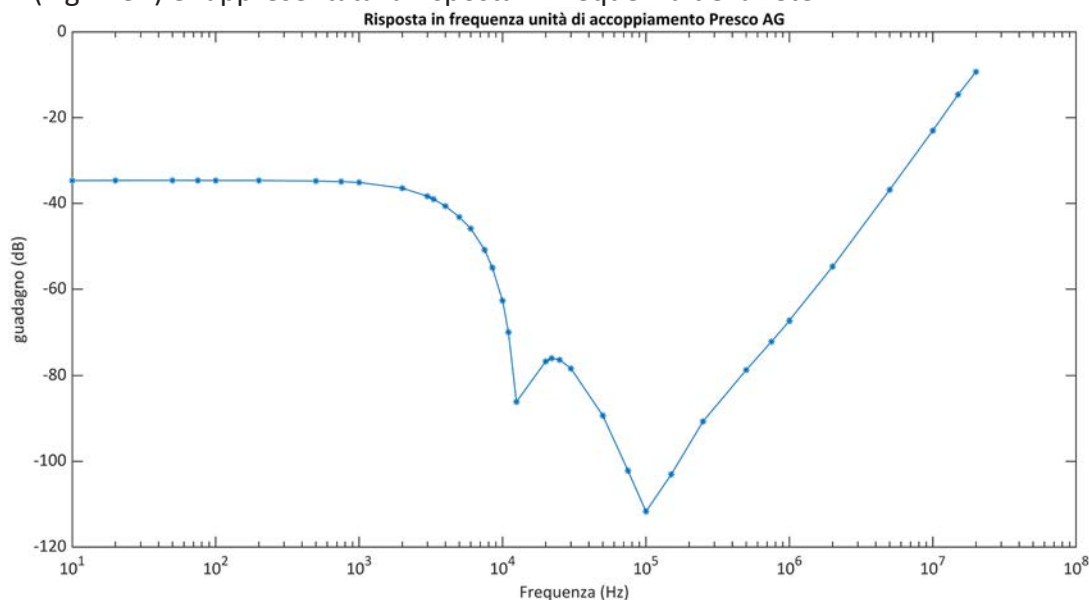


Fig. 7-32 Risposta in frequenza simulata e misurata dell'unità di accoppiamento Pesco AG

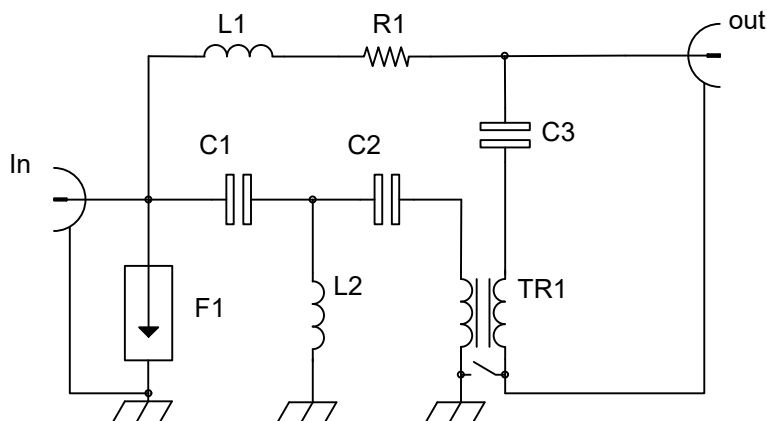


Fig. 7-31 Schema elettrico interno dell'unità di accoppiamento dello strumento

## 7.5 Il sistema di acquisizione con Buffer

All'interno del lavoro di ricerca svolto in [69] presso il laboratorio di alte tensioni dell'Università di Padova è stato realizzato un sistema di acquisizione a banda ultra-larga, in quel caso finalizzato allo studio dei fenomeni di scariche parziali entro i trasformatori isolati in resina epossidica.

Viste le buone prestazioni dimostrate e le grandi possibilità offerte in termini di libertà nell'acquisizione dei dati, si è pensato di riutilizzarlo per una applicazione diversa da quella natia.

Il sistema si compone di due canali di acquisizioni uguali, ognuno dei quali formato da due elementi: uno contenente uno shunt ed un filtro passa alto, l'altro contenente la circuiteria attiva (Fig. 7-33).

L'acquisizione dei segnali avviene grazie all'utilizzo di un oscilloscopio digitale, con adeguate caratteristiche di banda passante e velocità di campionamento, ma con possibilità di estrarre tutti i dati registrati senza limitazioni.

Le successive operazioni di elaborazione, sono svolte tramite algoritmi sviluppati in Matlab, basandosi sui dati grezzi provenienti dalla fase precedente.

Lo sviluppo di questa strumentazione è stata in realtà dettata dalla necessità di disporre di mezzi flessibili per lo studio delle scariche parziali.

Molto spesso i sistemi di acquisizione di tipo commerciale, pur promettendo prestazioni migliori dell'oggetto qui descritto, sono di tipo chiuso.

Non consentono quindi all'operatore di accedere ai dati direttamente derivanti dall'acquisizione, ma, solamente tramite il software proprietario, di visualizzare i risultati delle elaborazioni compiute dai loro, spesso non ben precisati, algoritmi.

Questo approccio, specie in fase di studio, è molto limitante, perché presuppone una cieca fiducia nel costruttore dello strumento e del software, vietando o rendendo assai difficoltosa una valutazione critica dei risultati da essa fornita, riducendo così enormemente le potenzialità di sistemi, che dal punto di vista hardware presenterebbero caratteristiche di tutto rispetto.

Nel caso di misure svolte in contesti industriali, questi strumenti sono invece particolarmente apprezzati, perché, data l'enorme semplificazione dell'utilizzo, rendono praticamente nulla la possibilità di errore da parte dell'operatore e molto più rapida la misura.



Fig. 7-33 Una delle due unità del sistema di acquisizione realizzato in [69]

## 7.5.1 Shunt e filtro passa alto

Nel primo blocco, la cui struttura è presentata in (Fig. 7-34), sono alloggiati i componenti passivi (Fig. 7-35).

Uno Shunt attua la conversione corrente-tensione del segnale, utilizzando un resistore a filo in esecuzione anti-induttiva di valore  $100\ \Omega$ .

Occorre prestare attenzione alla potenza dissipabile da tale elemento, poiché esso viene attraversato, oltre che dalle correnti dovute alle scariche parziali, generalmente di piccola entità, anche dalla componente a frequenza industriale che attraversa la capacità di accoppiamento.

Successivamente un filtro passa alto del terzo ordine provvede a lasciar passare solamente il segnale dovuto agli impulsi di scarica parziale, eliminando la componente alla frequenza industriale e sue armoniche.

Le scariche parziali, nonostante l'utilizzo di un resistore di shunt con un valore ohmico piuttosto elevato, provocano una caduta di tensione di qualche decina di mV su questo.

Osservando l'interno del dispositivo in (Fig. 7-35) si nota istantaneamente la generosa dimensione del resistore di Shunt a filo di tipo non induttivo, perché realizzato con tecnica Ayrton-Perry, ovvero avvolgendo su uno stesso supporto due fili in parallelo con direzione opposta.

Diviene molto importante la scelta della frequenza di taglio, tale da escludere completamente le grandezze di rete ed armoniche, ma al contempo non ridurre troppo l'energia associata agli impulsi di scarica parziale.

In quest'ottica è sicuramente una valida scelta quella di adoperare un filtro di terzo ordine, dove la transizione tra la zona di taglio e la zona di banda passante è molto ripida, con una pendenza fino a  $60\ \text{dB/decade}$ .

Analogamente a quanto fatto per l'unità di accoppiamento dello strumento Techimp, anche in questo caso è stata valutata la risposta in frequenza in termini di guadagno del filtro e successivamente confrontata con una simulazione al calcolatore (Fig. 7-36).

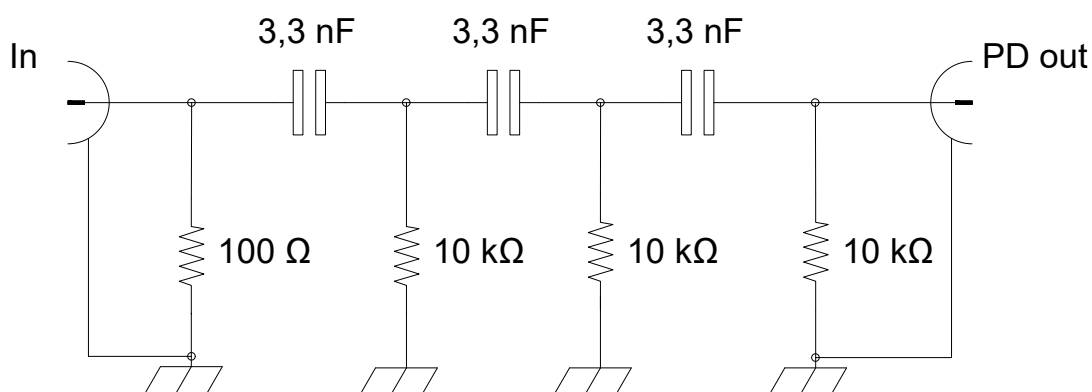


Fig. 7-34 Schema circuitale interno dello shunt e del filtro passa-alto

Ricavando un valore della frequenza di taglio stimata a -6 dB di circa 150 kHz. Dall'analisi del diagramma di Bode si può osservare una buona corrispondenza fra il modello teorico e le grandezze misurate, le differenze sono assolutamente giustificabili, poiché all'interno della funzione di trasferimento sono stati inseriti i valori nominali dei componenti, non tenendo conto delle tolleranze di produzione degli stessi.

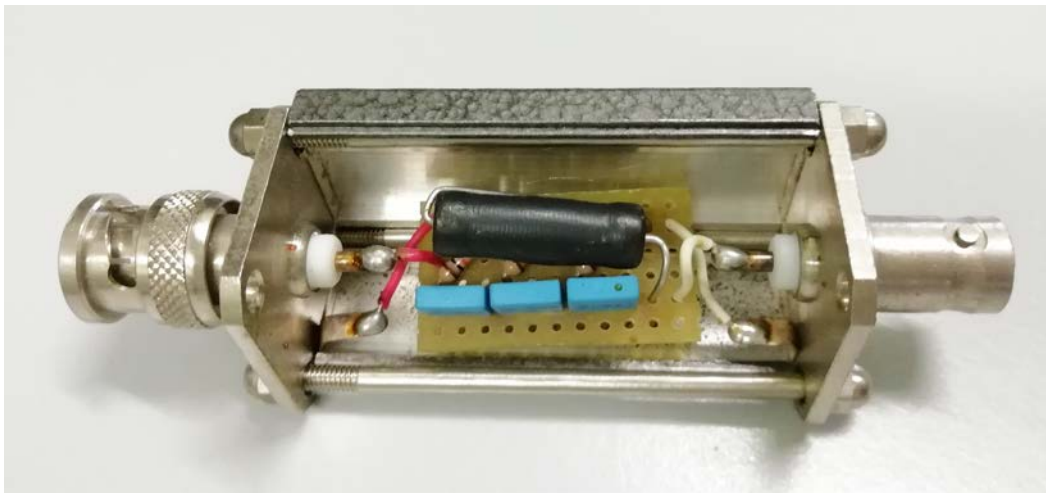


Fig. 7-35 Vista interna dell'unità contenente lo Shunt e il filtro passa alto

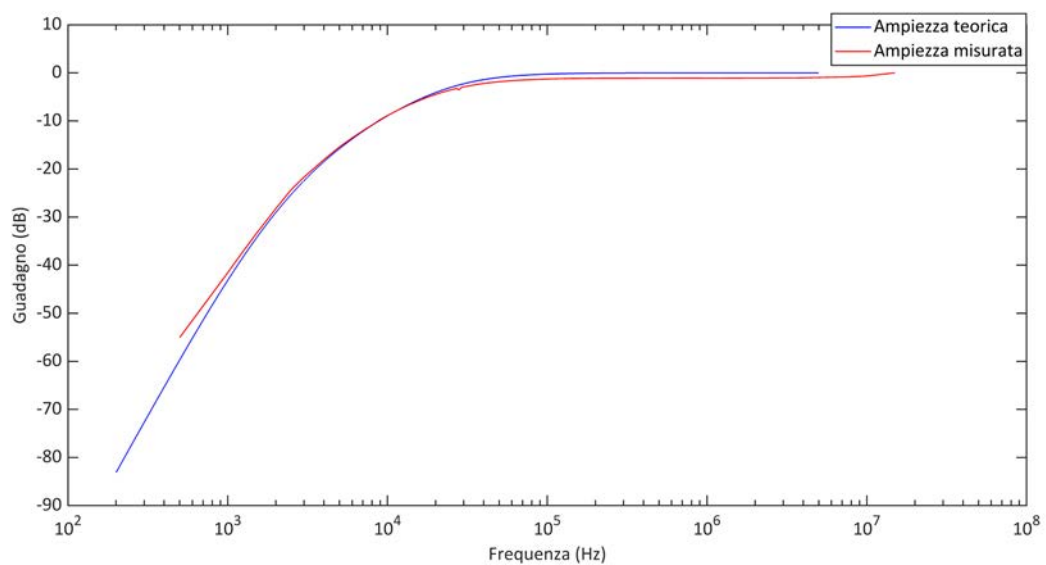


Fig. 7-36 Risposta in frequenza simulata e misurata del filtro a tre celle passa alto

## 7.5.2 Inseguitore di tensione a larghissima banda

Il segnale proveniente dallo shunt e dal filtro, deve essere inviato alla strumentazione di acquisizione, su cui l'operatore agisce, e quindi, posta a debita distanza dalle apparecchiature di alta tensione e collegata ai rivelatori a mezzo di cavo coassiale.

Cavo che deve essere opportunamente pilotato e terminato per evitare riflessioni lungo il percorso.

Allo stesso modo occorre preservare l'oscilloscopio digitale, anello più pregevole della catena, dal fatto che connessioni errate o cedimento di un componente sul lato di alta tensione, possano distruggere lo strumento.

Per cercare di separare i due diversi circuiti è stato inserito un inseguitore di tensione. Anziché utilizzare un comune amplificatore operazionale, la scelta è ricaduta su un dispositivo integrato nato proprio per assolvere alla funzione di Buffer (LH 033), con spiccate doti di velocità ( $1500 \text{ V}/\mu\text{s}$ ) ed un'ampia banda passante (100 MHz), in modo da ridurre al minimo la distorsione introdotta sul segnale (Fig. 7-37).

L'impedenza di ingresso del buffer è di circa  $10^{10} \Omega$ , valore elevatissimo, che è stato ridotto inserendo in parallelo una resistenza da  $10 \text{ M}\Omega$ , per azzerare il segnale nel caso in cui venga scollegato l'ingresso, senza comunque caricare il filtro a tre celle, e quindi alterarne la risposta.

L'alimentazione è di tipo duale ( $\pm 12 \text{ V}$ ) fornita da un alimentatore comune a tutti i canali di acquisizione usati nel sistema.

Vi è inoltre la possibilità, agendo sul piedino 7 del circuito integrato, di correggere eventuali offset presenti, nel nostro caso, con la taratura di un piccolo trimmer previsto allo scopo.

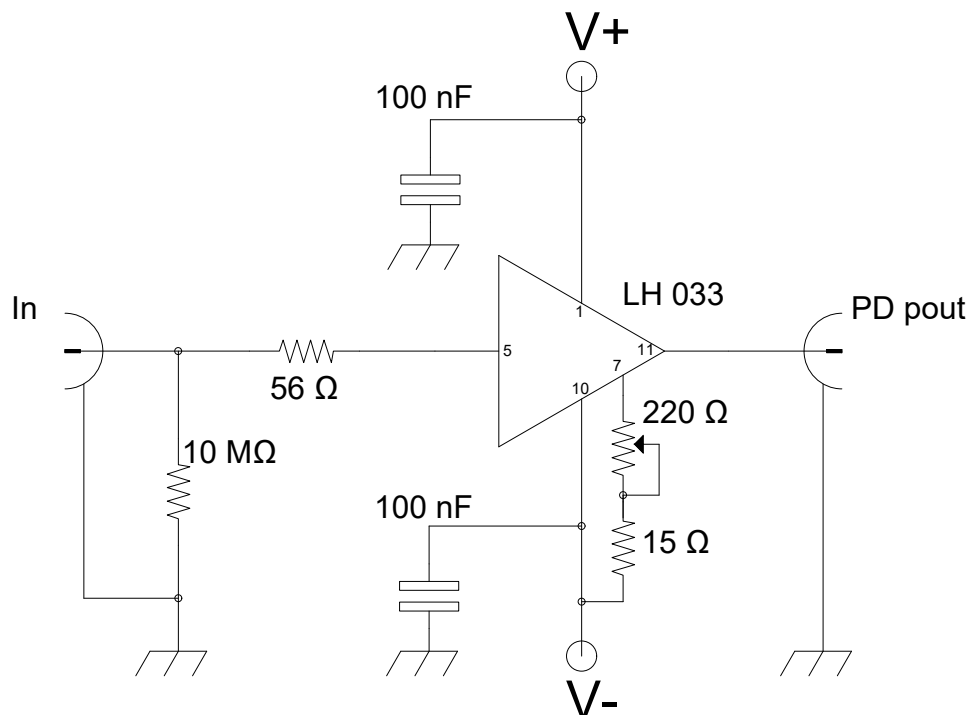


Fig. 7-37 Schema circuitale dello stadio inseguitore di tensione



Anche per lo stadio inseguitore di tensione è stata valutata la risposta in frequenza (Fig. 7-39), si può notare come il guadagno non sia perfettamente piatto entro la banda passante, ma presenti lievi oscillazioni, amplificate dalla visualizzazione logaritmica del diagramma.

Il valore stesso del guadagno assunto entro la banda passante non è unitario come previsto, ma si attesta a circa 0,9.

La sorpresa più amara è stata sul valore di banda passante del circuito, che, a giudicare dal diagramma, non può essere effettivamente di 100 MHz, ma di poco superiore a 20, confermando così, che oltre alle prestazioni del circuito integrato utilizzato è fondamentale un'attenta progettazione del PCB per limitare l'effetto dei parametri parassiti.

In ogni caso, quanto rilevato, seppur inferiore alle aspettative è più che bastevole per i nostri scopi di misura, giacché gli impulsi di scarica parziale sviluppati entro la macchina hanno generalmente estensione spettrale compatibile con questo limite.



Fig. 7-38 Vista interna dello stadio inseguitore di tensione basato su LH 033

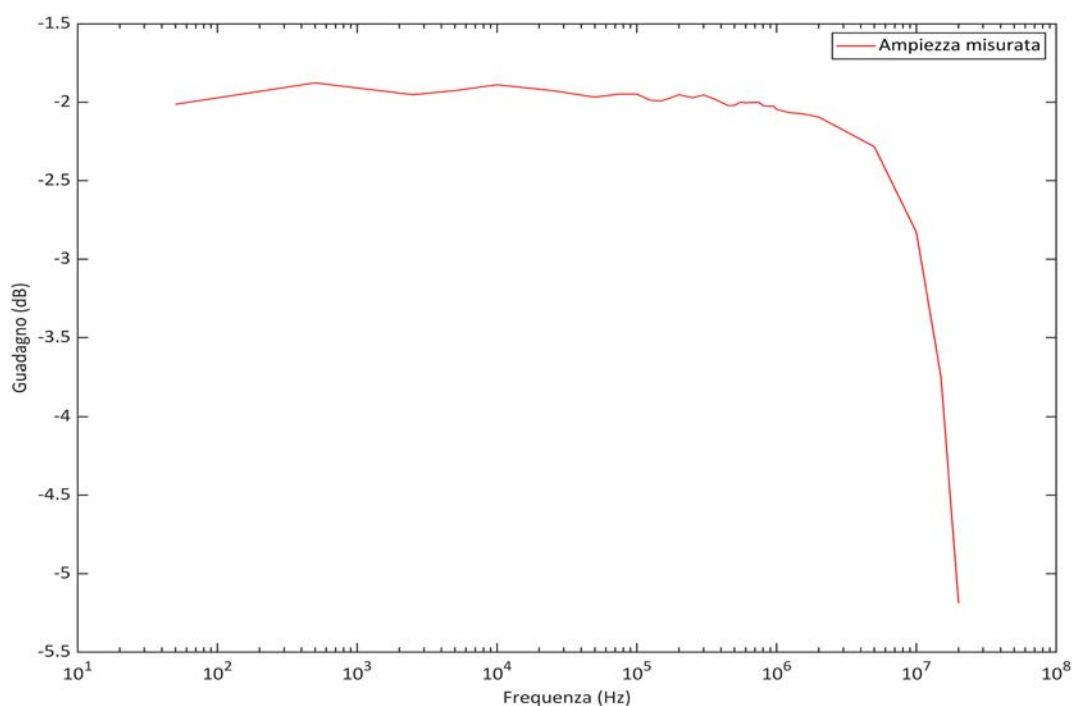


Fig. 7-39 Risposta in frequenza dell'inseguitore di tensione basato su LH 033



# 8

## Risultati delle prove

In questo capitolo verranno presentate le modalità con cui sono state eseguite le prove sperimentali e commentati i risultati da queste ottenuti.

La configurazione strumentale è stata di volta in volta adeguata alle caratteristiche dell'oggetto in prova, scegliendo tra le diverse soluzioni possibili in fatto di dispositivi di misura e topologia del circuito realizzato, in modo da ottimizzare la sensibilità del sistema, rispetto al livello di scariche parziali ipotizzabili nell'oggetto.

Non è stato fin da subito possibile eseguire la misurazione su uno statore completo di una macchina, viste le notevoli dimensioni non compatibili con quelle della sala prove a disposizione.

Si è dapprima cercato di prendere confidenza con la strumentazione e le tecniche di misura ed analisi, su componenti di queste, come ad esempio singole matasse, oppure oggetti con un comportamento propagatorio simile, come per esempio un lungo spezzone di cavo di media tensione.

Nel quale è tuttavia possibile osservare solamente gli effetti della propagazione lenta attraverso il mezzo trasmissivo, e non gli accoppiamenti veloci presenti nelle macchine.

Fino poi ad applicare quanto appreso su alcuni statori interi di un grandi macchine rotanti, sincrone ed asincrone, recandosi presso la sede di un'azienda operante nel settore delle riparazioni elettromeccaniche, che gentilmente ne ha concesso l'uso.

Parte fondamentale è stata la successiva analisi numerica dei segnali acquisiti, in modo da ricavare pattern degli eventi di scarica parziale in funzione della fase della tensione di rete o del contenuto tempo-frequenza, in modo da cercare di distinguere le diverse cause di scarica parziale all'interno dell'oggetto.

La distinzione dei diversi fenomeni in atto dovrebbe consentire una stima della pericolosità di questi per il sistema isolante, e quindi, valutandone l'evoluzione su lunghi periodi, cercare di capirne lo stato di salute.

## 8.1 Valutazione del tempo di propagazione

In questa prova, si è voluto valutare il tempo di propagazione degli impulsi di scarica parziale all'interno di una sezione di cavo di media tensione con tensione di riferimento per l'isolamento 24kV di tipo RG7H1R con una lunghezza di circa 16 metri, più le due terminazioni.

Per questa prova è stato utilizzato il sistema di misura auto costruito, con due buffer LH0033 posti rispettivamente all'inizio ed alla fine dello spezzone di cavo.

Essendo il cavo in buone condizioni, quindi non soggetto a scariche parziali di apprezzabile entità, se energizzato, gli impulsi di scarica parziale sono stati iniettati ad un estremità, impiegando il calibratore OMICRON CAL 542, ad un livello di 100 pC, che, dall'esperienza maturata, dovrebbero portare ad un'ampiezza del segnale ben rilevabile sull'oscilloscopio.

In (Fig. 8-1) è riportato lo schema circuito utilizzato per la prova.

Nonostante non sia stata applicata l'alta tensione è stato comunque lasciato il collegamento con il trasformatore elevatore, per simulare in modo più realistico possibile una vera misura di scariche parziali.

Le due capacità di accoppiamento hanno un valore di 1,5 nF, mentre lo shunt di misura ha una resistenza pari a 100  $\Omega$ .

Il cavo ha una capacità verso terra di 2.25 nF, che con l'ausilio della eq. 3.9, dovrebbe portare ad un gradino di tensione di circa 20 mV sull'intero sistema osservato.

Per garantire una corretta valutazione dell'intervallo temporale necessario alla propagazione dell'impulso lungo il cavo, la connessione fra i due punti di misura e l'oscilloscopio è stata realizzata utilizzando due cavi coassiali di pari lunghezza.

Sarebbe stato possibile evitare questa cautela ricorrendo alla compensazione del ritardo sull'oscilloscopio mediante la funzione deskeew e la conoscenza del ritardo introdotto su uno dei due segnali da parte della maggior lunghezza di cavo coassiale, circa 5 ns/m, più che rilevanti in questo genere di applicazione.

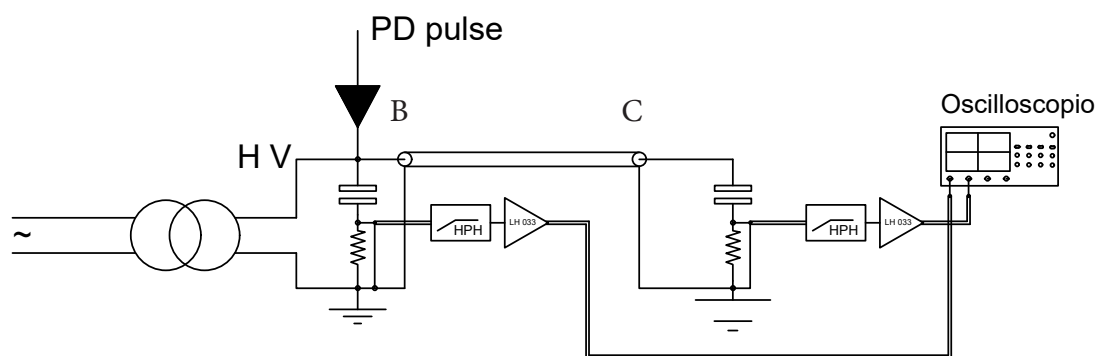


Fig. 8-1 Schema circuitale utilizzato per la prova

Le due lettere B e C indicano le due terminazioni del cavo, alle quali è stato alternativamente iniettato l'impulso di calibrazione.

Sull'oscilloscopio sono visualizzati ed acquisiti i due segnali provenienti dai due diversi punti di misura.

In (Fig. 8-2) è riportato l'oscillogramma acquisito nel caso di iniezione di un impulso di carica apparente di 100 pC nel punto B (lato di alimentazione del cavo).

Da essa si può notare come, l'impulso di partenza, evidenziato con un asterisco, giunga al termine della linea con ritardo e un'attenuazione, dove viene poi riflesso.

Molto prima del raggiungimento del termine della linea, si può osservare la presenza di una riflessione negativa, dovuta alla capacità di accoppiamento connessa alle due terminazioni, che al transitorio veloce, si comporta come un corto circuito.

Il tempo di transito lungo la linea, stimato come distanza temporale tra i due punti contrassegnati con un asterisco, per questa misura, ha fornito un valore di 98,5 ns.

Valore che verrà poi commentato e valutato, ma che in prima analisi dovrebbe essere piuttosto attendibile.

La prova è stata ripetuta in modo contrario, iniettando la carica apparente di calibrazione in C e valutando il tempo necessario all'impulso per giungere in B.

Osservando l'oscillogramma riportato in (Fig. 8-3) e confrontandolo con il precedente, si possono notare alcune differenze.

Dovute principalmente al maggior tempo di propagazione necessario alla riflessione positiva prodotta dall'avvolgimento del trasformatore, per giungere al punto di iniezione.

Anche in questo caso i due punti ritenuti significativi per la valutazione del tempo di transito dell'onda, sono stati contrassegnati con un asterisco. La loro differenza temporale porta ad un tempo di 102 ns.

