

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

*DIPARTIMENTO di
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE
"Guglielmo Marconi"
DEI*

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA

in

Affidabilità e statistica per i sistemi elettrici T

**MISURA UHF (ULTRA HIGHT FREQUENCY) DELLE SCARICHE
PARZIALI NEI SISTEMI ISOLATI A GAS: METODOLOGIE PER LA
VERIFICA DELLA SENSIBILITA' DELLA MISURA**

CANDIDATO

Ares Angelini

RELATORE

Prof. Ing. Andrea Cavallini

CORRELATORE

Dott. Ing. Fabrizio Negri

Anno Accademico 2015/2016

Sessione II

SOMMARIO ESECUTIVO

1. INTRODUZIONE

2. VERIFICA DELLA SENSIBILITÀ FASE 1: TEST DI LABORATORIO

- 2.1 Contesto e aspetti generali
- 2.2 Configurazione della prova
- 2.3 Dispositivo di misurazione di UHF
- 2.4 Generatore di impulsi
- 2.5 Determinazione del valore dell'impulso artificiale

3. VERIFICA DELLA SENSIBILITÀ FASE 2: TEST SUL POSTO

- 3.1 Aspetti generali
- 3.2 Disposizione dei sensori: aspetti principali ed importanti e dettagli
 - 3.2.1 Disposizione dei sensori in base alla relazione ELECTRA
 - 3.2.2 Metodo alternativo per la disposizione dei sensori
- 3.3 Posizionamento dei dispositivi di commutazione
- 3.4 Apparecchiatura di prova
- 3.5 Esecuzione della verifica di sensibilità in loco
- 3.6 Criteri per superare la prova

4. CONCLUSIONE

SOMMARIO ESECUTIVO

Le apparecchiature di manovra tramite isolamento a gas (GIS) sono in funzione da più di 45 anni ed hanno un elevato livello di affidabilità. Tuttavia, il riscontro pratico indica che alcuni dei difetti che si verificano durante il servizio sono legati a guasti del sistema di isolamento. Molti di questi difetti possono essere rilevati tramite diagnostica con scariche parziali (PD). Il metodo di misurazione ad altissima frequenza (UHF), che è stato introdotto alla fine degli anni '80 per la rilevazione PD, viene utilizzato in tutto il mondo dai produttori di GIS durante i test di routine in fabbrica, durante la messa in servizio sul luogo e dalle utility per il continuo monitoraggio del servizio. Il metodo UHF è meno sensibile a disturbi ed è quindi più facile da gestire in confronto al metodo convenzionale secondo IEC 60270.

Un rapporto di Electra pubblicato nel 1999 dal CIGRE Task Force 15/33.03.05 descrive la procedura in due fasi per la verifica della sensibilità del sistema UHF in modo molto generale. Dopo 15 anni dalla sua applicazione, è diventato evidente che una descrizione più dettagliata della procedura di verifica della sensibilità fosse necessaria per evitare interpretazioni tecniche errate.

Questa Brochure tecnica raccoglie l'esperienza maturata sulla verifica di sensibilità e descrive le sue applicazioni pratiche per GIS.

Nel capitolo 2, è descritta la verifica della sensibilità (Passaggio 1). L'obiettivo è quello di determinare in laboratorio una grandezza artificiale di impulso PD di valore equivalente a 5 pC di carica apparente rappresentante il difetto definito, che verrà successivamente applicato durante il Passaggio 2. La configurazione di prova compatta è definita per GIS monofase (capitolo 2.1), così come per la completa connessione di GIS trifase (capitolo 2.2). Gli esempi dei tipi di difetto del PD che devono essere utilizzati nel Passaggio 1 sono elencati nel capitolo 2.2.

Vengono descritti i componenti della catena di misurazione come ad esempio unità di acquisizione PD (capitolo 2.3) e generatore di impulsi (capitolo 2.4).

La determinazione della grandezza dell'impulso artificiale è mostrata con particolare attenzione ai diversi metodi di confronto degli spettri UHF del vero difetto di PD con gli spettri dell'impulso di calibrazione artificiale (capitolo 2.5).

Nel capitolo 3 è descritta la verifica della sensibilità (Passaggio 2). Lo scopo di questo passaggio è quello di verificare che i sensori installati e il sistema di misura o di controllo UHF abbiano una sufficiente sensibilità per rilevare i segnali, equivalenti a quelli di uno specifico tipo del difetto di PD, all'interno di ogni sezione del GIS che viene controllata. Allo stesso tempo, è anche testato il corretto funzionamento dei sensori stessi e della catena di misurazione. Il principio della procedura del Passaggio 2 e della sistemazione del sensore è descritto nel capitolo 3.2. Vengono anche proposti metodi tipici e alternativi per la disposizione dei sensori che conducono alla riduzione del numero di sensori, limitando la sensibilità di rilevamento generale per tutte le sezioni di GIS alla sensibilità di rilevazione necessaria richiesta di 5 pC (capitolo 3.2). L'influenza della posizione del dispositivo di commutazione GIS sull'attenuazione del segnale UHF è mostrato nel capitolo 3.3. I criteri per superare il test di verifica di sensibilità UHF sono descritti nel capitolo 3.6 e il capitolo 4 illustra le conclusioni.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Le apparecchiature di manovra tramite isolamento a gas (GIS) sono in funzione da più di 45 anni e hanno dimostrato un alto livello di affidabilità, con tassi di difetto molto bassi. Questo è il risultato del controllo della qualità durante il processo di sviluppo e di fabbricazione, nonché durante l'installazione e messa in servizio. Tuttavia, il riscontro pratico indica che alcuni dei guasti che si verificano durante il servizio sono legati a difetti del sistema di isolamento. Molti di questi difetti possono essere rilevati tramite diagnostica con scariche parziali (PD).

Al giorno d'oggi il metodo UHF, che è stato introdotto alla fine degli anni '80 per la rilevazione PD, viene utilizzato in tutto il mondo dai produttori di GIS nelle fabbriche, durante la messa in servizio, e dalle utility per il monitoraggio in servizio basato su riscontri positivi di prove effettuate sul campo. Il metodo UHF è meno sensibile a disturbi ed è quindi più facile da gestire in confronto al metodo convenzionale secondo IEC 60270. Per il metodo UHF non è possibile una calibrazione a "carica apparente a pC" a causa delle complesse caratteristiche di propagazione di impulsi PD. La sensibilità di rilevazione PD dipende da vari parametri come la distanza tra il difetto di PD (fonte del segnale UHF) e il sensore.

Nel 1999 è stato pubblicato un rapporto da CIGRE Task Force 15 / 33.03.05, che ha descritto la verifica della sensibilità sul GIS applicabile al metodo UHF. La procedura proposta in due fasi garantisce che i difetti che causano una carica apparente di 5 pC o superiore possono essere rilevati con il metodo UHF. Costruttori e utilizzatori hanno acquisito molta esperienza da quando il metodo proposto per la verifica della sensibilità è stato applicato per la messa in servizio di GIS ed il monitoraggio di PD.

Gli esperimenti precedenti riguardo l'identificazione di PD e la valutazione dei rischi basati sulla diagnostica di PD sono stati discussi negli ultimi anni da CIGRE WG D1.03 (TF 09) e il rapporto pubblicato fornisce informazioni utili per facilitare l'applicazione del metodo UHF.

Oggi il collaudo di GIS con tensione ad impulso è quasi completamente sostituito dalla misura sensibile di PD utilizzando il metodo UHF. Tuttavia, è necessario tenere presente che il metodo UHF per la rilevazione di PD è ancora una tecnica complessa e fin ora non standardizzata.

Il resoconto ELECTRA dal CIGRE Task Force 15 / 33.03.05 descrive la procedura in due fasi per la verifica della sensibilità in modo molto generale. Negli ultimi anni è diventato evidente che una descrizione più dettagliata della verifica di sensibilità fosse necessaria per evitare fraintendimenti tecnici sulla procedura a due fasi proposta, sia su misure necessarie al test di laboratorio (Passaggio 1) che sul test in loco (Passaggio 2).

Questa Brochure tecnica raccoglie l'esperienza disponibile sulla verifica di sensibilità e descrive le applicazioni pratiche della verifica di sensibilità per GIS. Una descrizione dettagliata della procedura a due fasi viene fornita e supportata da esempi. Linee guida aiuteranno i produttori e gli utenti nella corretta applicazione del metodo UHF per la rilevazione PD su GIS.

