

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria Elettrica

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE
INDIRIZZO: INGEGNERIA ELETTROTECNICA
CICLO XXII

**ASSET MANAGEMENT NEI SISTEMI DI TRASMISSIONE E DISTRIBUZIONE:
METODI E TECNOLOGIE AVANZATE PER LA VALUTAZIONE DEL DEGRADO
DEI SISTEMI DI ISOLAMENTO INTERNO**

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Paolo F. Bariani

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. Giovanni Martinelli

Supervisore: Ch.mo Prof. Giancarlo Pesavento

Dottorando: Nikola Kuljaca

RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare l'ing. C. Cherbaucich (dell'ERSE S.p.A. di Milano) per il grande supporto, l'amicizia e l'infinita pazienza che mi ha dimostrato, fin dai tempi della stesura della mia tesi di laurea e in tutti questi lunghi anni di collaborazione, come mio referente aziendale (inizialmente in CESI, poi in ERSE).

Ringrazio inoltre tutti gli altri miei amici, di ERSE e di CESI, che mi sono stati sempre vicini e che sono diventati, nel tempo, una mia seconda famiglia.

Per quanto riguarda questo lavoro di ricerca in particolare desidero ringraziare l'ing. S. Meregalli (ERSE) per l'affetto e le molte cose che mi ha insegnato sul mondo dei cavi di media ed alta tensione, il p.p. D. Bartalesi (ERSE) per l'amicizia e per avermi aiutato nello studio di diversi linguaggi di programmazione ed il Dott. G. Rizzi (ERSE) per il supporto durante la fase di stesura e revisione della tesi.

Ringrazio inoltre l'ing. L. Barbieri (Politecnico di Milano), il p.i. L. Arosio (ERSE) e tutto il personale tecnico e operativo dei Laboratori di Alta Tensione di ERSE per l'amicizia e la preziosa collaborazione durante la campagna di prove sperimentali.

Per quanto riguarda l'Università di Padova desidero ringraziare in particolare il mio relatore, il Prof. G. Pesavento, per la pazienza ed il supporto nella stesura e revisione di questa tesi, come anche l'ing. C. Ceretta e l'ing. E. Pedrotti per l'amicizia e la collaborazione durante questi tre anni.

Ringrazio soprattutto i miei genitori e mio fratello per tutto l'affetto, il sostegno, la pazienza e l'aver sempre creduto in me anche le volte in cui io non riuscivo più a farlo.

SOMMARIO

La liberalizzazione del mercato elettrico, aumentando la competitività nel settore, ha dato un notevole impulso allo sviluppo della gestione ottimizzata delle infrastrutture e dei componenti (Asset Management) nelle aziende preposte alla produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica.

L'applicazione delle moderne strategie di Asset Management ha inciso notevolmente sulla politica di manutenzione dei componenti, con l'introduzione graduale, a fianco della manutenzione programmata, della manutenzione su condizione (in inglese "Condition Based Maintenance" o CBM), basata essenzialmente sulla possibilità di stimare, tramite opportuni indicatori diagnostici del degrado, le condizioni e la vita residua del componente e prevedere di conseguenza l'intervento di manutenzione.

Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse tecnologie diagnostiche che, grazie alla possibilità di valutare lo stato dei componenti (ed in particolare le condizioni dell'isolamento interno, causa principale dei guasti dovuti all'invecchiamento del componente), sono oggi di fondamentale importanza per la corretta implementazione della CBM.

Nel lavoro di ricerca presentato in questa tesi, dopo una breve descrizione dello stato dell'arte delle principali tecniche diagnostiche utilizzate nei sistemi di trasmissione e distribuzione dell'energia, si è scelto di affrontare l'argomento della misura delle scariche parziali in quanto questo rappresenta uno degli indicatori più complessi ed interessanti per la stima delle condizioni dell'isolamento interno di un componente.

I moderni sistemi diagnostici basati sulla misura delle scariche parziali, attualmente in una fase iniziale di sviluppo, presentano ancora diverse criticità che sono oggetto di studio e discussione da parte della comunità scientifica internazionale e che rendono la diffusione di questo tipo di strumenti ancora piuttosto limitata in certi ambiti.

E' stato sviluppato un sistema prototipo per la misura delle scariche parziali a banda ultra larga, analizzando e implementando metodologie innovative per l'analisi dei segnali di scarica parziale, che sono state validate nel corso di un'ampia campagna di prove di verifica sperimentale presso i laboratori di ERSE S.p.A. di Milano e del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova. In conclusione sono stati affrontati diversi argomenti ed aspetti critici dei moderni strumenti diagnostici basati sulla misura delle scariche parziali, fornendo indicazioni e metodi utili allo sviluppo futuro di queste tecnologie.

Una parte di questo lavoro è stata finanziata dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito dell'Accordo di Programma tra ERSE ed il Ministero dello Sviluppo Economico - D. G. Nucleare, Energie rinnovabili ed efficienza energetica, stipulato in data 29 luglio 2009 in ottemperanza del DM, 19 marzo 2009.

ABSTRACT

The liberalization of the electricity market and the increasing competition in power energy sector, have given a major boost to the development of optimized management of infrastructures and components (Asset Management) in power generation, transmission and distribution companies.

The application of modern asset management strategies are bearing several changes in companies maintenance policies that are gradually moving from “Time Based Maintenance” to “Condition Based Maintenance” (CBM), adopting particular diagnostic indicators to evaluate the condition and remaining life of monitored components.

In recent years, several diagnostic technologies have been developed that are of fundamental importance for the proper implementation of CBM, having the ability to assess the status of components (and in particular the conditions of insulation systems, the main cause of failure due to ageing).

In the research work presented in this thesis, after a brief description of the state of the art of main diagnostic techniques used in transmission and distribution systems, the measurement of partial discharges has been addressed (as one of the most complex and interesting indicators for the estimation of internal condition of insulation systems).

Modern diagnostic systems based on the measurement of partial discharges are currently at an early stage of development, having several issues that are still the subject of study and discussion by the international scientific community, slowing the adoption of such technologies in certain areas.

A prototype ultra-wideband system for the measurement of partial discharges has been developed, innovative methodologies for the analysis of partial discharge signals have been implemented and compared through an extensive campaign of tests carried out at ERSE S.p.A. of Milan and Department of Electrical Engineering of Padua University laboratories. Various topics and critical aspects of modern diagnostic tools have been discussed, thus providing useful information and methods for the future development of these technologies.

A part of this work has been financed by the Research Fund for the Italian Electrical System under the Contract Agreement between ERSE and the Ministry of Economic Development - General Directorate for Nuclear, renewable Energies and Electrical Efficiency, stipulated on July 29, 2009 in compliance with the Decree of March 19, 2009.

Indice

1	INTRODUZIONE	4
1.1	Asset management nei sistemi di T&D	5
1.2	Le strategie di manutenzione	5
1.3	Le tecniche diagnostiche nei sistemi di T&D.....	7
1.3.1	Resistenza d'isolamento (IR)	7
1.3.2	Indice di polarizzazione (IP)	7
1.3.3	Fattore di perdita (tg δ).....	7
1.3.4	Misure della corrente di Polarizzazione e Depolarizzazione (PDC).....	8
1.3.5	Misure della tensione di ritorno (RVM).....	8
1.3.6	Misure di Spettroscopia Dielettrica in frequenza (FDS)	9
1.3.7	Analisi dell'olio isolante	10
1.3.8	Misura delle scariche parziali.....	10
1.3.9	Monitoraggio della temperatura	11
1.3.10	Misura delle vibrazioni.....	11
1.3.11	Misura della risposta in frequenza (FRA)	11
2	LA MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI	12
2.1	introduzione	12
2.2	La fisica delle scariche parziali.....	13
2.3	La misura della "carica apparente"	18
2.4	La norma IEC 60270	20
2.4.1	Definizioni principali della norma IEC 60270	20
2.4.2	Circuiti di misura definiti dalla norma IEC 60270.....	22
2.4.3	Classificazione dei sistemi di misura delle SP secondo la norma IEC 60270...	23
2.4.4	Considerazioni sulla classificazione introdotta dalla norma	25
3	METODI AVANZATI PER L'ANALISI DIAGNOSTICA DELLE SCARICHE PARZIALI	26
3.1	Introduzione.....	26
3.2	Analisi della distribuzione delle scariche parziali	28
3.3	Sistemi di misura di SP a banda ultra larga	33
3.3.1	Descrizione generale	33
3.3.2	Analisi tempo/frequenza equivalenti.....	33
3.4	Sistemi multi-terminale per la misura di SP.....	37
3.4.1	Descrizione generale	37
3.4.2	Principio di funzionamento	37
3.4.3	Il Sistema MPD600	38
4	ANALISI MULTI-BANDA PER LA SEPARAZIONE DELLE SORGENTI DI SCARICA PARZIALE	42
4.1	Generalità.....	42

4.2	La modalità di separazione multi terminale 3PARD	42
4.3	Separazione delle SP mediante analisi multi banda.....	46
4.3.1	Generalità	46
4.3.2	Diagrammi vettoriali per la separazione multi-banda con due e tre dimensioni	47
4.3.3	Osservazioni sull'incidenza dell'ampiezza del pattern.....	51
5	ALGORITMI PER IL RICONOSCIMENTO AUTOMATICO DEI CLUSTER..	55
5.1	Generalità.....	55
5.2	Tipologie di algoritmi di clustering	55
5.3	Algoritmo di clustering - “K-means”.....	57
5.4	Algoritmo di clustering - “C-means”	59
5.5	Algoritmo di clustering basato sulla densità - “dbscan”	59
6	SVILUPPO DI UN SISTEMA PROTOTIPO PER LA MISURA DELLE SP A BANDA ULTRA LARGA	62
6.1	Descrizione del sistema	62
6.2	Interfaccia utente.....	65
6.3	Il campionamento di segnali con digitalizzatori a memoria segmentata	65
6.4	La distribuzione delle scariche ed il problema del sincronismo	67
6.5	Funzionalità avanzate del software di controllo ed elaborazione dati	67
6.5.1	Applicazione di filtri digitali	67
6.5.2	Separazione multi banda.....	68
6.5.3	Separazione tempo/frequenza equivalenti.....	68
6.6	Funzionalità ausiliarie del software	73
7	VERIFICA SPERIMENTALE DEI METODI E DEI SISTEMI PRESENTATI..	74
7.1	Prove su spezzone di cavo MV	75
7.1.1	Misure con il sistema a banda stretta.....	77
7.1.2	Misure mediante sistema multiterminale.....	80
7.1.3	Misura con il sistema a banda ultra larga	99
7.2	Prove su trasformatore di distribuzione MT	102
7.2.1	Prova con due sorgenti simultanee di SP di tipo corona	103
7.2.2	Prova di caratterizzazione della risposta del trasformatore MV mediante calibratore di SP	111
8	CONSIDERAZIONI SULLA MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI NEI CAVI.....	113
8.1	Introduzione.....	113
8.2	Caratterizzazione di trasduttori per la rilevazione delle SP nei cavi.....	114
8.2.1	Caratterizzazione della risposta in frequenza	114
8.2.2	Caratterizzazione in frequenza mediante generatore di tensione sinusoidale..	115
8.2.3	Caratterizzazione in frequenza mediante generatore di tensione a gradino.....	115
8.2.4	Verifica della linearità	116
8.3	Caratterizzazione metrologica di alcuni trasduttori commerciali	116

8.4	Propagazione ed attenuazione delle scariche parziali nei cavi	120
8.4.1	Descrizione del fenomeno fisico	120
8.4.2	Propagazione e localizzazione delle SP nei cavi mediante analisi riflettometrica	122
8.4.3	Metodo di misura dell'attenuazione.....	124
8.5	Valutazione sperimentale in laboratorio dell'attenuazione per alcuni tipi di cavo MT	127
8.6	Verifica sperimentale del comportamento di alcuni trasduttori di scariche parziali su uno spezzone di cavo.....	129
8.7	Verifica sperimentale dell'attenuazione di alcuni cavi MT in esercizio.....	131
8.8	Prova di localizzazione di SP in un cavo MT mediante analisi riflettometrica...	137
8.9	Conclusioni.....	139
9	CONCLUSIONI.....	141
10	APPENDICE 1) ESEMPIO DI INNESCO DEL FENOMENO DEL TREEING IN UN DIELETTRICO SOLIDO	143
11	APPENDICE 2) METODOLOGIA PER LA STIMA DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO	146
12	BIBLIOGRAFIA.....	150

1 INTRODUZIONE

In passato, la produzione, la trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica venivano gestite da aziende verticalmente integrate che godevano di una posizione tale da permettere loro di effettuare investimenti consistenti anche per la corretta gestione, l'operazione, la manutenzione e l'eventuale sostituzione programmata dei propri asset (componenti elettrici ed infrastrutture).

La liberalizzazione del mercato elettrico, la conseguente frammentazione delle aziende originarie in aziende più piccole che si occupano di aspetti più limitati, l'ingresso e la creazione di nuovi concorrenti ed attori, hanno aumentato notevolmente la complessità e la competitività nel settore, riducendo i margini e gli investimenti disponibili e determinando conseguentemente una naturale corsa all'ottimizzazione della gestione delle risorse disponibili.

E' quindi chiaro come negli ultimi anni lo sviluppo di strategie, metodi e tecnologie di supporto all'Asset Management (gestione ottimizzata degli asset) nel settore della trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica, abbia avuto un notevole impulso.

Una panoramica veloce sull'Asset Management è presentata nel paragrafo seguente.