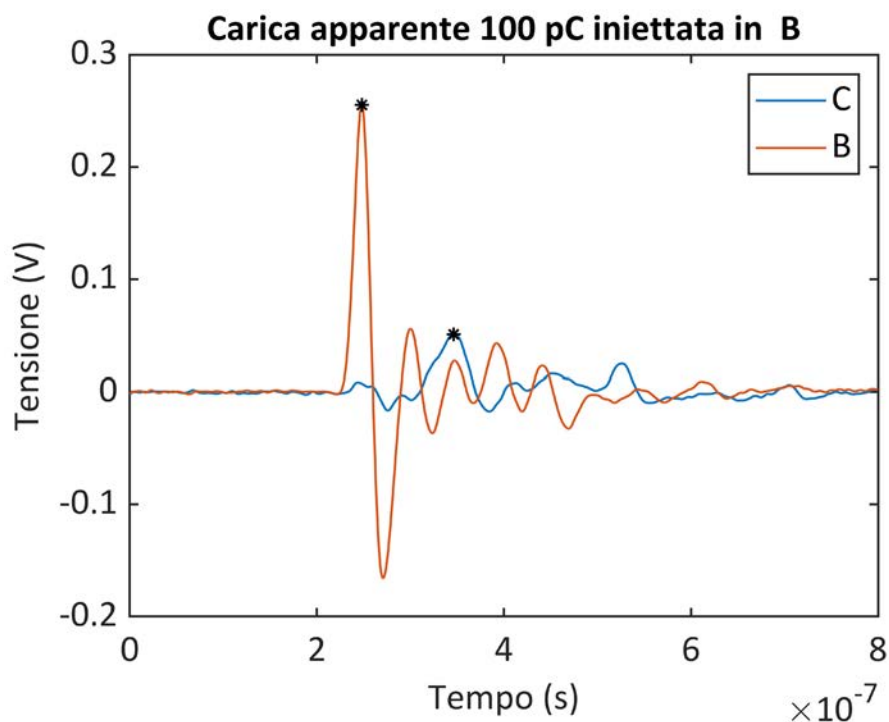


Fig. 8-2 Oscillogrammi acquisiti con l'iniezione di un impulso di calibrazione di carica 100 pC nel punto B

La valutazione dei parametri attinenti alla propagazione dei fenomeni ondulatori entro i diversi mezzi trasmissivi, è molto utile per capire di più su come le scariche parziali vengono modificate nel loro percorso dal luogo di origine a quello di misurazione. In questo tragitto vengono modificate nella forma, portando con se informazioni sulla distanza tra il luogo di origine e quello di rilevazione.

Il tempo di ritardo è appunto uno dei primi e più classici indicatori.

La propagazione di un onda elettromagnetica avviene con una velocità  $v$  dipendente dalle caratteristiche del mezzo trasmissivo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad \text{eq. 8.1}$$

Come risultato particolare, nel vuoto, l'onda si propaga alla velocità della luce  $c$ :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \simeq 300 \text{ m/us} \quad \text{eq. 8.2}$$

Nel caso in questione, dopo una ricerca in letteratura, si è visto che il cavo in questione dovrebbe avere un isolante con costante dielettrica relativa  $\approx 3$ , quindi nel caso esaminato, la velocità di propagazione all'interno del mezzo dovrebbe essere pari a:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} \simeq 173 \text{ m/us} \quad \text{eq. 8.3}$$

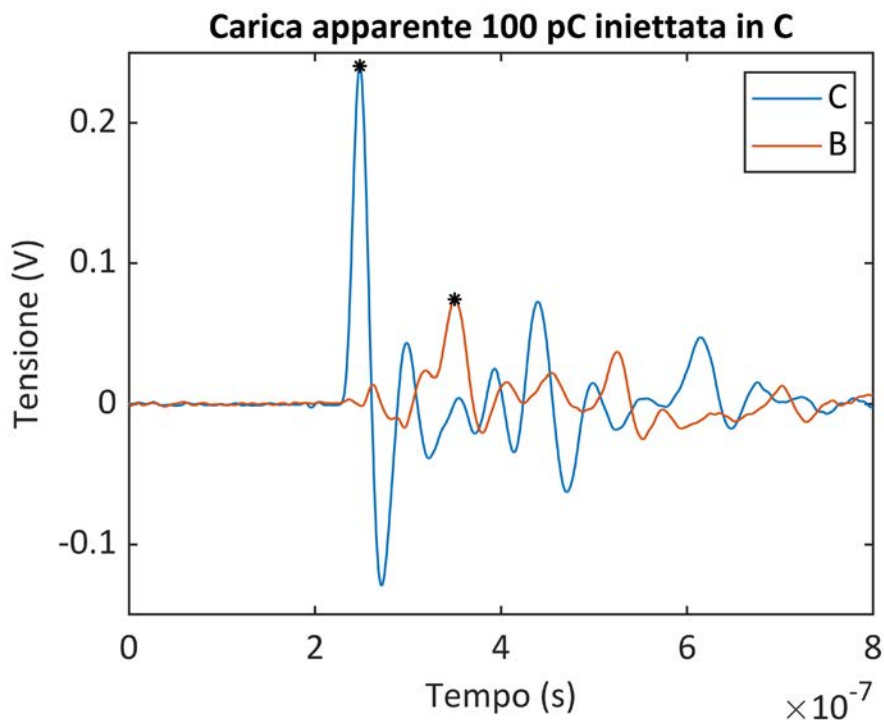


Fig. 8-3 Oscillogrammi acquisiti con l'iniezione di un impulso di calibrazione di carica 100 pC nel punto C

Ciò spiega come una lunghezza di circa 17 metri, compresa la parte necessaria per realizzare le terminazioni, richieda all'onda un tempo di circa 100 ns per propagarsi da un estremo all'altro.

Una valutazione specifica della velocità e dell'impedenza d'onda è stata condotta anche sullo spezzone di cavo in uso.

Mediante un LCR meter, sono stati misurati i valori della capacità trasversale e dell'induttanza longitudinale del cavo, portando ai valori di (Tab. 8-1), desunti scegliendo diverse frequenze di lavoro dello strumento per eseguire la misura.

Assumendo mediamente un valore di C di 0.002  $\mu$ F e per L 0.005 mH, si ottengono rispettivamente i seguenti valori per il tempo di transito e per l'impedenza caratteristica:

$$t = \sqrt{LC} = \sqrt{0.002 \cdot 10^{-6} \cdot 0.005 \cdot 10^{-3}} \simeq 100 \text{ ns} \quad \text{eq. 8.4}$$

$$v = \frac{l}{\sqrt{LC}} = \frac{17}{\sqrt{0.002 \cdot 10^{-6} \cdot 0.005 \cdot 10^{-3}}} \simeq 173 \text{ m/us} \quad \text{eq. 8.5}$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0.005 \cdot 10^{-3}}{0.002 \cdot 10^{-6}}} \simeq 50 \Omega \quad \text{eq. 8.6}$$

Si scopre quindi un valore dell'impedenza caratteristica, di 50  $\Omega$ , pari a quella utilizzata per i cavi coassiali di segnale, per i quali è noto un ritardo di propagazione di 5 ns/m similmente a quanto qui osservato.

Nelle prove di ricerca guasti sui cavi e nel caso di misura di scariche parziali su questi, una tecnica basata sull'analisi delle riflessioni prodotte lungo la linea trasmissiva ogni qualvolta vi sia una discontinuità è la TDR (Time Domain Reflectometry).

Frequenza di misura	Capacità C	Induttanza L
(kHz)	(nF)	( $\mu$ H)
10	2.06	5.31
25	2.04	5.14
75	2.04	5.03
100	2.04	5.00

Tab. 8-1 Misurazione della capacità e dell'induttanza del cavo

Per fare questo viene iniettato un impulso o un gradino all'interno della linea con un generatore di funzioni e contemporaneamente con l'oscilloscopio si osserva la tensione alla terminazione di ingresso.

I generatori di funzione hanno solitamente impedenza interna di  $50 \Omega$ , per cui, su una generica linea di trasmissione, si possono osservare sia fenomeni di riflessione, sia di rifrazione all'ingresso nel mezzo o nel passaggio tra mezzi con diverse caratteristiche. In (Fig. 8-4) è riportato uno schema di principio del setup per questo tipo di prova. Iniettando all'interno della linea una tensione con ampiezza  $v_i$  ed indicando con  $v_{ref}$  la sua riflessione, viene definito indice di riflessione il rapporto:

$$\rho = \frac{v_{ref}}{v_i} \quad \text{eq. 8.7}$$

Tale indice può assumere valori compresi fra  $\pm 1$ .

Nel caso in cui al termine della linea sia posta una impedenza di valore costante, esso può essere riscritto in funzione della caratteristica del carico  $Z_L$  e dell'impedenza d'onda della linea  $Z$ :

$$\rho = \frac{Z_L - Z}{Z_L + Z} \quad \text{eq. 8.8}$$

Nel caso particolare in cui la linea risulti adattata, ovvero l'impedenza del carico applicati corrisponda a quella caratteristica, l'indice di riflessione assume valore 0, mostrando come l'onda incidente non subisca alcuna riflessione, ma dissipi interamente la sua energia sul carico.

Nel caso in cui la linea sia posta in corto circuito, l'indice assume valore -1, si è quindi in presenza di una riflessione negativa, che va ad opporsi alla tensione incidente.

Se la linea viene lasciata aperta, l'indice assume valore +1, si è quindi in presenza di una riflessione positiva, che va a rafforzare l'ampiezza della tensione applicata.

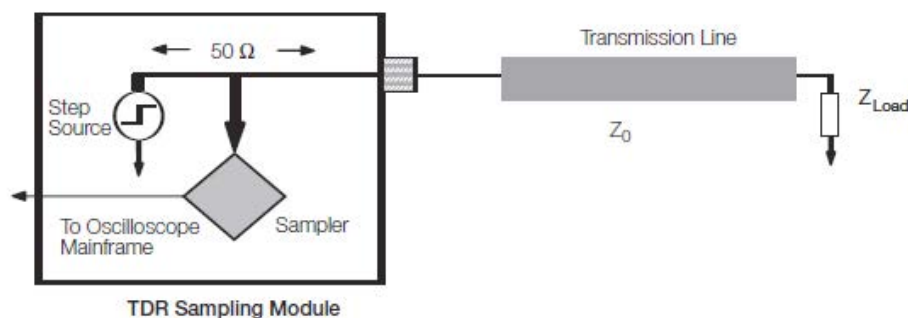


Fig. 8-4 Circuito per l'applicazione del metodo TDR su una linea trasmissiva  
(fonte: tektronix.com)



In (Fig. 8-5) sono riportati gli oscillogrammi relativi al caso di corto-circuito e di linea a vuoto.

In entrambi i casi, vi è un intervallo temporale di ampiezza  $2T_p$  rispetto all'istante di applicazione del gradino, nel quale il circuito di alimentazione vede l'impedenza caratteristica della linea, non avendo ancora ricevuto l'informazione di ritorno su qual'è lo stato all'altra terminazione.

Il valore di tensione  $V$  è dettato dal rapporto di partizione tra l'impedenza interna del generatore e quella della caratteristica linea trasmissiva.

La misura dell'ampiezza temporale  $2T_p$  fornisce invece il valore del tempo di andata e ritorno dell'informazione lungo la linea, doppio rispetto al tempo di propagazione.

La (Fig. 8-6) riporta invece il caso della linea ben terminata e terminata in modo errato. Si nota come un'esatta terminazione porta ad aver il minimo tempo di salita del gradino, rispetto ai casi precedenti, raggiungendo direttamente il valore di regime.

L'errata terminazione può essere causa di rifrazioni positive o negative, a seconda che l'impedenza inserita sia più elevata o più piccola, rispetto a quella caratteristica della linea.

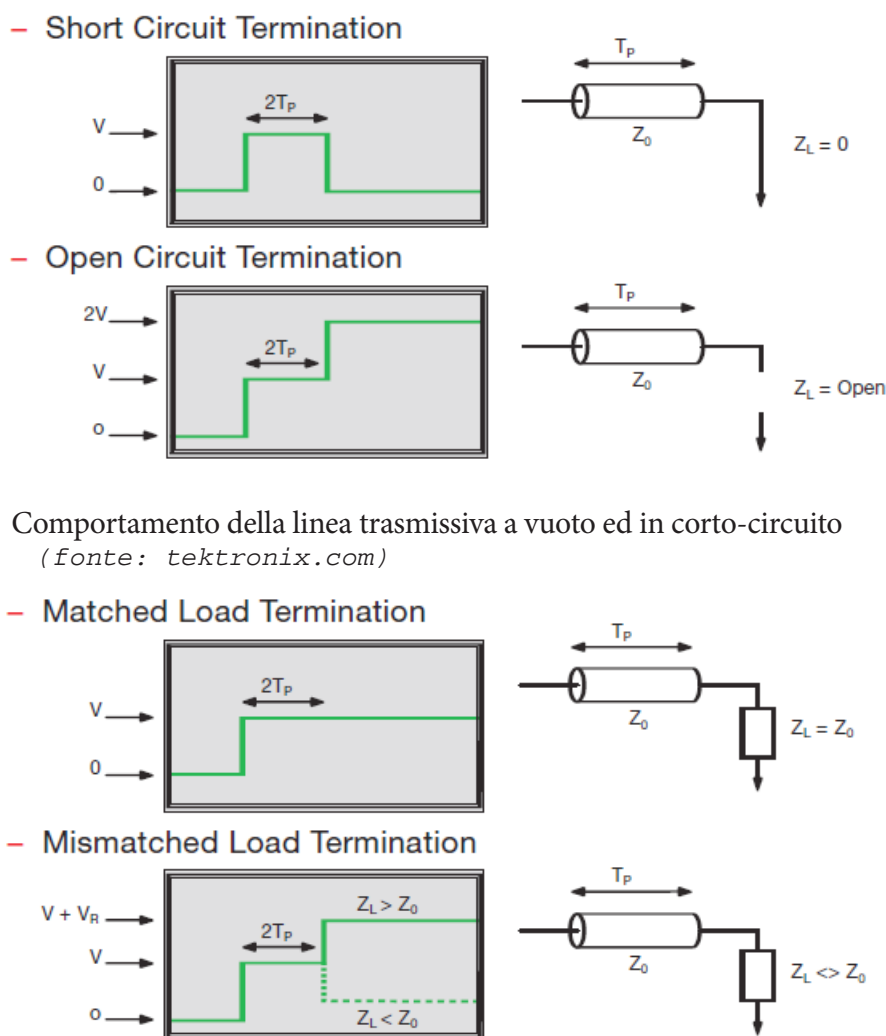


Fig. 8-5 Comportamento della linea trasmissiva a vuoto ed in corto-circuito  
(fonte: tektronix.com)

Fig. 8-6 Comportamento della linea trasmissiva a vuoto ed in corto-circuito  
(fonte: tektronix.com)

Si è deciso di provare a valutare il tempo di propagazione all'interno del cavo e la sua impedenza caratteristica, con la metodologia della riflettometria nel dominio del tempo.

Per fare questo è stato realizzato il circuito di (Fig. 8-7), dove ad un'estremità del cavo di media tensione è stato iniettato un gradino di tensione, contemporaneamente osservandone l'andamento nel tempo tramite l'oscilloscopio, mentre dall'altro capo il cavo è stato lasciato in corto circuito o aperto.

I collegamenti tra generatore di funzioni, cavo ed oscilloscopio devono essere il più corti possibile, poiché non è possibile terminare il cavo coassiale di misura utilizzato su  $50 \Omega$ , che altrimenti trovandosi in parallelo al cavo esaminato, andrebbero ad eseguire la pseudo-terminazione della linea, ovvero permettere il ritorno solamente della prima riflessione, che andrebbe poi ad incidere completamente sull'impedenza di adattamento posta.

Dapprima il cavo è stato chiuso in corto-circuito sulla terminazione finale, osservando come, fintanto che la riflessione negativa non giunge di ritorno all'interno del mezzo, la tensione applicata non è nulla, ma dipende dall'impedenza caratteristica del mezzo. Nel caso specifico, essendo il generatore di funzioni con impedenza interna  $50 \Omega$ , durante il transitorio la tensione applicata è circa metà rispetto quella impostata.

In (Fig. 8-8), oltre all'oscillogramma, sono indicati i due punti presi a riferimento per la valutazione del tempo impiegato dalla riflessione per raggiungere l'inizio della linea. Il tempo misurato è di  $211 \text{ ns}$ , coerentemente con i  $100 \text{ ns}$  valutati come tempo di transito.

Nel caso del cavo lasciato aperto, la situazione è presentata in (Fig. 8-9).

Qui la riflessione è di tipo positivo, permettendo così alla tensione a fine linea, dopo il transitorio, di eguagliare quella applicata all'inizio.

Il tempo necessario al ritorno della prima riflessione è stato stimato in circa  $202 \text{ ns}$  dall'applicazione del gradino all'ingresso.

In entrambe le situazioni si possono osservare due picchi piuttosto evidenti, appena dopo l'applicazione del gradino.

## Generatore di funzioni

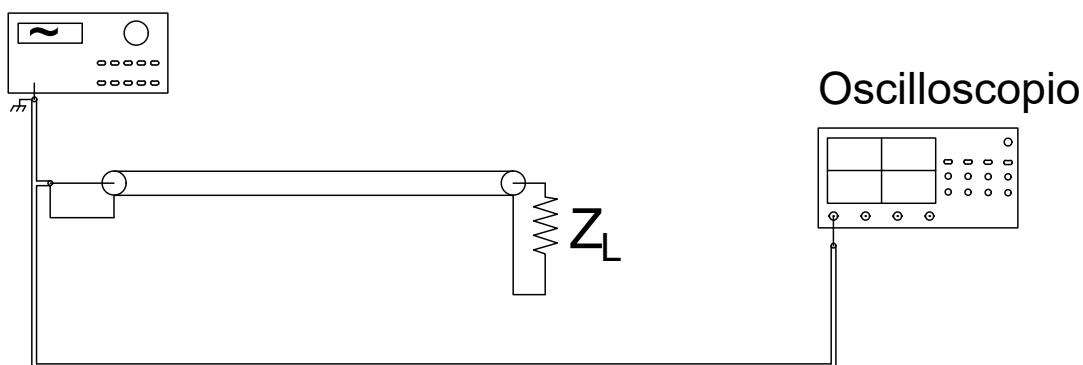


Fig. 8-7 Schema circuitale utilizzato per la valutazione delle riflessioni entro il cavo

Con buona probabilità si tratta della componente riflessa nel breve tratto di cavo coassiale tra generatore di funzioni ed oscilloscopio, che vista la lunghezza minore di oltre un ordine di grandezza, conclude la propagazione in tempi molto più brevi.

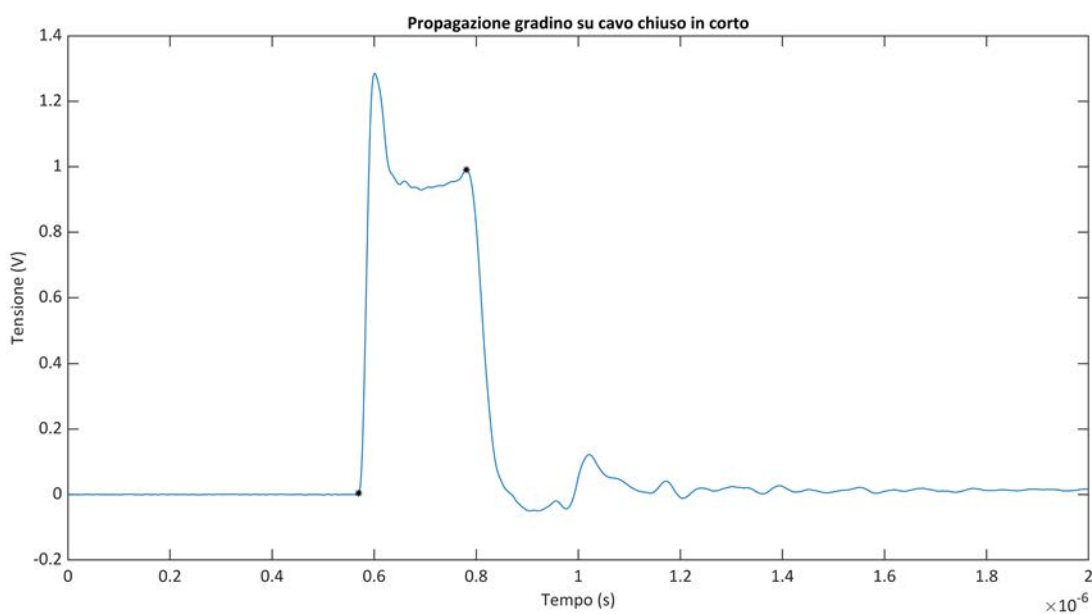


Fig. 8-8 Oscillogramma relativo alle riflessioni presenti nel cavo chiuso in corto-circuito

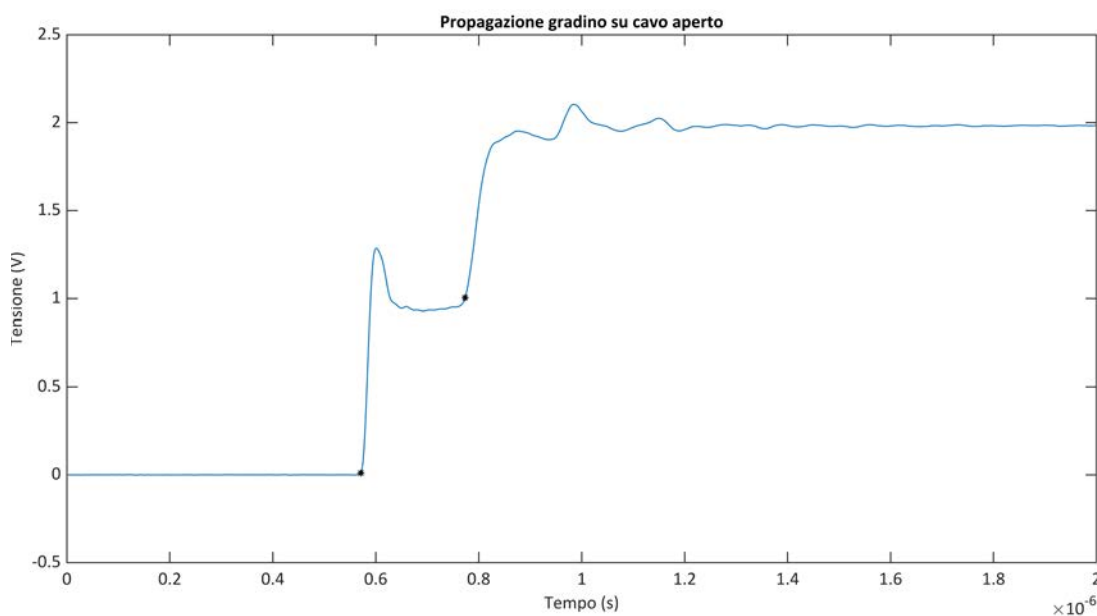


Fig. 8-9 Oscillogramma relativo alle riflessioni presenti nel cavo aperto a fine linea

## 8.2 Misura di scariche parziali su una matassa

Con questa seconda prova si è voluto valutare il comportamento dei materiali isolanti e delle tecniche impiegate per la realizzazione dell'isolamento nelle macchine rotanti per quel che riguarda la presenza di scariche parziali alla tensione di lavoro.

Valutando il comportamento di una singola matassa di un avvolgimento relativo ad una macchina alimentata in media tensione ad un livello di 6 kV.

Come riportato in (Fig. 8-10), la singola matassa oggetto di prove è stata energizzata attraverso il trasformatore elevatore e sul secondo terminale di questa è stato collegato il sistema di misura e il condensatore di accoppiamento, così come raccomandato dalla IEC 60034-27 per provare l'avvolgimento completo, nel caso di centro stella accessibile.

Sulla superficie esterna della porzione di matassa che andrebbe poi inserita entro la cava statorica, è stato posto uno strato di materiale conduttivo, collegato a massa, per riprodurre la situazione di lavoro del componente in termini di configurazione del campo elettrico presente.

La tensione nominale dell'isolamento è 6 kV, per questo la prova è stata eseguita applicando una tensione alternata con valore di picco di 8,8 kV, la regolazione è effettuata variando opportunamente il valore efficace della tensione fornita al primario del trasformatore a mezzo di un variac.

L'unità di accoppiamento utilizzata è quella a corredo dello strumento TechImp, impiegato nelle misure, essa rende disponibili due segnali in uscita, l'andamento temporale della tensione di rete a frequenza industriale, oltre al segnale relativo alle scariche parziali, già filtrato tramite un filtro passa alto.

Questi due segnali sono stati sia forniti allo strumento PD base II, sia applicati all'ingresso di un normale oscilloscopio digitale.

Ottenendo così la possibilità di confrontare i risultati forniti dallo strumento commerciale con quelli provenienti dall'elaborazione autonoma dei dati grezzi.

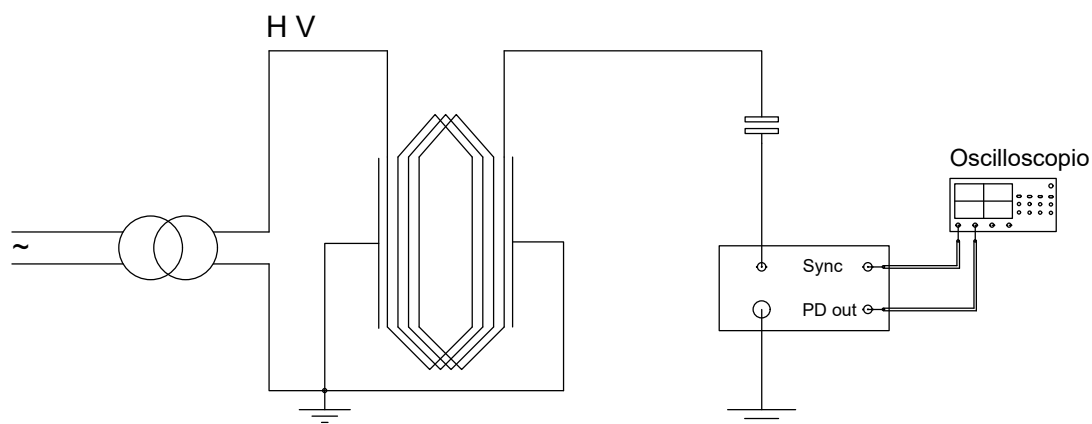


Fig. 8-10 Schema circuitale utilizzato per la misura di scariche parziali di una matassa

L'unità di accoppiamento non presenta elementi resistivi trasversali, per cui lo shunt che opera la conversione corrente-tensione è in realtà costituito dalla resistenza di 50  $\Omega$  posta a terminazione del cavo coassiale.

Questo fa sì che la sensibilità di misura sia piuttosto penalizzata, infatti, scariche parziali al di sotto dei 100pC possono essere valutate con estrema difficoltà.

La necessità di adattare il cavo coassiale con la giusta impedenza non rende possibile il cambio dello shunt con uno di valore ohmico più elevato, qualora la misura lo richieda.

Oltre allo strumento Techimp è stato utilizzato un oscilloscopio digitale tektronix TD-S5054B con una banda passante di 350 MHz ed una velocità di campionamento di 5 GS/s.

Lo strumento è stato configurato in modalità FastFrame, con larghezza temporale delle singole finestre di osservazione di 2  $\mu$ s, analogamente a quanto fatto dallo strumento Techimp. Il Trigger di inizio acquisizione è stato settato in modalità finestra, in modo da rilevare scariche parziali con entrambi i segni di carica apparente.

In tali condizioni la memoria consente di acquisire circa 5000 frames.