CAPITOLO 2

VERIFICA DELLA SENSIBILITÀ FASE 1:

TEST DI LABORATORIO

2.1 CONTESTO E ASPETTI GENERALI

I segnali nella gamma di frequenza UHF possono essere rilevati per mezzo di appositi sensori. A causa della distorsione del segnale UHF descritto, un certo numero di sensori deve essere ordinatamente installato in un GIS per poterlo monitorare completamente con sensibilità sufficiente per rilevare difetti PD. A causa della complessità dei modelli di risonanza, la grandezza dei segnali rilevati dipende fortemente dalla posizione PD rispetto al sensore ed in misura minore rispetto all'orientamento del difetto e all'installazione del sensore sul vano GIS. Un modello dettagliato ad alta frequenza sarebbe necessario per consentire la formulazione di una funzione di trasferimento complessiva tra difetto PD (emettitore) e sensore (ricevitore).

Al giorno d'oggi un calcolo numerico sembra non essere possibile perché la posizione precisa e l'orientamento del difetto generalmente non sono noti, e inoltre diversi tipi di difetto generano diversi spettri di Radio frequenze (RF). La creazione di un accurato modello RF di un GIS porrebbe una sfida formidabile, richiedendo software di modellazione RF altamente sofisticati e voce di ogni dettaglio interno di costruzione del GIS. Tuttavia, tale modello rappresenterebbe una versione ideale del GIS, principalmente a causa dell'effetto pelle, che determina la profondità di penetrazione dei segnali RF su conduttori. Per l'alluminio a 100 MHz, la profondità di pelle è già nell'ordine di 10 μm .

Poiché un GIS è costruito per condurre chiloampere e chilovolt a frequenze di potenza tipica – con differenza di molti ordini di grandezza dal range di frequenze UHF del segnale PD - la progettazione e l'assemblaggio del contatto interno non soddisfano la precisione e la ripetibilità a micron-scale per garantire un affidabile trasferimento del segnale RF. Perciò anche se un modello ad alta qualità venisse creato, sia cercare di verificare la sua validità che presumere la sua accuratezza per predirne le reali funzioni di trasferimento, sarebbe virtualmente impossibile.

Quando si tenta di confrontare la grandezza del PD utilizzando il metodo UHF rispetto al metodo convenzionale secondo IEC 60270, la carica effettiva trasferita al difetto

risulta nota nella carica apparente grazie alla misurazione tramite un condensatore di accoppiamento.

Tuttavia, i segnali PD misurati con il metodo UHF dipendono dai seguenti fattori:

1. Tipo di difetto
2. Posizione del difetto all'interno del vano GIS
3. Effetti di propagazione tra cui la riflessione, la dispersione, l'interferenza e l'attenuazione
4. Posizione del sensore rispetto al difetto e percorso di trasmissione del segnale
5. Caratteristiche del sensore, es. la propria funzione di trasferimento
6. Caratteristiche della catena completa del sistema di misurazione (dai sensori all'acquisizione dati e display)

I fattori menzionati sopra sono ben noti e sono già stati ampiamente documentati. La dipendenza di posizione dall'intensità del segnale UHF PD è facile da dimostrare in un laboratorio.

La situazione descritta indica chiaramente che una calibrazione di carica del metodo UHF non è possibile per le installazioni di GIS.

Tuttavia, quando si effettuano misurazioni PD, ad es. ai fini di test di collaudo o quando si implementa il monitoraggio PD in sistemi che utilizzano la tecnica UHF, è altamente desiderabile verificare che tali sistemi funzionino ad un determinato livello di sensibilità.

Pertanto, in questa relazione, è proposto un metodo per verificare la sensibilità di rilevamento, basato sulla correlazione tra il segnale UHF e la carica apparente misurata in un set-up IEC 60270 utilizzando un vero e proprio difetto di PD. Sfruttando questo confronto, può essere utilizzata una procedura in due fasi per stabilire che un sistema di misura UHF è funzionante e in grado di rilevare i difetti con una carica apparente per esempio di 5 pC.

In generale il metodo UHF ha dimostrato di essere almeno altrettanto sensibile nel rilevare la maggior parte dei difetti come il metodo convenzionale secondo IEC 60270 e questo è dovuto principalmente all'involucro GIS che opera come una gabbia di Faraday, contribuendo così ad escludere disturbi esterni di interferenze elettromagnetiche (EMI) e consentire così un basso livello di disturbo di fondo.

La sensibilità del sistema di misurazione UHF può essere modificata tramite appositi sensori, amplificatori, filtri e relative apparecchiature di elaborazione del segnale. Test nei laboratori e in loco hanno dimostrato che i difetti critici - e anche altri difetti - possono essere rilevati.

2.2 CONFIGURAZIONE DELLA PROVA

Il test di laboratorio deve essere eseguito per poter determinare la grandezza dell'impulso di un PD artificiale, che sarà applicato più tardi sul sito durante la Fase 2 della verifica della sensibilità, tramite comparazione con un difetto reale misurato secondo l'IEC 60270.

Il test di laboratorio è eseguito come qui descritto: un difetto reale è posizionato vicino al sensore C1 dell'UHF come mostrato in figura 1a. Il difetto comincerà a creare il disturbo quando il voltaggio applicato sarà abbastanza elevato. Quando la carica apparente del relativo segnale PD, misurato secondo l'IEC 60270, raggiunge la soglia di, ad esempio 5pC, il valore del segnale UHF relativo all'intensità di segnale (ad esempio l'energia dell'impulso, la grandezza dell'impulso) è misurata al sensore C2.

Questa grandezza A del segnale UHF (segnale A) sarà usata come riferimento per comparare i prossimi passaggi del test di laboratorio. Gli impulsi artificiali- come descritto sotto- sono inseriti nel sensore C1 come indicato in figura 1b. Il segnale UHF è nuovamente ricevuto dal sensore C2, come il passaggio precedente. Il segnale risultante di grandezza B (segnale B) deve essere comparato con la grandezza A delle misurazioni HV precedenti.

L'ampiezza dell'impulso artificiale deve essere variata finché la grandezza del segnale B misurato è l'equivalente della grandezza del segnale A in un range di tolleranza del $\pm 20\%$.

Tra i due sensori è preferibile la più bassa attenuazione (la distanza più corta).

Se non è possibile, il passaggio 1 della verifica della sensibilità può essere eseguito, senza alcuno svantaggio, utilizzando un vano GIS completo.

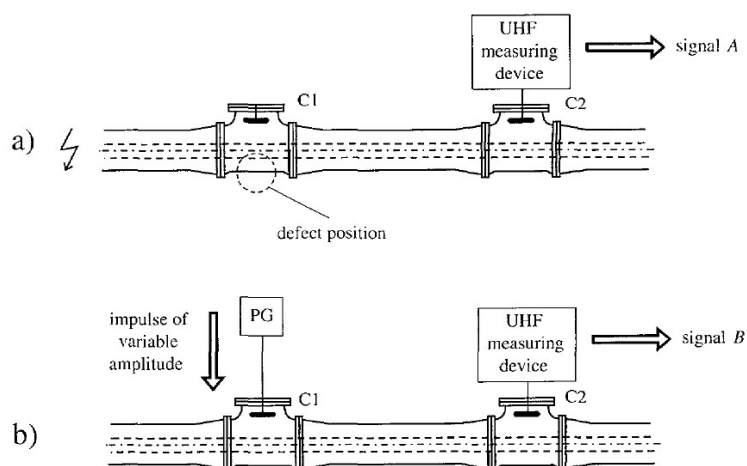


FIG.1 - Setup del laboratorio per le misurazioni ad alta tensione (a) e misure a bassa tensione (b) durante la verifica della sensibilità Passo 1

La figura 2 mostra una tipica configurazione che viene utilizzata in laboratorio. È costituita da due compartimenti GIS in cui sono installati i sensori. I vani sono divisi da un isolante e collegati ad un trasformatore ad alta tensione. La configurazione di prova è dotata di un condensatore di accoppiamento e da un sistema di misura PD convenzionale secondo IEC 60270.

La configurazione di prova completa ha un livello di disturbo di fondo inferiore a 2 pC. Il sensore C1 viene utilizzato solo per l'iniezione di impulsi di tensione artificiale da un generatore di impulsi (PG). Il sistema di misurazione di UHF PD che viene utilizzato nel test di laboratorio è sempre collegato al sensore C2.



FIG.2 - Tipica configurazione della prova per la verifica di sensibilità del Passo 1 di una singola fase del GIS

Il disturbo deve essere collocato all'interno del vano più vicino al sensore C1.

Spesso viene utilizzata una particella in movimento, ad esempio con una lunghezza di 3 - 5 mm e un diametro di 1 mm. Normalmente è disposta sull'involucro in una posizione vicino al sensore C1.