Gli asset nei sistemi di trasmissione e distribuzione, ovvero i principali componenti elettrici di media ed alta tensione (trasformatori, macchine rotanti, interruttori, sezionatori, linee aeree ed in cavo) presentano condizioni di guasto nella maggior parte dei casi riconducibili al degrado dell'isolamento interno per effetto di sollecitazioni elettriche, termiche, meccaniche ed ambientali (causate ad esempio da agenti inquinanti).

La possibilità di poter diagnosticare le condizioni di un componente elettrico in servizio (attraverso misure periodiche "off-line", mettendo cioè fuori servizio il componente a intervalli programmati, oppure con tecniche "on-line", realizzando invece un monitoraggio continuo di alcuni parametri chiave del componente senza precluderne il normale funzionamento) permette di adottare nuove e più efficienti strategie di manutenzione degli asset (manutenzione "su condizione") realizzando un aumento dell'affidabilità insieme ad una riduzione dei costi complessivi di gestione.

Nell'attività presentata in questo lavoro, dopo una breve descrizione dei principi alla base dell'asset management, della manutenzione su condizione e delle principali tecniche diagnostiche, vengono affrontati molteplici aspetti relativi alla diagnostica sui componenti elettrici di media ed alta tensione basate sulla misura e l'analisi delle scariche parziali.

1.1 Asset management nei sistemi di T&D

Il compito fondamentale delle utility del settore elettrico è di gestire i propri asset in modo da fornire ai propri clienti (consumatori) una quantità sufficiente di energia elettrica, rispettando determinati livelli di qualità del servizio ed al miglior prezzo possibile. In altre parole, da quanto detto, sembrerebbe che la “gestione degli asset” (in inglese “Asset Management”) sia esso stesso il compito fondamentale (il “core business”) di un’utility [1][2].

In realtà con il termine Asset Management (AM) viene considerata solo una parte della gestione complessiva dell’azienda. Il termine è stato introdotto inizialmente nel settore finanziario dove si riferisce alla gestione ottimizzata degli asset finanziari delle aziende. Nel settore industriale ed in quello della trasmissione e distribuzione (T&D) dell’energia elettrica in particolare, è riferito invece alla gestione degli asset fisici (infrastrutture) dell’azienda.

In generale si può dire che l’AM comprende due aspetti fondamentali, un aspetto economico-gestionale (che non verrà affrontato in questo lavoro, si veda [1][4][5]) ed uno tecnico ([6][7][8]). Tra le varie definizioni possibili e più o meno condivise, la seguente risulta una delle più interessanti [3]:

“L’AM è il processo che governa l’acquisto e l’esercizio degli asset in modo da massimizzarne lo sfruttamento dal punto di vista economico, gestendone nel contempo i rischi ed i costi connessi, durante tutta la loro vita utile”.

In questa definizione il punto di vista economico-gestionale dell’AM è chiaramente esplicitato (in particolare nei termini: “acquisto”, “sfruttamento economico”, “gestione dei costi”) mentre l’aspetto tecnico è comunque presente (in particolare nei termini “esercizio” e “gestione del rischio durante tutta la loro vita”) e si riferisce chiaramente alle strategie di esercizio e manutenzione degli asset.

1.2 Le strategie di manutenzione

Le strategie di gestione della manutenzione stanno avendo un notevole sviluppo negli ultimi anni. Il dover conciliare l’esigenza di ridurre i costi globali di gestione degli asset ed aumentare nel contempo l’affidabilità e la qualità del servizio offerto ha portato le aziende a ripensare in parte le strategie di manutenzione dei propri asset.

In principio tutte le aziende adottavano esclusivamente la cosiddetta manutenzione correttiva (ovvero con interventi di manutenzione e sostituzione solo a seguito di guasti sul componente) o, al limite, preventiva (in inglese “Time based maintenance” o TBM), la quale prevede l’intervento di manutenzione sul componente a intervalli temporali programmati. La frequenza di tali interventi viene stabilita tipicamente attraverso un’analisi statistica di dati storici per categorie di componenti simili, sulla base di indicazioni fornite dal costruttore, da indicazioni normative e sulla base di una valutazione dell’importanza strategica dell’asset per il sistema nel suo complesso.

Attualmente si sta invece iniziando ad introdurre anche la manutenzione di tipo “predittivo”, detta anche manutenzione su condizione o “Condition based maintenance” (CBM) che si basa sulla stima delle condizioni e della vita residua del componente.

La probabilità di guasto di un componente elettrico in funzione della sua vita residua è rappresentabile tramite una curva “a vasca da bagno” (Fig. 1.1).

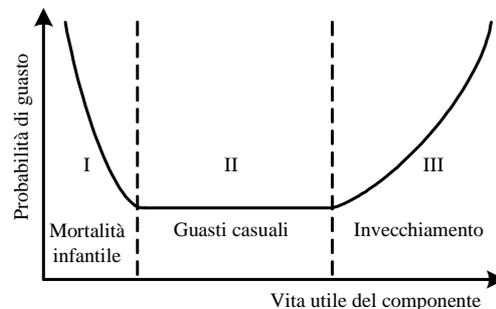


Fig. 1.1 - Probabilità di guasto in funzione della vita utile di un componente elettrico

La curva mostra sostanzialmente tre fasi della vita del componente. La fase iniziale è caratterizzata da una più elevata probabilità di guasto dovuta essenzialmente a difetti di progettazione o produzione dell'apparecchiatura. La fase centrale della vita del componente presenta invece una probabilità di guasto ridotta, legata sostanzialmente a fenomeni casuali, dovuta ad esempio a sollecitazioni anomale del componente (come situazioni di cortocircuito o sovraccarichi temporanei). Nell'ultima fase della vita di un componente i guasti sono dovuti essenzialmente all'invecchiamento e conseguente degrado del componente.

Per i componenti elettrici di media ed alta tensione l'isolamento interno risulta essere la parte più sensibile all'invecchiamento. Il degrado del sistema di isolamento interno porta il componente a non poter sostenere le condizioni limite imposte dalla sua classe di isolamento determinando la condizione di guasto permanente.

L'isolamento interno degrada naturalmente in funzione della temperatura con legge sostanzialmente esponenziale [9], ma anche a causa di sollecitazioni elettriche, meccaniche, oppure causate da agenti inquinanti.

E' possibile realizzare una stima del degrado dell'isolamento interno attraverso la misura e il monitoraggio di alcune particolari grandezze (dette anche indicatori diagnostici) ed il loro confronto con modelli teorici e banche dati basate su precedenti misure e sperimentazioni realizzate su componenti simili.

Una volta stimate le condizioni del componente (e quindi stimato il livello di rischio connesso all'esercizio di tale componente), è possibile decidere se e quando sarà necessario effettuare il prossimo intervento di manutenzione oppure l'eventuale sostituzione del componente (come definito dalla CBM).

Al di là dell'impatto economico dovuto al costo delle prove diagnostiche, una buona stima delle condizioni dell'isolamento interno del componente, attraverso il rilievo periodico o continuativo di indicatori diagnostici del degrado, presenta anche un ulteriore notevole vantaggio. Essa consente infatti, non solo di effettuare interventi di manutenzione solo se e quando questi risultino effettivamente necessari, ma permette anche di realizzare una

notevole estensione della vita utile del componente consentendone l'esercizio anche nella terza fase della curva descritta in precedenza.

E' quindi evidente l'importanza di sviluppare e migliorare l'affidabilità degli indicatori diagnostici del degrado attraverso il perfezionamento delle tecniche diagnostiche e dei metodi di analisi correlati.

1.3 Le tecniche diagnostiche nei sistemi di T&D

Vengono in seguito brevemente descritte alcune delle principali tecniche diagnostiche elettriche utilizzate sui componenti di media ed alta tensione per la stima del degrado dell'isolamento interno.

1.3.1 Resistenza d'isolamento (IR)

La misura della resistenza di isolamento (IR) è uno dei metodi più usati per determinare le condizioni dell'isolamento interno. Il metodo consiste nell'applicare una tensione continua e rilevare il valore di corrente assorbita. Questa sarà costituita da una componente capacitiva e da una resistiva monotona decrescente [10] [11].

La stima delle condizioni viene effettuata sulla base del confronto con i valori rilevati in precedenza sul componente.

Uno dei principali problemi che caratterizza questo tipo di misura è legato alla difficoltà di raggiungere le condizioni di regime. Infatti, soprattutto a macchina nuova, è necessario applicare tensione per molte ore prima di raggiungere una condizione di regime in tutto il materiale isolante. Vi è inoltre una forte dipendenza della misura dalla temperatura.

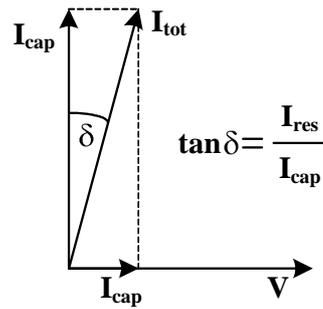
1.3.2 Indice di polarizzazione (IP)

La tecnica della misura dell'indice di polarizzazione (IP) è considerata un'estensione della misura della resistenza di isolamento in quanto la misura della resistenza avviene in due intervalli temporali differenti dal momento in cui è stata applicata tensione continua.

Come indice di polarizzazione si definisce il rapporto tra la resistenza misurata nei due intervalli. Più elevato è il rapporto e migliore è la condizione dell'isolamento. Questa tecnica è meno influenzata dalla temperatura rispetto alla precedente, di contro è più soggetta a variazioni legate alla geometria del sistema isolante interno [10] [11].

1.3.3 Fattore di perdita ($tg \delta$)

La misura del fattore di perdita è forse la misura più usata per verificare le condizioni di un dielettrico. Questa è definita come il rapporto tra la corrente resistiva e quella capacitiva quando l'isolamento è sottoposto ad una tensione alternata. Il fattore di perdita dell'isolamento è quindi espresso dalla tangente dell'angolo compreso tra la corrente totale che attraversa l'isolamento e la componente capacitiva (Fig. 1.2).

Fig. 1.2 - Rappresentazione del fattore di perdita ($\tan \delta$)

In laboratorio è prassi eseguire la misura del fattore di perdita applicando una tensione a frequenza industriale, anche se non sono rari casi nei quali, per ovviare al problema della presenza di frequenze indesiderate di disturbo, la prova venga eseguita con tensioni a frequenze differenti.[10] [14].

In particolare misure a bassa frequenza (0,1 Hz) sono state ampiamente utilizzate negli ultimi anni soprattutto per le prove in campo (in quanto, per tali frequenze, è possibile utilizzare generatori molto più compatti e facilmente trasportabili).

Negli ultimi anni sono state messe a punto tecniche non invasive in grado di fornire maggiori indicazioni sullo stato dell'isolamento globalizzando la "risposta dielettrica del sistema di isolamento" [10] [11]:

1.3.4 Misure della corrente di Polarizzazione e Depolarizzazione (PDC)

Il metodo si basa essenzialmente sulla misura della corrente di polarizzazione e di depolarizzazione che transita attraverso l'isolante una volta applicata una tensione continua tra due elettrodi.

Le curve degli andamenti della corrente di polarizzazione e depolarizzazione vengono poi confrontate con quanto calcolato attraverso una opportuna modellizzazione (che tiene conto delle caratteristiche e della geometria del sistema di isolamento) e sulla base di questo confronto viene effettuata una stima delle condizioni dell'isolamento [10][14]

Il notevole vantaggio di questa metodologia è legato al fatto che un'unica misura racchiude sostanzialmente tutte le prove standard descritte in precedenza (IR, IP, $\tan \delta$).

Per contro il metodo richiede lunghi tempi per l'esecuzione (dell'ordine di alcune ore).

1.3.5 Misure della tensione di ritorno (RVM)

Con questa metodologia si impiega la misura della tensione di ritorno anziché il valore della corrente di polarizzazione e di depolarizzazione. Il principio della misura si basa sull'applicare al sistema in esame una tensione U_0 per un periodo di t_c . Durante questa fase, nel materiale circola una corrente di polarizzazione I_{pol} che polarizza le particelle caratterizzate da un tempo di rilassamento inferiore a t_c .

Trascorso t_c , il materiale è cortocircuitato per un periodo $t_d < t_c$. In questa fase, a causa del riorientamento delle particelle polarizzate, nel materiale circola una corrente di

depolarizzazione I_{depol} fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio (completo rilassamento) di tutti i dipoli che hanno un tempo di rilassamento inferiore t_d .

A questo punto il collegamento di cortocircuito è rimosso e si procede con la misura della tensione di ritorno. Quanto detto è stato riportato sinteticamente nella Fig. 1.3.

Questo metodo è stato utilizzato in passato per valutare le proprietà dielettriche di sistemi di isolamento quando non esistevano strumenti con un'elevata risoluzione per la misura delle piccole correnti di polarizzazione e depolarizzazione.