Prima di dare tensione al circuito è stato iniettato un impulso di calibrazione, con carica apparente 100 pC, il cui andamento temporale e il relativo integrale sono visibili in (Fig. 8-11).

Come riferimento per la successiva determinazione del fattore di scala, è stato assunto il valore di picco del segnale integrale, ricavato dall'originale tramite elaborazione numerica.

Visti i valori di capacità in gioco: 2,5 nF sul condensatore di accoppiamento ed ulteriori 1,5 nF dovuti alla capacità dell'isolamento della matassa, l'impulso di tensione rilevabile è piuttosto contenuto, con un valore di picco attorno ai 150 mV.

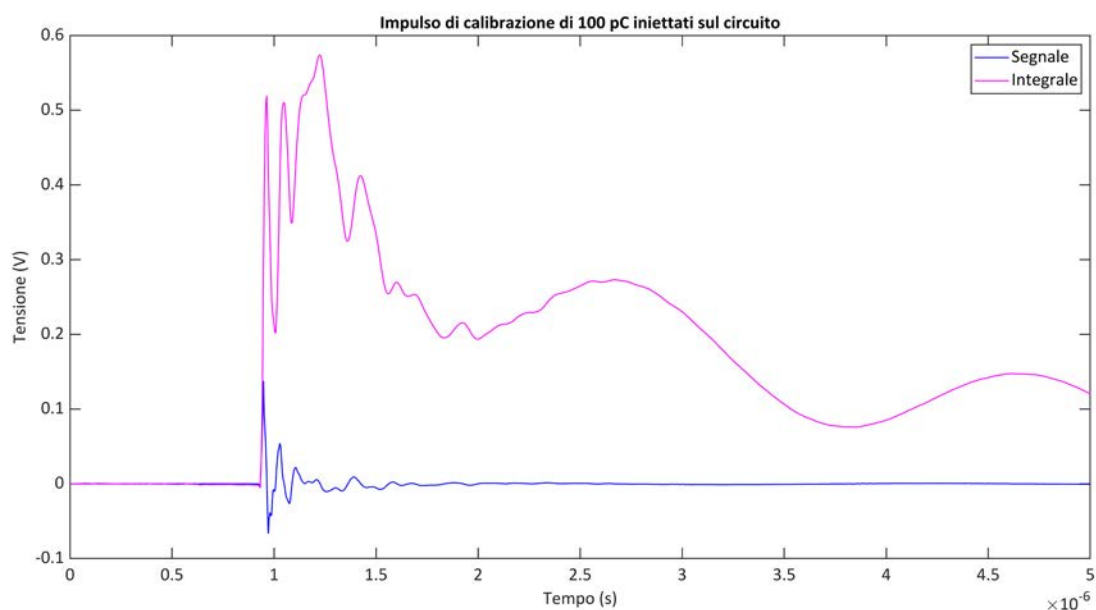


Fig. 8-11 Impulso di calibrazione iniettato nel circuito e suo integrale

La prova eseguita con una tensione di picco di 8,8 kV è più severa, rispetto al valore presente in esercizio, pur essendo il sistema di alimentazione a 6 kV, l'isolamento della macchina è in realtà sottoposto al valore della tensione di fase, 1,73 volte più contenuto.

Questo permette sicuramente di effettuare un test più severo sul componente, rendendo più probabile l'apparizione di scariche parziali con entità visualizzabile sull'oscilloscopio.

Per rendere meglio confrontabili le due informazioni provenienti dai due diversi sistemi di misura, si è deciso di applicare un filtro passa basso di tipo numerico sui segnali acquisiti dall'oscilloscopio, con la stessa frequenza di taglio superiore propria della scheda di acquisizione Techimp, 48 MHz.

Riducendo così anche la quantità rumore introdotta dalla catena di misura e non effettivamente presente negli impulsi di scarica parziale.

A questo proposito è possibile osservare in (Fig. 8-12) lo spettro osservato dell'impulso di calibrazione iniettato sul circuito.

In rosso è evidenziata quella porzione di spettro conservata nonostante la presenza del filtro passa basso.

Si nota come la maggior parte dell'energia del segnale è presente entro i 20 MHz, mentre quei due picchi presenti oltre gli 80 MHz, potrebbero essere causati da rumore esterno, magari introdotto proprio dalla strumentazione di misura.

Il fatto di utilizzare bande passanti uguali per i due sistemi è fondamentale per il successivo confronto dei segnali con il metodo tempo frequenza, poiché la collocazione sull'asse della frequenza del segnale richiede un eguale distribuzione spettrale dell'e-

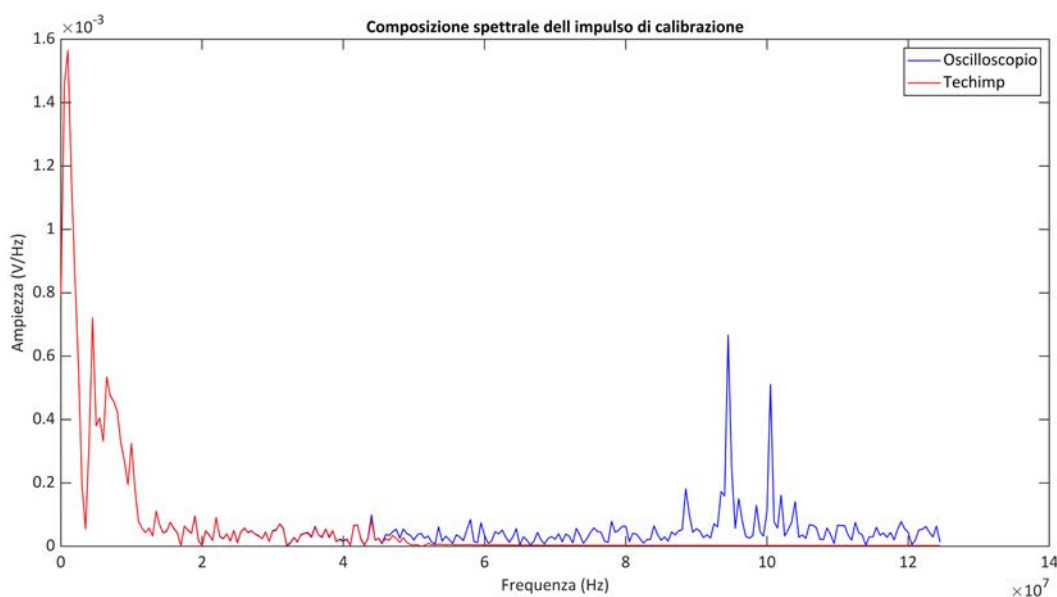


Fig. 8-12 Distribuzione spettrale dell'impulso di calibrazione iniettato sul circuito

nergia, possibile solo se due segnali identici sono stati acquisiti nelle stesse modalità. In (Fig. 8-13) è rappresentata la distribuzione dei valori di picco degli impulsi di scarica parziale acquisiti dalla strumentazione, in rosso per lo strumento Techimp, in blu quelli acquisiti dall'oscilloscopio.

Per poter confrontare le due informazioni acquisite, considerata la grande libertà fornita dall'oscilloscopio, ci si è adeguati al modo di procedere dello strumento Techimp. È stato utilizzato un trigger a finestra, come appare ben evidente dalla striscia bianca che separa gli impulsi con picco di valore positivo o negativo.

Questa indicazione non ha nulla a che vedere con la carica apparente di cui la IEC 60270 richiede la valutazione, rispecchia piuttosto lo standard americano IEEE Std 1434-2014, che richiede la valutazione del valore di picco degli impulsi.

La valutazione della quantità di scariche parziali sul valore di picco in mV ha dei problemi di ripetibilità della misura, che il sistema Europeo con carica apparente in parte risolve. Infatti a parità di quantità ed intensità di scariche parziali presenti nella macchina, l'ampiezza degli impulsi rilevabili esternamente è fortemente condizionata dalla capacità del condensatore di accoppiamento e delle caratteristiche dell'impedenza di misura e del sistema di acquisizione.

La riferibilità della misura è possibile quindi nella sola ipotesi di utilizzare lo stesso strumento di misura e lo stesso circuito di accoppiamento.

Questa assunzione è poco credibile per le misurazioni eseguite ad intervalli periodici, dove ogni volta la strumentazione viene montata e smontata, mentre può essere ragionevole nel caso dei sistemi di monitoraggio online, sempre inseriti e parte dell'impianto.

In ogni caso, il diagramma sotto riportato, mostra una buona corrispondenza dei livelli di scariche parziali rilevati, tenendo poi conto che il sistema Techimp, ha una quantità di memoria maggiore, quindi presenta più punti raffigurati.

Si suppone anche che le misurazioni eseguite con esso siano state effettuate in un momento in cui il rumore dello spazio elettromagnetico era più intenso, poiché da esso vengono rilevati sporadici impulsi con ampiezza maggiore, non visti con l'oscillo-

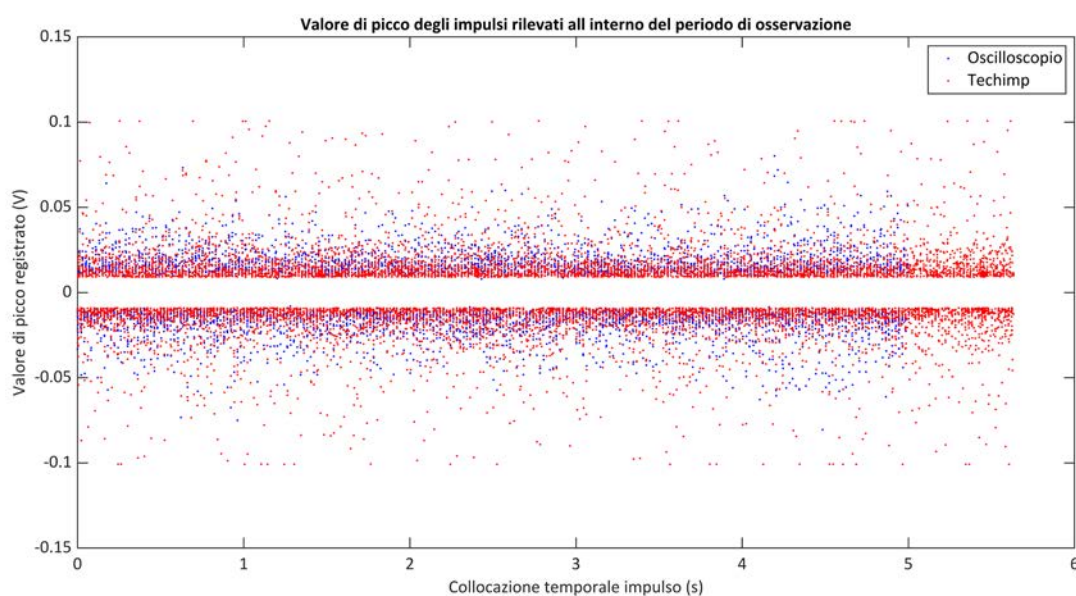


Fig. 8-13 Distribuzione dei valori di picco degli impulsi rilevati sul periodo di osservazione



scopio, nonostante la parità delle restanti condizioni.

Lo strumento Techimp esegue autonomamente la trasformazione degli impulsi rilevati nel dominio del tempo, in quello tempo - frequenza, come visto in par. 6.2.2.

Al momento in cui è stata eseguita questa misurazione, non consentiva invece l'accesso ai segnali acquisiti nelle varie finestre.

Sempre allo scopo di verificare la compatibilità dei risultati, si è effettuata la stessa trasformazione anche sui segnali acquisiti dall'oscilloscopio.

I segnali collocati sul piano tempo equivalente - banda equivalente, sono visibili in (Fig. 8-14), con colori diversi per i due sistemi di misura.

Vi è una buona sovrapposizione tra le informazioni rilevate, e si riesce vagamente ad intuire in entrambi i casi la presenza di due diverse sorgenti di impulsi, seppur con una collocazione molto vicina, data anche la limitata estensione della matassa in prova.

Lo strumento Techimp posiziona alcuni punti lontani dalla zona dove ne sono ubicati la quasi totalità, si è verificato che questi stessi impulsi sono quelli che nella (Fig. 8-13) erano posti in una fascia più elevata.

Tuttavia, non potendo accedere alla memoria interna dello strumento, e non potendone quindi visualizzare la forma, non è possibile stabilire a priori se si tratti di qualche ulteriore e più rara causa di scarica parziale, piuttosto che da semplice rumore che affligge la strumentazione.

In questo secondo caso, si può apprezzare la potenzialità della tecnica di clustering, che una volta stabilita la causa esterna, potrebbe consentire la rimozione di questa famiglia di segnali da quelli ritenuti significativi per stimare la salute della macchina.

Perché il confronto eseguito fra le due diverse informazioni raccolte sia significativo, è importante che la banda passante dei due sistemi di acquisizione sia la stessa, come verificato sperimentalmente, per questo, l'aggiustamento con tecniche di filtraggio numerico del limite di banda superiore, ha reso compatibili i risultati, altrimenti completamente discordanti.

Relativamente al metodo di analisi combinato tempo-frequenza, è bene ricordare che i valori indicati sono riferiti alla deviazione standard del modulo dei coefficienti di Fourier dei singoli impulsi, quindi il valore indicato in ordinata è indice dell'estensione

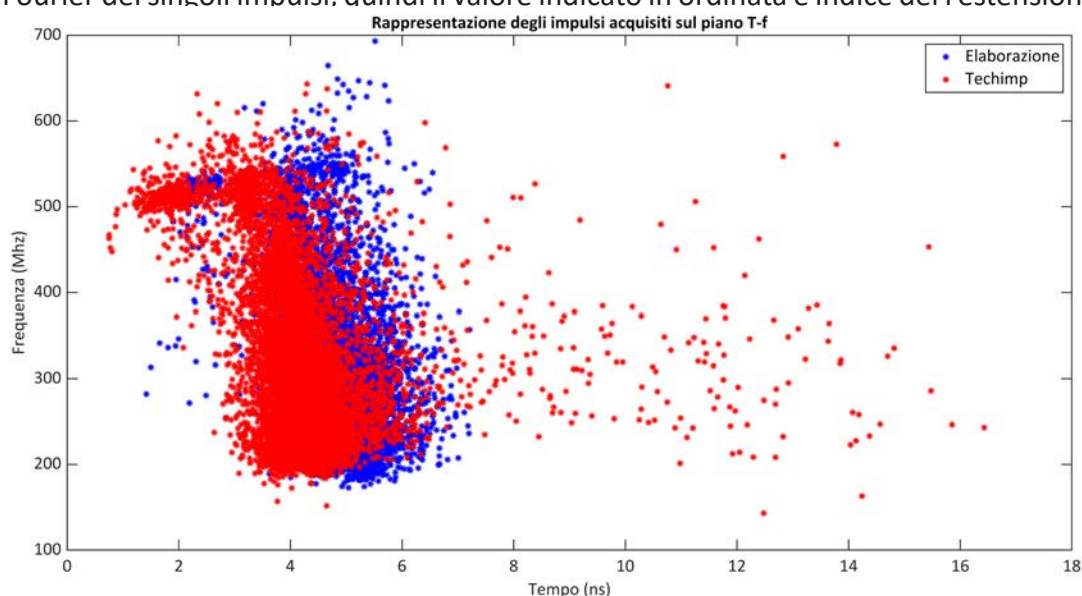


Fig. 8-14 Rappresentazione sul pianto tempo - frequenza degli impulsi acquisiti



spettrale dell'impulso, non della frequenza massima in esso presente. Successivamente, verificata la funzionalità del sistema di acquisizione e la rispondenza dei segnali catturati, rispetto quanto visto dal sistema commerciale, si è proceduto ad ulteriori elaborazioni su quanto acquisito dall'oscilloscopio. Dopo aver eseguito l'integrazione all'interno delle singole finestre temporali degli impulsi, tramite il fattore di scala ottenuto dall'operazione di calibrazione, si è assegnata ad ogni finestra di acquisizione una carica apparente. Attraverso il timecode reso disponibile per identificare la collocazione temporale di ogni frame, si è stimata la fase elettrica della tensione di rete. Questa, elaborazione è stata eseguita prendendo a riferimento un'acquisizione della tensione di alimentazione effettuato non simultaneamente alle misure di intensità di scarica parziale, che quindi potrebbe portare l'incertezza sul valore di fase elettrica stimato oltre la richiesta dalla normativa di 1°.

Lo scopo era quello di realizzare un phase pattern degli impulsi di scariche parziali, della carica apparente messa in gioco da ciascun impulso in funzione della fase elettrica di apparizione, in modo da trarne informazione sul fenomeno. Il risultato è visibile in (Fig. 8-15), dove la sinusoide della tensione di rete è solamente esemplificativa.

La maggior parte degli impulsi sono localizzati nella zona del passaggio per lo zero della tensione di rete, quindi dovuti a scariche interne all'isolamento. Tuttavia, si può notare dell'attività anche in corrispondenza dei massimi e minimi della tensione, che permettono di rilevare anche la presenza di effetto Corona, specialmente di tipo negativo, nella forma di impulsi di Trichel.

Gli sporadici punti che sono collocati sul lato opposto del diagramma rispetto agli altri, sono, per quel che si è potuto verificare, frutto di sovrapposizioni e concatenazioni di più impulsi adiacenti all'interno di una stessa finestra di osservazione. Mano a mano che l'oggetto in prova diviene più esteso, aumentata dapprima la fre-

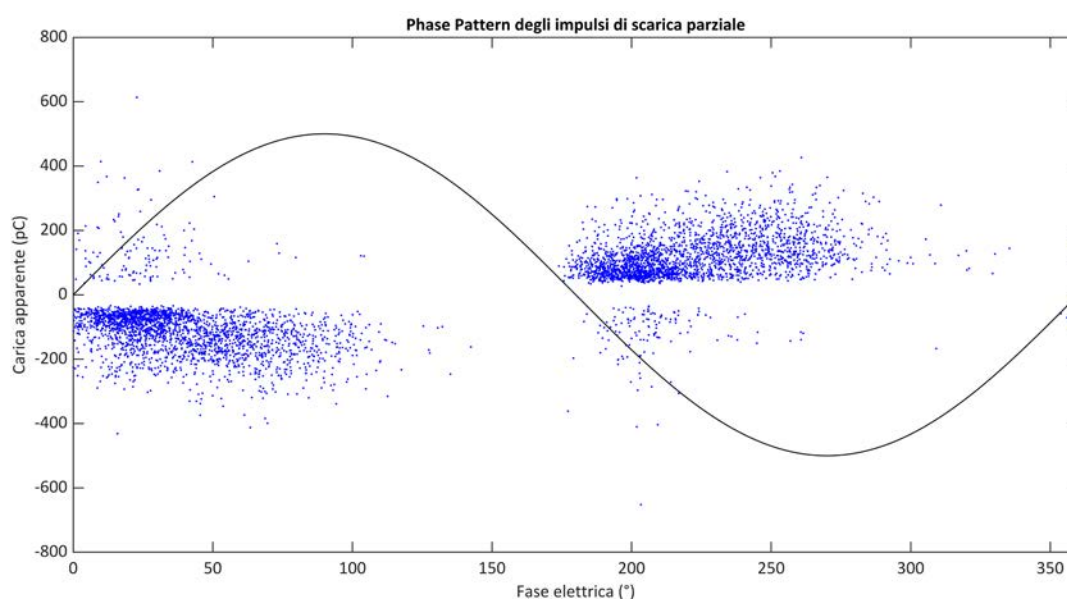


Fig. 8-15 Rappresentazione del Phase Pattern degli impulsi di scarica parziale acquisiti

quenza di ripetizione delle scariche parziali, fino al punto in cui diviene inevitabile l'osservazione di due o più all'interno di una stessa finestra temporale.

Per rendere più chiaro e significativo il pattern appena commentato, è stata effettuata una rielaborazione della distribuzione rappresentata, al fine di poterla rappresentare su un piano tridimensionale in una rappresentazione phi-q-n.

Essa è riportata in (Fig. 8-16).

L'intera area del piano è stata suddivisa in un reticolo di 450 sezioni, sia orizzontalmente, che verticalmente.

Sono stati contati il numero di impulsi all'interno di ciascun rettangolino così ottenuto ed infine, sulla base del numero di scariche parziali rilevate, è stato attribuito un colore fra il bianco ed il rosso.

Il profilo così ottenuto pone meglio in evidenza che la maggior parte degli eventi di scarica parziale sono allocati sul fronte di salita e di discesa, specialmente dopo il passaggio per lo zero.

Si ha così la conferma di come si stia osservando scariche parziali dovute a scarica interna, quindi legate alla rapidità con cui la tensione cambia, cioè al valore della derivata.

Anche da questa immagine si può evidenziare una lieve presenza di effetto Corona.

Il comportamento del fenomeno nei due diversi semi-cicli è simmetrico, o comunque non presenta differenze apprezzabili ad occhio nudo.

Per questo si è provato ad utilizzare anche il metodo descritto da Kreuger per la valutazione automatizzata del profilo del Pattern tramite indicatori statistici.

Tuttavia, data la contemporanea presenza di più motivi di scarica parziale all'interno del oggetto di prova, la valutazione complessiva di questi indicatori è poco significativa, poiché da questi parametri integrali non è possibile effettuare un confronto con i valori ottenuti in letteratura tecnica.

In quel caso la determinazione dei valori è stata eseguita in laboratorio su campioni realizzati per mostrare esattamente un dato tipo di scarica parziale, mentre qui le cause che vi concorrono sono molteplici.

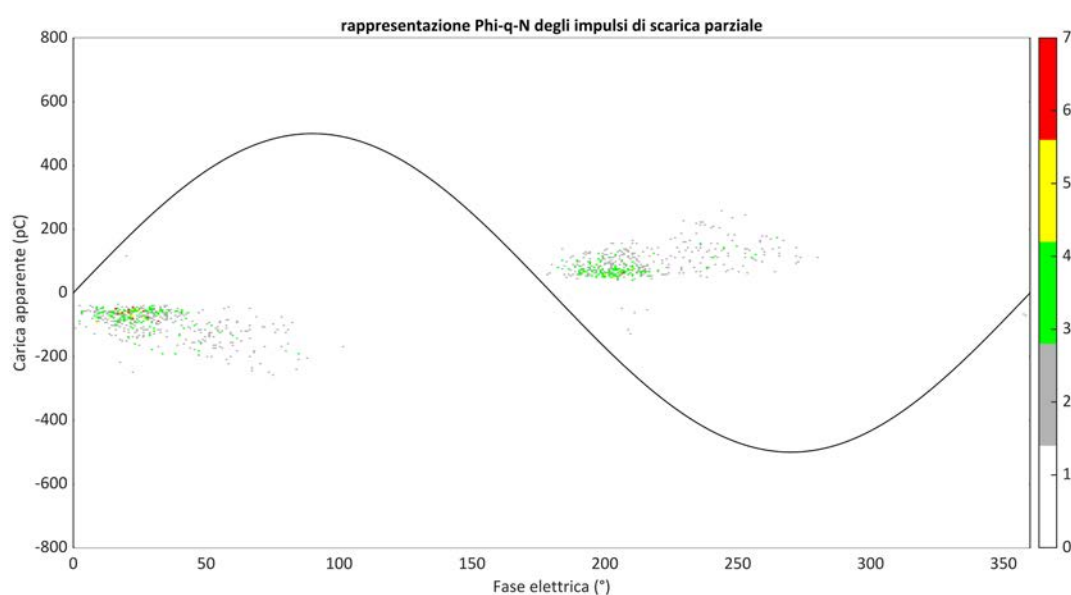


Fig. 8-16 Rappresentazione del Pattern della distribuzione Phi-q-n degli impulsi registrati

Indici per la valutazione del pattern			
<i>Semiciclo:</i>	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>	
Numero di scariche parziali rilevate	2511	2490	
Carica massima rilevata	613	426	(pC)
Carica minima rilevata	-652	-431	(pC)
Somma cariche rilevate	-2.68e+05	2.66e+05	(pC)
Fase massima rilevata	179.8	359.9	(°)
Fase minima rilevata	0.01	180.1	(°)
Fase media pesata sulla base della quantità di carica	44.86	227.94	(°)
Fase media	40.7	223.18	(°)
Deviazione standard $H_n(\phi)$	10.09	9.43	(\)
Skewness $H_n(\phi)$	2.13	1.88	(\)
Kurtosis $H_n(\phi)$	4.20	2.91	(\)
Carica media $H_{qn}(\phi)$	-106.73	106.73	(pC)
Deviazione standard $H_{qn}(\phi)$	71.7	73.99	(pC)
Skewness $H_{qn}(\phi)$	-0.785	0.704	(\)
Kurtosis $H_{qn}(\phi)$	-0.245	-0.466	(\)

Tab. 8-2 Indici statistici per la valutazione automatizzata del pattern

## 8.3 Misura di scariche parziali su statori completi

In questa serie di prove, ci si è recati presso lo stabilimento di un importante officina elettromeccanica della zona, dove vengono riavvolte ed eseguita manutenzione anche su macchine alimentate a media tensione.

In quest'occasione è stato possibile eseguire una campagna di misurazioni sugli statori presenti in quel momento, quattro, appartenenti a tre diverse tipologie di macchine. Uno degli statori era disponibile in due esemplari, uno appena riavvolto, quindi con isolamento assolutamente nuovo, ed uno ancora da essere sottoposto alle lavorazioni, quindi nelle originarie condizioni di degrado.

Seppur la forma delle testate sia stata modificata, per adeguare la struttura dell'avvolgimento alle più moderne tecniche di costruzioni elettromeccaniche, può risultare comunque molto interessante il confronto tra i dati rilevabili nelle due diverse condizioni, per verificare se effettivamente le scariche parziali costituiscono un utile strumento per diagnosticare preventivamente il degrado del sistema isolante.

Le altre due macchine sottoposte a test, erano da poco giunte all'interno dello stabilimento, e quindi non ancora interessate da interventi di rifacimento, ma in un caso solamente sottoposta ad una preliminare fase di pulizia.

Per limitare il numero di apparecchiature trasportate presso l'azienda ospitante, tutte le misure sono state eseguite utilizzando solamente lo strumento Techimp PD base II e la sua unità di separazione, accoppiate al circuito di alta tensione a mezzo di una capacità in gas compresso, con un valore di 2,5 nF.

Lo strumento è dotato internamente di una scheda di acquisizione con velocità 250 Ms/s, che comunica attraverso fibra ottica (per garantire la separazione galvanica) con un personal computer, sul quale sono visualizzate e salvati i risultati.

La sorgente di alimentazione, un trasformatore elevatore, è stato reperito in loco, tra la strumentazione messa a disposizione da parte dell'azienda ospitante.

Trovarsi a far prove in un vero ambiente industriale è ben diverso rispetto a trovarsi all'interno della sala prove del dipartimento, completamente schermata, in termini di rumore presente.

Certamente le capacità della strumentazione in termini di sensibilità ne risentiranno, ma dovrebbe comunque essere possibile osservare almeno gli importanti fenomeni di corona nelle testate, che tipicamente si riscontrano nelle macchine rotanti.

Ben più critica è invece l'osservazione dei fenomeni di scarica parziale di più piccola entità, eventualmente dovuti all'attività di scariche interne nei vuoli presenti all'interno tra strati di nastro.

### 8.3.1 Statore di fabbricazione BBC U<sub>n</sub>=6.25 kV

Il primo statore sottoposto a prove è stato quello di un motore asincrono BBC con potenza nominale 4 MW, con statore collegato internamente a stella, per essere alimentato ad una tensione di 6250 V.

Si tratta di una macchina a 8 poli, data la velocità di rotazione di 740 rpm alla condizione nominale, dove la corrente assorbita raggiunge i 446 A, costringendo così i costruttori ad utilizzare un avvolgimento costituito da due vie in parallelo.

In (Fig. 8-17) è visibile lo statore, mentre in (Fig. 8-18) la targa identificativa.