Oppure, invece di una particella in movimento, sono utilizzate sporgenze sul conduttore ad alta tensione, simulate attraverso un ago con una lunghezza di 5-10 mm e un raggio di punta di circa 0,5 mm che potrebbe essere posizionato preferibilmente proprio sotto il sensore (Figura 3).



FIG.3 - Ago posizionato all'interno del vano GIS per simulare una sporgenza sul conduttore interno

Sul GIS trifase incapsulato la verifica di sensibilità del Passo 1 può essere eseguita anche su piccole parti come descritto nella figura 2. Tuttavia, a causa della loro dimensione limitata e della linea di trasmissione meno omogenea caratteristica di questi GIS, la verifica della sensibilità potrebbe essere eseguita su una connessione completa come presentato nella figura 4.



FIG.4 - Test di set-up per la verifica della sensibilità Passo1 su un GIS trifase incapsulato 145 kV (Per gentile concessione di GE Grid (Svizzera) GmbH)

Proprio come in regime monofase il sensore C1 e il difetto devono essere posizionati il più vicino possibile l'uno all'altro. Le ricerche hanno dimostrato che la distanza tra i sensori C1 e C2 ha un effetto trascurabile fintanto che è di alcuni metri.

2.3 DISPOSITIVO DI MISURAZIONE DI UHF

I segnali UHF possono essere rilevati nel dominio del tempo o nel dominio di frequenza. I risultati ottenuti nel dominio del tempo possono essere caratterizzati dal valore dei segnali UHF. Misure nel dominio della frequenza consistono in spettri che mostrano le ampiezze delle varie frequenze di risonanza simulate dagli impulsi PD. Non c'è nessuna raccomandazione per qualsiasi acquisizione specifica e per il metodo di valutazione, ma è vincolante che lo stesso metodo venga usato totalmente per la verifica della sensibilità. Pertanto qualsiasi metodo significativo può essere utilizzato.

Sistemi a banda stretta (Figura 5) esaminano una parte della gamma di frequenza per segnali PD (ad esempio analizzatore di spettro). Questi sistemi presentano il vantaggio di essere in grado di fornire un elevato scarto dei segnali di disturbo ambientali e di avere miglior rapporto segnale-rumore.

Oltre a questi vantaggi, l'esame dello spettro di frequenze rivela spesso importanti informazioni sul tipo del difetto PD e sulla posizione.

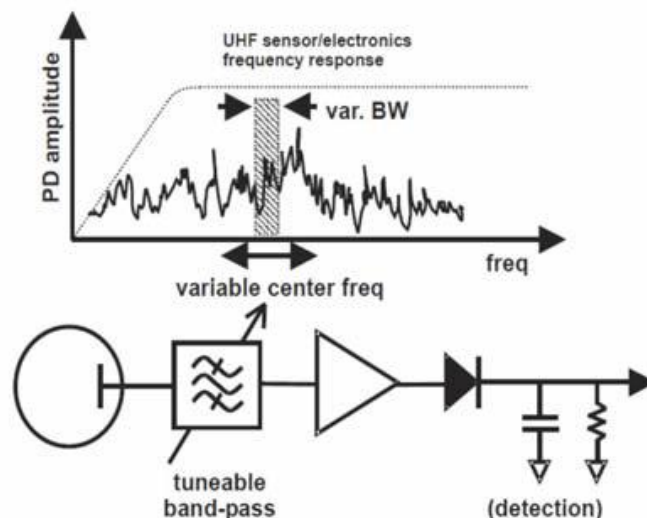


FIG. 5 - Spettro in banda stretta e schema a blocchi del sistema PD

Sistemi a larga banda (Figura 6) amplificano uno spettro di frequenza a banda larga (ad esempio 300 - 1500 MHz) e mandano il segnale direttamente ad un rivelatore.

L'uscita è modellata e inviata direttamente a un dispositivo di visualizzazione (oscilloscopio) o a un convertitore A/D, che potrebbe essere parte della misura di PD oppure di sistemi di monitoraggio.

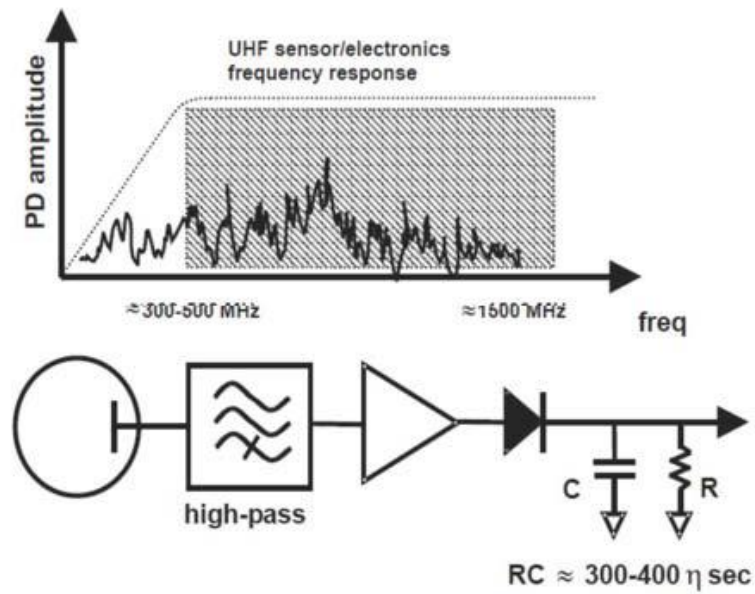


FIG.6 - Spettro a larga banda e schema a blocchi del sistema PD

2.4 GENERATORE DI IMPULSI

A seconda dei mezzi con cui il segnale UHF viene registrato e confrontato, l'ampiezza degli impulsi artificiali può variare leggermente. Queste variazioni non sono significative in vista della precisione insita nel presente procedimento. I cavi di rilevamento devono essere adatti per frequenze nella banda di UHF applicata.

La forma esatta dell'impulso artificiale non è critica. Tuttavia, consideriamo rilevanti i seguenti parametri:

- Il **tempo di salita** dell'impulso artificiale determina il limite di frequenza superiore del relativo spettro di uscita e così quello del segnale emesso verso il sensore. Pertanto, il tempo di salita dell'impulso artificiale deve essere appropriato, in modo tale che tutte le frequenze della larghezza di banda siano sollecitate. Per la rilevazione dei segnali UHF possono essere utilizzate diverse ampiezze di banda, inoltre non c'è nessuna necessità di una definizione dettagliata, tuttavia il tempo di salita degli impulsi artificiali non deve superare 0,5 ns.
- L'**ampiezza della tensione di impulso** (capitolo 2.5).
- Il **tempo tra gli impulsi consecutivi** deve essere superiore alla durata più lunga dei segnali di risonanza UHF rilevati dai sensori al fine di evitare la sovrapposizione di più impulsi. Solitamente può essere utilizzata qualsiasi cadenza di ripetizione inferiore a 100 kHz, ad esempio 50 Hz o 60 Hz.

I parametri del generatore di impulsi sopra menzionati, devono essere documentati da certificati di prova o da misurazioni durante la prova di laboratorio. Lo stesso tipo di generatore di impulsi deve essere utilizzato per la prova in loco (verifica della sensibilità Passo 2) per garantire che i test siano comparabili. Si consiglia di utilizzare lo stesso tipo di generatore di impulsi delle prove di laboratorio (verifica di sensibilità Passo 1) e in loco (verifica di sensibilità Passo 2).

Varie misurazioni sono state effettuate presso laboratori diversi utilizzando diversi modelli GIS e diversi metodi per la generazione degli impulsi artificiali. I risultati indicano che l'ampiezza di impulso degli impulsi artificiali si trova solitamente nella gamma da 5-20 V a seconda della forma dell'impulso, della progettazione del sensore e del tipo di GIS.

Nota: i regolamenti di controllo delle esportazioni per generatori di impulsi ad alta velocità devono essere considerati in UE, USA e Giappone.

2.5 DETERMINAZIONE DEL VALORE DELL'IMPULSO ARTIFICIALE

I metodi qui presentati non sono una calibrazione. Tuttavia, l'obiettivo è di trovare la migliore corrispondenza possibile fra un reale difetto di PD e la grandezza di impulso artificiale al fine di verificare la sensibilità del sistema di misura nel corso della verifica in loco della sensibilità (Passaggio 2). Una tolleranza di $\pm 20\%$ è accettabile per la determinazione della grandezza dell'impulso artificiale.

A) Determinazione della grandezza dell'impulso artificiale nel dominio di frequenza (utilizzando un analizzatore di spettro)

La figura 7 Mostra la misura di un difetto PD con spettro di ampiezza di 5 pC confrontato con lo spettro di rumore, per esempio senza l'applicazione di alta tensione. Le diverse linee o picchi del segnale di rumore sono causati da radio e televisioni, trasmettitori radio mobili e da un radar di Aeroporto nelle vicinanze.