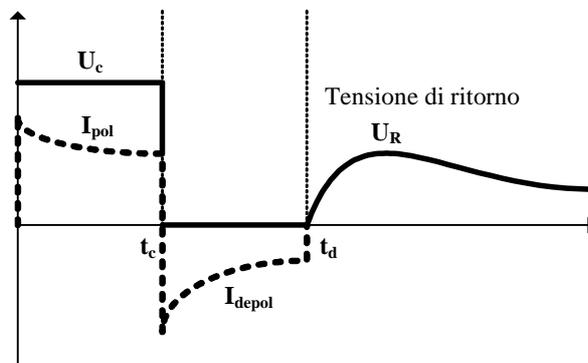


Fig. 1.3 - Principio di misura della tensione di ritorno

Ripetendo i tre step con la stessa tensione di carica U_c e con lo stesso rapporto t_c/t_d , ma con tempi di carica sempre più elevati, e scaricando il dielettrico dopo ogni ciclo è possibile costruire, lo “spettro di polarizzazione” del dielettrico in esame riportando ogni valore acquisito di $U_{R\text{max}}$ in funzione del tempo di carica t_c (Fig. 1.4). Questo spettro è caratteristico del dielettrico e cambia se cambiano le condizioni del sistema di isolamento [10][15]

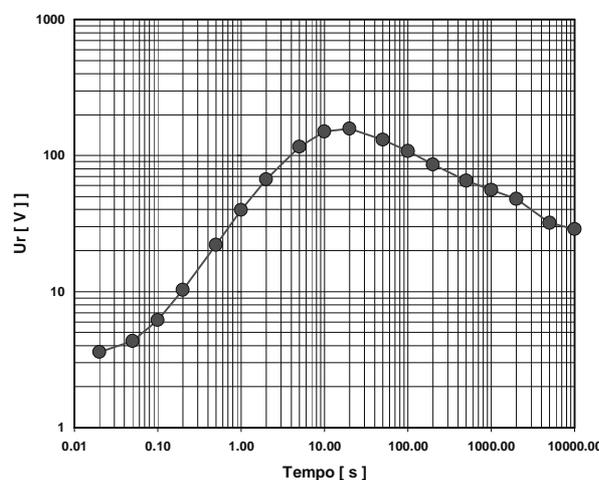


Fig. 1.4 - Spettro di polarizzazione di un trasformatore di potenza

1.3.6 Misure di Spettroscopia Dielettrica in frequenza (FDS)

Questa tecnica si basa sull'analisi della risposta dielettrica del sistema isolante quando sottoposto ad una serie di tensioni sinusoidali a diverse frequenze (tipicamente nel campo 1mHz-1kHz).

La tecnica FDS presenta un vantaggio notevole rispetto a tutte le altre tecniche finora descritte. Infatti la banda in frequenza che interessa ogni singola misura è molto ristretta, per

cui risulta pressoché insensibile ai disturbi ed alle interferenze. Non è perciò necessario applicare valori di tensione molto elevati (dell'ordine delle decine di volt per gli isolamenti in carta e olio).

Tramite il confronto della risposta in frequenza ottenuta per via sperimentale e quanto calcolato sulla base di un modello della macchina (che tiene conto delle caratteristiche e della geometria del sistema di isolamento) viene effettuata una stima delle condizioni dell'isolamento [10][11][16]. In Fig. 1.5 viene presentato a titolo di esempio la curva della risposta dielettrica (o meglio la variazione del $\text{tg}\delta$ in funzione della frequenza) di un sistema di isolamento in carta-olio per un trasformatore di potenza.

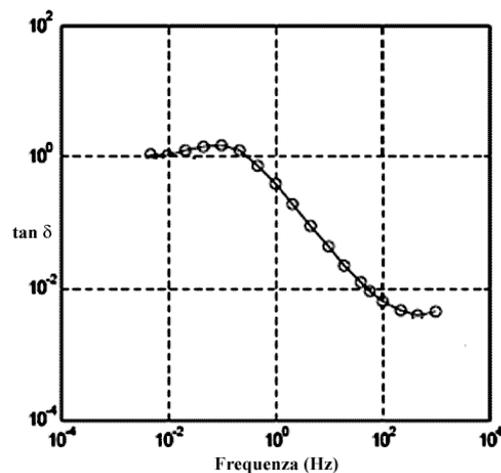


Fig. 1.5 - Variazione del fattore di perdita di un sistema carta/olio in funzione della frequenza

1.3.7 Analisi dell'olio isolante

Nei sistemi di isolamento in carta e olio, è generalmente possibile individuare sintomi del degrado in atto in un componente attraverso il prelievo e l'analisi ad intervalli regolari delle caratteristiche chimiche e fisiche di una minima quantità di olio [17].

Sollecitazioni ed anomalie interne possono anche causare la comparsa di concentrazioni apprezzabili di gas disciolti nell'olio isolante. Esistono sistemi diagnostici che, operando anche on line (ovvero con il componente sempre in servizio), vanno a rilevare le concentrazioni di idrogeno, metano, acetilene, etilene, monossido e biossido di carbonio, azoto ed ossigeno. Attraverso l'analisi del rapporto di tali concentrazioni viene fornita una indicazione dello stato del sistema di isolamento interno del componente (la tecnica diagnostica viene chiamata "Dissolved Gas Analysis" o DGA) [18][19].

1.3.8 Misura delle scariche parziali

Questo tipo di tecnica si basa sul rilievo, l'analisi e l'interpretazione di segnali generati dalle scariche parziali. Come si vedrà nei capitoli seguenti, le scariche parziali rappresentano un fenomeno di degrado locale dell'isolamento interno che può evolvere fino a portare al guasto permanente del componente. Mentre le tecniche diagnostiche descritte in precedenza vanno ad investigare, tramite la misura di grandezze "integrali" (come ad esempio il $\text{tg}\delta$ o la corrente di polarizzazione), le condizioni di degrado ed invecchiamento complessivo del

sistema di isolamento di un componente, la misura delle scariche parziali consente di individuare processi localizzati di degradazione all'interno dell'isolamento altrimenti non rilevabili con misure di tipo "integrale".

Oltre alle tecniche diagnostiche (di tipo elettrico) descritte fino ad ora, specifiche per l'individuazione del degrado dell'isolamento interno, nei sistemi di trasmissione e distribuzione vengono utilizzate anche diverse altre tecniche diagnostiche (a supporto della CBM) in grado di evidenziare anomalie di funzionamento nei componenti dovute a problematiche diverse da quelle elettriche. A titolo di esempio vengono qui brevemente introdotte le seguenti tecniche:

1.3.9 Monitoraggio della temperatura

Questo tipo di misura diagnostica prevede la misura periodica o continuativa della temperatura di diverse sezioni critiche del componente in modo da evidenziare per tempo condizioni di surriscaldamento anomalo. Alcune tecniche si basano sull'utilizzo di sensori a fibra ottica [20] [21] oppure della termografia [24].

Considerazioni legate al tipo di componente da monitorare, alle sue tipiche criticità ed al costo della strumentazione diagnostica possono guidare l'utente verso l'applicazione più idonea. L'uso dei sistemi in fibra ottica DTS (Distributed temperature sensors [21]) per esempio, a causa del loro elevato costo, è attualmente giustificato solo per collegamenti in alta tensione di particolare importanza strategica.

1.3.10 Misura delle vibrazioni

Attraverso la misura e l'analisi delle vibrazioni (tipicamente su macchine rotanti ma anche su trasformatori) è possibile diagnosticare anomalie meccaniche e malfunzionamenti del componente [22][23]

1.3.11 Misura della risposta in frequenza (FRA)

Questa tecnica diagnostica (chiamata in inglese "Frequency response analysis" o FRA) viene applicata principalmente nei trasformatori di potenza. Attraverso l'analisi della risposta in frequenza degli avvolgimenti è possibile stabilire se nel corso del tempo non si siano formate delle deformazioni permanenti degli avvolgimenti a seguito di sollecitazioni meccaniche o elettrodinamiche (dovute ad esempio a cortocircuiti). [26]

2 LA MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI

2.1 introduzione

Da diversi anni a questa parte la misura delle scariche parziali (SP) è stata riconosciuta come una delle più importanti tecniche diagnostiche delle condizioni dell'isolamento interno di un componente elettrico.

Per scarica parziale si intende una particolare tipologia di scarica elettrica che non cortocircuita completamente un dielettrico interposto fra elettrodi in tensione, bensì interessa solamente una sua piccola parte.

Le scariche parziali sono un fenomeno di per sé limitato in quanto mettono in gioco solo piccole quantità di energia in porzioni microscopiche di dielettrico, ma le elevate densità di potenza che si vanno a creare localmente e la ripetitività del fenomeno possono facilmente determinare modifiche chimiche e strutturali di porzioni via via crescenti del dielettrico.

La comparsa di SP in una certa porzione dell'isolamento di un componente elettrico è un indicatore diagnostico dell'evoluzione del sistema di isolamento interno verso un degrado che può divenire rapidamente irreversibile e portare il componente ad una condizione di guasto permanente.

Da qui l'interesse crescente della comunità scientifica per lo sviluppo ed il perfezionamento delle tecniche diagnostiche basate sul rilievo e l'analisi del fenomeno delle scariche parziali al fine di ottenere sistemi diagnostici in grado di valutare automaticamente, in modo affidabile, lo stato dell'isolamento interno e segnalare per tempo eventuali condizioni di rischio.

2.2 La fisica delle scariche parziali

Viene qui presentata una breve descrizione del fenomeno fisico delle SP ([27] [28] [29] [30] [31][32]). Per una migliore comprensione del fenomeno è opportuno introdurre la seguente suddivisione per tipologia di scariche parziali:

Scariche parziali esterne:

Questo tipo di scariche avvengono tipicamente in corrispondenza di estremità appuntite di elettrodi posizionati in dielettrici gassosi o liquidi. Tutte le scariche parziali di questo tipo che si sviluppano in aria sono definite di tipo “Corona”. Nella maggior parte dei casi (per tensioni inferiori alle centinaia di kV) è possibile considerare tale fenomeno non pericoloso, anche se in generale può provocare disturbi elettromagnetici e inquinamento dovuto a formazione di prodotti chimici e pertanto andrebbe comunque limitato.

Scariche interne:

Sono scariche che si manifestano per la presenza di impurità interne al dielettrico principale del componente. Nel caso di dielettrici solidi in corrispondenza di impurità, particelle conduttrici o cavità gassose (generate tipicamente durante il processo di produzione) di dimensioni microscopiche, si ha un aumento localizzato del campo elettrico [28]. Poiché nelle cavità la rigidità dielettrica risulta tipicamente minore rispetto al circostante dielettrico solido, si avranno, in corrispondenza di questa, la comparsa delle scariche parziali. La conseguenza di queste scariche localizzate e ripetitive è un processo di degrado del materiale che ha inizio con l’erosione della superficie interna della cavità e può proseguire con la formazione di ramificazioni (fenomeno del “*treeing*”, descritto in seguito), che, indebolendo il dielettrico, possono causare la scarica completa. E’ possibile effettuare una modellizzazione circuitale estremamente semplificata del fenomeno (Fig. 2.1) considerando un semplice condensatore tra le cui armature di superficie S sia interposto un dielettrico. All’interno del dielettrico sia presente una sola cavità di capacità C_c , di area s e spessore d . Si alimenti ora il condensatore con una sorgente di tensione sinusoidale. Il circuito equivalente corrispondente è indicato in Fig. 2.1 dove sono stati indicati con C_a la capacità della porzione intatta dell’isolante, C_c la capacità della cavità e C_b la capacità del isolante avente la stessa area “ s ” del vuoto ma di altezza pari a $D-d$

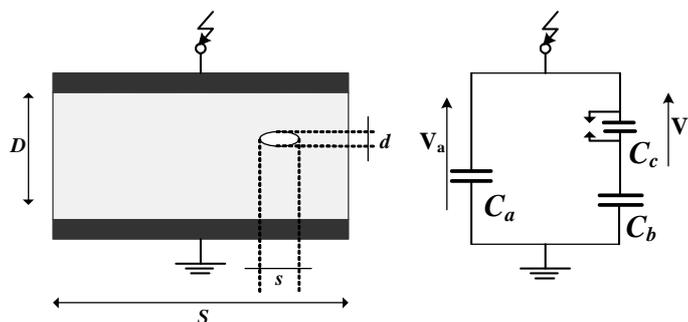


Fig. 2.1 - Modello circuitale semplificato di una scarica parziale in una cavità

Le tre capacità risultano allora date da:

$$(2.1) \quad C_a = \varepsilon \frac{S-s}{D} \cong \varepsilon \frac{S}{D}$$

$$(2.2) \quad C_b = \varepsilon \frac{s}{D-d} \cong \varepsilon \frac{s}{D}$$

$$(2.3) \quad C_c = \varepsilon_0 \frac{s}{d}$$

E' immediato osservare che ai capi del condensatore C_c si avrà una tensione ridotta e proporzionale alla tensione di alimentazione:

$$(2.4) \quad V_c = \frac{C_c}{C_b + C_c} \cdot V_a$$

Quando tale tensione supera la "tensione di innesco" della cavità (ovverosia il campo elettrico entro la cavità supera la sua rigidità dielettrica) avviene una scarica parziale (come indicato nella Fig. 2.2), e la tensione ai capi di C_c si porta sino ad un valore molto basso detto di "estinzione". Fino a quando aumenta la tensione sinusoidale applicata dal generatore si ha proporzionalmente una crescita della tensione ai capi della cavità e quindi, al superamento del livello limite di rigidità dielettrica, si ottiene nuovamente la condizione descritta in precedenza ottenendo così una nuova scarica parziale. In corrispondenza di ogni scarica parziale nella cavità, ai terminali del condensatore compare un piccolo impulso di corrente ad ampio spettro che si sovrappone alla corrente di regime circolante nel circuito.