Fig. 8-17 Vista frontale dello statore della macchina BBC



Fig. 8-18 Targa identificativa della macchina di fabbricazione BBC

Presentando la macchina un centro stella non accessibile, collegato internamente, si è stati costretti ad energizzare contemporaneamente tutte e tre le fasi dell'avvolgimento statorico, collegando tutti e 6 i terminali uscenti (2 per fase) alla sorgente di alimentazione, come riportato in (Fig. 8-19).

Lo schema rientra tra quelli consigliati dalla normativa IEC 60034-27 [67].

L'intera capacità del sistema isolante misurata è di 330 nF, valore certamente importante, vista la limitata tensione di lavoro, la corrente assorbita capacitiva, ammonta a circa 0,6 A, più che tollerabili per la sorgente di alimentazione.

Per capacità così grandi, diviene invece critica la sensibilità del sistema di misura, che, sui suoi 2,5 nF di capacità di accoppiamento vedrà segnali di ampiezza limitata, perché una gran parte della corrente relativa all'impulso di scarica parziale, non uscirà nemmeno dai terminali della macchina, ma si richiederà internamente verso terra tramite le capacità del sistema isolante stesso.

Lo strumento Techimp PD base II mette a disposizione due diverse modalità di lavoro, una di tipo Ultra Wide Band, pensata espressamente per la diagnostica sulle macchine, con banda passante fino a 48 MHz, ed una seconda modalità rispondente ai requisiti Wide Band della normativa IEC 60270 [64], ponendo il limite superiore di banda, in corrispondenza del massimo previsto della vecchia versione del testo (400 kHz).

Durante le prove sono state utilizzate entrambe le modalità di funzionamento per confrontare i vantaggi di questa nuova metodologia proposta dalla normativa, rispetto al metodo classico.

Tuttavia, per così come è pensato il sistema di acquisizione Techimp, l'esportazione delle forme d'onda e quindi la possibilità di eseguire ulteriori valutazioni è riservata solamente alle registrazioni effettuate con il salvataggio in un file WFM, solo in modalità WB.

La sorgente di alimentazione, un trasformatore elevatore realizzato a secco, dovrebbe essere esente da scariche parziali ai livelli di tensione utilizzati, poiché esso presenta il secondario avvolto su due diverse colonne, ognuna con tensione nominale 25 kV.

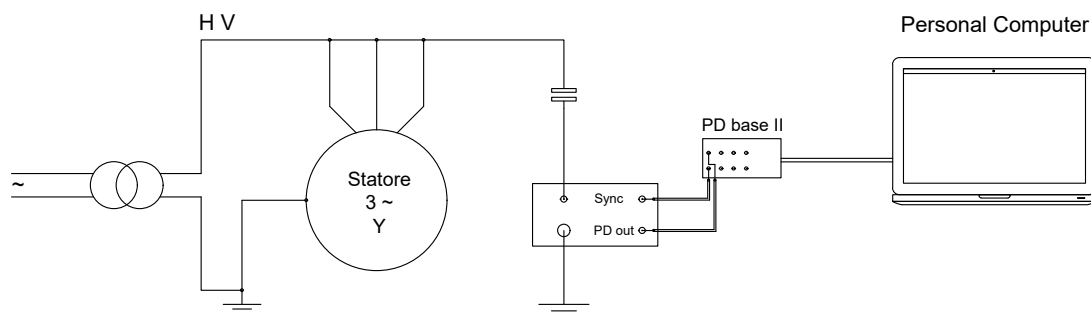


Fig. 8-19 Schema elettrico del circuito di prova dello statore di fabbricazione BBC



Lo statore oggetto di descrizione è stato provato a 4 diversi livelli di tensione, 2 kV, 4 kV, 6 kV ed infine 8 kV. La macchina nel normale funzionamento, dato il collegamento a stella, tipico delle grandi macchine rotanti, presenta una tensione verso terra di circa 3,6 kV. Questo fa sì che, già la prova effettuata a 6 kV è decisamente severa per il sistema isolante.

Una volta realizzato il circuito di misura, prima di energizzare il trasformatore elevatore, si è effettuata una calibrazione del sistema di misura, utilizzando un calibratore auto-costruito in grado di mettere in gioco una carica apparente di 1 nC.

Questo perché le cariche apparenti disponibili sul calibratore omicron in nostro possesso, con limite superiore dei 100 pC, sono decisamente piccole se valutate su un sistema isolante con capacità così elevate.

La soluzione utilizzata è quella del classico generatore di impulsi di calibrazione presentato in (Fig. 3-13), dove un generatore di onda quadra (nel caso in questione agilent 33220a) viene posto in serie ad una capacità di valore noto (1 nF).

La regolazione della carica applicata avviene tramite la variazione del valore picco-picco dell'onda quadra erogata dal generatore, impostato nel nostro caso ad 1 Vpp, con un Duty-cycle del 50% e frequenza 50 Hz.

In (Fig. 8-20) è visibile la risposta vista dal sistema di misura all'applicazione dell'impulso di calibrazione da 1 nC di carica apparente ai capi dell'intero sistema isolante.

Eseguendo un confronto con la risposta impulsiva del solo sistema di acquisizione, mostrata in (Fig. 8-21), la prima cosa che salta all'occhio è la notevole riduzione dell'ampiezza della risposta nel caso in cui sia connesso l'intero sistema isolante statorico, nonostante la carica iniettata sia di 1 nC contro 50 pC.

A riprova del pesante effetto di attenuazione introdotto dalle capacità trasversali della rete a parametri distribuiti e dalle induttanze longitudinali.

Altra grande differenza nelle due risposte è relativa alla loro durata temporale, infatti, con la connessione dell'intero sistema isolante, la risposta si allunga di quasi un ordine di grandezza.

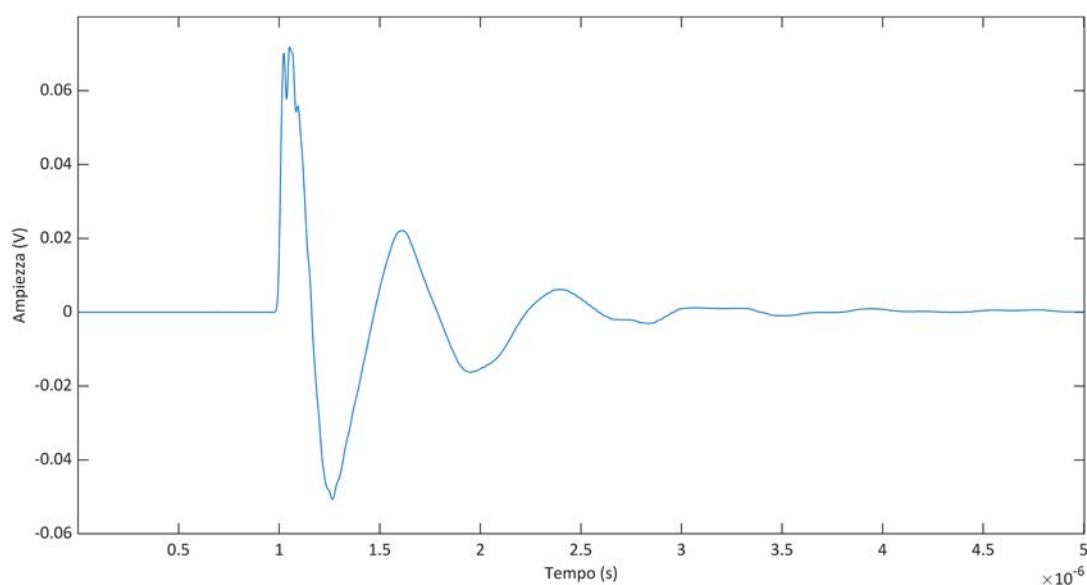


Fig. 8-20 Risposta acquisita dal sistema di misura all'applicazione dell'impulso di calibrazione

Questo perché le componenti a più elevata frequenza dello spettro dell'impulso di calibrazione subiscono un rapido degrado, richiudendosi sulla capacità degli isolamenti ed interessando solo marginalmente il condensatore di accoppiamento e l'impedenza di misura.

In parte la colpa di ciò potrebbe essere imputabile alla stessa strumentazione utilizzata per la calibrazione, poiché il generatore di funzioni Agilent, pur essendo un pregevole strumento, ha una durata del tempo di salita dichiarata di circa 13 ns.

Valore che dovrebbe poi essere ulteriormente accresciuto per considerare l'effetto dei lunghi cavi di connessione necessari a collegarvi il circuito di alta tensione.

Mentre il calibratore Omicron, con cui è stata catturata la seconda risposta, è stato direttamente interfacciato all'ingresso dell'unità di separazione dello strumento.

Il segnale acquisito durante l'operazione di calibrazione, mostrato in (Fig. 8-20), durante le operazioni di post-processing è stato integrato per via numerica e dal valore di picco del segnale integrale, nota la carica iniettata nel circuito, si è ricavato il fattore di scala per la valutazione della carica apparente.

Si è scelta questa modalità, piuttosto che quella americana con la valutazione del valore di picco del segnale originale, perché sembra più resistente ai disturbi di natura esterna che potrebbero influenzare il segnale originale, ma data l'area limitata, difficilmente rovinano la valutazione della carica.

Il pattern della carica messa in gioco dall'impulso, in funzione della fase elettrica istantanea della tensione di rete, ha costituito un primo strumento per consentire la distinzione delle diverse tipologie di fenomeni in atto.

Successivamente, l'utilizzo della rappresentazione tempo-frequenza, ha consentito un'ulteriore e più precisa operazione di clustering delle varie sorgenti, ricollegate poi al tipo di fenomeno rappresentato sulla base dei singoli pattern phi-q.

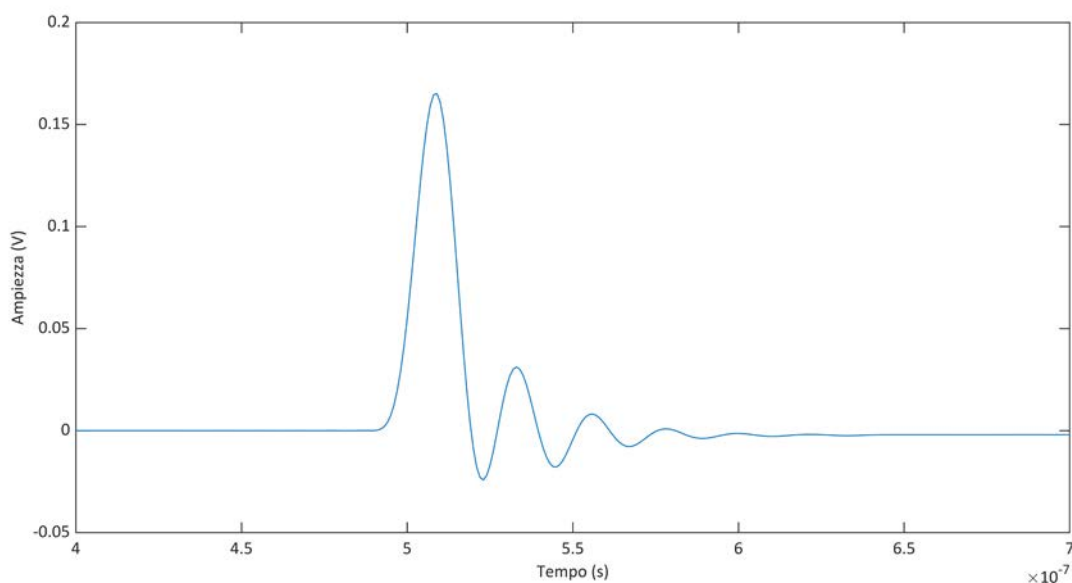


Fig. 8-21 Risposta acquisita del solo sistema di misura all'applicazione di un impulso di calibrazione con carica apparente 50 pC



Nella prima prova effettuata all'intero statore sono stati applicati 2kV verso terra, acquisendo con la strumentazione 2000 impulsi, dopo aver impostato debitamente il livello di trigger fino ad evitare buona parte del rumore ambientale.

In (Fig. 8-22) è riportato il pattern della carica apparente in funzione della fase.

Si nota subito come la maggior parte dell'attività di scariche parziali sia attiva nei momenti in cui la tensione di rete assume la massima derivata.

Quella particolare conformazione rettilinea del pattern suggerisce, come ipotizzabile, un'attività di Corona sulle testate degli avvolgimenti della macchina.

Si possono notare alcuni punti relativi ad impulsi la cui collocazione in termini di carica è opposta alla maggior parte dei segnali acquisiti.

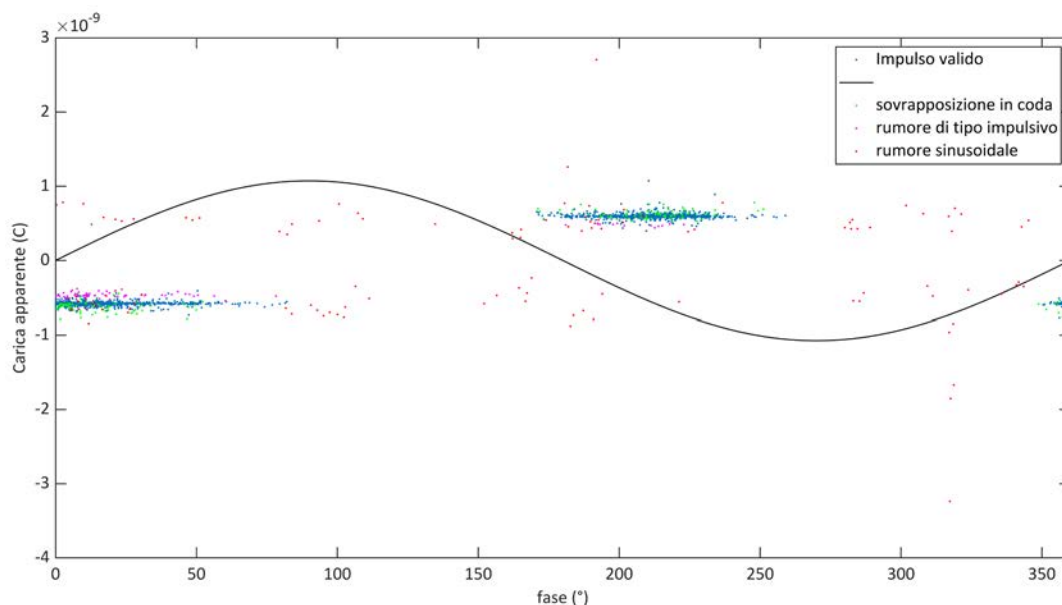


Fig. 8-22 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore BBC a 2 kV

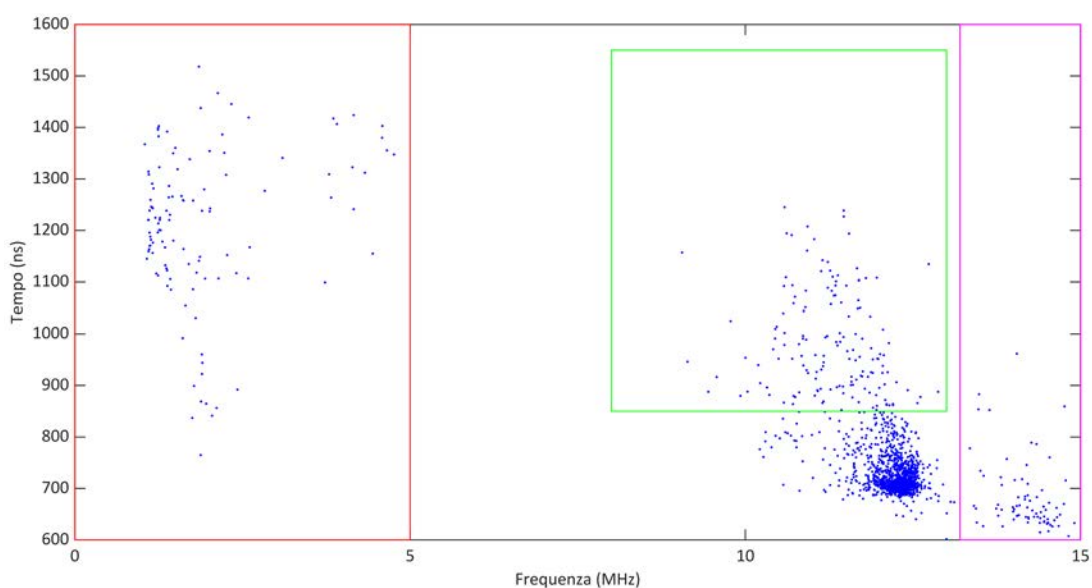


Fig. 8-23 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore BBC a 2 kV

Il confronto con il diagramma dei parametri tempo-frequenza dei singoli segnali, ha evidenziato la collocazione in diverse zone degli impulsi acquisiti.

In (Fig. 8-23) è rappresentato il pattern, si può notare come la maggior parte degli impulsi sia collocata in uno specifico punto del piano, evidenziando la presenza di una sola sorgente, o comunque di una zona molto limitata all'interno dell'avvolgimento. Poi vi sono altre zone del diagramma, con un numero limitato di segnali collocati, a causa di sovrapposizioni di rumore e altre risposte impulsive durante l'acquisizione. Per individuare le diverse cause, le singole zone sono state delimitate da rettangoli, il cui colore è stato utilizzato per rappresentare anche gli impulsi che vi appartengono nel pattern fase-carica apparente.

Si vede quindi come, quegli impulsi la cui collocazione è discorde dal resto del gruppo, sono tutti collocati all'interno del rettangolo rosso, che un'analisi ha rivelato contenere non impulsi di scarica parziale, ma rumore con forma d'onda sinusoidale, la cui valutazione della carica apparente è totalmente priva di significato.

Alcuni di essi, ritenuti più significativi, sono osservabili in (Fig. 8-24).

Trattandosi di una componente sinusoidale con frequenza di circa 1 MHz, essa non viene in alcun modo filtrata dall'unità di accoppiamento, né dai filtri precedenti la scheda di conversione AD dello strumento.

Altre due zone del digramma t-f sono delimitate dal rettangolo verde e magenta.

In entrambi i casi si tratterebbe di impulsi la cui sovrapposizione di rumore o di altre risposte impulsive, non sembra aver danneggiato la valutazione della carica apparente, vista la loro comunque coerente collocazione all'interno del diagramma phi-q.

Nel caso verde, si tratta di sovrapposizioni di componenti sinusoidali in coda, tali da allungarne la durata, quindi anche la valutazione del tempo equivalente rispetto al gruppo principale, nel secondo caso invece si tratta di componenti sovrapposte di tipo impulsivo, tali da accrescere quello che è il contenuto spettrale dell'impulso e quindi spostarne verso destra la collocazione sul piano t-f.

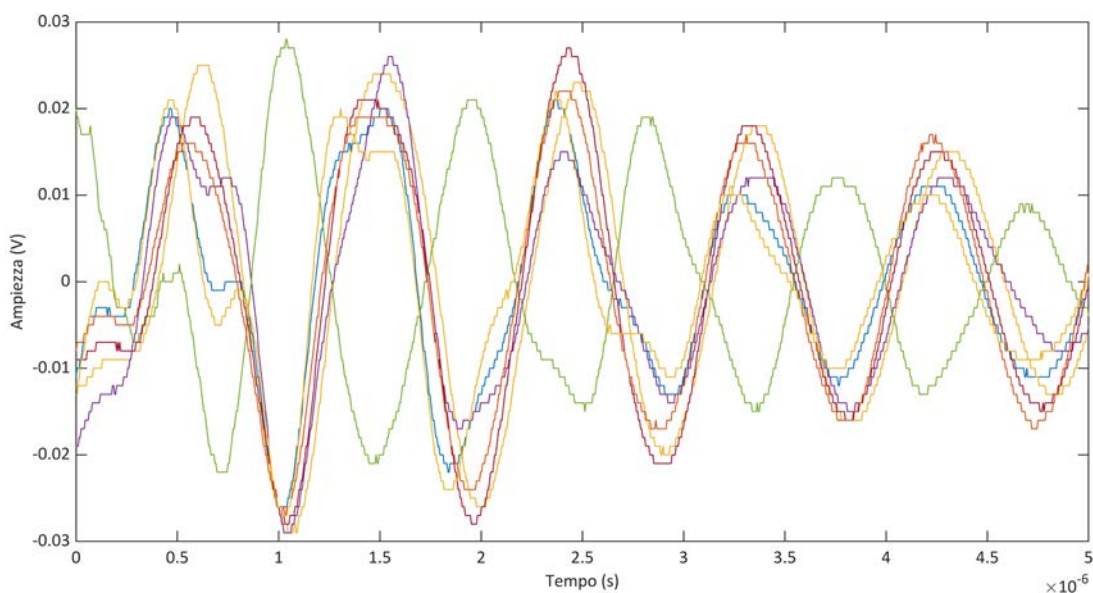


Fig. 8-24 Alcuni dei segnali etichettati come disturbo sinusoidale nell'acquisizione

La seguente misura, eseguita a 4 kV mostra una più intensa attività di scariche parziali, rispetto al caso precedente, così come osservabile nel pattern fase-carica apparente di (Fig. 8-25) e nel diagramma t-f di (Fig. 8-26).

Si è per questo dovuto aggiungere un nuovo cluster ed una nuova colorazione. Le classificazioni attuate nella precedente misura, per distinguere gli impulsi validi dal rumore sono rimaste in essere, attribuendovi i colori magenta, verde e rosso, tuttavia, il cambio del livello di trigger ha rafforzato l'immunità del sistema verso i disturbi provenienti dall'esterno.

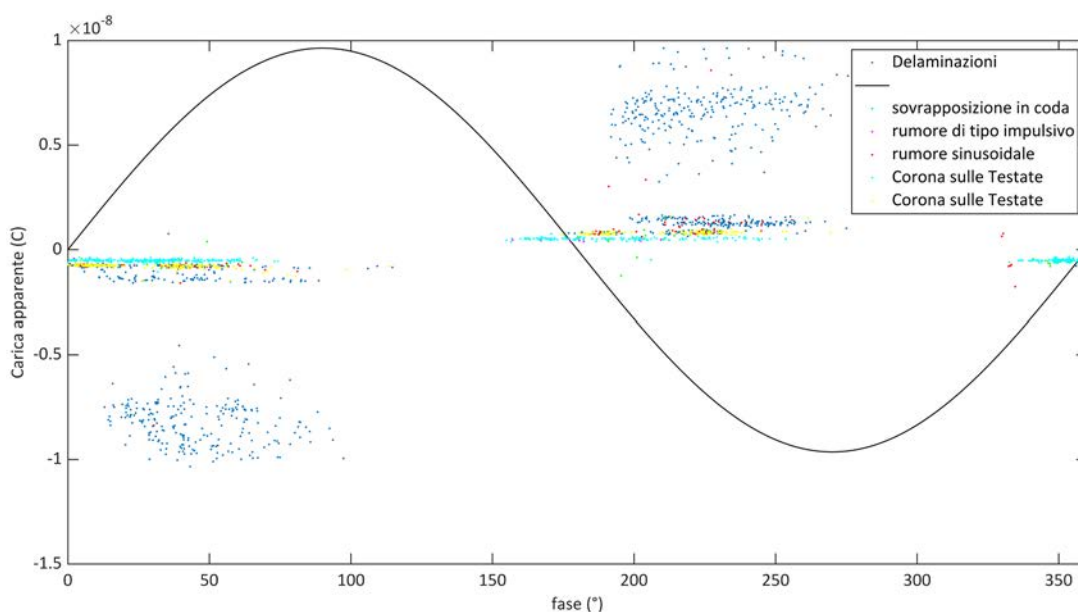


Fig. 8-25 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore BBC a 4 kV

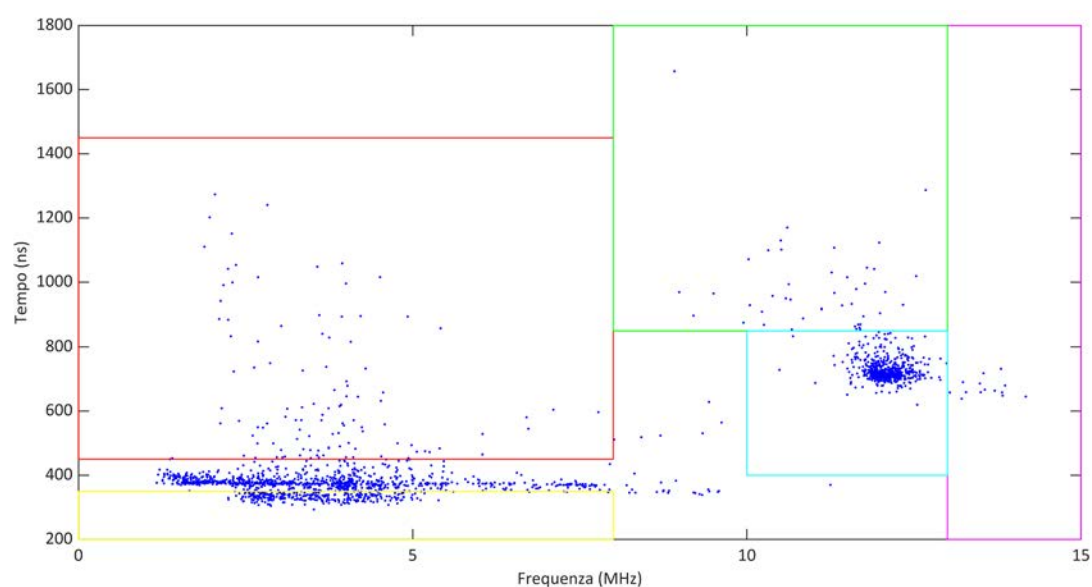


Fig. 8-26 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore BBC a 4 kV

Osservando la posizione dei punti nel diagramma t-f di (Fig. 8-26), si può notare la presenza di una zona di concentrazione, evidenziata dal rettangolo azzurro, colore con il quale sono rappresentati anche gli impulsi appartenenti al cluster nel pattern fase-carica.

Vista la conformazione rettilinea, sulla zona di transizione della tensione di rete, sembrerebbe si tratti di Corona sulle testate, presenti anche nel caso precedente, su una zona piuttosto ristretta.

Anche il cluster evidenziato dal rettangolo giallo sembrerebbe imputabile a Corona sulle testate, ma, vista la più estesa collocazione in frequenza, sembrerebbero estese su una vasta zona dell'avvolgimento statorico.

I restanti impulsi, fuori dai rettangoli di delimitazione, formano una seconda striscia sul diagramma, la cui forma sul pattern fase-carica, non è così nitida, ma potrebbe assomigliare piuttosto bene alla forma assunta tipicamente dalle scariche parziali risultanti da delaminazioni all'interfaccia tra il conduttore attivo e lo strato isolante, cosa assolutamente credibile in una macchina al termine della propria vita, in attesa di essere riavvolta.

Alcuni di questi impulsi acquisiti sono riportati in (Fig. 8-27).

La forma dell'impulso è molto diversa, quegli stessi segnali che presentano la massima ampiezza, sono gli stessi a presentare la massima estensione in termini di spettro. Si tratta molto probabilmente di impulsi di scarica parziale dovuti allo stesso fenomeno, ma attenuati ed addolciti nella forma, via via che il luogo della loro origine si allontana dai terminali di connessione.

È interessante notare come la carica apparente non sia interessata in modo significativo da questo problema, poiché, nonostante la diversa ampiezza, l'area sottesa e quindi l'integrale non mostra grandi deviazioni.

La componente HF che rende il segnale particolarmente appuntito, giunge ai terminali di misura tramite propagazione veloce, venendo via via sempre più attenuata lungo il suo cammino.