Non si tratta di risultati ottenuti a causa di una schermatura errata, ma piuttosto questi segnali interferenti sono direttamente accoppiati nella configurazione di set-up dei GIS, ad esempio tramite le flange o nella fattispecie attraverso le boccole. La figura 8 Mostra che lo spettro del segnale applicato al sensore C1 è meglio allineato con quello del reale PD a 5 pC utilizzando un impulso di 2 V.

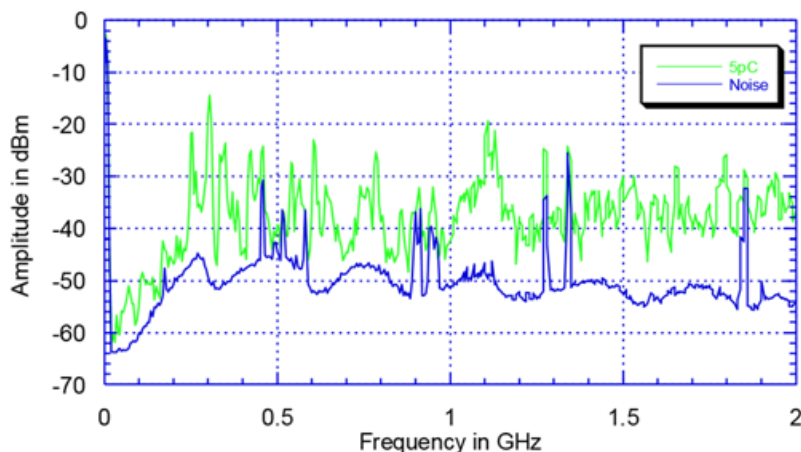


FIG.7 - Ampiezza degli spettri - segnale di rumore senza alta tensione applicata e segnale di PD a 5 pC - misurata al sensore C2

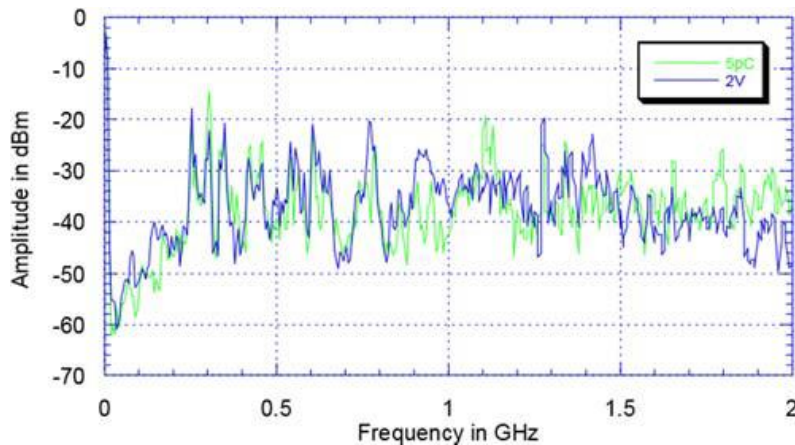


FIG.8 - Confronto dello spettro di ampiezza misurato al sensore C2 per un reale PD di 5 pC con lo spettro di ampiezza di un impulso artificiale di 2 V

Il confronto con gli spettri di impulsi di tensioni differenti può essere effettuato mediante un confronto visivo o con l'ausilio di strumenti statistici. La scelta di una caratteristica estratta basata sulla potenza di spettro è uno dei parametri più rilevanti rispetto all'ampiezza media (AA). L'ampiezza media (AA), la potenza massima misurata (MP) e la potenza media (AP) applicati per una particella in movimento sono elencati nella tabella 1.

Tabella 1 - valori statistici di spettri di frequenza calcolati in caso particelle di difetto di 5 pC di carica apparente e con diverse grandezze di impulsi date da un generatore di impulsi.

	MP [dBm]	AP [dBm]	AA [dBμV]
Particella in movimento	-25.7	-50.9	53.4
10 V	-25.8	-51.2	50.9
20 V	-19.5	-44.8	56.5

In questo esempio un impulso di tensione di 10 V si adatta bene con il segnale estratto dalla particella. Un confronto visivo conferma che questo metodo può essere utilizzato per tale tipo di difetto.

In genere, per la determinazione dell'ampiezza dell'impulso artificiale richiesto, viene utilizzato un confronto dell'intero spettro di frequenza, e misurazioni a banda stretta sono utilizzate additionally a causa della loro maggiore sensibilità.

Nel caso in cui venga utilizzato un sistema di misura a banda stretta con banda di frequenza fissa senza il confronto dell'intero spettro, dovrà essere prestata particolare attenzione per la determinazione della sensibilità.

Le misurazioni a banda stretta hanno lo svantaggio che i risultati non dipendono soltanto dal segnale di difetto PD, ma anche dalla misurazione della frequenza.

Questo può trasformarsi in un vantaggio (ovvero un'ancora più bassa suscettibilità al rumore esterno) se le frequenze di misurazione sono scelte con cura. Ciò è stato fatto per la configurazione attuale con un sistema di misurazione UHF PD a banda stretta.

La tabella 2 contiene gli impulsi di tensione equivalente misurata. Vi è una buona correlazione in caso di misurazioni effettuate a 740 MHz e si può vedere che i risultati ottenuti alle altre due frequenze mostrano scostamenti significativi.

Tabella 2 - impulsi di tensione equivalenti di entrambi i difetti artificiali di 5 pC misurati con un sistema a banda stretta a frequenze diverse

Frequenza	Protuberanza	Particella in movimento
540 MHz	2-5 V	1-2 V
740 MHz	2-5 V	Circa 10V
1240 MHz	1-2 V	10-20 V

B) Determinazione della grandezza dell'impulso artificiale nel dominio del tempo (utilizzando il modello PRPD)

Per i sistemi di rilevamento di picco a banda larga quali sistemi di controllo PD, si può effettuare un confronto utilizzando modello PRPD (Figura 9). Nell'esempio dato, un impulso di grandezza artificiale di 20 V è equivalente a 5 pC, ed è causato da una particella in movimento.

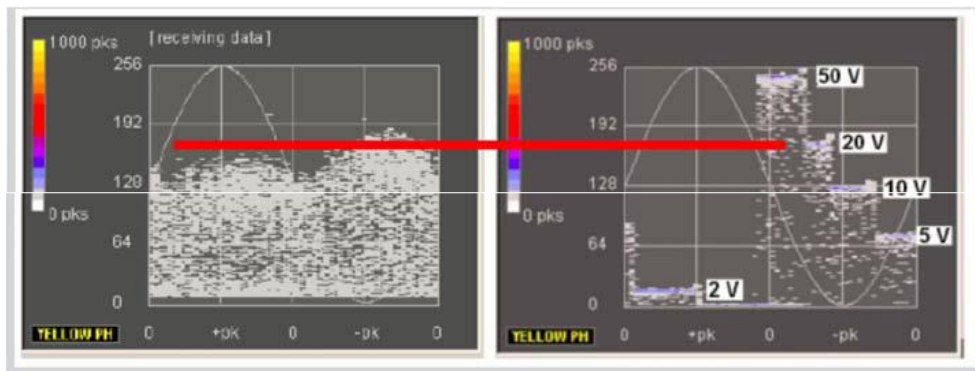


FIG. 9 - Determinazione della grandezza di impulso artificiale utilizzando modello PRPD per un difetto PD che mostra ad esempio una carica apparente di 5 pC causata dal movimento di particelle (a sinistra) ed impulsi artificiali con diverse grandezze (a destra)

CAPITOLO 3

VERIFICA DELLA SENSIBILITÀ FASE 2:

TEST SUL POSTO

3.1 ASPETTI GENERALI

La seconda fase della verifica di sensibilità CIGRE viene effettuata in loco sul GIS installato (stesso tipo di GIS utilizzato nel test di laboratorio) al fine di verificare che i sensori installati e la misurazione UHF oppure il sistema di controllo abbiano una sensibilità sufficiente per rilevare segnali, equivalenti a quelli di un tipo specifico di difetti PD, all'interno di qualsiasi comparto del GIS. Inoltre, e allo stesso tempo, vengono testati il corretto funzionamento sia dei sensori stessi che della catena di misura. Resta inteso che lo stesso tipo di sensori e lo stesso generatore di impulsi devono essere utilizzati durante la verifica della sensibilità in loco nello stesso modo in cui sono stati impiegati per la prova di laboratorio (Passaggio 1). Il Passaggio 2 dovrebbe essere eseguito con lo stesso sistema di misurazione che è stato usato al passo 1 oppure con un sistema con una sensibilità di rilevamento simile o addirittura migliore. In generale, la verifica della sensibilità in loco è soddisfatta se l'impulso artificiale iniettato può essere misurato ai sensori adiacenti.