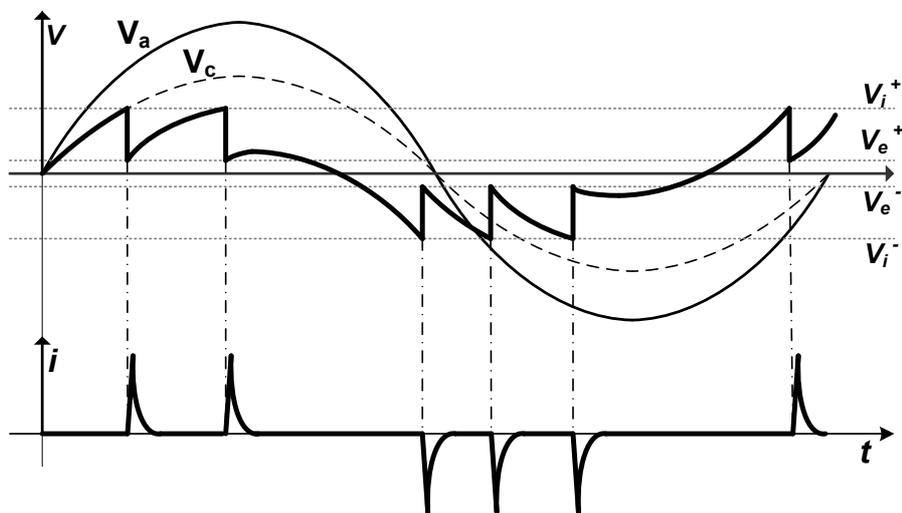
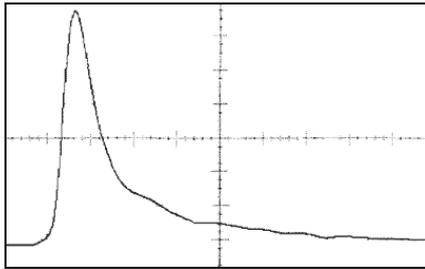
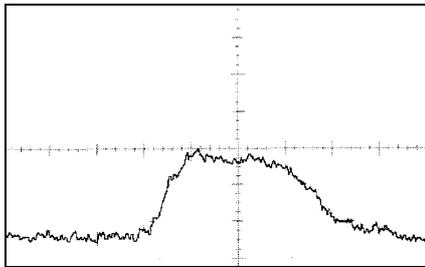


Fig. 2.2 - Impulsi di scarica parziale generati da una cavità in un dielettrico solido

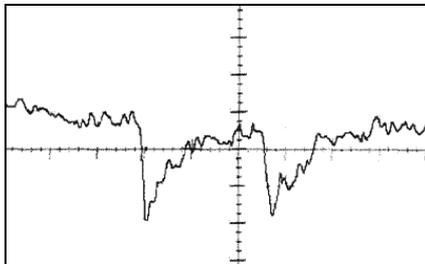
Il fenomeno di scarica parziale nella cavità evolve in funzione della durata dell'attività di scarica; in particolare si ha un degrado localizzato dapprima sulle pareti della cavità che poi progredisce anche nelle zone circostanti. Sono stati individuati [29][30] tre stadi successivi dell'evoluzione delle SP in una generica cavità:

(Tipo Streamer) **2ns/div**

Stadio tipo **Streamer**: è lo stadio presente all'inizio dell'attività di scarica ed è caratterizzato da un impulso di corrente di scarica a fronte molto ripido della durata delle centinaia di picosecondi sino a qualche nanosecondo. Nella cavità le scariche sono distribuite spazialmente sulla superficie e si innescano in rapida successione. Ogni singola scarica consiste di uno stretto canale (streamer) con qualche estensione laterale in prossimità della superficie della cavità.

(Tipo Townsend) **20ns/div**

Stadio tipo **Townsend**: è lo stadio che si ha ad invecchiamento già avanzato in cui gli impulsi di corrente di scarica sono caratterizzati da una durata temporale maggiore, (rispetto alla scarica *Streamer*), e proporzionale allo spessore della cavità. Gli impulsi presentano un fronte di salita dell'ordine delle decine di nanosecondi e possono presentare un "pianerottolo" sul fronte di discesa con durata che può arrivare all'ordine delle decine di microsecondi

(Tipo Pitting) **10ns/div**

Stadio tipo **Pitting**: è lo stadio finale di attività di scarica parziale, che inizialmente si instaura contemporaneamente allo stadio tipo *Townsend*. Questo stadio è caratterizzato da un'intensa degradazione del dielettrico che porta alla formazione di crateri (*pits*).

Scariche superficiali:

Queste scariche si possono sviluppare nelle zone (superfici) di separazione tra dielettrici di diversa natura quando vi è presente una componente del campo elettrico parallela alla superficie di valore sufficientemente elevato. Questo fenomeno può danneggiare le superfici dei dielettrici per effetto termico e per la formazione di composti chimici, che possono portare al "tracciamento" ed erosione con conseguente indebolimento del dielettrico. (Fig. 2.3).

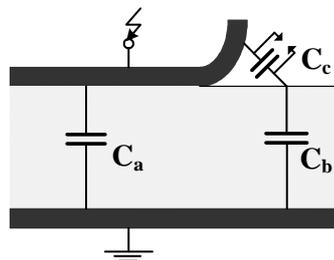


Fig. 2.3 – Schematizzazione di una scarica parziale di tipo superficiale

Treeing (arborescenza):

E' un fenomeno di scarica parziale interno al dielettrico caratterizzato dalla generazione di ramificazioni che si sviluppano a partire da impurità, particelle conduttrici o da cavità gassose in un isolante solido.

Il fenomeno si caratterizza per la formazione di complesse strutture ramificate, che indeboliscono progressivamente il dielettrico favorendone la scarica disruptiva.

Il tempo necessario per la generazione di un canale di scarica dipende fra l'altro dalle caratteristiche del dielettrico, dalla geometria dell'impurità e dal valore della tensione applicata. Il fenomeno della generazione e sviluppo del treeing è ancora, in parte, oggetto di studio [33] (a titolo di esempio in appendice 1 vengono presentati alcuni risultati di prove di generazione del fenomeno del treeing in un dielettrico solido trasparente). In linea di principio il fenomeno progredisce nel seguente modo: durante il processo di scarica si deposita, sulle pareti delle cavità (e dei rami già formati), una certa quantità di carica residua. Con determinati valori di tensione applicata si ha l'estinzione della scarica con conseguente formazione di una carica spaziale con direzione perpendicolare al campo elettrico; all'aumentare della tensione applicata aumenta la carica spaziale che tende a diffondersi nel dielettrico ramificandosi entro il materiale. Quando la ramificazione ha raggiunto una certa dimensione e profondità e quindi ha determinato una riduzione della rigidità dielettrica complessiva, si possono avere le condizioni per la scarica disruptiva.

A titolo di esempio nelle Fig. 2.4, Fig. 2.5 e Fig. 2.6 vengono presentati alcuni casi di treeing.

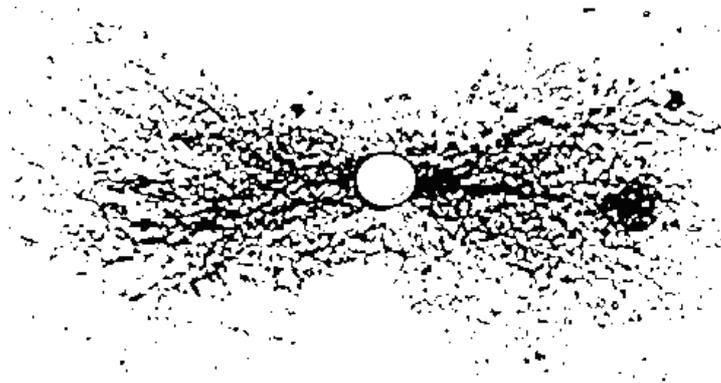


Fig. 2.4 - Treeing originato da una cavità di alcuni micron di diametro in un provino di materiale isolante XLPE (cross-linked polyethylene)

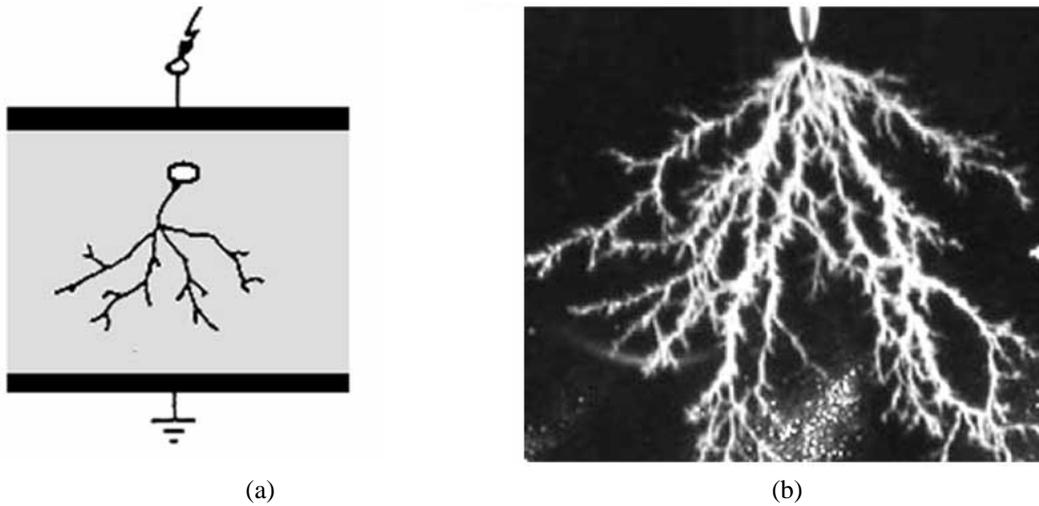


Fig. 2.5 - (a) Schematizzazione di un treeing originato da una cavità e (b) foto del fenomeno generato da una punta metallica in tensione in un campione trasparente di PMMA

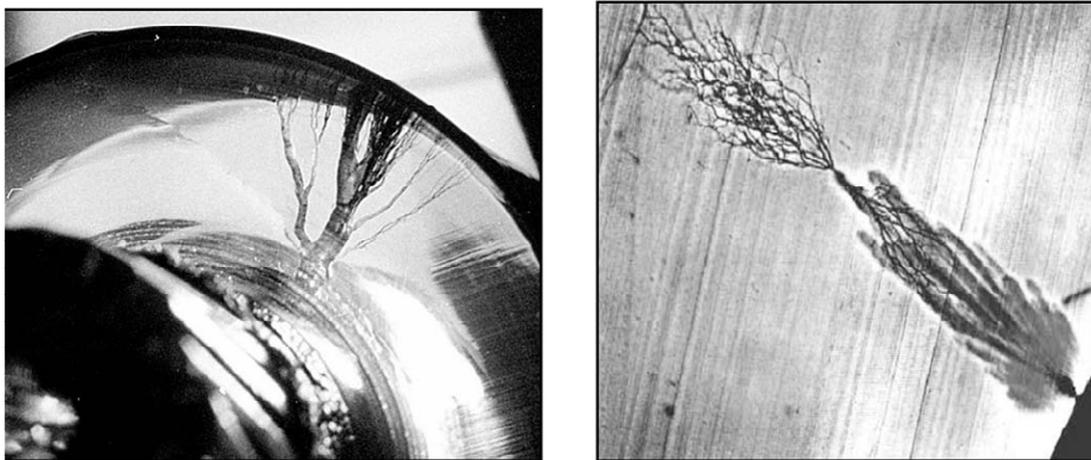


Fig. 2.6 - Treeing in cavi AT isolati in XLPE

2.3 La misura della “carica apparente”

Come accennato in precedenza le scariche parziali interne non sono misurabili per via diretta in quanto la sorgente di scarica parziale non è direttamente accessibile.

Nei componenti elettrici in prova sono accessibili solo i terminali dell’oggetto per cui, come verrà in seguito mostrato con l’introduzione di alcuni circuiti di misura, si possono rilevare solo gli impulsi di corrente ai capi dei terminali del componente in prova provocati in corrispondenza delle scariche parziali.

Si consideri pertanto nuovamente il circuito equivalente di Fig. 2.1.

Si può allora definire la carica apparente (misurabile come integrale degli impulsi di corrente che si presentano ai capi dell’oggetto in prova) come:

$$(2.5) \quad q_a = \Delta V_a \left(C_a + \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} \right)$$

Considerando che $C_a \gg C_b$ e $C_c \gg C_b$ si può derivare che

$$(2.6) \quad q_a \cong \frac{C_b}{C_c} \cdot q_c$$

Questa carica è quindi proporzionale alla carica messa in gioco dalla scarica parziale nel punto di generazione ma è di valore inferiore. Si può dimostrare che q_a risulta essere quella carica che iniettata in brevissimo tempo tra i terminali dell’oggetto in prova da luogo alla stessa caduta di tensione causata dalla scarica all’interno del vacuolo.

Per poter misurare la carica apparente è possibile utilizzare una apposita impedenza di accoppiamento Z_m (che può essere di tipo “RC” oppure “RLC”), un condensatore di accoppiamento C_k e una sorgente di tensione per alimentare il circuito (preferibilmente esente da scariche parziali o comunque con un livello molto basso) come descritto in Fig. 2.7. All’impedenza di misura vengono connessi (tramite uno stadio di amplificazione) un sistema di acquisizione, un oscilloscopio o un rilevatore di picco.

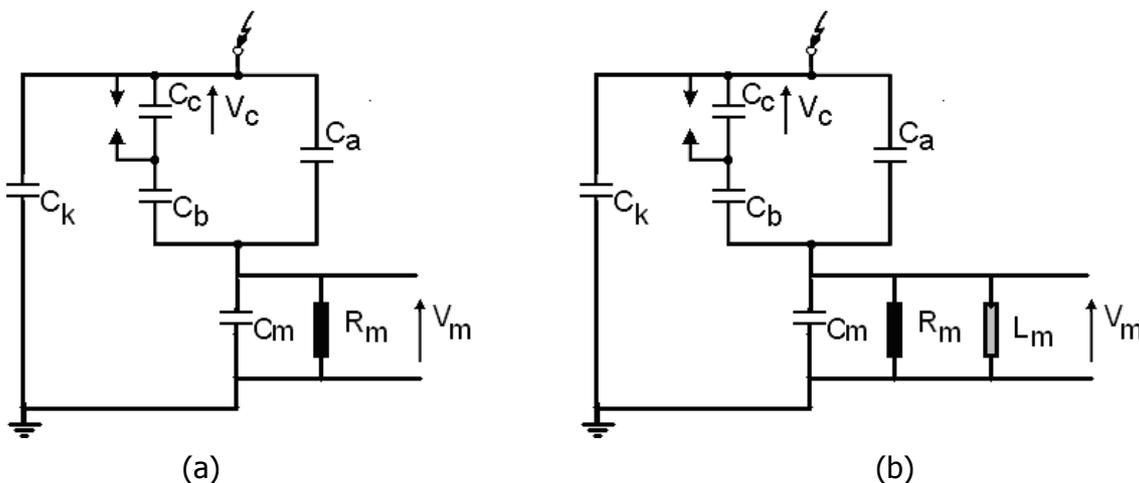


Fig. 2.7 - Schemi circuitali per la misura delle scariche parziali.