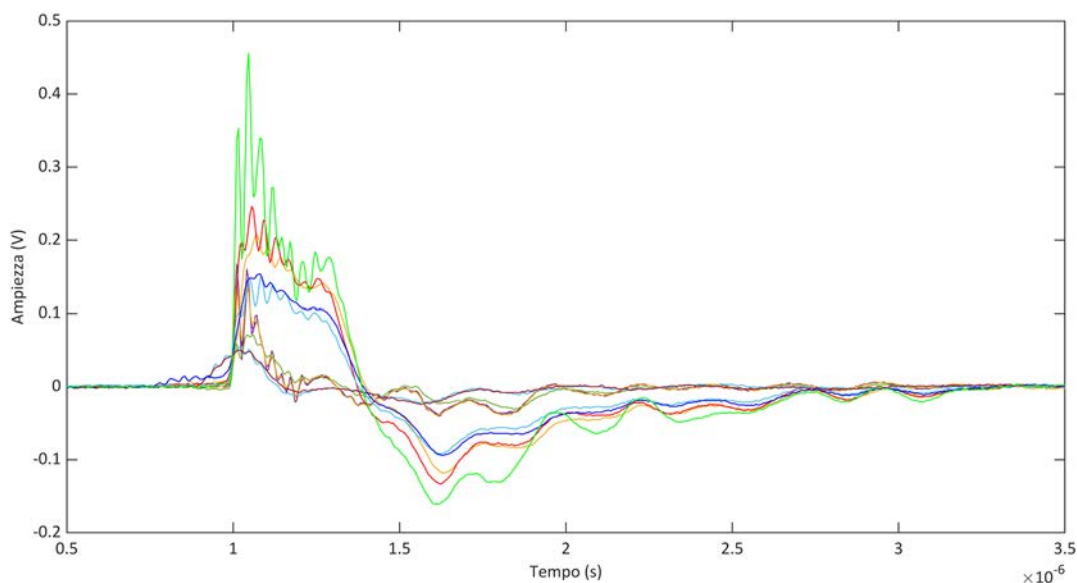


Fig. 8-27 Alcuni dei segnali acquisiti con diversa forma imputabile alla propagazione lungo l'avvolgimento statorico

Innalzando ulteriormente la tensione di alimentazione, fino a raggiungere i 6 kV, l'attività delle scariche parziali diviene talmente intensa, da essere tranquillamente apprezzabile attraverso l'udito.

Il pattern di (Fig. 8-28) mostra questa volta livelli di scariche parziali in attività in termini di carica apparente fino a 20 nC.

Osservando la rappresentazione sul diagramma t-f (Fig. 8-29), si può vedere come gli impulsi acquisiti, siano posizionati in aree molto diverse del diagramma ed in particolare modo con continuità, rispetto al caso precedente, dove le diverse aree erano tra loro separate da netti confini.

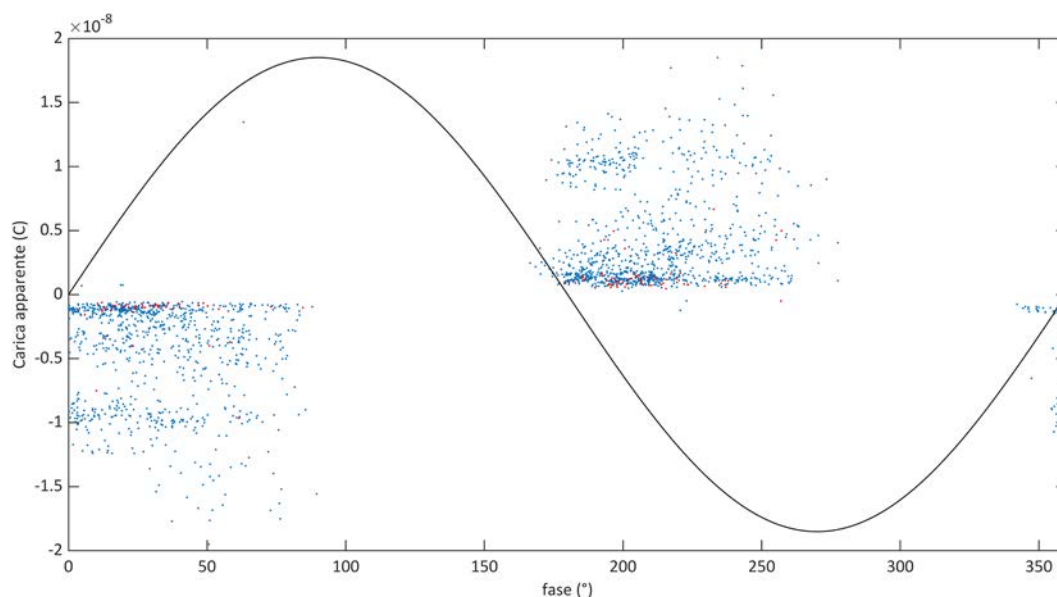


Fig. 8-28 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore BBC a 6kV

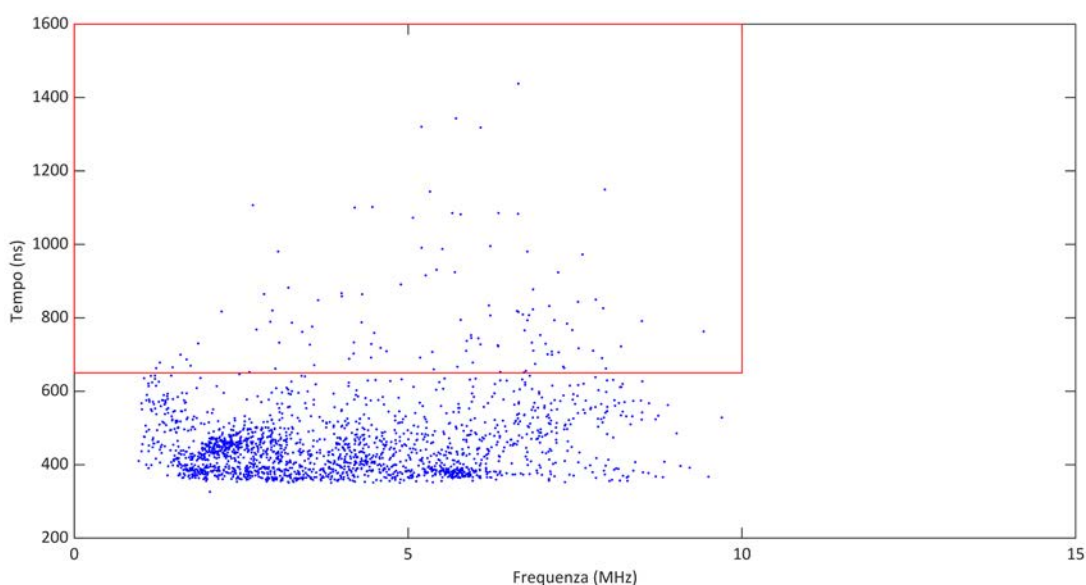


Fig. 8-29 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore BBC a 6 kV

Questo fa sì che l'attività di clustering sia per lo più impossibile in questa situazione. Fa eccezione la l'area del rettangolo rosso, già attivata per individuare i casi di rumore di tipo sinusoidale, che comunque evidenzia un numero limitato di casi, anche a causa della minor sensibilità del sistema di acquisizione, visto l'aumento del livello di trigger. In questa situazione, la tensione a cui è sottoposto il sistema isolante è 1.73 volte più elevata, per cui lo stress è notevole, specie trattandosi di una macchina a fine vita. Osservando il pattern di (Fig. 8-28) e cercando di confrontarne la forma con i casi proposti nell'appendice della norma [67], la figura con caratteristiche più simili sembra quella relativa alle delaminazioni, ipotizzate anche nell'analisi dei risultati della precedente misura.

L'alternativa del corona sulle testate, in forma così accentuata, sembra invece da escludere, poiché tutti e tre gli avvolgimenti sono alimentati alla stessa tensione, quindi le testate fra di loro non dovrebbero portare ad attività di scariche parziali.

Piuttosto, sembrerebbe che all'interfaccia fra la parte di matassa inserita in cava e la parte di testata, non siano presenti in questa macchina elementi semiconduttivi per evitare la presenza di componenti tangenziali di campo elettrico sul bordo ed assicurare il contatto elettrico con la parete metallica della cava, che quindi potrebbero essere motivo di attività di scariche parziali.

La situazione potrebbe essere aggravata anche dalla presenza di polvere ed altri depositi, dovuti all'inquinamento dell'ambiente dove la macchina ha operato fino ad oggi, che potrebbero creare percorsi conduttivi sulla superficie dell'isolante, con la conseguente formazione di scariche parziali superficiali e del fenomeno di tracking.

L'ultimo livello di tensione a cui è stata eseguita la misura è quello di 8 kV, situazione particolarmente critica per un isolamento stressato da anni di funzionamento in esercizio.

Anche in questo caso, la possibilità di effettuare un riconoscimento dei singoli fenomeni in atto mediante cluster sul diagramma t-f (Fig. 8-31), non è possibile.

Osservando il pattern della carica in funzione della tensione di rete (Fig. 8-30), e confrontandolo con quello relativo al caso dei 6 kV, non si nota un apprezzabile incremento del livello di carica apparente massimo rilevato nell'intervallo temporale di acquisizione.

Questo è giustificabile pensando al meccanismo con cui si formano gli impulsi di scarica parziale qui valutati, le singole sorgenti presenti nella macchina hanno ciascuna un preciso valore della tensione di innesco.

Una volta che la tensione di alimentazione è tale da aver "acceso" tutte le sorgenti presenti, l'entità della carica apparente, così come l'ampiezza degli impulsi, mostra nei confronti della tensione applicata una saturazione, fino al raggiungimento della tensione di scarica.

In questo caso, anche la sola analisi della forma del pattern non fornisce molte informazioni.

Visti i risultati delle prove precedenti, l'ipotesi della presenza di delaminazioni tra il conduttore e lo strato isolante, può continuare ad essere considerata, in quanto il pattern, dalla sola analisi visiva, mostra una possibilità di compatibilità con questo, anche se vi è certamente anche la sovrapposizione di altri fenomeni, tra cui un'attività di scariche parziali nelle testate, nella zona di uscita dalla cava delle matasse.

Dal diagramma t-f di (Fig. 8-31), rispetto quello del caso precedente, si può constatare la presenza di alcuni punti con un tempo equivalente oltre i 1600 ns, limite superiore del diagramma per tutti gli altri casi, questo non significa che gli impulsi acquisiti in



questa situazione abbiano una durata temporale, quindi una deviazione temporale rispetto al loro punto medio superiore.

Osservando i segnali acquisiti posti in queste posizioni, si è notato come si tratti piuttosto di sovrapposizioni di più impulsi di scarica parziale all'interno della stessa finestra temporale, dovute all'intensificazione della frequenza di ripetizione delle scariche parziali, che è naturale con l'aumento della tensione applicata, per alcuni fenomeni..

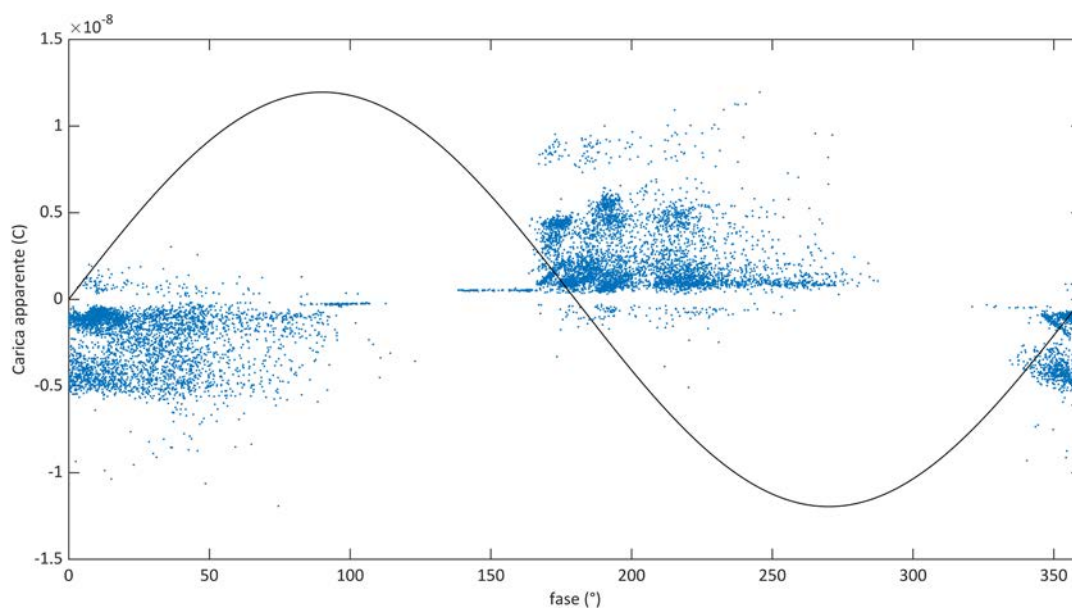


Fig. 8-30 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore BBC a 8kV

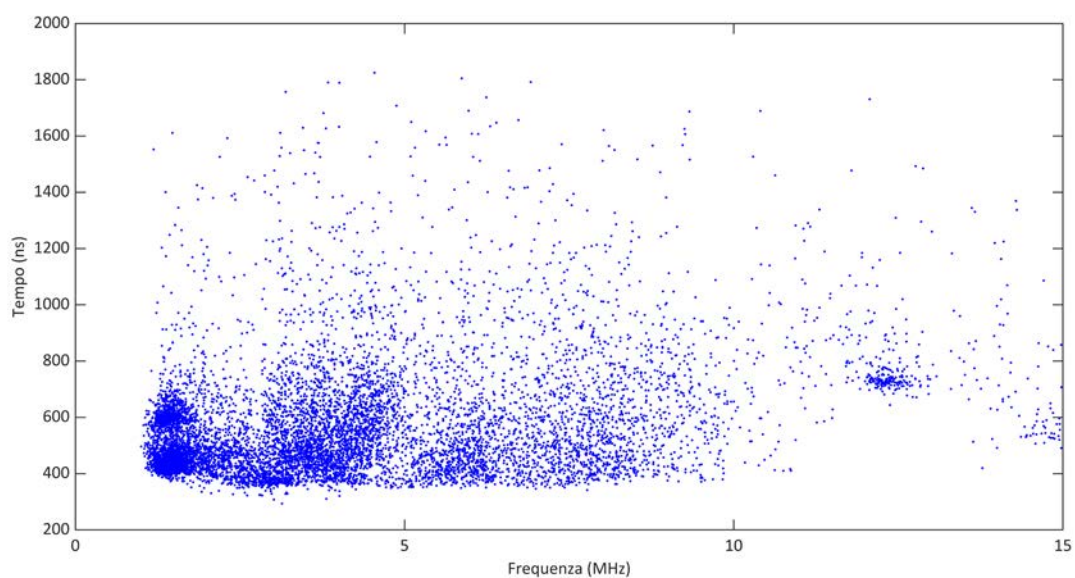


Fig. 8-31 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore BBC a 8 kV

### 8.3.2 Statore di una macchina asincrona con $U_n=6\text{kV}$

La seconda macchina oggetto di prove è stata un motore asincrono con tensione nominale 6 kV.

Di questo statore non si hanno molte informazioni, poiché la targa identificativa era probabilmente ubicata sul lato della cassa su cui vi era l'appoggio con il piano di sostegno (Fig. 8-32).

La macchina in prova, era anch'essa in attesa degli interventi di manutenzione meccanica e completo riavvolgimento, ma a differenza della precedente, erano già state effettuate operazioni di lavaggio e pulizia della parte statorica.

Anche in questo caso il centro stella dell'avvolgimento era collegato internamente e non accessibile, quindi, l'unica possibilità per eseguire la misura è quella di energizzare contemporaneamente tutti e tre gli avvolgimenti statorici verso terra, provando così il solo isolamento principale verso terra della macchina (Fig. 8-33).

L'intera capacità del sistema isolante verso terra misurata è di 360 nF, valore importante se confrontato con i 2,5 nF della capacità di accoppiamento utilizzata per collegare l'impedenza di misura al ramo di alta tensione.

L'operazione di calibrazione è stata eseguita iniettando una carica apparente di 1 nC in corrispondenza dei 3 terminali di connessione e della capacità di accoppiamento.

L'impulso risultante da questa operazione è riportato in (Fig. 8-34).



Fig. 8-32 Vista frontale dello statore della macchina BBC



La scelta di utilizzare finestre temporali di larghezza 2 us, così come di default proposto dallo strumento, non è stata molto azzeccata, in quanto, nella successiva rielaborazione dei risultati, ci si è accorti come la risposta all'impulso di calibrazione acquisito non fosse del tutto estinta al termine della registrazione.

Questo non pregiudica la valutazione della carica apparente e quindi del fattore di scala da esso derivato, che utilizza il picco del segnale integrale, collocato in corrispondenza del primo passaggio per lo zero della risposta.

Per quel che riguarda l'ampiezza del segnale, se confrontata con quella del caso precedente, visto il valore molto simile delle capacità dei due sistemi isolanti, si può constatare una discreta corrispondenza.

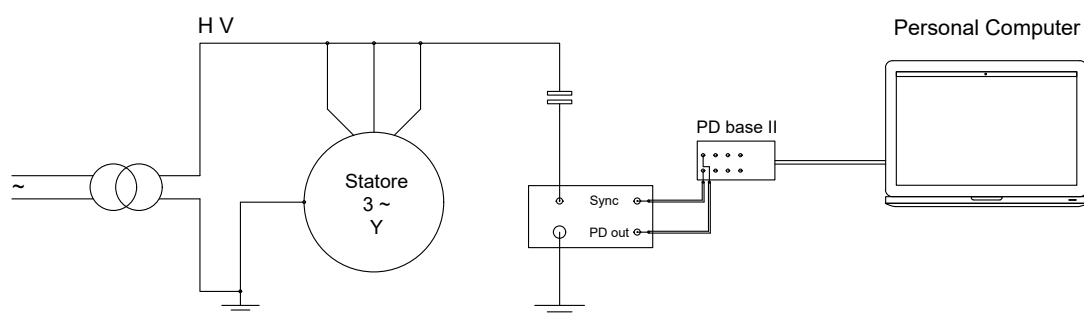


Fig. 8-33 Schema elettrico del circuito di prova dello statore

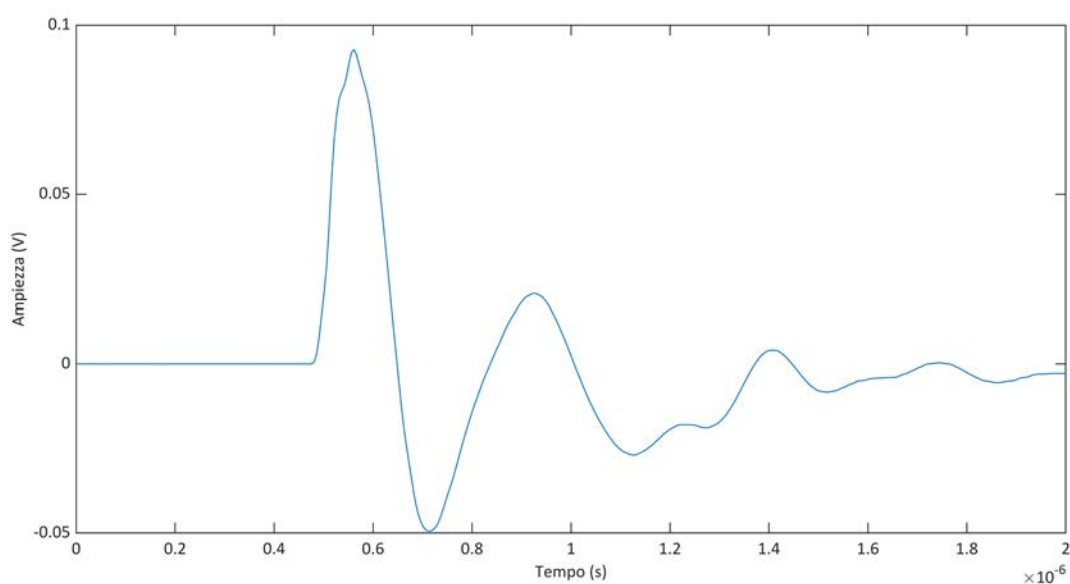


Fig. 8-34 Risposta acquisita dal sistema di misura all'applicazione dell'impulso di calibrazione

Una prima prova è stata eseguita energizzando lo statore alla tensione di 2 kV, ma a questo livello non erano presenti scariche parziali di entità tale da poter essere distinguibili dal rumore ambientale.

Si è per questo alzato il valore di tensione applicata, portandolo a 4 kV, dove le scariche parziali sono osservabili.

La scelta della finestra temporale e del tempo morto così contenuti, ha fatto sì che alcuni degli impulsi non fossero completamente estinti, ma andassero ad interferire con acquisizioni successive, falsando la valutazione della carica, e il segno.

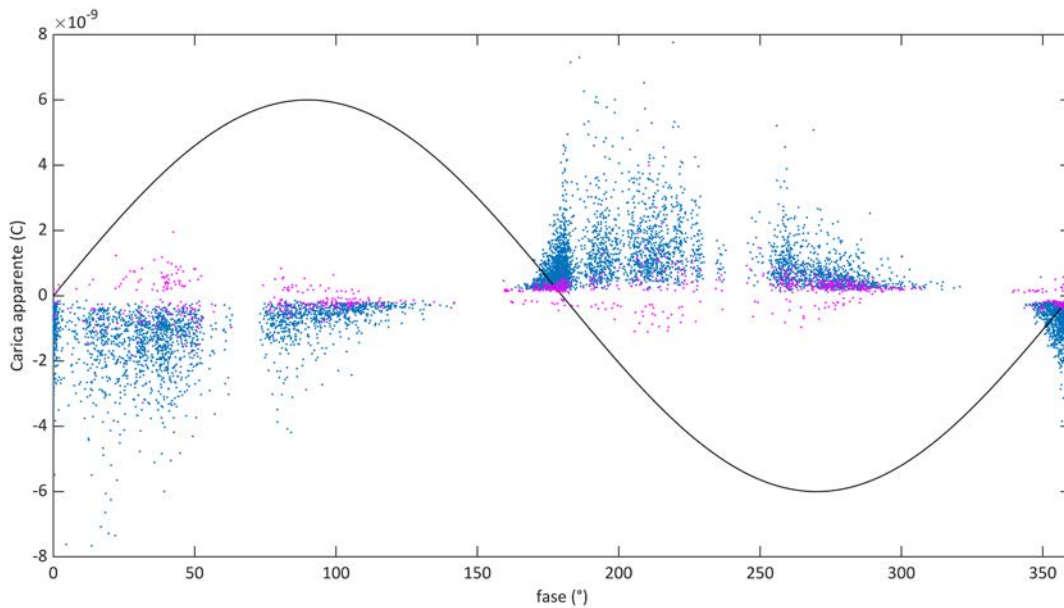


Fig. 8-35 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 4 kV

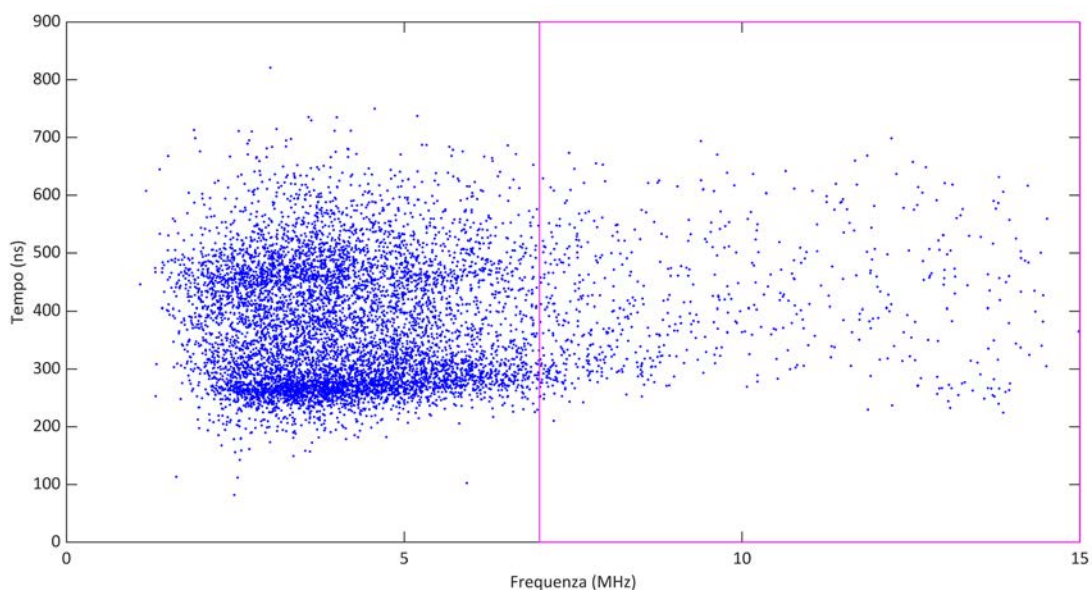


Fig. 8-36 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore applicando una tensione di 4 kV

Tutte le acquisizioni appartenenti a questa categoria non sono state rappresentate in nessuno dei due pattern, perché rimossi nella fase di post-processing.

In (Fig. 8-35) è rappresentato il pattern fase-carica dell'acquisizione.

Si può notare, una quasi totale assenza di scariche parziali nella zona del massimo e del minimo valore della tensione di rete, zona tipicamente prioritaria per la ricerca di eventuale Corona in aria.

Osservando il diagramma tempo-frequenza equivalenti di (Fig. 8-36) sembrerebbe vi siano presenti due diverse tipologie di impulsi, alcuni posti su una linea pressoché orizzontale, altri su un'area ellittica posta al di sopra.

Utilizzando le tecniche di clustering viste nel caso precedente, non si è comunque tratto alcun beneficio da questa possibile divisione, in quanto, pur occupando aree lievemente diverse, il loro comportamento in termini di fase è assolutamente identico, non permettendo così alcuna supposizione sull'origine del fenomeno.

Occorre tuttavia considerare che in questa seconda situazione le formazioni presenti sul diagramma si compenetrano tra loro, rendendo veramente inefficace il cluster rettangolare utilizzato.

Si è quindi passati all'ultima prova, applicando la massima tensione possibile verso terra all'intero statore, 6 kV.

Come si può osservare dal pattern fase-carica di (Fig. 8-37), le scariche parziali ora vanno a posizionarsi anche in quegli intervalli di fase che prima ne erano privi, seppur in maniera più rada, che nel resto della ciclo di rete.

Il valore della massima carica apparente messa in gioco resta anche qui abbastanza costante, mostrando come le sorgenti di scariche parziali più intense fossero già attive precedentemente.

Secondo la classificazione tempo-frequenza equivalente, osservabile in (Fig. 8-38), buona parte degli impulsi registrati si collocano in una porzione del piano dove la frequenza equivalente è inferiore agli 8 MHz, quelli posti oltre questo valore, contenuti nel rettangolo lilla, si è visto in molti casi essere il risultato di sovrapposizione di rumore di tipo impulsivo.

A parte questa classificazione, i punti sono distribuiti sull'area in modo così denso, che non sembra possibile attuare una vera e propria classificazione dei singoli eventi. L'analisi della forma complessiva del pattern in fase delle scariche parziali, e il confronto con le figure di riferimento proposte in appendice alla normativa di riferimento [67], sembrano compatibili con la forma proposta nel caso in cui siano presenti scariche interne al sistema isolante.

Trattandosi di una macchina con anni di servizio alle spalle, realizzata con tecniche costruttive ormai obsolete, questa possibilità non è totalmente da escludere, visto che, come si è detto i materiali inorganici sono praticamente immuni al fenomeno, essa potrebbe aver convissuto con questo problema per l'intera vita in esercizio.

Tuttavia, anche il processo di lavaggio eseguito presso l'officina potrebbe aver peggiorato le cose, permettendo al liquido utilizzato di intrufolarsi all'interno dei vacuoli e delle cavità presenti all'interno isolante, grazie anche alla presenza di fessurazioni sulla superficie della resina.