Il numero di sensori necessari da installare nel GIS dipende dal difetto PD e dalla sensibilità di rilevazione necessaria. Una soluzione alternativa è presentata per la disposizione di sensori che sono fortemente limitati alla sensibilità di rilevazione necessaria.

3.2 DISPOSIZIONE DEI SENSORI: ASPETTI PRINCIPALI ED IMPORTANTI E DETTAGLI

3.2.1 Disposizione dei sensori in base alla relazione ELECTRA

Il posizionamento dei sensori all'interno del GIS dovrebbe essere fatto in modo che un difetto PD (ad esempio una particella mobile che mostra una carica apparente di 5 pC) possa essere rilevato in qualsiasi compartimento del GIS da almeno due sensori.

Il numero e la posizione dei sensori determinerà la sensibilità della misura UHF PD. Molti parametri influenzano l'attenuazione osservata fra due sensori, per esempio le modifiche del diametro del contenitore o forme geometriche di scomparti del gas.

Non è possibile stabilire regole fisse che descrivano la migliore disposizione dei sensori.

Principale: Le posizioni dei sensori PD UHF devono essere scelte in modo tale che per l'intero GIS sia garantita una certa sensibilità predefinita. La figura 10 mostra una sezione GIS con tre posizioni del sensore. Nel test di laboratorio (passaggio 1), la grandezza dell'impulso generato è stato determinato in, ad esempio, 10V.

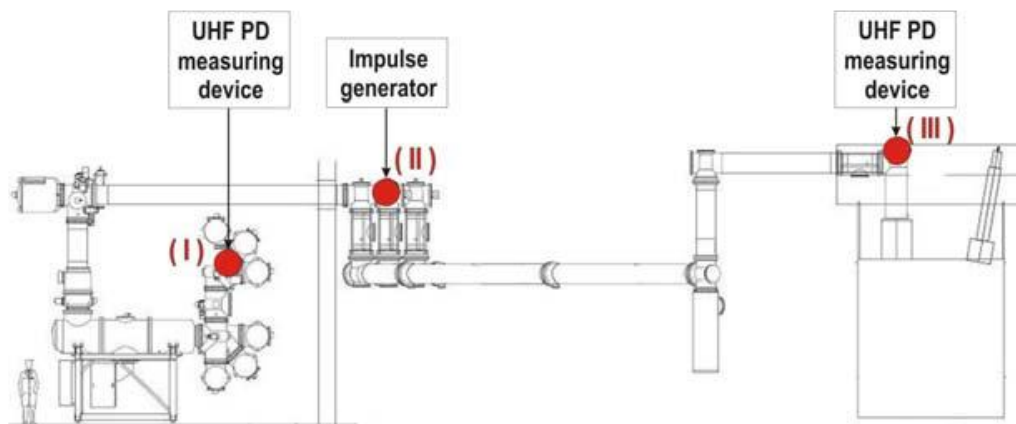


FIG.10 - Principio di verifica della sensibilità CIGRE Passaggio 2

Al GIS costituito sul posto, il generatore di impulsi è collegato ad un sensore (II) e il sistema di misurazione UHF PD è collegato ai sensori adiacenti (I) e (III). Quando il valore dell'impulso predeterminato che viene erogato dal generatore di impulsi (ad esempio 10 V segnale, come detto sopra) può essere misurato ai sensori adiacenti, il controllo di sensibilità viene effettuato per entrambe le sezioni GIS. Se questo vale per tutte le configurazioni dei sensori, si ritiene che sia la combinazione di sistemazione dei

sensori che il sistema di misurazione siano sufficienti per misurare l'intero GIS con una sensibilità predefinita (ad esempio 5 pC di una particella in movimento)

In dettaglio: Si consideri un GIS monofase incapsulato con cinque sensori UHF PD situati nelle posizioni A, B, C, D ed E su ogni fase, come in figura 11. La terminazione del cavo A e la boccola del trasformatore E corrispondono ai punti finali del GIS.

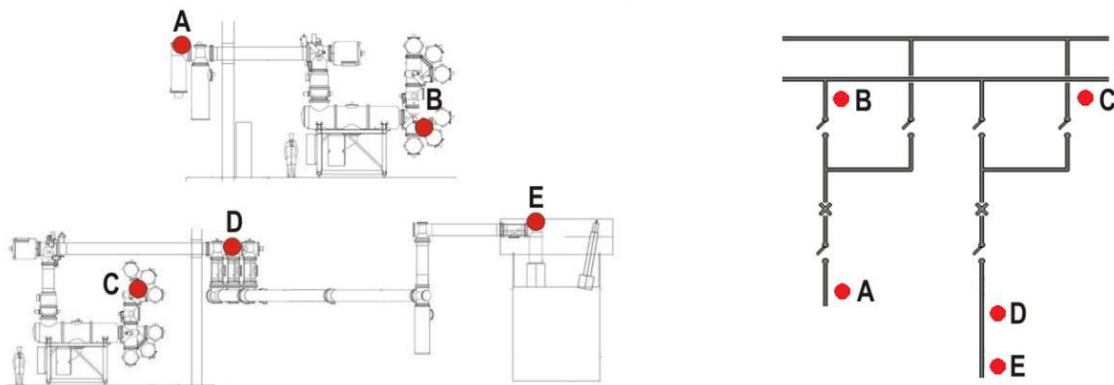


FIG.11 - GIS a 420 kV con cinque posizioni dei sensori: A - E (vista in sezione (a sinistra) e schematica (a destra))

Un'illustrazione della sequenza di misurazione è presentata in figura 12a rispetto a diversi punti di iniezione e di misura su GIS. Per semplificare questa rappresentazione, l'attenuazione tra due sensori è considerata lineare.

Consideriamo due casi per la posizione del difetto:

Caso A: Un difetto di 5 pC si trova nel centro della sezione B-C. Dalla figura 12b si può dedurre che il difetto può essere rilevato dai sensori B e C, ma non dai sensori A e D.

Caso B: Un difetto 5 pC si trova vicino al sensore C. Dalla figura 12c si può dedurre che il difetto può essere rilevato dai sensori UHF PD B, C, D ed E.

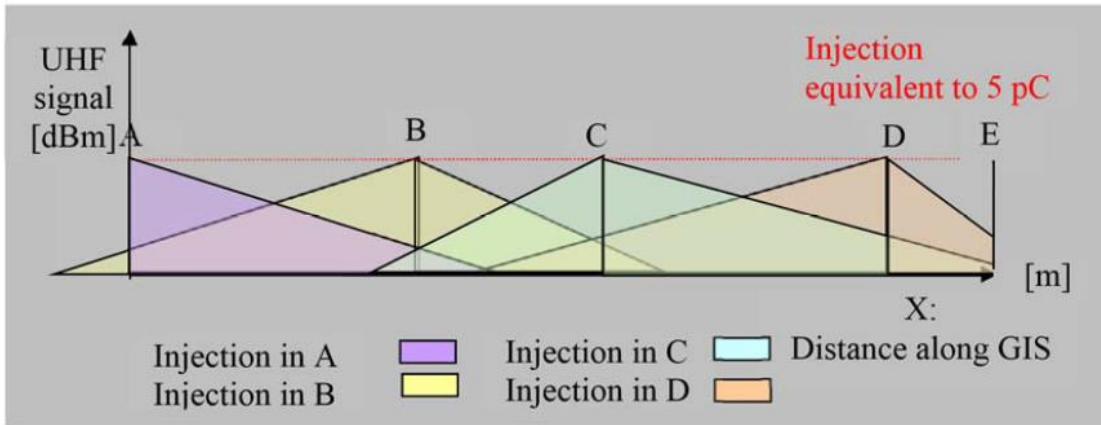


FIG.12a - Segnale di attenuazione UHF semplificato per le diverse posizioni di iniezione e di misurazione