(a) misura con impedenza di accoppiamento di tipo “RC”

(b) misura con impedenza di accoppiamento di tipo “RLC”

La tensione ai capi dell'impedenza di misura di tipo "RC" in corrispondenza di un impulso di scarica parziale è data allora da:

$$(2.7) \quad V_m(t) = q_a \frac{1}{C_a + C_m \left(1 + \frac{C_a}{C_k}\right)} e^{-\alpha t}$$

Dove si è posto:

$$(2.8) \quad \alpha = \frac{1}{R_m \cdot C_{eq}}$$

$$(2.9) \quad C_{eq} = C_m + \frac{C_k \left(C_a + \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} \right)}{C_k + \left(C_a + \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} \right)} \cong C_m + \frac{C_k C_a}{C_k + C_a}$$

Mentre nel caso di una impedenza di tipo RLC si ottiene:

$$(2.10) \quad V_m(t) = q_a \frac{1}{C_a + C_m \left(1 + \frac{C_a}{C_k}\right)} e^{-\alpha t \left(\cos(\varpi_0 t) - \frac{\alpha}{\varpi_0} \sin(\varpi_0 t) \right)}$$

Dove è stato posto:

$$(2.11) \quad \varpi_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C_{eq}} - \frac{1}{4R_m^2 C_{eq}^2}} \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{1}{2 \cdot R_m \cdot C_{eq}}$$

Si osserva come per il caso "RC" l'ampiezza dell'impulso è proporzionale alla carica apparente e decade con legge esponenziale, per cui è possibile valutare il valore di q_a con una semplice misura del picco della tensione. Nel caso "RLC" invece la tensione ai capi dell'impedenza di misura è composta da un termine di smorzamento e da un termine oscillatorio, con valore massimo, anche in questo caso, proporzionale alla carica apparente relativa alla scarica parziale nell'oggetto in prova.

Si può inoltre osservare come l'ampiezza dell'impulso è inversamente proporzionale alla capacità dell'impedenza di misura e dell'oggetto in prova mentre valori più elevati della capacità di accoppiamento favoriscono la sensibilità del circuito di misura.

2.4 La norma IEC 60270

La norma internazionale IEC 60270 [31] ha come obiettivo quello di fornire i criteri generali, la definizione delle grandezze e la descrizione delle metodologie per la misura delle scariche parziali su apparecchiature e componenti elettrici previsti per alimentazione continua o alternata in ambito industriale.

Attraverso le sue definizioni la norma indica come effettuare misure di scariche parziali al fine di verificare che l'oggetto in prova, ad una tensione specificata, sia esente da scariche parziali d'intensità superiori ad un valore prefissato, determinare i valori di tensione ai quali scariche parziali di uno specificato livello minimo si innescano con tensione crescente e si estinguono con tensione decrescente e determinare l'intensità delle scariche ad una tensione specificata

Come si vedrà più avanti la norma definisce quindi criteri e metodi di misura delle scariche parziali con l'obiettivo di renderli riproducibili e riferibili ai campioni di riferimento, ma non dà alcuna indicazione sull'utilizzo ai fini diagnostici di tale tipologia di misura.

2.4.1 Definizioni principali della norma IEC 60270

In questo paragrafo vengono presentate brevemente alcune delle definizioni e considerazioni principali introdotte dalla norma.

Definizione di scarica parziale:

Scarica elettrica localizzata che attraversa solo parzialmente l'isolamento tra conduttori e che può essere o non adiacente a un conduttore. Le scariche parziali sono generalmente una conseguenza di concentrazioni locali di sollecitazioni elettriche nell'isolamento o sulla superficie dell'isolamento.

Definizione di "Effetto corona":

è una forma di scarica parziale che si verifica in gas intorno a conduttori lontani da isolamento solido o liquido.

Impulso di scarica parziale:

Impulso di corrente o di tensione risultante da una scarica parziale che si verifica all'interno dell'oggetto in prova. L'impulso viene misurato utilizzando idonei circuiti di rilevazione, che sono stati introdotti nel circuito di prova per tale scopo. Una scarica parziale che si verifica nell'oggetto in prova, produce un impulso di corrente. Un rivelatore conforme alle prescrizioni della Norma produce un segnale di corrente o di tensione in uscita, proporzionale alla carica dell'impulso di corrente in entrata.

Carica apparente (q) di un impulso di scarica parziale:

è quella carica che, iniettata in brevissimo tempo tra i terminali dell'oggetto in prova, in un circuito di prova specificato, darebbe luogo alla stessa lettura sullo strumento di misura dell'impulso di corrente di scarica parziale stesso. La carica apparente è generalmente espressa in picocoulomb (pC) La carica apparente non è uguale al valore della carica messo in gioco nel luogo nel quale si produce la scarica, che non può essere misurata direttamente.

Sistema di misura delle scariche parziali:

Sistema costituito da un dispositivo di accoppiamento, un sistema di trasmissione e uno strumento di misura.

Impedenza di trasferimento Z(f) :

Rapporto tra l'ampiezza della tensione di uscita e l'ampiezza di una corrente di ingresso costante, in funzione della frequenza f, quando la corrente di ingresso è sinusoidale.

Frequenza limite inferiore f1 e frequenza limite superiore f2 :

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

Frequenza centrale f_m e ampiezza di banda Δf :

Per tutti i tipi di sistemi di misura la frequenza centrale e l'ampiezza di banda sono definite rispettivamente da:

$$(2.12) \quad f_m = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

$$(2.13) \quad \Delta f = f_2 - f_1$$

Il dispositivo di accoppiamento:

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

Risposta degli strumenti di misura di carica apparente a un treno di impulsi:

La risposta dello strumento è un impulso di tensione con un valore di cresta proporzionale alla carica (unipolare) dell'impulso di ingresso, a condizione che l'ampiezza dello spettro in frequenza degli impulsi di ingresso sia costante almeno entro l'ampiezza di banda Δf del sistema di misura (vedere Fig. 2.8). La forma, la durata e il valore di cresta di tale impulso di uscita sono determinati dall'impedenza di trasferimento Z(f) del sistema di misura. Pertanto, la forma e la durata dell'impulso di uscita possono essere completamente diversi da quelli del segnale di ingresso.

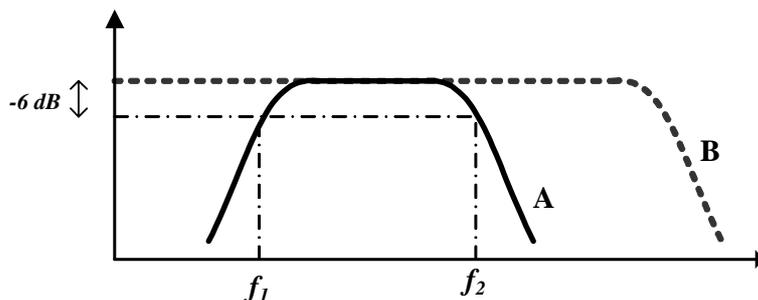


Fig. 2.8 - Ampiezza di banda del sistema di misura (A- banda passante del sistema di misura, B- Spettro dell'impulso di scarica parziale)

Tensione di innesco delle scariche parziali

Valore efficace della tensione applicata all'oggetto in prova per la quale si ha la comparsa delle scariche parziali (o il superamento di un valore limite predeterminato)

Tensione di estinzione delle scariche parziali

Valore efficace della tensione applicata all'oggetto in prova per la quale si ha la scomparsa delle scariche parziali (o quando le scariche scendono al di sotto di un valore limite predeterminato)

Tensione di prova

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

2.4.2 Circuiti di misura definiti dalla norma IEC 60270

I principali schemi circuitali proposti nella norma sono indicati in Fig. 2.9 e Fig. 2.10 dove con C_a è stato indicato l'oggetto, T_r il trasformatore di alimentazione, con C_k la capacità di accoppiamento, con M_i lo strumento di misura connesso all'impedenza di misura Z_m tramite un cavo coassiale e con Z_n un'impedenza di filtro posizionata a valle del trasformatore di alimentazione in modo da limitare l'influenza del rumore ed eventuali scariche parziali presenti alla sorgente sul circuito di misura.

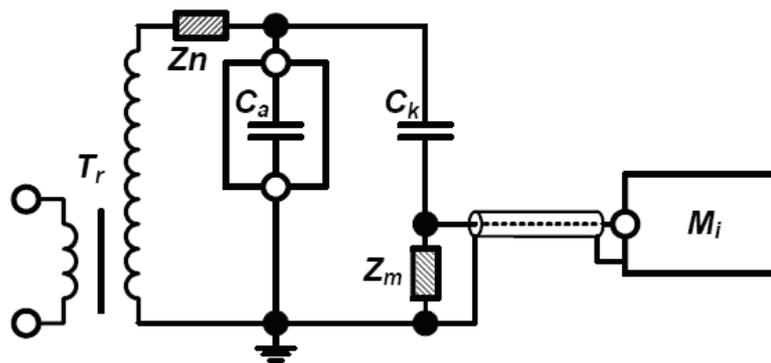


Fig. 2.9 – Schema circuitale per la misura delle SP secondo la IEC60270 (l'impedenza di misura è posta in serie al condensatore di accoppiamento)

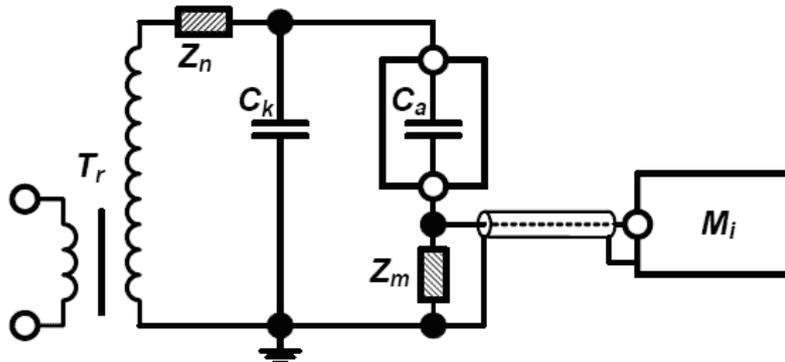


Fig. 2.10 – Schema circuitale per la misura delle SP secondo la IEC60270 (l'impedenza di misura è posta in serie all'oggetto in prova)

2.4.3 Classificazione dei sistemi di misura delle SP secondo la norma IEC 60270

Sulla base di quanto definito nel paragrafo precedente la norma introduce una classificazione degli strumenti in base alla banda passante prevedendo tre categorie così definite:

1) Strumenti di misura di scariche parziali a banda larga:

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

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

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz}$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$$

In Fig. 2.11 è rappresentata la risposta all'impulso di uno strumento di questo tipo. Si può osservare come i segnali siano degli impulsi oscillanti fortemente smorzati; anche se la loro forma non riproduce l'impulso originale, il loro picco risulta proporzionale alla carica apparente del segnale originale inoltre, non essendo particolarmente oscillanti è possibile anche stabilire la polarità del segnale originale.

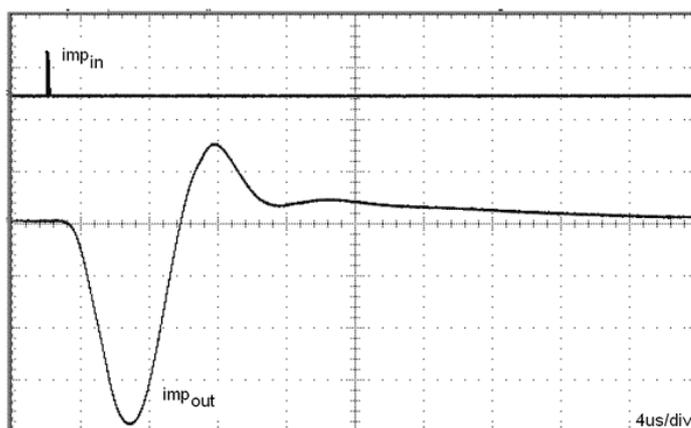


Fig. 2.11 – Risposta all’impulso di un sistema di misura di SP a banda larga

2) Strumenti di misura di scariche parziali a banda stretta:

Questi strumenti sono caratterizzati da un’ampiezza di banda stretta Δf e da una frequenza centrale f_m che possono essere variate su un’ampia gamma di frequenza, nella quale l’ampiezza, dello spettro in frequenza degli impulsi di corrente di scariche parziali è approssimativamente costante. I valori raccomandati per Δf e f_m sono:

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

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

In Fig. 2.12 è rappresentata la risposta all’impulso di uno strumento di questo tipo. In questo caso i segnali ottenuti sono fortemente oscillanti, il picco rappresenta la misura della carica apparente del segnale originale, mentre, a causa della forte oscillazione non è possibile risalire alla polarità del segnale.