A differenza della macchina precedente, in questa vi è uno strato di materiale semiconduttivo che ricopre lo strato isolante fino ad una certa distanza dall'uscita dalla cava, in questo modo l'assenza di scariche parziali sulla superficie esterna delle matasse potrebbe essere verosimile.

Circa 4 nC di carica apparente massima ripetuta, sono una quantità notevole, quantomeno superiori al valore massimo ammissibile per le altre tipologie di componenti per cui la prova viene effettuata.

Da qui si comprende perché l'approccio scelto dalla normativa sulle scariche parziali non è tanto quello di porre un limite quantitativo, quanto piuttosto di indagare sulla natura del fenomeno e sulle possibili problematiche ad esso legate.

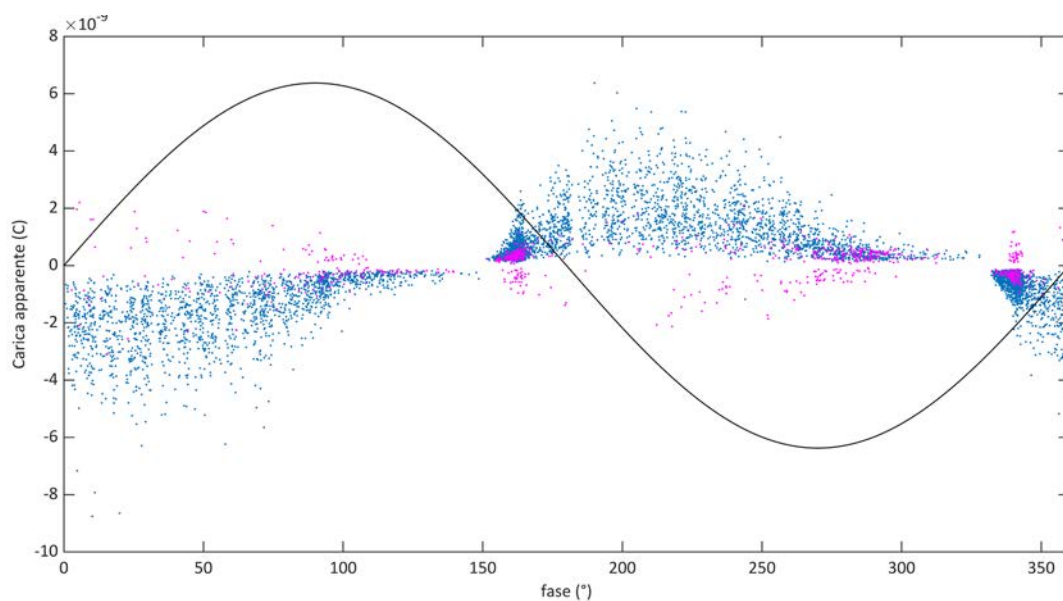


Fig. 8-37 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 6 kV

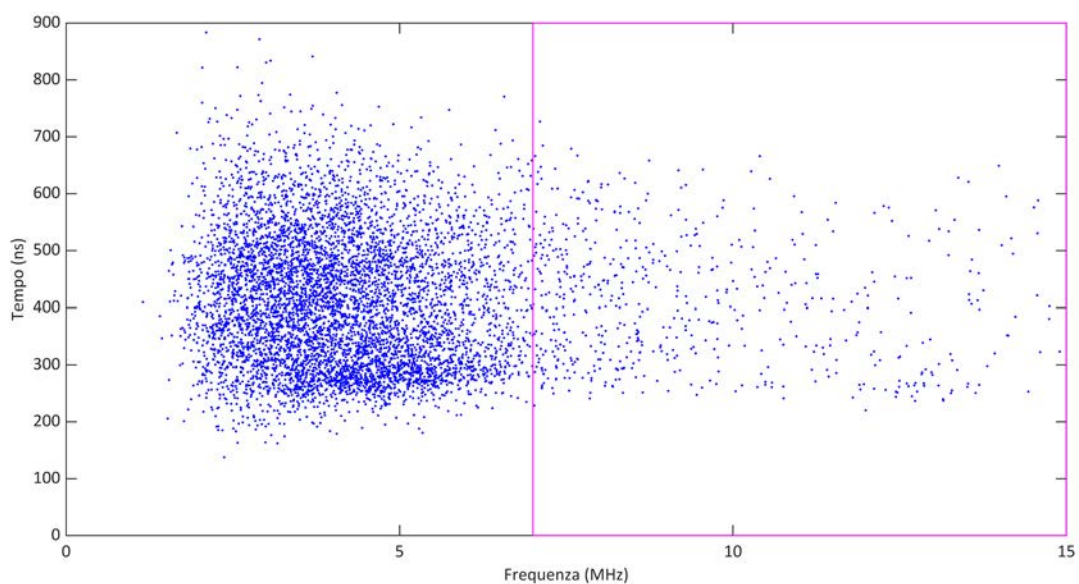


Fig. 8-38 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore applicando una tensione di 6 kV

### 8.3.3 Statore di fabbricazione ASEA usurato

Questa prova ha riguardato lo statore di una macchina sincrona di fabbricazione ASEA utilizzata in un gruppo termoelettrico di piccola potenza, a 2 poli, con potenza apparente nominale di 6250 kVA alla tensione di 6300 V.

In (Fig. 8-39) ed in (Fig. 8-40) sono riportate la vista frontale dello statore provato e la sua targhetta identificativa.



Fig. 8-39 Vista frontale dello statore della macchina ASEA

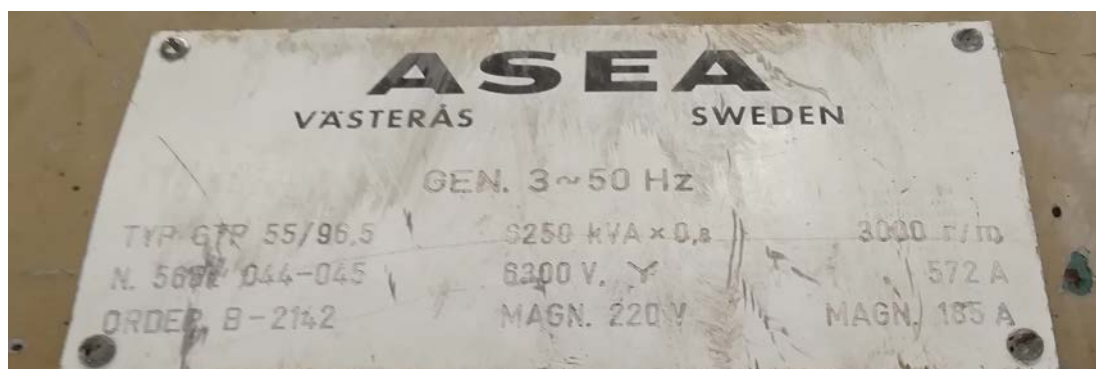


Fig. 8-40 Targa identificativa della macchina



La macchina in oggetto delle prove si trovava nell'officina elettromeccanica, luogo delle misure, in attesa di un totale riavvolgimento e della completa sostituzione del pacco di lamierini statorici.

Si tratta quindi di una macchina, nel momento in cui sono state eseguite le misure al termine della sua vita operativa, per quel che ne riguarda il sistema isolante.

Ci si aspetta quindi di trovare intensi e diversificati fenomeni di scariche parziali.

Lo statore in questione è realizzato portando nella morsettiera della macchina tutti e sei i terminali dell'avvolgimento statorico, ovvero l'inizio e la fine di ciascuna fase.

Questo consente, per la prima volta, di energizzare una singola fase per volta, mettendo a terra le altre due, così come osservabile in (Fig. 8-41).

In questo modo, oltre a provare l'isolamento principale fase-terra, come nelle prove precedenti, si andrà a stressare anche l'isolamento tra fasi diverse.

Inoltre, si andrà a ridurre la capacità equivalente verso terra della macchina vista dalla rete di alimentazione, solamente 17 nF, che consentiranno un grande miglioramento nella sensibilità del sistema di misura ed una maggiore immunità al rumore ambientale, vista la possibilità di acquisire segnali più ampi.

La normativa di riferimento [67] consiglia l'applicazione della tensione di alimentazione dal lato opposto dell'avvolgimento rispetto al capo su cui si collega la capacità di accoppiamento del sistema di misura.

Questa raccomandazione non è però in alcun modo sostenuta da motivazioni, quindi si è provato ad eseguire le misure di scariche parziali nella macchina, sia nella configurazione riportata in (Fig. 8-41), sia spostando la capacità di accoppiamento sul terminale V2.

Prima di passare alla vera e propria misura di scariche parziali, si è voluto eseguire una breve indagine sui fenomeni legati alla propagazione dell'impulso entro l'avvolgimento statorico, dal luogo di origine della scarica parziale, fino ai morsetti di connessione. A questo scopo si è iniettato l'impulso di calibrazione, con carica apparente 1 nC e durata 13 ns, andando contemporaneamente a registrare la forma dell'impulso, sia dal lato di iniezione, sia da quello opposto, valutando anche l'eventuale presenza dell'avvolgimento secondario del trasformatore di alimentazione in parallelo.

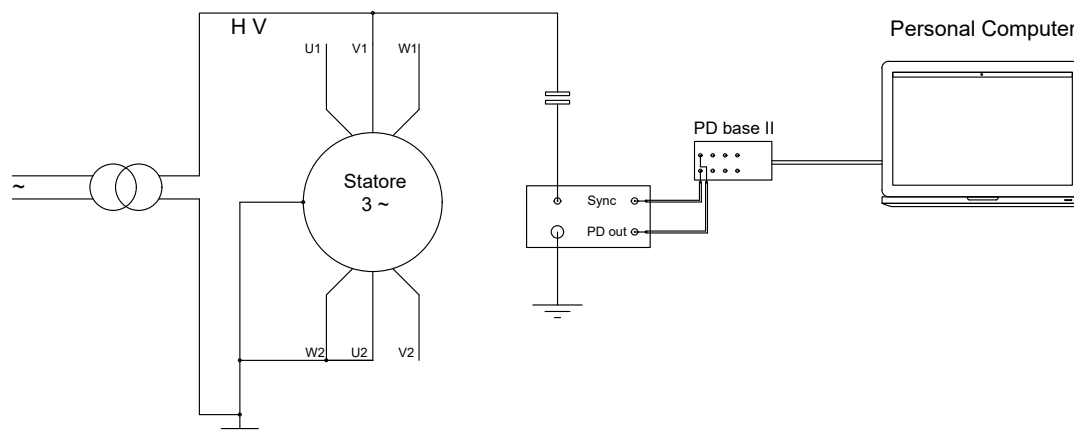


Fig. 8-41 Schema elettrico del circuito di prova dello statore di fabbricazione ASEA

In (Fig. 8-42) sono riportate le tre acquisizioni effettuate nel dominio del tempo. L'impulso color arancione è stato iniettato e rilevato dal terminale della macchina connesso al trasformatore di alimentazione, lasciando contemporaneamente l'altro capo dell'avvolgimento aperto.

L'impulso ocra è invece stato acquisito collegando la capacità di accoppiamento dal lato opposto rispetto alla sorgente di alimentazione, mentre il segnale di calibrazione veniva iniettato in corrispondenza del terminale di misura.

L'ultimo caso è relativo all'iniezione dell'impulso di calibrazione dal lato della sorgente di alimentazione, osservandolo attraverso l'impedenza di misura e la capacità

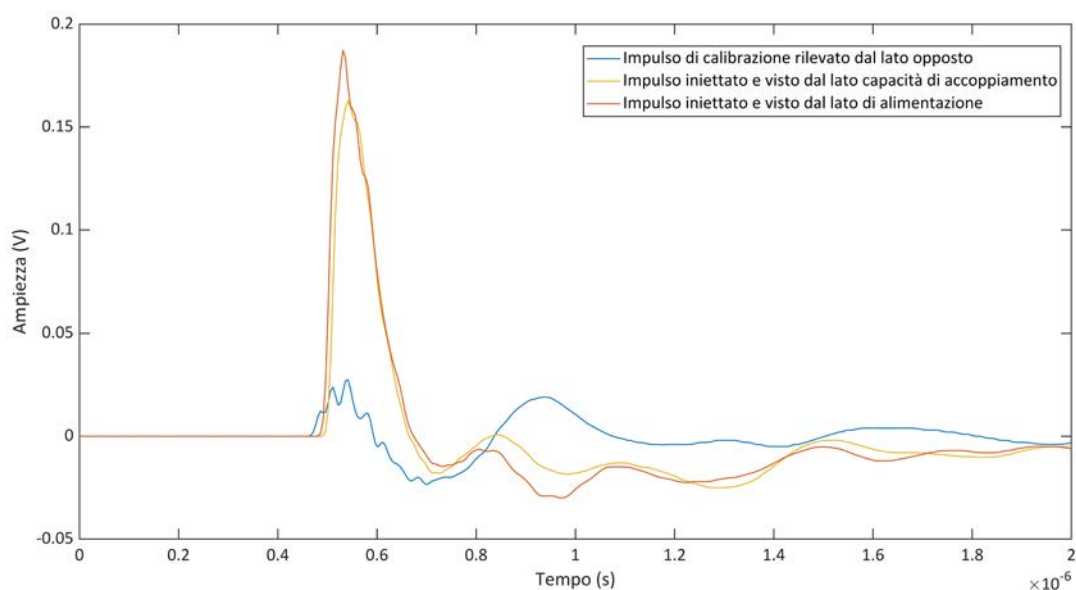


Fig. 8-42 Confronto temporale degli impulsi di calibrazione acquisiti nelle tre condizioni

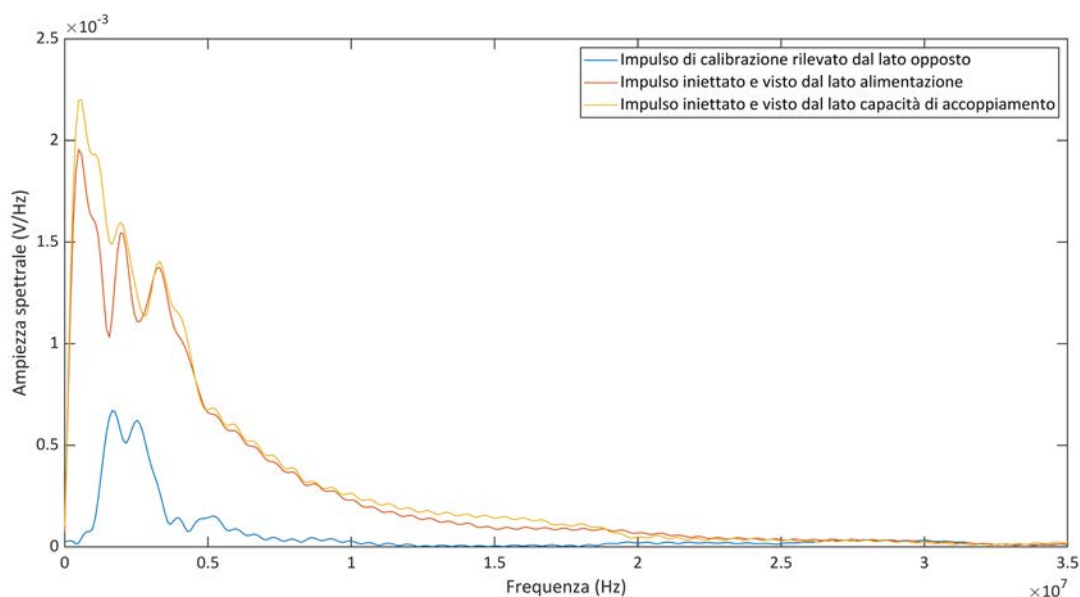


Fig. 8-43 Confronto spettrale degli impulsi di calibrazione acquisiti nelle tre condizioni

poste dal alto opposto, facendo quindi attraversare al segnale di calibrazione l'intera fase statorica della macchina, prima di poter essere osservato.

I segnali arancione ed ocra, non mostrano particolari differenze, se non la presenza sull'arancione di una riflessione positiva nei primi istanti dovuta al comportamento dell'avvolgimento del trasformatore di alimentazione al transitorio veloce.

In entrambi, dopo l'impulso vero e proprio vi è una coda oscillante.

Il segnale disegnato in colore blu, sembra avere ben poco in comune con gli altri due. Il primo tratto evidente è l'attenuazione, esso presenta un'ampiezza del picco circa un sesto rispetto ai due valutati in corrispondenza del punto di iniezione.

Questo perché, nel tragitto all'interno dello statore, le varie capacità trasversali della rete a parametri distribuiti, drenano verso terra parte della carica apparente iniettata. Così come visto nell'apposita sezione, la propagazione si compone di due diversi meccanismi, uno veloce, grazie al quale è possibile vedere l'impulso, seppur deformato dalla risposta in frequenza della macchina, quasi in contemporanea rispetto agli altri canali, contenente la parte più alta dello spettro dell'impulso ed uno lento, nel quale l'avvolgimento si comporta come una linea di trasmissione, dove la componente a frequenza più ridotta viene fondamentalmente trasmessa senza distorsioni.

In (Fig. 8-43) è riportata la trasformata di Fourier eseguita per via numerica dei tre diversi segnali. La scelta di una finestra temporale di soli 2  $\mu$ s non è molto indicata, perché introduce un troncamento nel segnale, facendo apparire il fenomeno dell'aliasing spettrale.

Posta a circa 250 kHz sembrerebbe collocata la frequenza di risonanza dell'avvolgimento della macchina.

Utilizzando le definizioni di tempo equivalente e frequenza equivalente di un segnale, si è provato a collocare i tre appena esaminati sul piano t-f, per vedere in che modo il diverso contenuto spettrale e la forma d'onda, ne condizionano la collocazione sul piano, senza entrare nei dettagli ci si accorge che segnali simili nel dominio temporale e della frequenza si collocano in punti del piano vicini, mentre è abbastanza nitida la differenza con il segnale rappresentato in blu.

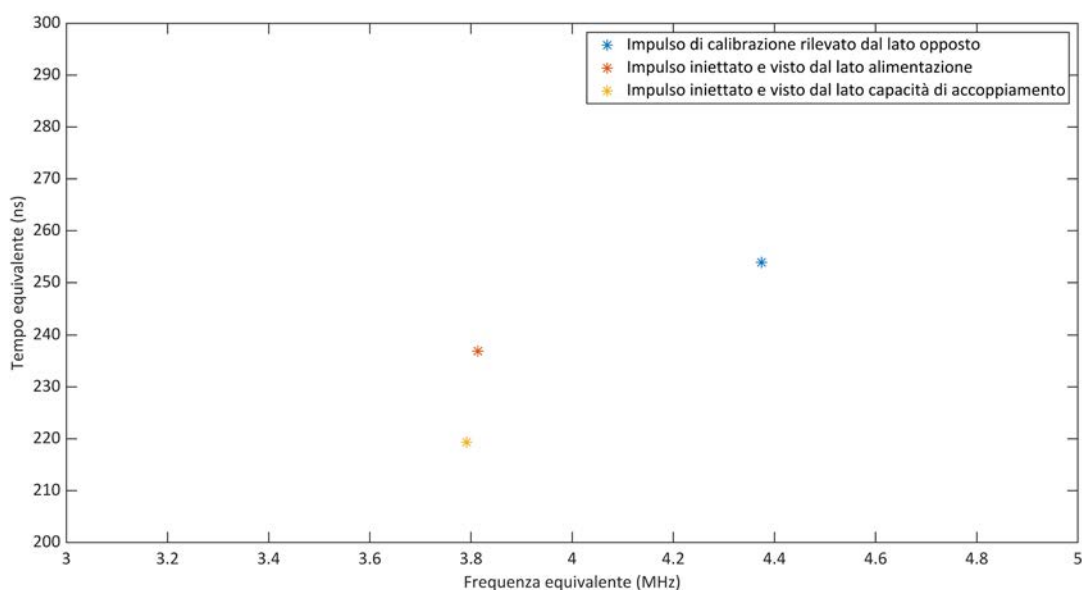


Fig. 8-44 Posizionamento sul piano tempo-frequenza equivalente dei tre segnali acquisiti



Ritornando alla classica misura di scariche parziali, essa è stata eseguita su questo statore alle tensioni di 2, 4 e 6 kV.

Tuttavia, al livello di 2 kV, la macchina si è dimostrata silenziosa in termini di scariche parziali, o comunque queste avevano ampiezza tale da non risultare rilevabili rispetto al rumore di fondo.

Si passerà quindi direttamente alle prove eseguite alla tensione applicata fase-terra di 4 kV.

In questa prima sezione si riporteranno i risultati ricavati alimentando lo statore dallo stesso terminale su cui è anche posta la capacità di accoppiamento con la strumentazione di misura.

Tutti i valori di carica apparente sono stati espressi grazie al fattore di scala fornito dall'integrazione dell'impulso di calibrazione fornito nell'analogica configurazione circuitale a quella di prova.

In (Fig. 8-45) è riportato il pattern carica apparente-fase delle scariche parziali rilevate, si possono osservare tre bande orizzontali, poste a diversi livelli di carica apparente. La banda, la cui carica apparente è posta di poco sopra lo zero per l'intero ciclo della tensione di rete, è probabilmente attribuibile a rumore raccolto dalla strumentazione a causa dell'ambiente industriale in cui si eseguivano le prove.

Più interessanti sono invece le altre due strisce, poste a livelli opposti di segno durante le diverse semi-onde della tensione di rete, in questo caso potrebbe trattarsi di Corona sulle testate, ma la rumorosità della misura osservata, non consente di effettuare stime in merito.

Anche il comportamento sul piano tempo-frequenza equivalente non è molto nitido, vi è una sovrapposizione tra le zone coperte dai diversi fenomeni eventualmente presenti, che non consente di raccogliere informazioni.

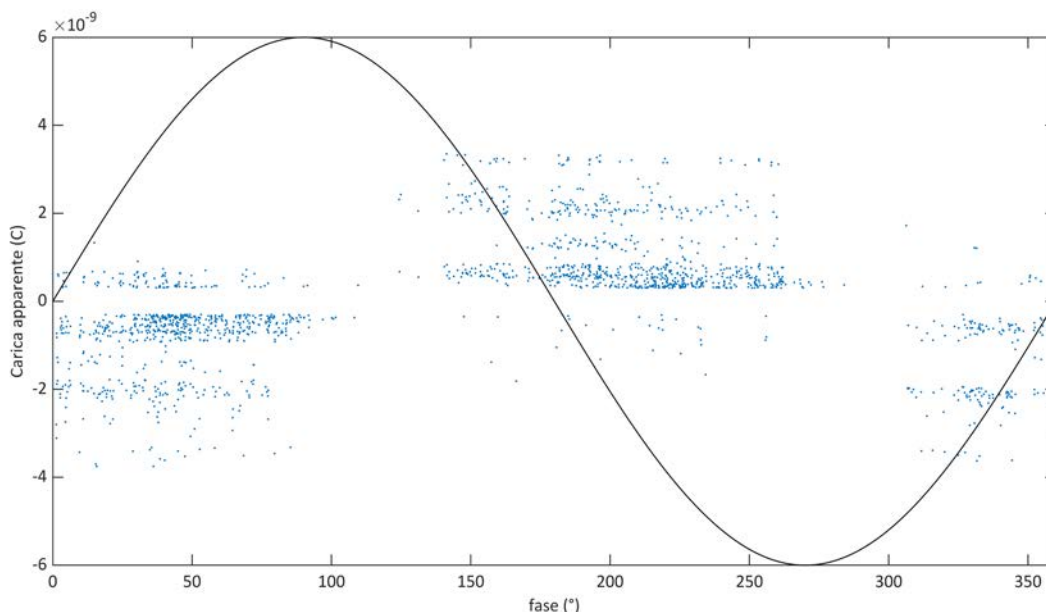


Fig. 8-45 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 4 kV

È stata quindi elevata la tensione di alimentazione, fino a raggiungere il valore massimo utilizzato di 6 kV.

In (Fig. 8-46) è riportato il pattern fase-carica apparente dell'acquisizione, utilizzando gli stessi colori del cluster entro cui sono racchiusi i punti in (Fig. 8-47).

Sul diagramma t-f i vari impulsi si collocano in zone ben delimitate, permettendone abbastanza bene il riconoscimento.

Vista la forma triangolare e leggermente asimmetrica del pattern formato dai punti blu, si sospetta un'attività legata alla presenza di delaminazioni attorno ai conduttori attivi, oltre alla presenza di Corona all'uscita dalle cave dei conduttori e sulle testate.

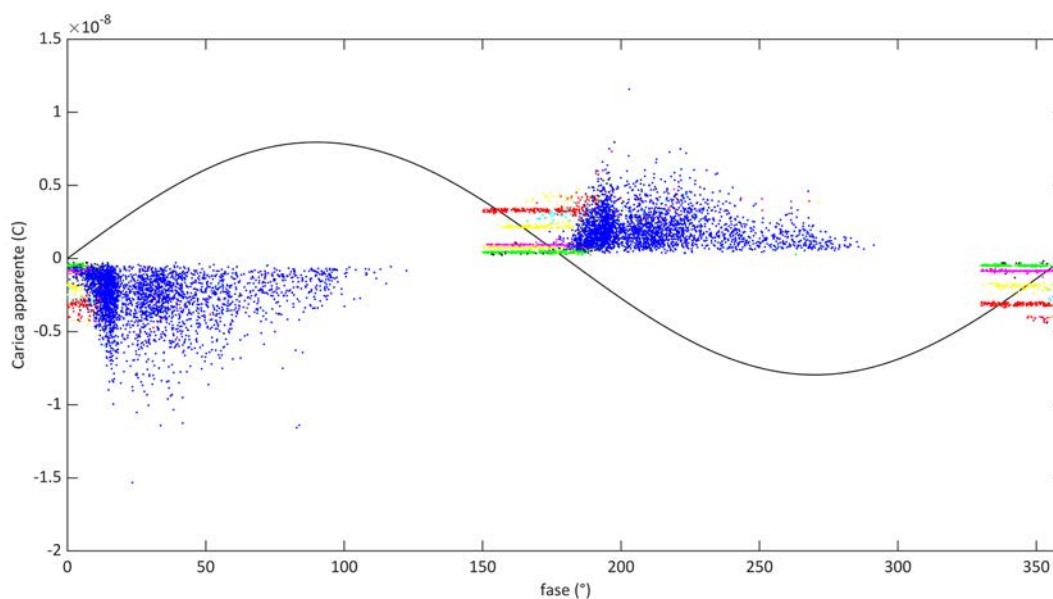


Fig. 8-46 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 6 kV

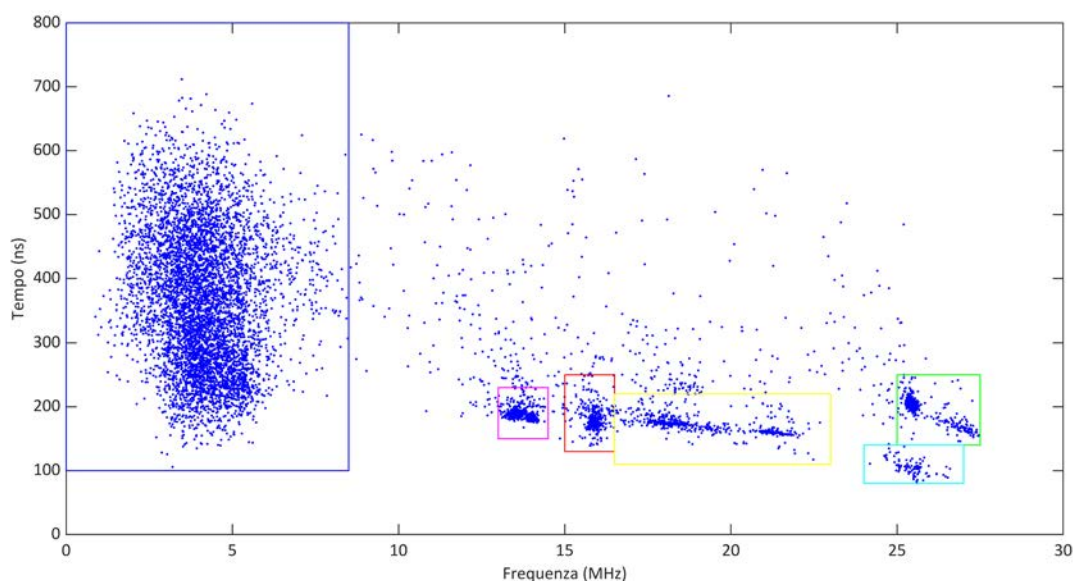


Fig. 8-47 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore applicando una tensione di 6 kV

Si è quindi provveduto a spostare il condensatore di accoppiamento sul secondo terminale della fase dell'avvolgimento in prova, mantenendo le altre due fasi non energizzate collegate a terra.