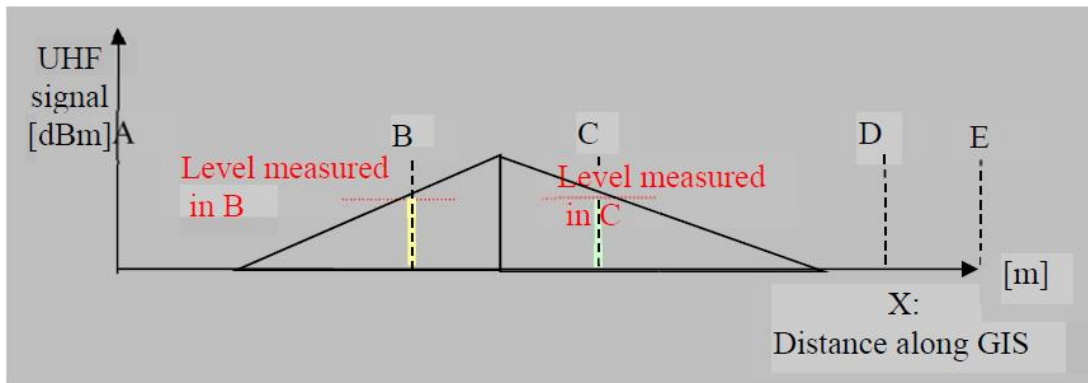


FIG. 12b - Livello di misurazione UHF semplificato per un difetto PD localizzato nel centro della sezione B-C

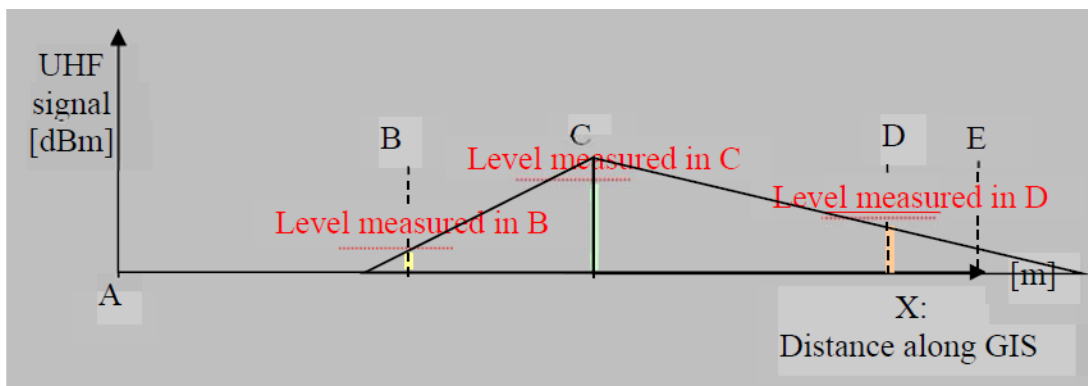


FIG.12c - Livello di misurazione UHF semplificato per un difetto equivalente a 5 pC vicino a C

Il metodo proposto per la verifica in loco della sensibilità può portare all'installazione di ulteriori sensori rispetto a quanto sia effettivamente necessario per rilevare un difetto PD di 5 pC. Comunque, qualunque sia la posizione del difetto, viene sempre rilevato da almeno due sensori. Questo significa anche che la sensibilità di rilevamento con tale disposizione e numero di sensori è meglio di 5 pC.

3.2.2 Metodo alternativo per la disposizione dei sensori

In questo capitolo viene mostrato un metodo alternativo che permette la riduzione del numero di sensori limitando la sensibilità di rilevamento globale per tutti i compartimenti del GIS alla sensibilità di rilevamento richiesta, ad esempio 5 pC. Considerando la figura 13a, solo i sensori alle posizioni B e D sono tenuti a soddisfare il requisito del livello di rilevazione di 5 pC nelle sezioni A-B, B-D e D-E.

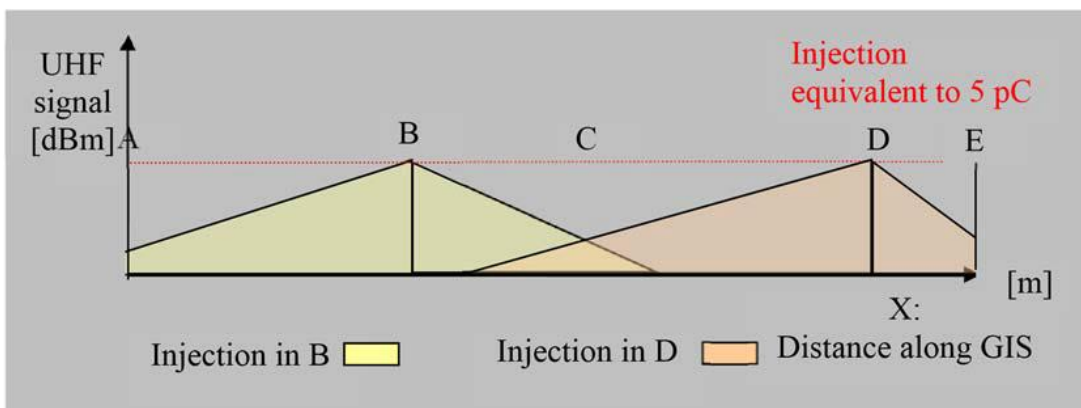


FIG.13a - Attenuazione semplificata del segnale UHF in base punto di iniezione del sensore

Un difetto di 5 pC nella sezione B-C sarà rilevato dal sensore B, mentre un difetto nella sezione C-D viene rilevato dal sensore D. Un difetto nelle sezioni A-B o D-E viene rilevato rispettivamente dal sensore B o D. Per soddisfare il requisito di sensibilità, sono necessari solamente due sensori nella posizione corretta, rispetto a cinque. Un difetto nella posizione C dovrebbe essere rilevato tramite il sensore B o D (Figura 13b). La posizione dei sensori B e D deve essere convalidata durante il controllo di sensibilità in loco. A causa della lunga distanza che separa due sensori, l'impulso artificiale iniettato su un sensore non può essere rilevato sul secondo.

Tuttavia, diverse procedure sono disponibili per eseguire la verifica della sensibilità in loco per questa disposizione alternativa di sensori.

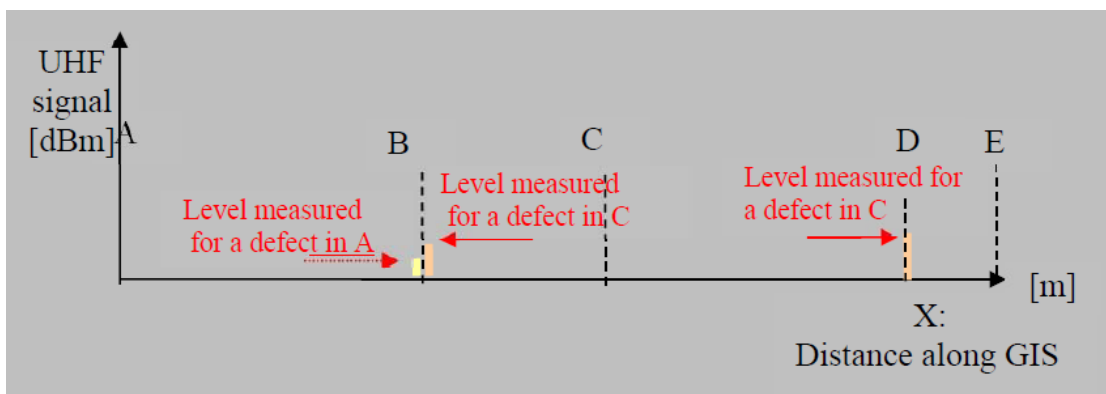


FIG.13b - Misurazione semplificata del livello UHF per un difetto vicino alla posizione C

Procedura 1: Lo stesso sensore (previsto di tipo incorporato) come quelli installati sul GIS è installato nella posizione intermedia (posizione C) su una fase ed utilizzato unicamente per l'iniezione di impulsi. Le tre fasi di un GIS incapsulato monofase possono essere considerate simili dalla progettazione e di conseguenza dal punto di vista dell'attenuazione. Questo ragionamento è basato sul fatto che sia la posizione del sensore (che è identica sui compartimenti delle tre fasi) e sia la limitata variazione di lunghezza tra due sensori, non ne modificano sostanzialmente l'attenuazione. È tuttavia consigliabile dotare la fase più lunga con la sezione GIS.

Procedura 2: Un sensore UHF PD esterno, è applicato in una posizione intermedia (posizione C) ed è utilizzato solo per l'iniezione dell'impulso. In questo caso la determinazione della grandezza del generatore di impulsi dovrebbe essere svolta anche nel test di laboratorio (Passaggio 1) per il sensore esterno. Di conseguenza possono essere determinati due livelli di tensione corrispondenti all'iniezione interna e al sensore esterno.

Procedura 3: Le stesse sezioni della connessione di GIS sono generalmente disponibili per diverse sottostazioni e solo la connessione ai trasformatori e alle boccole può variare. In questo caso la verifica della sensibilità in loco può essere omessa dalla sezione GIS supponendo che la verifica di sensibilità sia stata bypassata con un set completo di

sensori, dove sia le posizioni del sensore stesso che la distanza nel mezzo sono entrambe rispettate per il GIS.