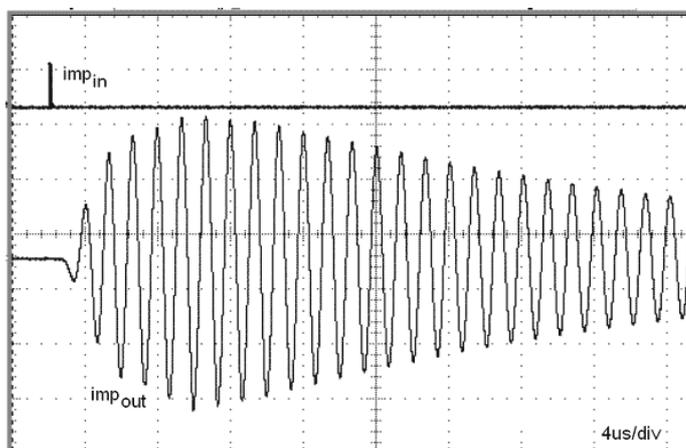


Fig. 2.12 – Risposta all’impulso di un sistema di misura di SP a banda larga

3) Strumenti a banda ultra larga per il rilevamento di scariche parziali

Le scariche parziali possono anche essere rilevate da oscilloscopi con elevata ampiezza di banda, o da strumenti selettivi in frequenza (per es., analizzatori di spettro), insieme a dispositivi di accoppiamento appropriati. Lo scopo dell’applicazione è la misura e la quantificazione della forma o dello spettro in frequenza degli impulsi di corrente o di tensione della scarica parziale in apparecchiature con parametri distribuiti, per es., cavi, macchine rotanti o dispositivi di manovra con isolamento in gas, oppure fornire informazioni

sulla fisica o sull'origine dei fenomeni di scarica. La Norma non contiene alcuna raccomandazione per i metodi di misura o per le ampiezze di banda/frequenze degli strumenti da utilizzare in tali indagini, in quanto tali metodi o strumenti, in generale, non quantificano direttamente la carica apparente degli impulsi di corrente di scarica parziale.

2.4.4 Considerazioni sulla classificazione introdotta dalla norma

Come si può osservare quindi la norma specifica con precisione le caratteristiche ed i requisiti delle prime due classi di strumenti, lasciando la classe degli strumenti a "banda ultra larga" in attesa di essere meglio definita in qualche futuro documento.

Per inquadrare quindi meglio l'attività descritta in questa tesi è opportuno introdurre anche la seguente classificazione:

- Sistemi di misura classici (o standard)

A questa categoria appartengono tutti quei sistemi (analogici e digitali) che misurano unicamente le grandezze definite nella norma IEC 60270 [31] (ovvero i sistemi definiti come "a banda stretta" ed "a banda larga").

- Sistemi avanzati per la misura delle SP:

(sistemi non inclusi nella norma di riferimento)

- Elettrici

In questa categoria possiamo includere i sistemi digitali avanzati (che consentono di effettuare l'elaborazione e l'analisi delle distribuzioni di scariche parziali rispetto alla fase della tensione applicata), i sistemi a banda ultra larga ed i sistemi multi terminale.

- Non elettrici Dove si possono includere tutti quei sistemi che effettuano il monitoraggio di parametri acustici, ottici, chimici ecc. conseguenti alla presenza di scariche parziali nell'oggetto in prova. (Questi sistemi non verranno affrontati all'interno di questa tesi)

3 METODI AVANZATI PER L'ANALISI DIAGNOSTICA DELLE SCARICHE PARZIALI

3.1 Introduzione

Oltre alla semplice rilevazione delle grandezze definite dalla norma [31], con lo sviluppo della strumentazione digitale, nei sistemi di misura di scariche parziali sono state introdotte nuove funzionalità di monitoraggio, analisi ed elaborazione dei dati, trasformando gradualmente quelli che erano dei semplici sistemi di misura della carica apparente (utilizzati principalmente per misure in laboratorio) in strumenti avanzati per la diagnostica dello stato dell'isolamento del componente che possono effettuare misure continuative su componenti in servizio (monitoraggio delle SP).

Fin dall'inizio dello studio e dello sviluppo dei primi sistemi di misura di scarica parziale è stato possibile osservare come per diverse tipologie di fenomeni di scarica parziale (scariche dovute all'effetto corona, treeing, scariche in cavità interne, scariche superficiali ecc...) vi siano in corrispondenza delle particolari distribuzioni (caratteristiche) degli impulsi di scarica parziale rispetto alla fase della tensione applicata al componente durante la prova [34][35][36]

I moderni sistemi diagnostici basati sulla misura delle scariche parziali permettono oggi, attraverso l'analisi di tali distribuzioni, di avere una stima della tipologia e della pericolosità del difetto interno al sistema di isolamento del componente.

La misura delle scariche parziali su componenti installati presenta molte difficoltà in più rispetto alla misura di tale fenomeno in condizioni di laboratorio, causate principalmente dalla presenza di elevati livelli di rumore ed interferenze esterne che si vanno a sovrapporre ai deboli segnali di SP rilevati (tipicamente dell'ordine dei mV).

Lo sviluppo di particolari metodi di analisi ed elaborazione numerica dei segnali ha consentito di introdurre nuove tecniche di riduzione dell'effetto del rumore esterno, di separazione ed anche di localizzazione di diverse sorgenti di SP che possono presentarsi simultaneamente nel componente.[37÷44]

Negli ultimi anni si sta cercando di sviluppare sistemi diagnostici basati sulla misura delle scariche parziali in grado di operare in maniera completamente automatica, senza la necessità di coinvolgere tecnici esperti, basandosi sull'analisi e l'elaborazione numerica e statistica dei segnali di scarica parziale e sull'implementazione di particolari algoritmi di intelligenza artificiale. [44÷47].

Tali sistemi, presenti sia a livello prototipale che a livello commerciale, sono ancora in una fase iniziale di sviluppo, con ampi spazi di miglioramento ed ottimizzazione.

Un sistema diagnostico avanzato, basato sulla misura di segnali di SP, presenta schematicamente le seguenti fasi di elaborazione:

- **Rilevazione**

In questa fase i segnali (tipicamente deboli impulsi di corrente), provenienti dalle sorgenti di scariche parziali, agenti all'interno dell'isolamento del componente in esame, vengono rilevati mediante i sensori del sistema diagnostico, dove vengono trasformati in segnali di tensione e, successivamente, amplificati e campionati dal sistema.

- **Separazione**

Attraverso opportuni algoritmi di elaborazione numerica, i segnali vengono analizzati e separati in famiglie omogenee corrispondenti a diverse sorgenti di SP presenti simultaneamente nel componente oppure a rumore [40÷43].

- **Localizzazione**

Una volta separati i segnali, in taluni casi (tipicamente nei cavi e nei trasformatori) è possibile anche, mediante opportune tecniche di elaborazione, stimare la posizione delle sorgenti di scariche parziali all'interno del componente in esame.

- **Identificazione e diagnosi**

Mediante l'analisi della distribuzione delle SP rispetto alla fase della tensione applicata ed in alcuni casi anche mediante l'analisi di alcune caratteristiche della forma dei segnali (generalmente per confronto con limiti, criteri, regole e informazioni presenti in banche dati appositamente create) il sistema diagnostico è in grado di fornire una stima della natura e della pericolosità del fenomeno rilevato [44÷47].

3.2 Analisi della distribuzione delle scariche parziali

Già alcuni dei primi strumenti analogici offrivano all'utente, oltre all'indicazione del livello di scarica parziale (misurata come valore di carica apparente definita dalla norma [31]), anche un'opportuna uscita da collegare agli oscilloscopi tramite i quali, grazie alla persistenza della traccia visualizzata, si poteva osservare la distribuzione delle scariche su diversi cicli della tensione di alimentazione.

Nella seguente schematizzazione (Fig. 3.1) è possibile vedere come da una serie continua di impulsi di scarica è possibile ottenere dei grafici, chiamati "pattern" di scarica parziale, che rappresentano graficamente la distribuzione delle scariche parziali rispetto alla fase della tensione di alimentazione.

Dall'analisi visiva di tali grafici di distribuzione, tecnici esperti, sulla base di conoscenze e casistiche pregresse, sono in grado di rilevare non solo la presenza di un difetto all'interno del sistema isolante del componente in prova, ma anche di stimarne la tipologia e la gravità.

A titolo di esempio in Fig. 3.2 sono rappresentati alcuni pattern caratteristici di diverse tipologie di SP.

La maggior parte dei moderni sistemi di misura di scariche parziali può fornire oggi una o più modalità di rappresentazione della distribuzione delle scariche parziali rispetto alla fase della tensione di alimentazione.

I strumenti più moderni presentano particolari grafici del "pattern" dove vengono evidenziati, con una opportuna scala di colore, i fenomeni di scarica parziale che occorrono più o meno frequentemente (Fig. 3.3) in un determinato periodo di tempo.

Per fare questo, l'intervallo di fase (0-360°) della tensione di alimentazione e l'intervallo di ampiezza degli impulsi di scarica parziale rilevati vengono suddivisi in sotto-intervalli discreti (di ampiezza rispettivamente pari a $\Delta\phi$ e Δq) e sulla base della matrice così ottenuta viene costruito un diagramma bidimensionale delle occorrenze che riassume graficamente in maniera molto efficace la distribuzione delle scariche parziali nel tempo rispetto alla fase della tensione applicata evidenziando in particolare i fenomeni più ripetitivi

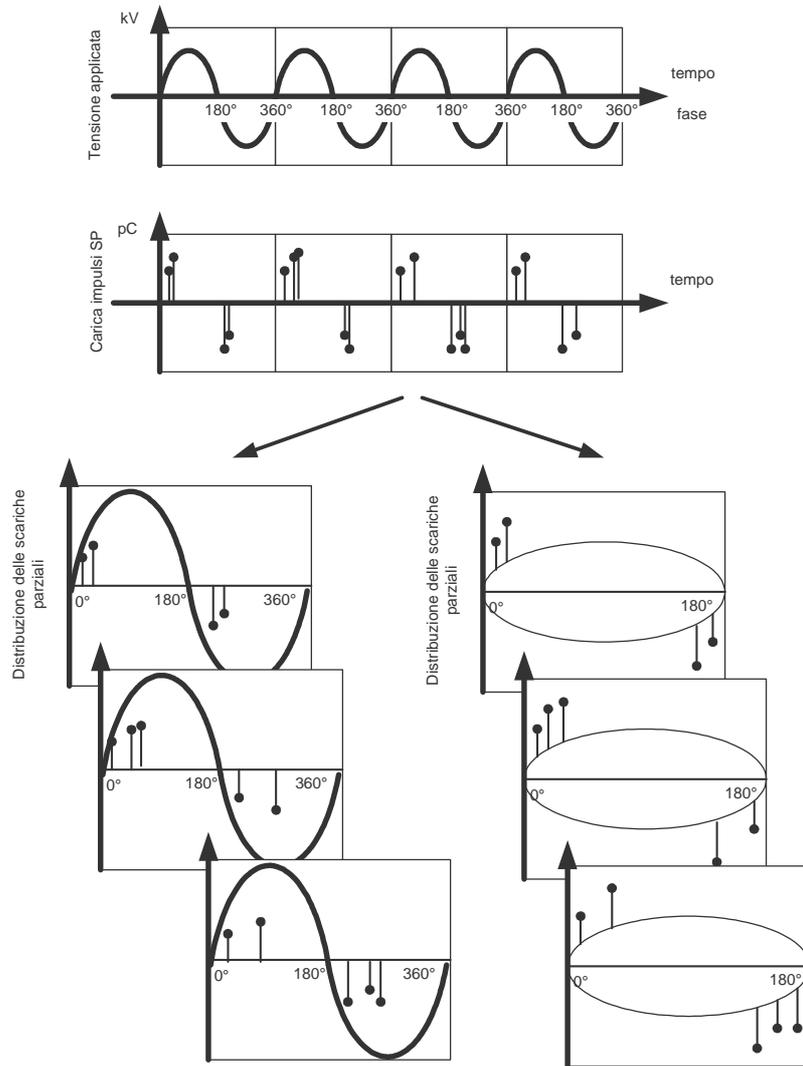


Fig. 3.1 – Rappresentazione delle scariche parziali rispetto alla fase della tensione di alimentazione

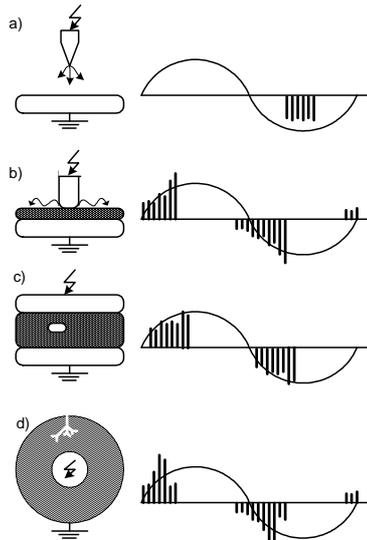


Fig. 3.2 – Distribuzione delle scariche parziali per alcuni casi tipici
 (a) Corona (b) Scariche superficiali (c) Cavità in un dielettrico solido (d) Treeing in un cavo