Dopo aver applicato un impulso di calibrazione all'estremità di misura, ed effettuato l'integrale per ricavare la costante di calibrazione della misura, si è provato a ripetere le misure di cui al pagine precedenti nella configurazione prevista dalla norma.

Alla tensione applicata fase-terra di 2 kV, anche in questo caso, non si è riusciti a ricavare una registrazione in cui i fenomeni di scarica parziale fossero evidenti rispetto il rumore acquisito.

Salendo alla tensione di 4 kV, si è ricavato il pattern fase-carica di (Fig. 8-48), dove, anche senza l'utilizzo dei colori di clustering risulterebbe abbastanza evidente la presenza di diverse forme tra loro combinate.

Conferma di questo giunge da (Fig. 8-49), dove la rappresentazione tempo-frequenza equivalente, mette chiaramente in luce le diverse famiglie di impulsi presenti.

Analizzando la rispondenza colore-forma nel pattern in funzione della fase, si direbbe anche in questo caso che le scariche parziali rappresentate con la colorazione blu siano relative ad un problema di delaminazione dello strato isolante dalla superficie esterna dei conduttori attivi.

Le altre zone, seppur attive in diverse zone dell'avvolgimento, sembrerebbero tutte imputabili a fenomeni di tipo corona all'uscita del conduttore dalla cava e sulle testate tra fasi.

Pur effettuata anch'essa a 4 kV di tensione applicata, questa acquisizione mostra un netto miglioramento del rapporto segnale/rumore, rispetto a quella eseguita non considerando il consiglio della normativa di porre alimentazione e capacità di accoppiamento su lati opposti.

Certamente la presenza di quest'elemento vicino al punto di misura potrebbe introdurre, oltre ai veri impulsi di scarica parziale, quella che ne è la sua risposta, per esempio creando riflessioni positive d'onda, così come visto prima con il confronto degli impulsi di calibrazione.

Inoltre, in caso di scariche parziali interne al trasformatore, la propagazione all'interno di tutto l'avvolgimento statorico potrebbe costituire un limitato elemento filtrante per ridurre l'impatto sui risultati.

Tuttavia, una singola prova non può bastare a comprendere se la ridotta quantità di rumore acquisito dipende dal momento favorevole in cui sono state effettuate le registrazioni, piuttosto che un merito effettivamente da attribuire alla nuova configurazione circuitale.

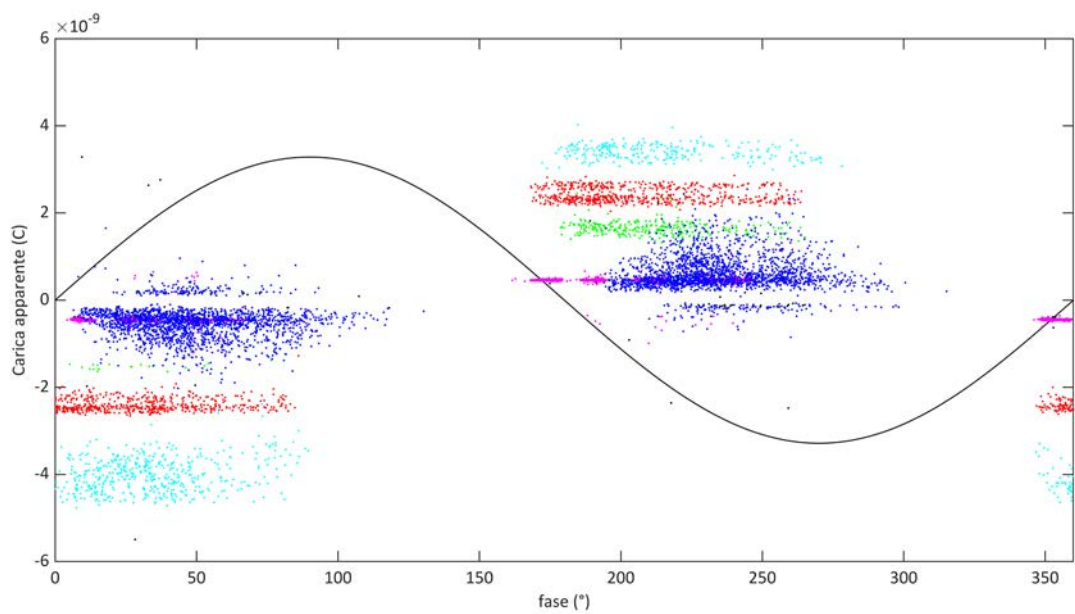


Fig. 8-48 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 4 kV

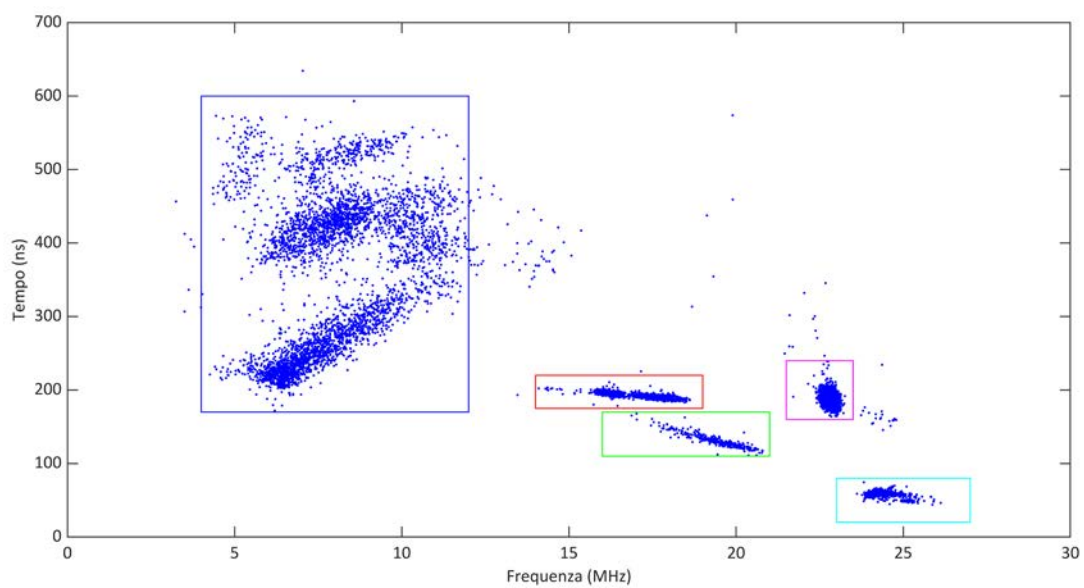


Fig. 8-49 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore applicando una tensione di 4 kV

Le prove effettuate alla tensione applicata di 6 kV, sembrano confermare quanto ipotizzato, il pattern fase-carica apparente di (Fig. 8-50) mostra una situazione simile alla precedente, alcuni impulsi stabili su un livello ben definito, oltre ad una forma leggermente triangolare ed asimmetrica.

Nel dominio tempo-frequenza, i punti sono ben distinti tra loro, quindi si dovrebbe trattare di fenomeni tra loro indipendenti per collocazione o tipologia.

La comparazione con i pattern proposti dalla normativa come esempio, porta a confermare la presenza all'interno della macchina di problemi di delaminazione dello strato isolante, oltre ad una attività di Corona sulle testate o all'uscita dalle cave.

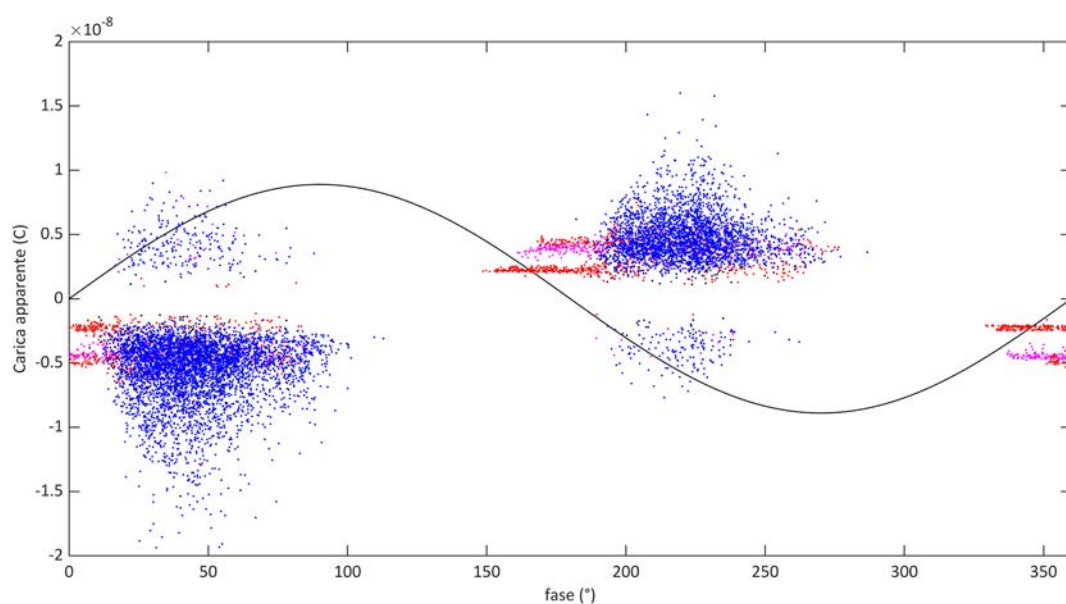


Fig. 8-50 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 6 kV

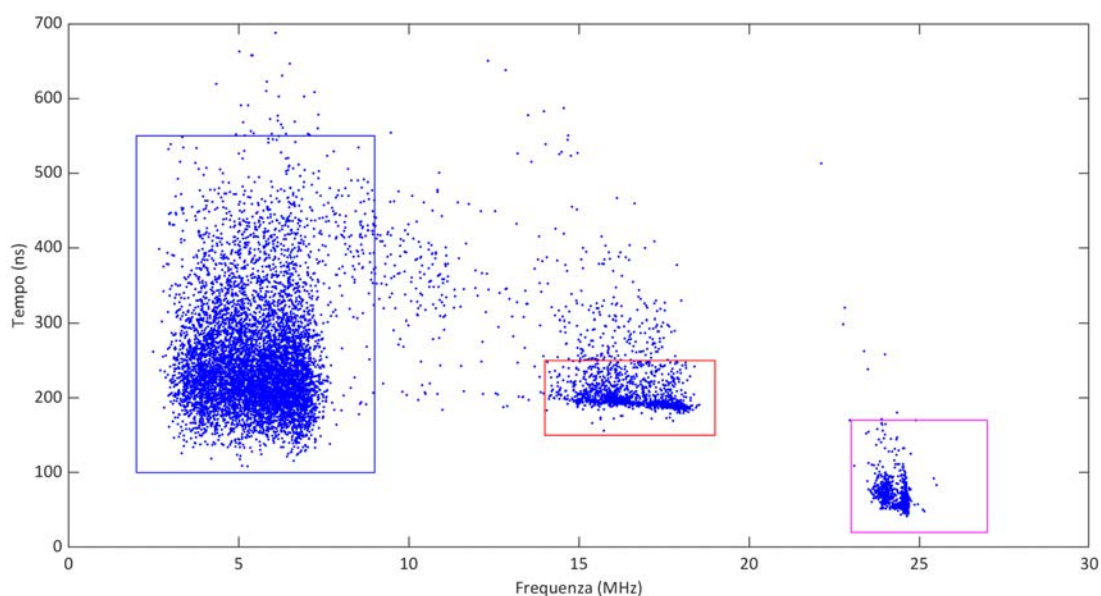


Fig. 8-51 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore applicando una tensione di 6 kV



### 8.3.4 Statore di fabbricazione ASEA riavvolto

La macchina provata in questa sezione è esattamente gemella come caratteristiche alla macchina ASEA della sezione precedente, ma a differenza di questa, su di essa sono state completate le operazioni di riavvolgimento.

Nel momento in cui si scrive, si tratta quindi di uno statore il cui sistema isolante è assolutamente nuovo, privo da qualsiasi danno derivante da usura, poiché deve ancora essere posto in servizio.

Il rifacimento dell'avvolgimento ha comportato un adeguamento dei materiali e delle modalità costruttive di questo all'attuale stato dell'arte.

Oggi gli avvolgimenti di tipo concentrico, presenti originariamente, sono utilizzati di rado sulle macchine di grande potenza, poiché risultano molto più comodi gli avvolgimenti di tipo embricato, dove le matasse (tutte uguali) possono essere formate, nastrate e successivamente essere inserite nelle cave di statore prestando attenzione ai soli collegamenti di inizio e fine di ciascuna.

Lo strato isolante è stato realizzato in nastro di mica, impregnato in resina epossidica, materiale con certamente migliori caratteristiche elettriche e termiche rispetto a quanto era stato usato 40 anni addietro.

Tuttavia, la presenza della resina epossidica, componente di tipo organico, rende la macchina suscettibile ai danni provocati dalla presenza per tempi lunghi di scariche parziali, specialmente se entro le cave.

Nonostante l'adeguamento tecnologico della struttura interna della macchina, i dati di targa sono rimasti uguali a quelli dichiarati in (Fig. 8-40), seppur è stata notata una non trascurabile differenza tra le due realizzazioni, nel valore di capacità fase-terra del singolo avvolgimento, ora mediamente pari a 57 nF, valore più che triplo rispetto agli originali 18 nF, certamente a causa del diverso valore della costante dielettrica dei nuovi materiali.



Fig. 8-52 Nuova struttura delle testate della macchina, rispetto quella della sezione precedente

Anche in questo caso l'avvolgimento presenta un centro stella accessibile ed apribile, per cui le prove sono state effettuate secondo lo schema di (Fig. 8-53), energizzando una singola fase statorica, mentre le altre due erano mantenute collegate a terra.

La prova è stata effettuata in due diverse configurazioni, ponendo la capacità di accoppiamento in corrispondenza del terminale di iniezione dell'alta tensione e sul lato opposto dell'avvolgimento.

Poi, visti anche i migliori risultati forniti nel caso precedente e volendo seguire le prescrizioni della normativa di riferimento, si è utilizzato solamente i risultati della seconda configurazione.

La prova è stata svolta a quattro diversi livelli di tensione 2, 4, 6 ed 8 kV, in quanto trattandosi di una macchina con isolamento nuovo, che dovrà resistere anche alla prova di tensione applicata di valore  $2 U_n + 1$  per 60", si è potuto stressarla dal punto di vista dielettrico maggiormente, rispetto alla gemella a fine vita.

La prova eseguita a 2 kV non ha mostrato attività di scariche parziali, o almeno non di entità tale da emergere al di sopra del rumore di fondo ambientale.

La successiva prova eseguita alla tensione di 4 kV ha mostrato comunque una limitata attività di scariche parziali, con valori di carica apparente nel pattern fase-carica di (Fig. 8-54) sempre inferiori ad 1 nC.

Il valore di 100 pC rappresenta tutto sommato il limite di sensibilità dello strumento, da quanto visto in laboratorio, quindi la presenza di alcuni impulsi con carica di segno opposto rispetto alla quasi totalità degli altri nello stesso semiperiodo, vista anche la presenza di rumore elettromagnetico dovuto all'attività degli altri macchinari in uso, è più che tollerabile.

Il pattern tempo-frequenza equivalente, mostra la grande totalità dei segnali acquisiti collocati in un'unica zona molto densa, con la presenza di alcuni punti ad essa estranei, in molti casi riconducibili agli stessi punti la cui carica apparente dopo l'integrazione risulta con segno opposto.

Analizzandone alcuni si è visto che si trattava di sovrapposizioni di più impulsi adiacenti di scariche parziali, o di altri fenomeni di natura impulsiva captati dal circuito di misura e acquisizione.

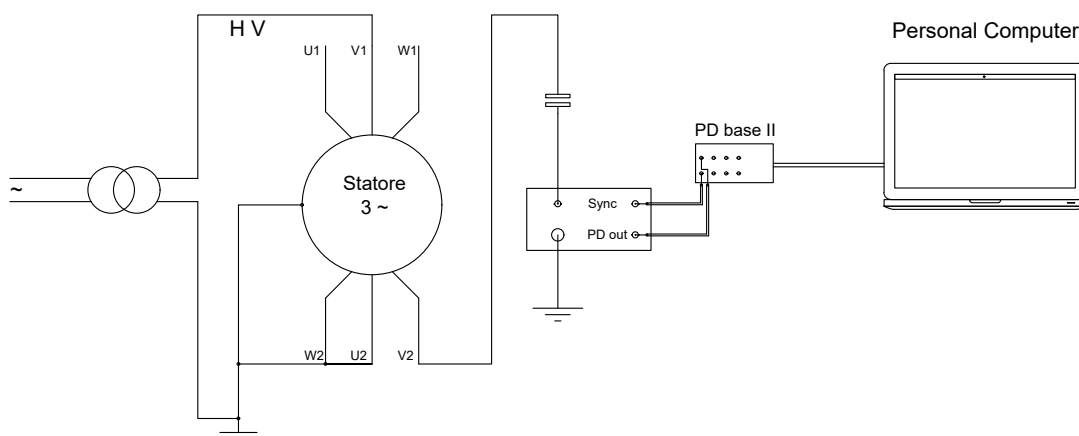


Fig. 8-53 Schema elettrico del circuito di prova dello statore

L'analisi della forma del pattern in fase della carica apparente sembra suggerire un'attività di scarica parziale in aria, Corona, sulle testate della macchina. Tuttavia, l'esito di questa acquisizione mostra livelli così contenuti, che forse è meglio attendere le misure a tensione più elevate per fornire opinioni più sicure.

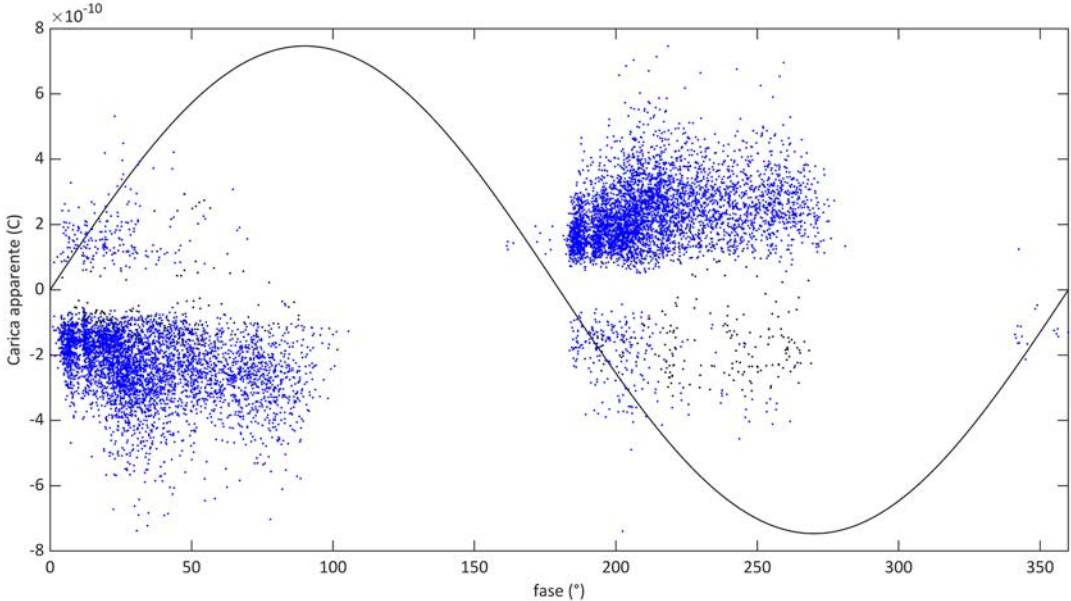


Fig. 8-54 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 4 kV

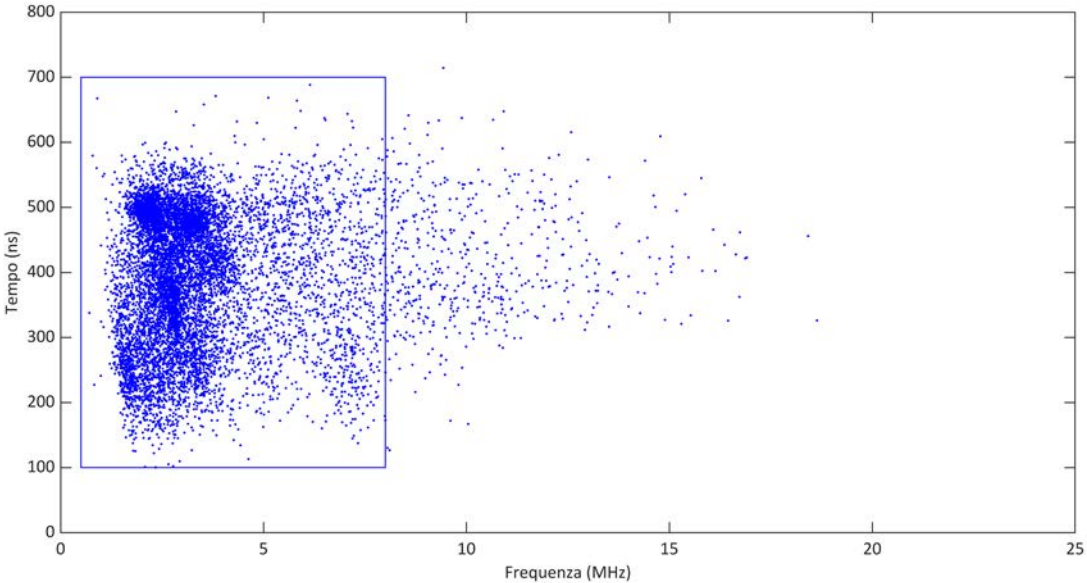


Fig. 8-55 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore applicando una tensione di 4 kV



La prova eseguita alla tensione di 6 kV mostra un lieve aumento dei livelli di scarica parziale riscontrati, pur mantenendosi attorno al valore di 1 nC di ampiezza (Fig. 8-56). Il diagramma tempo-frequenza equivalente mostra come la quasi totalità degli impulsi sia ancora collocata all'interno della stessa area, evidenziata dal rettangolo blu e dal colore blu dei puntini nel pattern di fase.

L'innalzamento della tensione produce una più fitto treno di impulsi di scariche parziali, che facendo aumentare il numero di sovrapposizioni osservate.

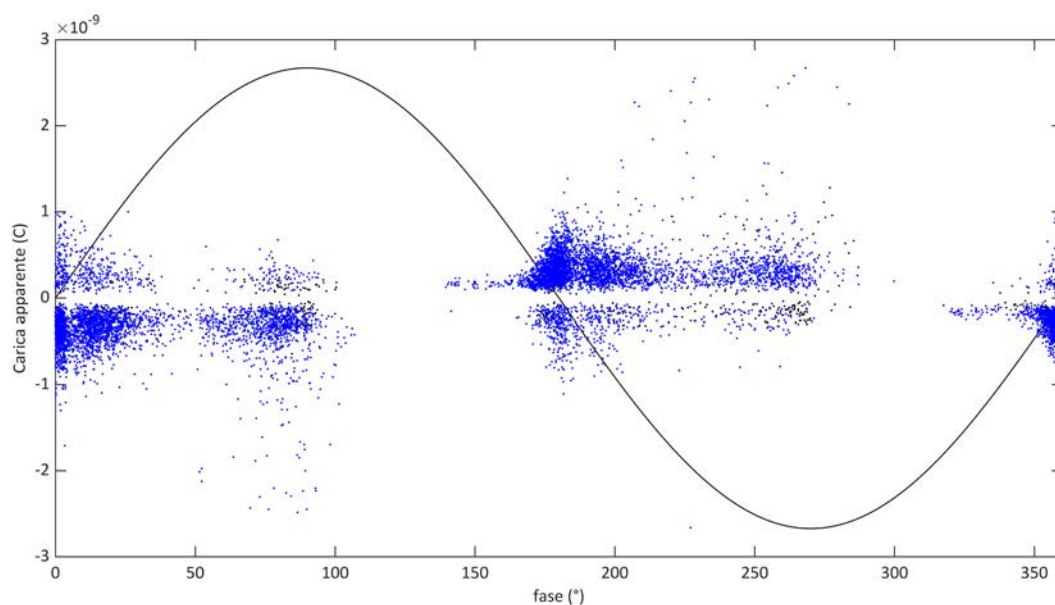


Fig. 8-56 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 6 kV

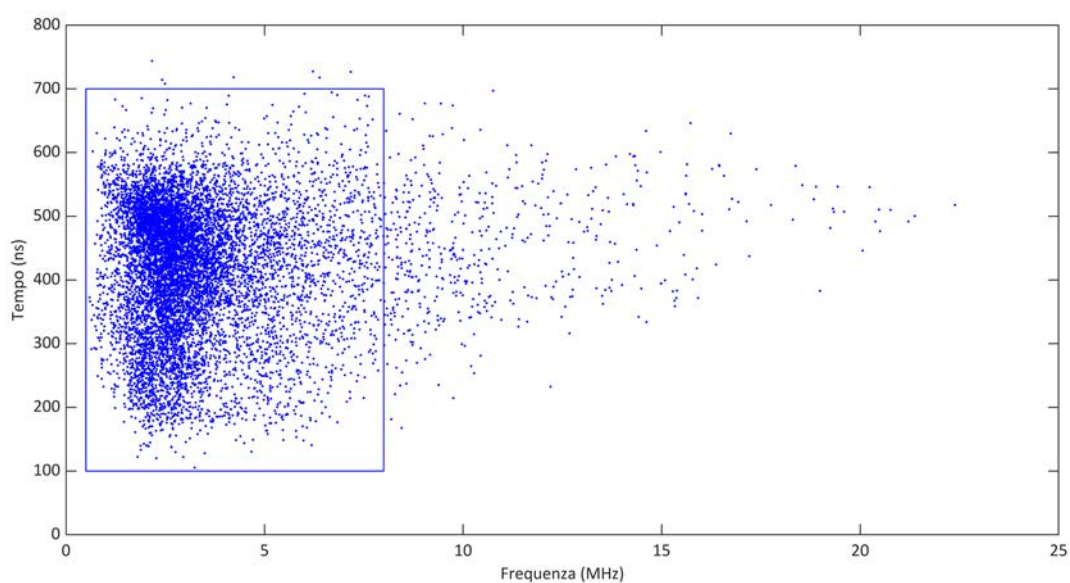


Fig. 8-57 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore applicando una tensione di 6 kV

L'ultima misura eseguita ad 8 Kv, mostra un importante aumento dell'attività e della carica apparente delle scariche parziali (Fig. 8-58).

Le caratteristiche degli impulsi in accordo con quanto riportato nel digramma tempo frequenza equivalente, sembrano non subire grandi modifiche rispetto ai due casi precedenti (Fig. 8-59).

A riprova quindi che il fenomeno in atto e la sua localizzazione, sono rimaste le medesime, probabilmente di Corona in aria sulle testate, nelle zone di vicinanza tra la fase alimentata e le due a terra.