Tuttavia, per la sistemazione alternativa dei sensori, il corretto funzionamento dei sensori stessi e la catena di misurazione possono essere testati a qualsiasi grandezza adatta erogata dal generatore di impulsi.

È necessario menzionare che un ridotto numero di sensori interni (che determina un solo sensore per rilevare il segnale PD) può ridurre la possibilità di individuazione di difetti PD per mezzo di apparecchi elettrici di misura time-of-flight, poiché sensori esterni aggiuntivi non possono essere applicati in tutte le configurazioni di GIS.

3.3 POSIZIONAMENTO DEI DISPOSITIVI DI COMMUTAZIONE

Da un punto di vista generale, la geometria del segnale del GIS può essere considerata ad onda coassiale, con il suo conduttore HV interno isolato da terra.

Sezionatori ed interruttori automatici rispettano questa geometria solo in posizione di chiusura, dove i contatti sono aperti: questo provoca una discontinuità che agisce per impedire che la modalità TEM si propaghi da un lato all'altro. Le onde che si propagano nella modalità TEM saranno parzialmente riflesse e parzialmente convertite in modalità TE e TM, modificando così il contenuto di frequenza dell'onda itinerante. Di conseguenza, la posizione dei dispositivi di commutazione influenza l'attenuazione dei segnali UHF e deve essere tenuta in considerazione per la verifica della sensibilità in loco.

Le misure effettuate da un sistema di monitoraggio PD su un collegamento trifase GIS incapsulato illustrano l'effetto descritto. Il sensore utilizzato per l'iniezione di impulsi si trova sulla sbarra superiore del collegamento GIS e la posizione del sensore per la rilevazione del segnale si trova al termine del cavo. La combinazione delle posizioni dei dispositivi di commutazione (OPEN o CLOSED) influenza in modo significativo l'ampiezza risultante del segnale UHF misurato (Figura 14). In questo esempio il segnale UHF misurato può variare dal 58% al 100%.

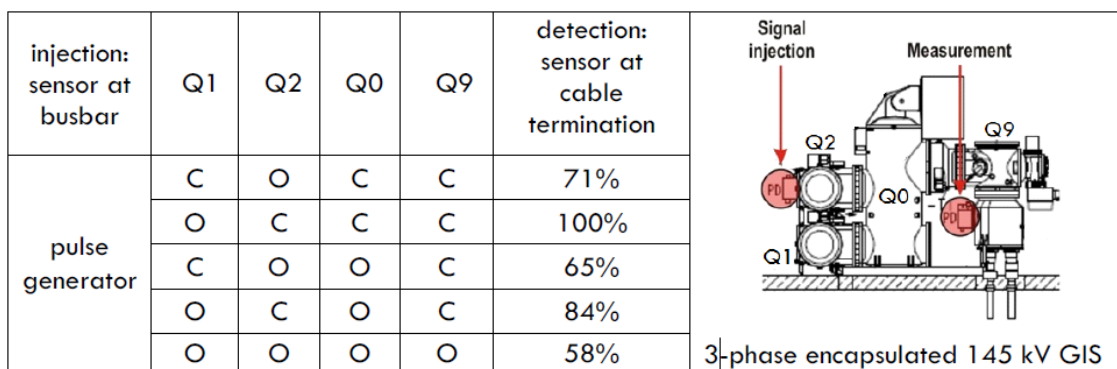


FIG.14 - Influenza delle posizioni dei dispositivi di commutazione sui segnali UHF misurati (PRPD)

Gli stessi tipi di misurazione sono stati eseguiti nel dominio della frequenza su un GIS monofase incapsulato 245 kV. Lo spettro di frequenza mostrato in figura 15, con frequenza da 300 MHz a 1200 MHz, rappresentano la massima ampiezza degli spettri. Quando l'interruttore è commutato da CLOSE ad OPEN, alcune frequenze di risonanza scompaiono nella parte superiore dello spettro (800 a 1200 MHz), mentre alcune sono dominanti nella banda di frequenza più bassa (meno di 800 MHz).

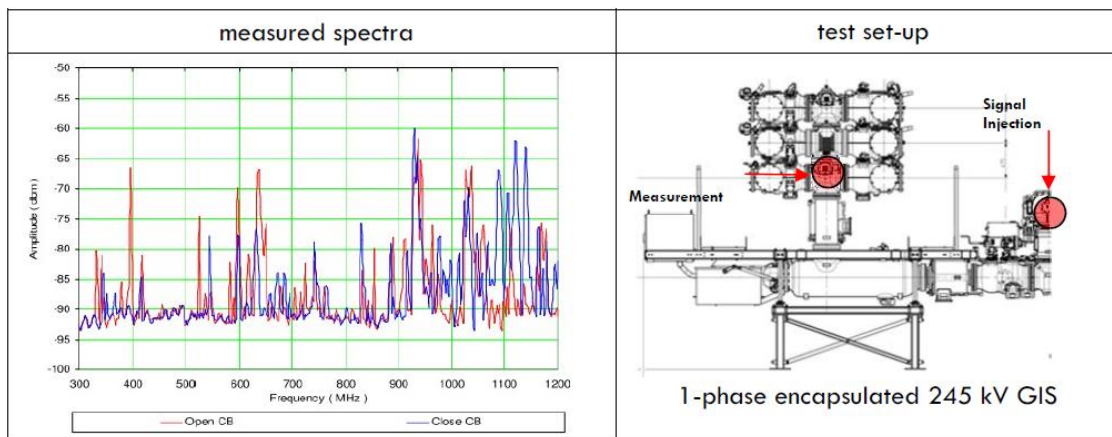


FIG.15 - Influenza della posizione dell'interruttore di commutazione (CLOSE / OPEN) sul segnale misura UHF

Si può concludere che il valore dei segnali UHF misurati dipende dalla posizione di commutazione dei vari dispositivi di commutazione (interruttori sezionatori, interruttori automatici) situati tra due sensori. Le misure nel dominio della frequenza mostrano che il cambiamento nel segnale UHF non corrisponde ad un'attenuazione completa sullo spettro. Invece, vi è una modifica completa delle modalità di propagazione che impedisce che venga definito un unico fattore di attenuazione su una base per-componente. Pertanto, la verifica della sensibilità può essere effettuata utilizzando qualsiasi posizione ragionevole dei dispositivi di commutazione. Si raccomanda che la verifica della sensibilità in loco venga effettuata con la configurazione più frequentemente utilizzata in servizio.

3.4 APPARECCHIATURA DI PROVA

Sensori

Lo stesso tipo di sensori deve essere utilizzato durante la prova di laboratorio (Fase 1) e per la verifica della sensibilità in loco (Fase 2). La lunghezza ed il tipo di cavi utilizzati per collegare i sensori al dispositivo di misura o di monitoraggio PD dovrebbero essere identici a quelli utilizzati al Passo 1, come nella configurazione finale utilizzata per il monitoraggio delle misurazioni. Quando i preamplificatori sono collegati direttamente ai sensori, ad esempio per le prove in loco, possono essere utilizzate lunghezze ragionevoli e convenienti dei cavi di misura.

Generatore di impulsi

Il tempo di salita del calibratore dell'impulso può influenzare sia il livello del segnale UHF risultante che viene ricevuto che la forma dello spettro risultante (per esempio frequenza di taglio superiore). Di conseguenza, lo stesso tipo di generatore di impulsi che viene utilizzato nel Passaggio 1 è utilizzato anche nel Passaggio 2.

Attrezzatura per la misurazione

Le misurazioni UHF possono essere eseguite con sistemi a banda larga o a banda stretta. Il livello di rilevamento ed il minimo rumore dipendono dal tipo di apparecchiature. La Fase 2 della verifica della sensibilità deve essere eseguita con lo stesso sistema di misura che è stato usato al Passo 1, oppure con un sistema che ha sensibilità simile o migliore.

3.5 ESECUZIONE DELLA VERIFICA DI SENSIBILITÀ IN LOCO

Per ciascuna delle sezioni di GIS le seguenti operazioni devono essere eseguite e ripetute per tutte le combinazioni dei sensori (sensore e sensore adiacente) installati nel GIS:

- a. Il generatore di impulsi è collegato ad un sensore UHF PD.
- b. Il dispositivo di misurazione UHF è collegato al sensore adiacente alla sezione GIS esaminata.
- c. La prima misurazione è fatta con il generatore di impulsi spento (per effettuare una misurazione del livello di rumore di fondo). Questo deve essere fatto per circa un minuto per tener conto dei segnali di disturbo stocastici che si verificano in loco.
- d. La seconda misurazione viene effettuata con il generatore di impulsi acceso e impostato sul valore della tensione determinata dalla sensibilità CIGRE verificata durante la Fase 1, effettuata in laboratorio.
- e. L'ampiezza del segnale UHF misurato deve essere controllato e documentato (capitolo 3.6).