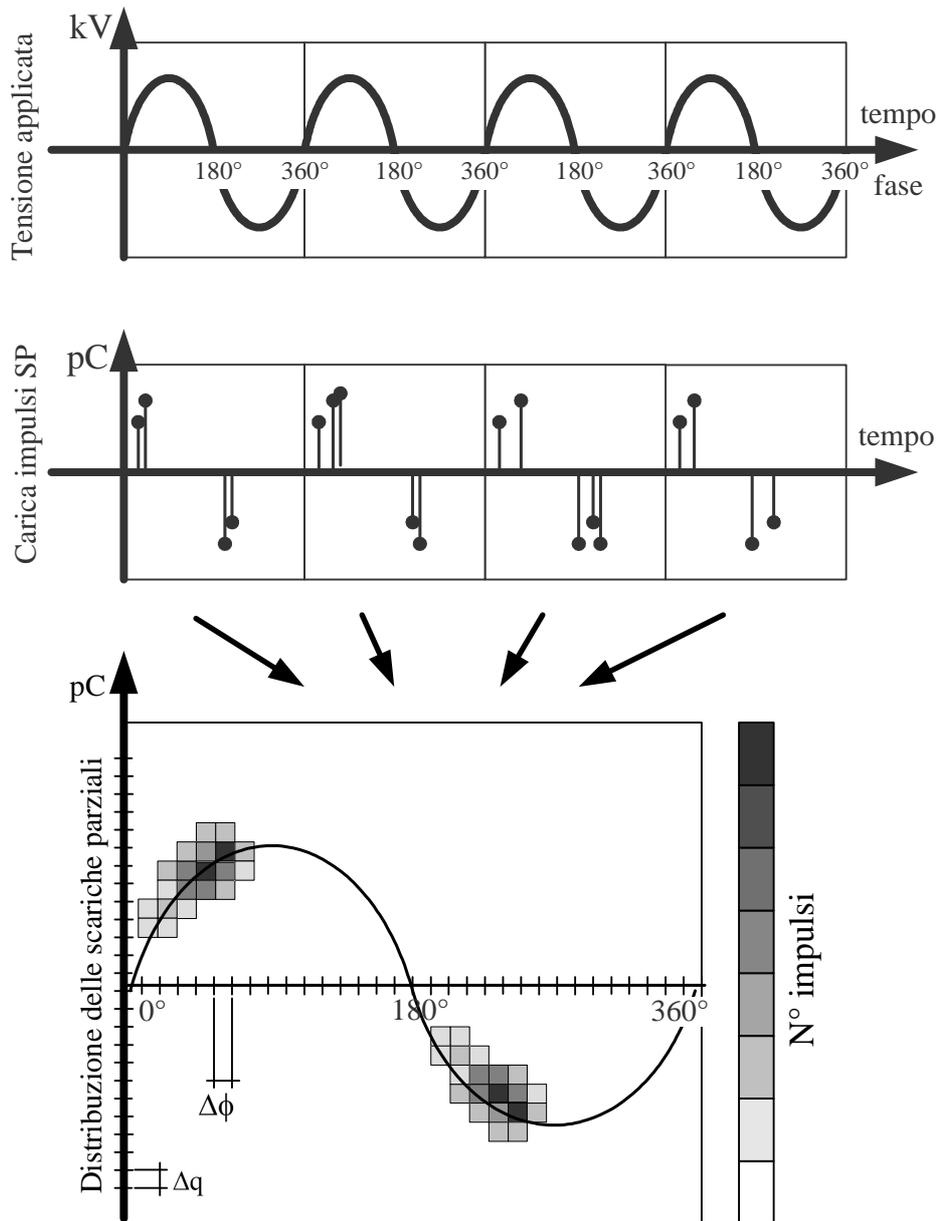


Fig. 3.3 – Grafico di distribuzione delle scariche parziali a intensità di colore

Con lo sviluppo dei calcolatori e dell'elaborazione numerica dei segnali, dalla fine degli anni ottanta sono state introdotte alcune metodologie di analisi automatica dei pattern sulla base del calcolo e confronto di diversi parametri caratteristici [48÷53].

Per ottenere questo risultato sono stati considerati, oltre alle grandezze definite precedentemente dalla norma [31], alcuni nuovi parametri caratteristici (qui vengono elencati quelli più significativi) :

q_i - intensità della scarica:

valore proporzionale alla carica corrispondente al singolo impulso di scarica parziale e

q_{min} e q_{max}: rispettivamente il valore minimo e massimo di carica misurata

φ_i – fase delle scariche q_i :

E' definita come l'angolo di fase della tensione di alimentazione in corrispondenza della scarica i -esima

 U_{inc} – tensione di innesco nel periodo

Valore della tensione applicata a cui si osserva la prima scarica nel semi-periodo considerato. Si avranno quindi due valori del parametro corrispondenti ai due semiperiodi

 U_{est} – tensione di estinzione nel periodo

Valore della tensione applicata a cui si osserva l'ultima scarica nel semi-periodo considerato. Anche in questo caso si avranno quindi due valori corrispondenti ai due semiperiodi

 φ_{inc} – fase di innesco nel periodo

Angolo di fase della tensione di alimentazione in corrispondenza dei valori di U_{inc}

 φ_{est} – fase di estinzione nel periodo

Angolo di fase della tensione di alimentazione in corrispondenza dei valori di U_{est}

 N_q – Numero di scariche per periodo

Rappresenta il numero di scariche occorse durante un periodo della tensione di alimentazione. Talvolta vengono anche utilizzati i parametri N_{q+} ed N_{q-} ad indicare il numero di cariche per semiperiodo (positivo e negativo rispettivamente)

Oltre a questi parametri sono stati introdotti due tipi di distribuzione delle scariche parziali. Suddividendo l'intervallo 0° - 360° della tensione di alimentazione in sotto-intervalli discreti, di ampiezza $\Delta\varphi$, si definiscono le seguenti due distribuzioni:

 $H_n(\varphi)$ – “Pulse count distribution”

Ottenuta calcolando il numero delle scariche rilevate in corrispondenza di ciascun sotto-intervallo della fase in un determinato tempo

 $H_{qn}(\varphi)$ – “Mean Height distribution”

Ottenuta invece calcolando il valore di ampiezza media delle scariche parziali (come somma dei valori di carica degli impulsi misurati diviso il numero degli impulsi) per ciascun sotto-intervallo della fase.

Entrambe le distribuzioni vengono solitamente suddivise nelle parti che si riferiscono alla sola semionda positiva e negativa (ottenendo quindi i seguenti parametri: $H_{n+}(\varphi)$, $H_{n-}(\varphi)$ e $H_{qn+}(\varphi)$, $H_{qn-}(\varphi)$).

A queste distribuzioni è possibile associare una serie di parametri statistici.

In seguito vengono elencati alcuni dei principali parametri statistici utilizzati per l'analisi del pattern [49÷51]:

Asimmetria delle scariche

Definita come media dei valori di carica delle scariche registrate nella semionda negativa della tensione di alimentazione rispetto alla semionda positiva.

Asimmetria della fase

Rapporto tra la fase della tensione di innesco nel semi-periodo positivo rispetto alla tensione di innesco nel semi-periodo negativo

Sk –Skewness

Questo parametro individua il fattore di asimmetria della distribuzione. E' definito secondo la seguente formula:

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

$S_k = 0$ se la distribuzione risulta essere simmetrica,
 $S_k < 0$ se asimmetrica verso destra
 $S_k > 0$ asimmetrica verso sinistra

dove:

x_i - è il valore discreto dell'i-esimo elemento della distribuzione

p_i - è la probabilità dell'i-esimo elemento

μ - è il valore medio espresso come $\mu = \sum x_i p_i$

σ - è la varianza espressa come $\sigma = \sqrt{\sum (x_i - \mu)^2 p_i}$

Ku – Curtosi

Questo parametro invece rappresenta la deviazione della distribuzione rispetto ad una distribuzione di tipo gaussiano. E' definita seconda la seguente formula:

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

$K_u = 0$ se la distribuzione coincide con una gaussiana
 $K_u < 0$ se si ha una distribuzione più appiattita rispetto ad una gaussiana
 $K_u > 0$ se si ha una distribuzione più concentrata rispetto ad una gaussiana

L'introduzione dei parametri statistici che permettono di caratterizzare le grandezze e distribuzioni fino a qui definite, riduce notevolmente il numero di dati da trattare.

Questa semplificazione rende quindi possibile un facile confronto, implementabile anche come algoritmo automatico, delle distribuzioni rilevate con dati immagazzinati in archivi contenenti i risultati di numerose altre prove precedenti (generalmente ottenuti sulla base di prove in laboratorio su campioni rappresentativi delle varie tipologie di difetto e da misure su componenti elettrici effettuate sia in laboratorio che in campo) e quindi realizzando l'identificazione automatica della tipologia del difetto.

3.3 Sistemi di misura di SP a banda ultra larga

3.3.1 *Descrizione generale*

Come accennato in precedenza gli impulsi di scarica parziale possono anche essere acquisiti tramite oscilloscopi o schede di acquisizione con elevata ampiezza di banda (anche dell'ordine delle centinaia di MHz) allo scopo di registrarne, non solamente l'intensità, ma anche la forma (e, di conseguenza, potendone calcolare anche lo spettro in frequenza).

E' stato verificato come la conoscenza della forma degli impulsi di SP può consentire di ottenere utili informazioni sulla natura o sull'origine dei fenomeni di SP nel componente [29][30][41][42][43].

In particolare il problema della simultanea presenza di più sorgenti di SP combinata anche con la presenza di rumore esterno, che, con sistemi di misura tradizionali, impedirebbe la corretta interpretazione del pattern di SP, può essere superato, sotto talune condizioni, utilizzando tecniche basate sull'analisi ed elaborazione degli impulsi di SP mediante sistemi a banda ultra larga [54÷72].

Una volta a disposizione un numero sufficiente di punti per ciascun impulso è possibile classificarli e raggrupparli in famiglie o sottoinsiemi di impulsi simili (chiamate in inglese "cluster") basandosi sul confronto di alcuni parametri rappresentativi della loro forma.

Allo scopo è possibile scegliere una moltitudine di parametri caratterizzanti ed utilizzarli congiuntamente per suddividere in cluster la totalità degli impulsi.

All'aumentare del numero e della complessità dei parametri aumenta però anche la complessità dell'algoritmo di elaborazione ottenendo quindi una conseguente riduzione della velocità computazionale complessiva.

In particolare, il metodo chiamato di "analisi tempo/frequenza equivalenti", basato sull'elaborazione dell'insieme degli impulsi di SP mediante due parametri e descritto brevemente nel paragrafo seguente, presenta un buon compromesso tra capacità di partizionare correttamente l'insieme degli impulsi in cluster ed efficienza computazionale [54÷61].

3.3.2 *Analisi tempo/frequenza equivalenti*

Partendo dal presupposto che impulsi di scarica parziale, provenienti da sorgenti differenti o, più in generale segnali aventi diversa natura, avranno forma differente è possibile immaginare vari algoritmi di separazione basati sull'analisi della forma dei segnali.

Per semplificare il problema del confronto tra un numero elevato di segnali campionati aventi diverse centinaia di campioni ciascuno, è possibile considerare un numero (arbitrariamente) ridotto di parametri di forma per ciascun singolo segnale acquisito riducendo, in questo modo, la complessità computazionale del problema.

Un metodo avanzato, implementato anche in alcuni sistemi commerciali, si basa sul considerare, per ciascun impulso acquisito, due parametri di forma, detti appunto tempo equivalente e frequenza equivalente e definiti come segue [54÷56].

Definito il parametro temporale t_b (baricentro temporale del segnale) come:

$$(3.1) \quad t_b = \frac{\sum_{i=0}^k t_i \cdot s_i(t_i)^2}{\sum_{i=0}^k s_i(t_i)^2}$$

dove è stato posto k il numero complessivo dei campioni di ciascun impulso, s_i il valore del segnale campionato nell'istante t_i , il parametro tempo equivalente (T_{eq}) del singolo impulso di scarica parziale viene espresso come:

$$(3.2) \quad T_{eq}^2 = \frac{\sum_{i=0}^k (t_i - t_b)^2 \cdot s_i(t_i)^2}{\sum_{i=0}^k s_i(t_i)^2}$$

Ponendo ora X_i come il valore della trasformata discreta di Fourier del segnale impulsivo in corrispondenza della frequenza f_i , viene definito il parametro frequenza equivalente (F_{eq}) del singolo impulso di scarica parziale con la seguente espressione:

$$(3.3) \quad F_{eq}^2 = \frac{\sum_{i=0}^k f_i^2 \cdot |X_i(f_i)|^2}{\sum_{i=0}^k |X_i(f_i)|^2}$$

L'introduzione di due soli parametri permette una facile rappresentazione grafica (bidimensionale) del problema. Si può infatti associare, per ciascun impulso, un singolo punto in un particolare piano detto piano tempo/frequenza equivalente (brevemente piano t/f) come descritto schematicamente in Fig. 3.4.