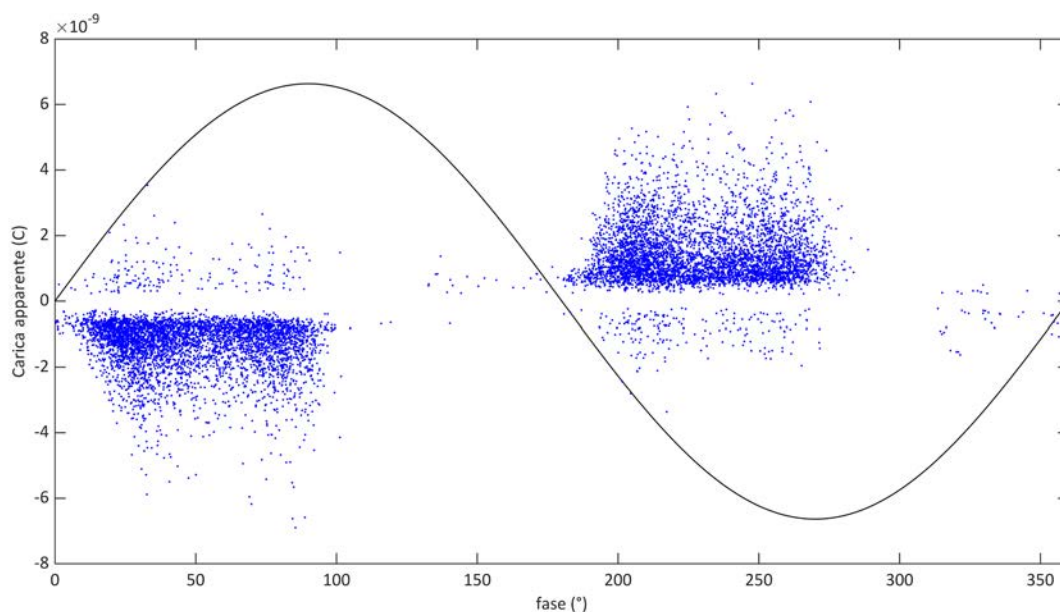


Fig. 8-58 Pattern fase-carica apparente relativa alla misura eseguita sullo statore a 8 kV

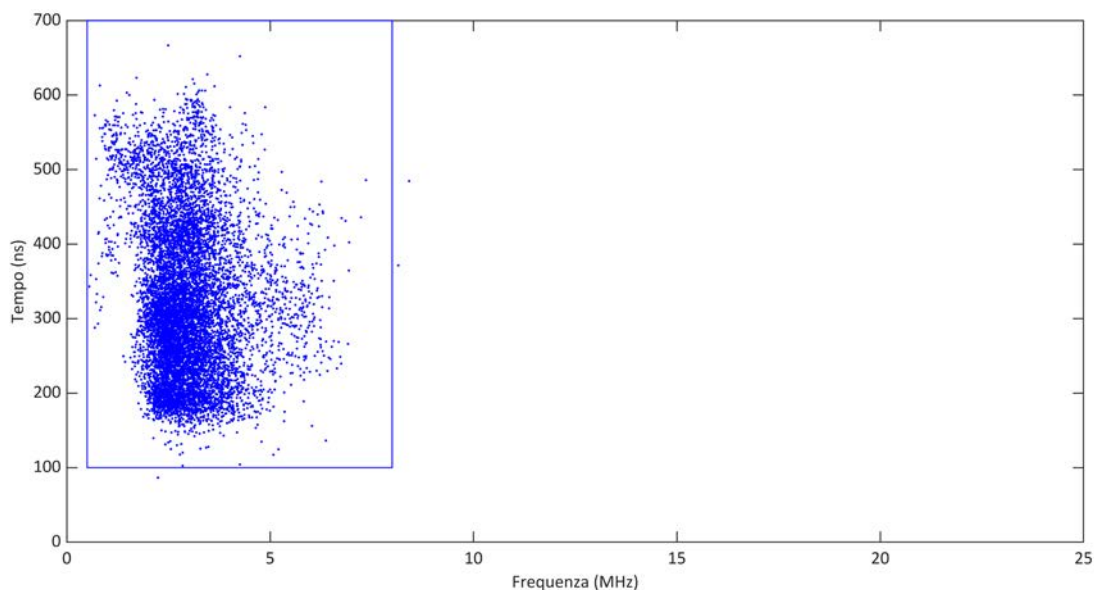


Fig. 8-59 Diagramma tempo equivalente-frequenza relativo alla misura eseguita sullo statore applicando una tensione di 8 kV

## 8.4 Considerazioni sui risultati delle misure

Le misure fin qui effettuate hanno permesso di mostrare qualche esempio di rilevazione offline di scariche parziali su statori di macchine rotanti e suoi componenti.

Si è visto come, anche su macchine nuove, con isolamento realizzato con moderne tecnologie e materiali, le scariche parziali sono presenti, con valori di carica apparente non certo trascurabili e ben superiori ai valori posti come limite per le altre tipologie di apparecchiature elettriche dove questo test è utilizzato.

Questo a ragione delle diverse tipologie di isolamenti presenti nello statore della macchina.

La zona delle testate è critica, in particolare all'uscita della matassa dalla cava statorica e nei punti di vicinanza di avvolgimenti di fasi diverse, qui l'aria presente è il materiale più debole dal punto di vista della rigidità dielettrica, ma al contempo quella sottoposta ai massimi valori di campo elettrico, quindi è tollerabile la presenza di fenomeni di scariche Corona.

L'idea quindi di non basarsi solo sul valore di carica apparente messa in gioco, ma cercare di capire la causa e gli effetti provocati delle singole scariche parziali appare perfettamente giustificata.

Tuttavia, come si è potuto vedere dai risultati delle misure, ogni macchina ha una diversa funzione di trasferimento, che lega lo spettro dell'impulso alla propagazione di esso all'interno dell'avvolgimento, così come, fenomeni analoghi di scarica parziale, in atto su diversi materiali possono dare luogo ad impulsi di forma leggermente diversa. La collocazione dei diversi segnali acquisiti nella misura sul piano tempo-frequenza equivalente consente in molti casi almeno di separare le diverse famiglie di segnali con analoghe caratteristiche di spettro e durata, quindi quelli con buona probabilità riconducibili a diverse sorgenti.

Nel caso di misure eseguite su singoli componenti di macchine, questa possibilità non è applicabile, ad esempio nella prova eseguita su singole matasse, si è visto la propagazione dell'impulso di scarica è talmente limitata nello spazio da non essere in grado di

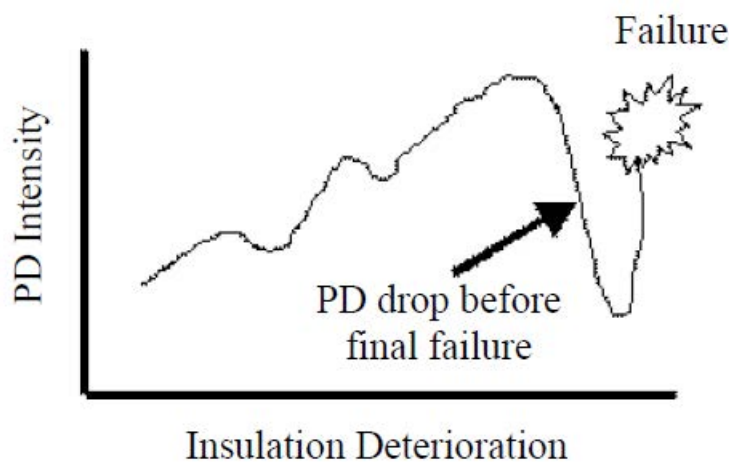


Fig. 8-60 Andamento dell'intensità di scariche parziali durante la vita della macchina  
(Fonte: [59])

modificarlo in modo osservabile, quindi l'eventuale riconoscimento del fenomeno in atto può essere basato sulla distribuzione in funzione della fase della tensione di rete degli impulsi di carica e della loro entità.

Le scariche parziali più pericolose per la salute della macchina, sono quelle che avvengono all'interno di vuoti o cavità all'interno dello strato isolante, in presenza di materiali di tipo organico, queste tuttavia, come mostrato dalla (Fig. 8-60) devono poter essere rilevate quando ancora di entità modesta, in modo da avere il tempo necessario per pianificare i successivi interventi di manutenzione.

La distinzione di queste tipologie di fenomeno, con quelle fisiologicamente presenti non è facile, visto che nelle fasi iniziali la differenza di intensità può raggiungere anche i due ordini di grandezza.

L'altra grande criticità incontrata, è quella del rumore, trattandosi di misure tipicamente eseguite in contesti industriali, dove l'utilizzo dei macchinari relativi allo svolgimento delle attività produttive è sovente causa di notevoli disturbi dello spazio elettromagnetico circostante, che male si accostano alla necessità di dover acquisire segnali con ampiezze attorno al centinaio di mV o meno.

L'esecuzione della prova offline, implica l'energizzazione di un intero avvolgimento o di una singola fase, con una distribuzione di tensione che in molte zone della macchina non rispecchia quanto accade in esercizio.

La tensione applicata è sempre uguale o superiore a quella presente verso terra nominalmente all'inizio dell'avvolgimento, ma in questo caso viene estesa ad un'intera fase statorica o all'intero set di avvolgimenti, permettendo potenzialmente di evidenziare problemi all'isolamento anche in zone della macchina che nel normale funzionamento devono sostenere solo una piccola parte della tensione, come ad esempio le matasse poste vicino alla chiusura del centro stella.

La creazione delle vere e proprie condizioni di esercizio della macchina, quindi l'alimentazione dei tre terminali statorici con una terna trifase e la chiusura del centro stella non è facilmente realizzabile.

L'alternativa è quella del monitoraggio online, sempre più diffuso su macchine di grande e media potenza o destinate ad assolvere funzioni critiche.

In questi casi le problematiche di sensibilità della strumentazione e del riconoscimento dei fenomeni in atto diventano spesso complessi, si ricorre quindi ad una valutazione della sola intensità del fenomeno, rinunciando alle operazioni di classificazione ed identificazione.

Pur trattandosi di dispositivi piuttosto semplici, possono risultare del tutto inefficaci nel diagnosticare tempestivamente il guasto, poiché, se l'intensità rilevata supera il valore di soglia impostato, il guasto potrebbe essere talmente vicino nel tempo da non portare alcun giovamento nella gestione della criticità, rispetto all'assenza del sistema di monitoraggio.

Anche la reperibilità nella letteratura tecnica di esempi dei pattern di riferimento per un dato tipo di fenomeno e per una data tipologia di materiale isolante e struttura dell'avvolgimento, risulta ad oggi molto complessa, da un lato è vero che l'estensione di questo tipo di prova alle macchine rotanti è piuttosto recente, dall'altro per poter agire più agevolmente si dovrebbe creare una raccolta organica di misurazioni condotte su più macchine, con diverse tipologie di sistema isolante, indagando poi sulla natura del difetto collegato a ciascun pattern di scariche parziali osservato.

Gli articoli oggi disponibili, sono spesso basati su analisi eseguite in laboratorio su

piccoli campioni, spesso una sola matassa, volutamente danneggiati per riprodurre un determinato guasto ipotizzabile sulla macchina intera, ma che in molti casi non sono effettivamente rappresentativi del comportamento riscontrabile dall'intero statore, pur affetto dalla stessa problematica, magari su una zona limitata.

Alcuni produttori di strumentazione, che nei loro dispositivi implementano algoritmi di riconoscimento delle tipologie di scariche parziali hanno condotto campagne di misura più estese, ma i risultati da queste ottenuti, sono stati usati solamente a vantaggio della sola strumentazione da essi prodotta.



# 9 Conclusioni

Il lavoro svolto sia dal punto di vista della ricerca bibliografica, sia delle prove sperimentali ha permesso di osservare come la recente estensione delle misure di scariche parziali anche alle macchine rotanti sia in molti casi utile, permettendo di diagnosticare alcune tipologie di problemi come le delaminazioni in modo precoce, prima che con altre prove tradizionali.

Tuttavia, la corretta valutazione delle scariche parziali in questo campo, richiede delle accortezze in più rispetto alla misura classicamente eseguita, condizionando in questo modo la scelta della strumentazione.

La strumentazione tradizionale a larga banda, comunemente utilizzata nelle prove in accordo alla normativa IEC 60270, appare inadeguata per permettere una successiva caratterizzazione del luogo e del tipo di fenomeno in atto.

Viene per questo richiesta la possibilità di registrare in modo fedele la forma d'onda dell'impulso di corrente interno al sistema isolante, quindi l'utilizzo di sistemi UWB a larghissima banda, oggi disponibili a costi sostenibili, visto il continuo sviluppo in termini di velocità dei sistemi di acquisizione.

Valori di capacità del sistema isolante elevati, decine o centinaia di nF a seconda della configurazione di prova utilizzata, nonostante una scelta accurata del valore della capacità di accoppiamento, richiedono di lavorare con segnali di ampiezza contenuta (100 mV), in contesti disturbati dal punto di vista elettromagnetico.

Diviene quindi essenziale l'utilizzo di tecniche di gating e riconoscimento del rumore.

Questa tipologia di misurazione a fini diagnostici è già utilizzata ed utilizzabile anche industrialmente, ma occorre in futuro cercarne di estenderne le possibilità di riferibilità, oggi condizionate fortemente dalle specificità del sistema di misura utilizzato e dalle modalità di prove scelte.

A questo proposito sarebbe auspicabile un maggior dettaglio nelle linee guida fornite dalla normativa di riferimento IEC 60034-27-1, magari attraverso indicazioni per fissare una metodologia di prova standardizzata, al contrario di quanto avviene oggi, dove l'operatore con la sua azione condiziona pesantemente l'esito della prova.





# 10 Bibliografia

## Libri

- 
- [1] K.C. Agrawal, "*Electrical Power Engineering Reference & Applications Handbook*". CRC Press 2007
- 
- [2] G. Baldo, G. Pesavento, "*Tecnica delle Alte Tensioni*". Cleup 2004
- 
- [3] L. Cohen, "*Time-Frequency Analysis*". Prentice Hall Signal Processing Series, Alan V. Oppenheim Series editor 1995
- 
- [4] W. Hauschild, E. Lemke, "*High-Voltage Test and Measuring Techniques*". Springer 2014
- 
- [5] E. Lemke, Working Group D1.33, "*Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270*". CIGRE publication 2008
- 
- [6] F. H. Kreuger, "*Partial discharge detection in high-voltage equipment*". Butterworths 1989
- 
- [7] F. H. Kreuger, "*Industrial High Voltage*". Delft University Press 1991
- 
- [8] E. Kuffel, J. Kuffel, W.S. Zaengl, "*High Voltage Engineering*". Butterworth-Heinemann 2000
- 
- [9] A.J.M. Pemen, "*Detection of partial discharges in stator windings of turbine generators*". Technische Universiteit Eindhoven 2000
- 
- [10] T.S. Ramu, H.N. Nagamani, "*Partial Discharge Based Condition Monitoring of High Voltage Equipment*". new age publishers 2010
- 
- [11] Working Group D1.33, "*Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements*". CIGRE publication 2010
-

# Articoli

- 
- [12] Alsharif M. A., Wallace P.A., Hepburn D.M., Zhou C. "*Electric Field Investigation in MV PILC Cables with Void Defect*". World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering Vol. 9, No.1, 2015 pp. 60-63
- 
- [13] Aksenov Y.K., Yaroshenko I.V., Noe G., Andreev A.V., Arces I., " *Pattern analysis of turbine generators on-line discharge zone location in winding*". 2009 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives
- 
- [14] Argüeso M., Robles G., Sanz J., "*Implementation of a Rogowski coil for the measurement of partial discharges*". Review of Scientific Instruments May 2005
- 
- [15] Barrè O., Napame B., "*The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy, Design, Tests and Acceptance Criteria Issues*". Machines 2017, 5,7
- 
- [16] Cavallini A., Conti M., Contin A., Montanari G.C., Puletti F., "*New Algorithm for the Identification of Defects Generating Partial Discharges in Rotating Machines*". Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN USA, 19-22 September 2004 pp.204-207
- 
- [17] Cavallini A., Contini A., "*Identification of Defects Supporting PD in Rotating Machines with Different Insulation Technologies*". IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD) 1-5 July 2018
- 
- [18] Chan C.Y.J., Ma H., Saha T.K., "*Time-frequency sparsity map on automatic partial discharge sources separation for power transformer condition assessment*". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 4; August 2015 pp.2271-2283
- 
- [19] Contin A., Aizza M., Fantin F., Piccolo A., "*Identification of PD Sources and Insulation Technologies in Rotating Machines*". 2015 Electrical Insulation Conference (EIC), Seattle, Washington, USA, 7 -10 June 2015 pp.458-462
- 
- [20] Contin A., Cavallini A., Montanari G.C., Pasini G., Puletti F., "*Digital Detection and Fuzzy Classification of Partial Discharge Signals*". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 9, No. 3, June 2002 pp.335-348
- 
- [21] Contin A., Al-Marzouqi H., "*Searching for Partial Discharge Patterns for the Identification of Defects of Insulation Systems in AC Rotating Machines*". 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, QC, Canada, 31 May - 3 June 2009 pp.405-408
-

- 
- [22] Contin A., Tessarolo A., " *Identification of Defects Generating PD in AC Rotating Machines by Means of Fuzzy-Tools*". Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (9-12 June 2008) pp.558-562
- 
- [23] Fabiani D., Cavallini A., Montanari G.C., Caprara A., " *A Technique for Defect Investigation in Pulse-Controlled Motors through Partial Discharge Measurements*". Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN USA, 19-22 September 2004 pp.196-199
- 
- [24] Farahani M., Gockenbach E., Boni H., Kaufhold M., " *A Method for the Evaluation of Insulation Systems for High Voltage Rotating Machines*". Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 1-5 2W3 Nagoya pp.1108-1111
- 
- [25] Fuhr J., Aschwanden T., " *Identification and Localization of PD-Sources in Power-Transformers and Power-Generators*". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 24, No. 1; February 2017 pp.17-30
- 
- [26] Hudon C., Reed C.W., Timperley J.E., " *Use of Spectral Analysis and Phase Resolved Partial Discharge Measurements for Generator Testing*". Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - (CEIDP'94) pp.103-111
- 
- [27] Gobbo R., Pesavento G., Sardi A., Varetto G., Cherbancich C., Rizzi G., " *Influence Quantities in the calibration of PD Calibrators Contribution to the Uncertainty Estimate*". High Voltage Engineering Symposium, 22-21 August 1999 Conference Publication No. 467,D IEEE. 1999 pp.1499-1502
- 
- [28] Goffaux R., Comte B., Cottet M., Fruth B. " *Quality Assurance of Generator and Motor Insulation System*". Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, April 2-5,2000 pp.512-515
- 
- [29] Goffeaux R., Krecke M., Comte B., Cottet M., Fruth B., " *Dielectric Test Methods for Rotating Machine Stator Insulation Inspection*". 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena pp.528-533
- 
- [30] Gulski E., Kreuger F. H., Krivda A. " *Classification of Partial Discharges*". IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28 No. 6, December 1993 pp.917-931
- 
- [31] Gulski E., Kreuger F. H., " *Computer-aided recognition of Discharge Sources*". IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 27 No. 1, February 1992 pp.82-92
-

- 
- [32] Gulski E., Kreuger F.H., " *Diagnostics of Insulating Systems Using Statistical Tools*". Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, MD USA, June 7-10, 1992 pp.393-396
- 
- [33] Gulski. E., Morshuis P.H.F., Kreuger F.H." *Conventional and Time-Resolved Measurements of Partial Discharges as a Tool for Diagnosis of Insulating Materials*". Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, July 34,1994, Brisbane Australia pp.666-669
- 
- [34] Heitz C., M. Piemontesi M., Salge G., " *Surface Discharge along Solid Dielectrics in Atmospheric Air* ". Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, April 2-5,2000 pp.341-344
- 
- [35] Hudon C., Guuinic P., Audoli A., " *Investigation of Partial Discharge Signal Propagation, Attenuation and Pattern Recognition in a Stator Winding*". Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19,1996 pp.201-205
- 
- [36] Joyo T., Okuda T., Kadota N., Miyatake R., Okada S., Mio K.," *Phase Resolved Partial Discharge Patterns for Various Damage of Winding Insulation Detected with Different Measuring Devices*". Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA, 11 - 14 June 2017 IEEE pp.344 - 347
- 
- [37] Koltunowicz W., Plath R., " *Synchronous Multi-channel PD Measurements*". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 6; December 2008 pp.1715-1723
- 
- [38] Kurimsky J., Kolcunova I., Cimbala R., " *Partial Discharge Analysis for Insulation Systems of Electric Rotating Machines with various Voltage Stress*". Acta Electrotechnica et Informatica Vol. 8, No. 4, 2008, pp.64-67
- 
- [39] Kreuger F. H., Morsuis P.H.F., " *A Relation Between Time-Resolved Discharge Parameters and Agering*". Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications 7-10 sept 1992 pp.37-40
- 
- [40] Kurimský J., Kolcunová I., Cimbala R., " *Understanding surface partial discharges in HV coils and the role of semi-conductive protection*". Electrical Engineering Vol. 92 December 2010 pp.283-289
- 
- [41] Lamarre L., Jean D., Ngoc Nguyen D., " *Laboratory studies of slot discharges on stator bars*". Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena pp.490-494
- 
- [42] Lévesque M., David E., Hudon C., Bélec M., " *Contribution of Humidity to the Evolution of Slot Partial Discharges*". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 1; February 2012 pp.61-75
-

- 
- [43] Li C., Song J., Lin L., Lei Z., Wen Su, Bi X., " *Effects of Vapor with Different Chemical Properties on Corona Partial Discharges of Stator Windings*". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 3; June 2014 pp.964 - 972
- 
- [44] Lin L., Kang A., Song J., Lei Z., Zhao Y., Feng C., " *Influences of Humidity and Temperature on Oil Contamination Discharge of HV Motor Stator Windings*". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 5; October 2016 pp.2695-2703
- 
- [45] Luo Y., Li Z., Chen T. " *Experimental Study of Partial Discharge Pulses Propagation in Stator Winding of Hydro Generator*". IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC) 15-17 Dec 2017, pp.773-777
- 
- [46] Luo Y., Li Z., Wang H." *A Review of Online Partial Discharge Measurement of Large Generators*". *Energies* 2017, 10, 1694
- 
- [47] Maqrashi A.A., " *Pattern Recognition of Partial Discharges using MATLAB Tools*". 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004 pp.197-201.
- 
- [48] Maughan C.V., Nelson D., Schultz R.P., Stone G.C., " *Impact of Slot Discharges and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators*". IEEE Electrical Insulation Magazine September/October 2008 — Vol. 24, No. 5 pp.14 - 21
- 
- [49] Montanari G.C., Negri F, Ciani F., " *Noise rejection and partial discharge identification in HVDC insulation systems*". 2017 Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA, 11 - 14 June 2017 pp.425-428
- 
- [50] Montanari G.C., Seri P., " *A Partial Discharge-Based Health Index for Rotating Machine Condition Evaluation*". IEEE Electrical Insulation Magazine March/April 2018 - Vol. 34, No. 2 pp.17-23
- 
- [51] Oettl F, Engelen C., Binder E., Kessler T., " *A Study of the Propagation Behavior of Partial Discharge Pulses in the High-Voltage Winding of Hydro Generators*". 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) pp.
- 
- [52] Paoletti G.J., Golubev A., " *Partial Discharge Theory and Technologies related to Medium Voltage Electrical Equipment*". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37 No. 1, January/February 2001 pp.90-103
- 
- [53] Pascoli G., Kral C., Pirker F., Pokomy N., " *Experiences with Online Partial Discharge Diagnoses on Turbogenerators*". 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003. pp.20-24
-

- 
- [54] Rhudy R.G., Owen E.L., Sharma D.K., "Voltage Distribution Among The Coils And Turns Of A Form Wound AC Rotating Machine Exposed To Impulse Voltage". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-1, No. 2, June 1986 pp. 50-60
- 
- [55] Schon K., Lucas W., lemke E., Elze H., Bergman A., Gunnarsson O., Garnacho F., Simon P., Muhr M., Pack S., Rizzi G., Sardi A., giorgi P.A., Pesavento G., Gobbo R., Gomez F.N., Domingues F., Blanc I., Hallstrom J., Piironen J., Zaengl W., Weber H.J., Claudi A., Brooks R., "Intercomparison on PD Calibrators and PD Instruments". 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering pp.1999-2002
- 
- [56] Song J., Li C., Lin L., Lei Z., Bi X. Y., Yang Y., " Slot Discharge Pattern of 10 kV Induction Motor Stator Coils under Condition of Insulation Degradation". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 6; December 2013 pp.2091-2098
- 
- [57] Sureshjani S.A., Kayal M., " A Novel Technique for Online Partial Discharge Pattern Recognition in Large Electrical Motors". 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) pp.721-726
- 
- [58] Suwarno, "Phase Resolved Measurement and Simulation of Partial Discharges in Solid and Liquid Insulating Materials". Conference Proceedings of ISEIM 2014 pp.46-48
- 
- [59] Vahidinasab V., Mosallanejad A., Gholami A., " Partial Discharge Theory, Modeling and Applications To Electrical Machines". Proc. of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Tenerife, Spain, December 16-18, 2005 pp.130-135
- 
- [60] Wai G.L., Bonwick W.J., " Subspecies analysis of partial discharge data from a generator stator conductor". IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology ( Volume: 144 , Issue: 6 , Nov 1997 ) pp.287-293
- 
- [61] Wang W., Li C.R., Li W., Liu L., Wang Z., Ding L., " Pattern recognition of single and composite partial discharge on generator stators". 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena pp.335-339
- 
- [62] Wilson A., Jackson R.J., Wang N., " Discharge detection techniques for stator windings". IEE PROCEEDINGS, Vol. 132, Pt. B, No. 5, SEPTEMBER 1985 pp.234-244
- 
- [63] Wu X., Ye H., " Statistical Methods based on Parameters Applied to the Partial Discharge Pattern Recognition in Power Devices". IEEE 2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design 9-10th december 2017 pp.365-368
-



# Normative

- 
- [64] IEC 60270:2001+A1:2016 “*High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*“
- 
- [65] IEC 60034-27-4:2018 “*Measurement of insulation resistance and polarization index on winding insulation of rotating electrical machines*“
- 
- [66] IEC 60034-27-3:2016 ”*Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation of rotating electrical machines*”
- 
- [67] IEC 60034-27-1:2011 “*Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines*“
- 
- [68] IEEE Std 1434:2014 " *IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*"
-

# Tesi

- 
- [69] Ceretta C., "Analisi Delle Scariche Parziali per la Diagnostica delle Macchine Elettriche". Ph.D Thesis Università di Padova (2008)
- 
- [70] Scroccaro A., "Metrologia delle Scariche Parziali". Ph.D Thesis Università di Padova (2003)
- 
- [71] Morshuis P.H.F., "Partial Discharge Mechanisms". Ph.D. Thesis TU Delft (1993)
-





# Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Ing. Renato Gobbo, relatore di questa tesi, per la grande disponibilità e cortesia dimostratemi, avendomi egli seguito e consigliato quotidianamente per tutto il periodo di stesura.

Contributo essenziale per lo svolgimento della parte sperimentale del lavoro è stata fornita da "Elettromeccanica Viotto srl", che ha gentilmente concesso l'esecuzione di misure sugli statori delle macchine al momento presenti in officina, mettendo a disposizione un loro tecnico per fornire aiuto pratico.

È doveroso ulteriormente ringraziare il Prof. Gobbo ed il Prof. G. Pesavento per la possibilità concessami di usufruire del laboratorio di alte tensioni.

Un sentito ringraziamento ai miei genitori, che, con il loro incrollabile sostegno morale ed economico, mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Andrea Astolfi  
7 Dicembre 2018