Si deve osservare che la verifica della sensibilità in loco deve poter essere applicata durante la messa in servizio e durante il normale funzionamento di un GIS.

3.5 CRITERI PER SUPERARE LA PROVA

Per superare la verifica della sensibilità in loco, quando l'impulso artificiale viene iniettato, la grandezza del segnale UHF misurato dovrebbe essere chiaramente sopra il livello di rumore (display PRPD) oppure può essere considerato sufficiente quando alcune frequenze di risonanza appaiono chiaramente sopra lo spettro del rumore di fondo (analizzatore di spettro).

CAPITOLO 4

CONCLUSIONE

L'esperienza maturata grazie alle prove effettuate sul GIS, indica che alcuni dei guasti in servizio sono legati a difetti del sistema di isolamento. Molti di questi difetti possono essere rilevati dalla diagnostica UHF PD. Un rapporto Electra pubblicato nel 1999, descrive la procedura in due fasi per la verifica della sensibilità del sistema UHF. Questo opuscolo tecnico raccoglie l'esperienza disponibile sulla verifica della sensibilità degli ultimi 15 anni e descrive le sue applicazioni pratiche per il GIS. La tabella 3 riassume le linee guida stabilite e le raccomandazioni che aiuteranno i produttori e gli utenti nella corretta applicazione del metodo UHF per la rilevazione PD su GIS.

Tabella 3 - Linee guida e raccomandazioni per la verifica della sensibilità

N°	Argomento	Linee guida e raccomandazioni	Riferimento
Verifica della sensibilità Fase 1: Laboratorio			
1	Scopo	Determinazione della grandezza di un impulso artificiale PD equivalente a 5 pC di carica apparente di un difetto definito, che sarà applicato successivamente in loco durante la fase 2 della verifica di sensibilità sullo stesso tipo di GIS.	Cap. 2.1
2	Configurazione di prova	- Configurazione di prova compatta per GIS monofase: Figura 1 e Figura 2 - Collegamento completo per GIS trifase: Figura 4	Cap. 2.2

3	Difetto PD e rilevazione della sensibilità	Spesso viene utilizzata una particella in movimento, ad esempio con una lunghezza di 3 - 5 mm e un diametro di 1 mm. Essa è posta sul contenitore in una posizione vicino al sensore che viene utilizzato per l'iniezione di impulsi: Figura 1, sensore C1. Invece di una particella che si muove, a volte per simulare protuberanze sul conduttore di alta tensione, viene utilizzato un ago con una lunghezza di 5 - 10 mm e un raggio della punta di circa 0,5 mm (figura 3). La rilevazione di sensibilità necessaria, di solito corrisponde ad una carica apparente di 5 PC in base alla norma IEC 60270.	Cap. 2.2
4	Sensore	Sensori interni ed esterni possono essere utilizzati con risposta in frequenza adatta. Confronto e ottimizzazione dei sensori sono possibili utilizzando metodi diversi (cellule GTEM, ecc.)	
5	Dispositivo di misurazione PD	I segnali UHF possono essere rilevati nel dominio del tempo o nel dominio della frequenza da sistemi a banda stretta o larga (figura 5 e 6): oscilloscopi, analizzatori di spettro, strumenti PD, sistemi di controllo PD con o senza amplificatori e filtri.	Cap. 2.3
6	Generatore di impulsi	Ogni generatore di impulsi con uscita variabile è in grado di generare impulsi artificiali di: - Tempo di salita $\leq 0,5$ ns - Grandezza variabile (vedi capitolo 2.5) - Frequenza di ripetizione dell'impulso: meno di 100 kHz, per esempio 50 Hz o 60 Hz	Cap. 2.4
7	Determinazione della grandezza dell'impulso artificiale	Il metodo qui presentato non è una calibrazione. Tuttavia, l'obiettivo è quello di trovare la migliore corrispondenza possibile tra la reale difettosità PD e l'impulso artificiale al fine di verificare la sensibilità della misura UHF. Il confronto con gli spettri di impulsi di tensioni differenti può essere effettuato mediante un confronto visivo o con l'ausilio di strumenti statistici. Un confronto potrebbe anche essere realizzato con il modello PRPD (Figura 9). Una tolleranza di $\pm 20\%$ è accettabile per la determinazione della grandezza dell'impulso artificiale.	Cap. 2.5

8	Risultato	Rapporto di prova che mostra l'ampiezza di impulsi artificiali e documentazione della configurazione di prova e della misurazione PD	
Verifica della sensibilità Fase 2: In loco			
9	Scopo	Verificare che i sensori installati e che il sistema di misurazione o di monitoraggio UHF abbiano una sensibilità sufficiente per rilevare i segnali, equivalenti a quelli di un tipo specifico di difetto PD, all'interno di ogni compartimento del GIS che viene controllato. Inoltre, e allo stesso tempo, vengono testati il corretto funzionamento dei sensori stessi e della catena di misura.	Cap. 3.1
10	Principio della verifica della sensibilità in loco	Il generatore di impulsi è collegato ad un sensore e il sistema di misurazione UHF PD è collegato ai sensori adiacenti (Figura 10). Se il segnale del generatore di impulsi (Valore in accordo al Passo 1) può essere misurato dai sensori adiacenti, il controllo di sensibilità è sufficiente per le sezioni GIS. Se questo vale per tutte le configurazioni di sensori si ritiene che la combinazione di posizionamento fra sensori e sistema di misurazione, sia sufficiente per misurare l'intero GIS con una sensibilità predefinita (ad esempio 5 pC di una particella in movimento).	Cap. 3.2
11	Disposizione dei sensori	- <u>Posizionamento del sensore</u> : deve essere fatto in modo tale che un difetto PD (ad esempio una particella mobile che mostra una carica apparente 5 pC) possa essere rilevato in qualsiasi compartimento del GIS da almeno due sensori. - <u>Metodo alternativo per il posizionamento di sensori</u> : attua una riduzione del numero di sensori limitando la sensibilità di rilevazione generale per tutti i comparti GIS alla sensibilità di rilevazione necessaria di esempio di 5 pC (rilevazione dei difetti PD da almeno un sensore).	Cap. 3.2

12	Posizione dei dispositivi di commutazione	La grandezza dei segnali UHF misurati dipende dalla posizione di commutazione dei vari dispositivi (sezionatori, interruttori automatici) situati tra due sensori. Pertanto, la verifica di sensibilità deve essere effettuata utilizzando una posizione ragionevole dei dispositivi di commutazione. Si raccomanda che la verifica di sensibilità in loco venga effettuata con la configurazione più frequentemente utilizzata in servizio.	Cap. 3.3
13	Apparecchiatura di prova	La Fase 2 della verifica sensibilità proposta, deve essere eseguita con lo stesso sistema di misurazione che è stato usato al Passo 1, o con un sistema con sensibilità di rilevamento simile o migliore. Lo stesso tipo di sensori e lo stesso generatore di impulsi devono essere utilizzati durante la prova di laboratorio (Fase 1) e per la verifica sensibilità in loco (Fase 2).	Cap. 3.4
14	Criteri per superare la prova	Quando l'impulso artificiale viene iniettato, la grandezza del segnale UHF misurato dovrebbe essere chiaramente sopra del livello di rumore (display PRPD) oppure può essere considerato sufficiente quando alcune frequenze di risonanza appaiono chiaramente sopra lo spettro del rumore di fondo (analizzatore di spettro).	Cap. 3.6
15	Risultato	Resoconto della prova che mostra i risultati di verifica e la documentazione delle apparecchiature di misurazione PD.	

Bibliografia

Testi estratti e tradotti dalla lingua inglese dal documento 654 CIGRE:

“UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification” –Working Group D1.25; April 2016

Ringraziamenti

Con immenso affetto ringrazio di cuore i miei genitori, Claudio e Manuela, per l'opportunità che mi hanno offerto, per l'incoraggiamento e per l'amore che mi hanno sempre dimostrato; Luca; gli amici Cato, Simo e Guidone che dalle scuole superiori condividono con me gioie e dolori; i miei compagni di università e di serate bolognesi Zazza, Lore, Sergio, Jek e Berna; la mia ragazza, Carlotta, che ha sempre creduto in me e mi ha sempre supportato; i miei nonni ed in particolare Edda; gli Amici di una vita e tutte le persone a me vicine in questi anni.

A voi tutti, un grazie sincero,

Ares