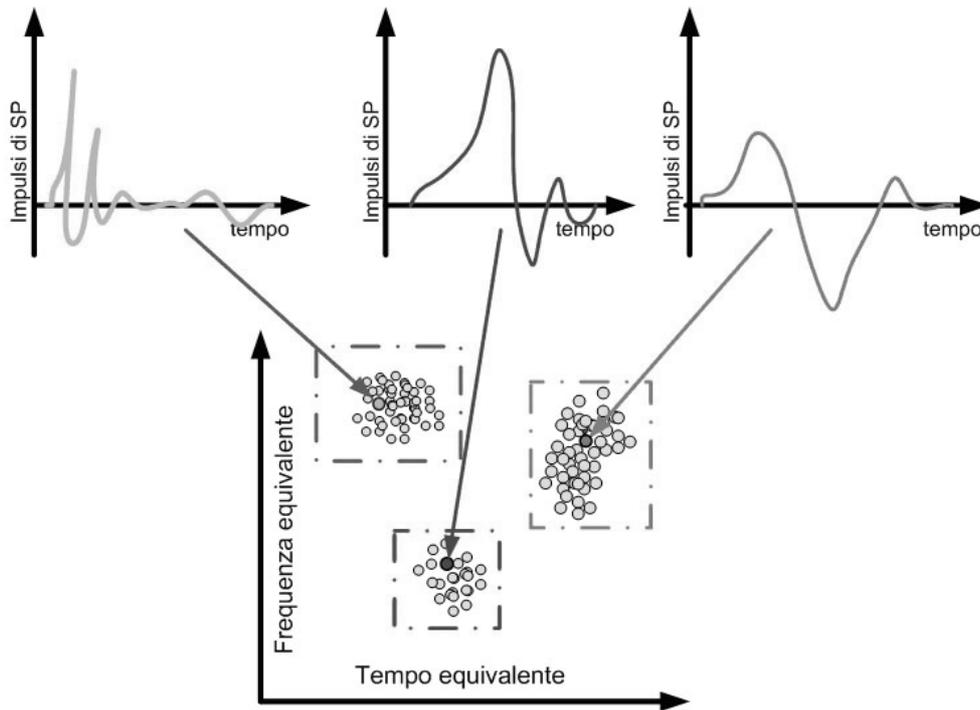


Fig. 3.4 - Posizionamento dei segnali nel piano tempo equivalente / frequenza equivalente

Segnali di forma simile assumeranno tendenzialmente posizioni vicine nel piano t/f, per cui è possibile facilmente individuare cluster di impulsi simili e, per ciascuno di questi, valutare la distribuzione delle scariche parziali rispetto alla frequenza di alimentazione (pattern), come presentato in Fig. 3.5.

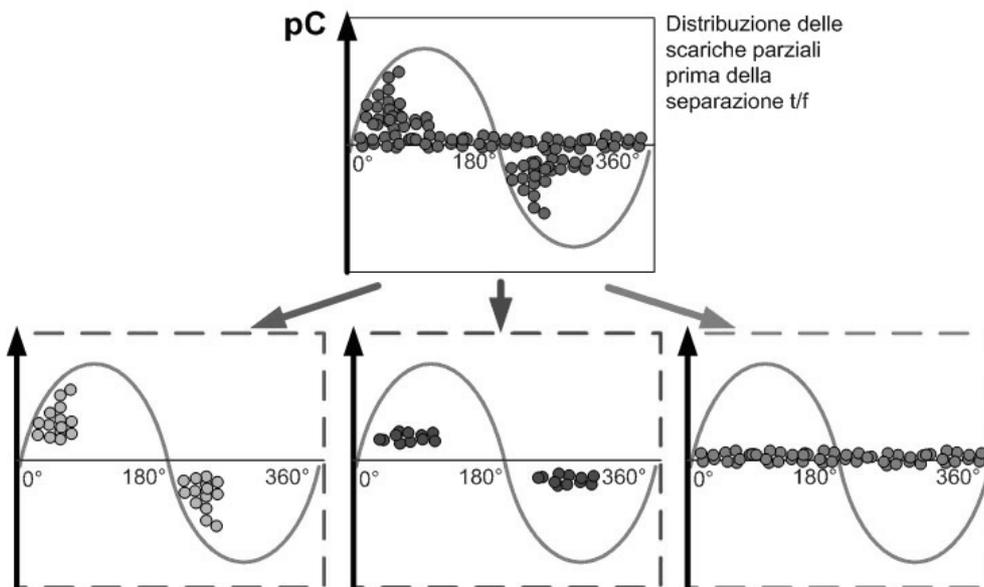


Fig. 3.5 - Separazione dei pattern relativi ad ogni singolo cluster individuato nel piano t/f

Come si può vedere nell'esempio descritto nelle due precedenti figure, il metodo ha consentito di individuare tre cluster distinti, fornendo come risultato dell'elaborazione tre pattern diversi, corrispondenti a tre fenomeni differenti presenti simultaneamente.

Si può anche osservare come il terzo pattern prodotto sia ragionevolmente da considerare rumore poiché gli impulsi di SP non risultano correlati in alcun modo con la fase di alimentazione.

3.4 Sistemi multi-terminale per la misura di SP

3.4.1 Descrizione generale

I sistemi di misura di SP multi-terminale sono stati introdotti inizialmente per soddisfare due esigenze [73]. La prima esigenza era poter misurare (e monitorare) le scariche parziali lungo i cavi di alta tensione direttamente in corrispondenza dei singoli giunti. La sempre maggiore lunghezza di questo tipo di cavi infatti non consentirebbe di effettuare misure sufficientemente buone posizionando lo strumento unicamente in corrispondenza dei terminali del cavo (principalmente perché il segnale di SP che viaggia attraverso un cavo subisce una significativa attenuazione all'aumentare del percorso tra sorgente e sensore, fino a non essere più misurabile a causa del rumore). La seconda esigenza riguarda le macchine elettriche di alta tensione con più fasi (trasformatori e macchine rotanti) alle quali veniva applicato il sistema di misura delle SP tradizionale su ciascun terminale singolarmente e, una volta eseguita la misura, veniva spostato, collegandolo al terminale successivo, oppure veniva impostato un sistema con multiplexer (che commutava semplicemente la misura sulla fase seguente).

La presenza però di più sorgenti di SP in una singola macchina unita all'effetto di “cross-talk” (ovvero la presenza di segnali dovuti a scariche parziali di un difetto posizionato in una fase della macchina che si propagano, per effetto del mutuo accoppiamento delle fasi, anche sulle altre fasi) impediscono di fatto la corretta localizzazione della sorgente. In seguito verrà descritto come l'utilizzo di un sistema multi-terminale sia in grado di effettuare, tramite l'analisi “3PARD” ([73][74]), una separazione in famiglie omogenee di segnali consentendo di determinare su quale fase è effettivamente presente il difetto.

3.4.2 Principio di funzionamento

Questi sistemi sono generalmente realizzati con più unità di misura ed elaborazione dei segnali di scarica parziale (unità remote) indipendenti e sincronizzate.

Tali unità remote sono connesse con un'unità centrale che si occupa di gestire la sincronizzazione delle singole unità, il loro controllo, la raccolta e l'elaborazione dei dati.

Nelle seguenti figure si vede l'applicazione di questo tipo di sistemi sui cavi (Fig. 3.6) e su macchine trifase (Fig. 3.7).

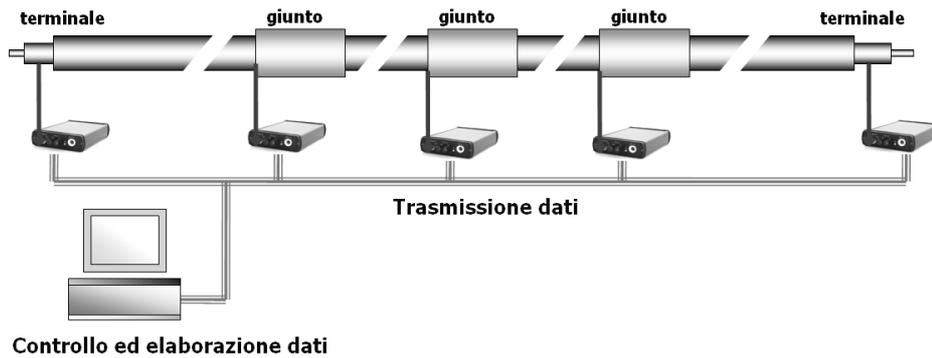


Fig. 3.6 - Sistema multi-terminale di misura delle SP applicato su un cavo di alta tensione

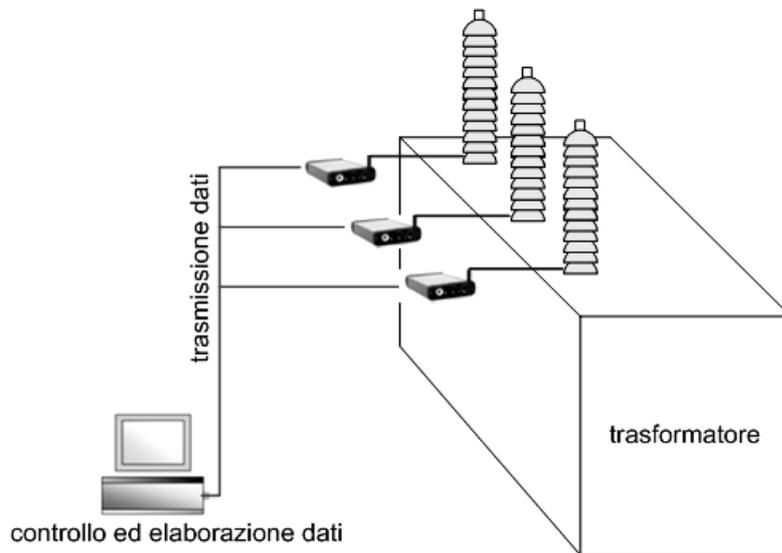


Fig. 3.7 - sistema multi-terminale di misura delle scariche parziali applicato ad un trasformatore

3.4.3 Il Sistema MPD600

Il sistema OMICRON mtronix, modello MPD600 [74], è un sistema di misura di scariche parziali multi-terminale in grado di effettuare il rilevamento, la rappresentazione in tempo reale e la registrazione del pattern delle scariche parziali sia per prove di laboratorio che per prove in campo. E' stato progettato per poter essere installato su cavi di alta tensione, trasformatori e macchine rotanti. Il sistema è costituito da un'unità centrale connessa (via cavo USB 2.0) a un PC sul quale viene eseguito un software di controllo, elaborazione e presentazione dei dati, e da una o più unità remote (fino ad oltre 100 unità), alimentate tramite accumulatori ricaricabili e connesse in cascata tramite fibra ottica (Fig. 3.8).

Questo sistema è stato utilizzato nell'attività di verifica sperimentale descritta più avanti nel capitolo 7.

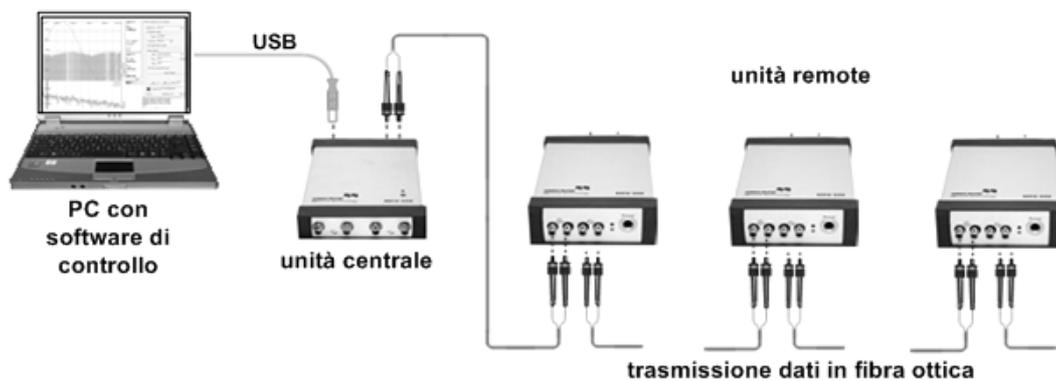


Fig. 3.8 - Sistema MPD600

3.4.3.1 Funzionamento e principali caratteristiche tecniche

Uno schema funzionale dell'unità remota del sistema MPD600 è fornito in (Fig. 3.9).

Come si può vedere dalla figura ciascuna unità presenta due ingressi, indicati nello schema con V e PD. In particolare l'ingresso V è preposto al campionamento e all'acquisizione della forma d'onda della tensione di alimentazione (opportunamente ridotta) mentre l'ingresso PD per i segnali provenienti dai sensori di scariche parziali (che possono essere quadripoli di accoppiamento, ma anche trasformatori di misura ad ampia banda, antenne, sensori acustici oppure trasduttori di altro tipo).

Per quanto riguarda il canale denominato con "V" questo quindi campiona la tensione di alimentazione con un convertitore da 24bit alla frequenza di campionamento di 100kS/s per fornire un riferimento di fase accurato.

Il canale "PD" invece dispone di un filtro anti aliasing con frequenza di taglio a 20 MHz seguito da un convertitore a 14bit con una frequenza di campionamento di 64MS/s per campionare i singoli impulsi di scarica parziale. Un volta campionato il segnale questo viene elaborato dall'unità FPGA presente sulla scheda. In particolare al segnale campionato viene convoluto con un filtro digitale programmabile (con banda centrale che può essere impostata tra 0 e 20 MHz e ampiezza della banda passante da 9 kHz a 3 MHz). Del segnale così elaborato viene calcolato il picco (proporzionale alla carica apparente dell'impulso di scarica parziale) il cui valore (espresso in pC) viene inviato all'unità centrale insieme al corrispondente valore di tempo di trigger e fase (calcolata rispetto alla tensione di alimentazione).

In questo modo all'unità centrale, tramite fibra ottica, non devono arrivare tutti i 2048 campioni del segnale acquisito (che saturerebbero la banda passante del canale di trasmissione dati) ma solamente una tripletta di valori per ogni evento di scarica.

Al fine di poter impostare correttamente i valori di frequenza centrale e banda passante ciascuna unità remota invia, anche i singoli campioni (2048) di un segnale di scarica acquisito. Questa operazione viene però effettuata solamente poche volte al secondo a causa della limitata banda del canale di comunicazione tra le unità remote e l'unità centrale. Nonostante questa limitazione è comunque possibile individuare la forma e, tramite FFT, anche lo spettro, di quei segnali di SP che con maggior frequenza vengono acquisiti in quel momento dall'unità remota e, sulla base di queste informazioni, impostare i valori di

frequenza centrale e banda passante in modo da cercare di migliorare il rapporto segnale rumore della misura.

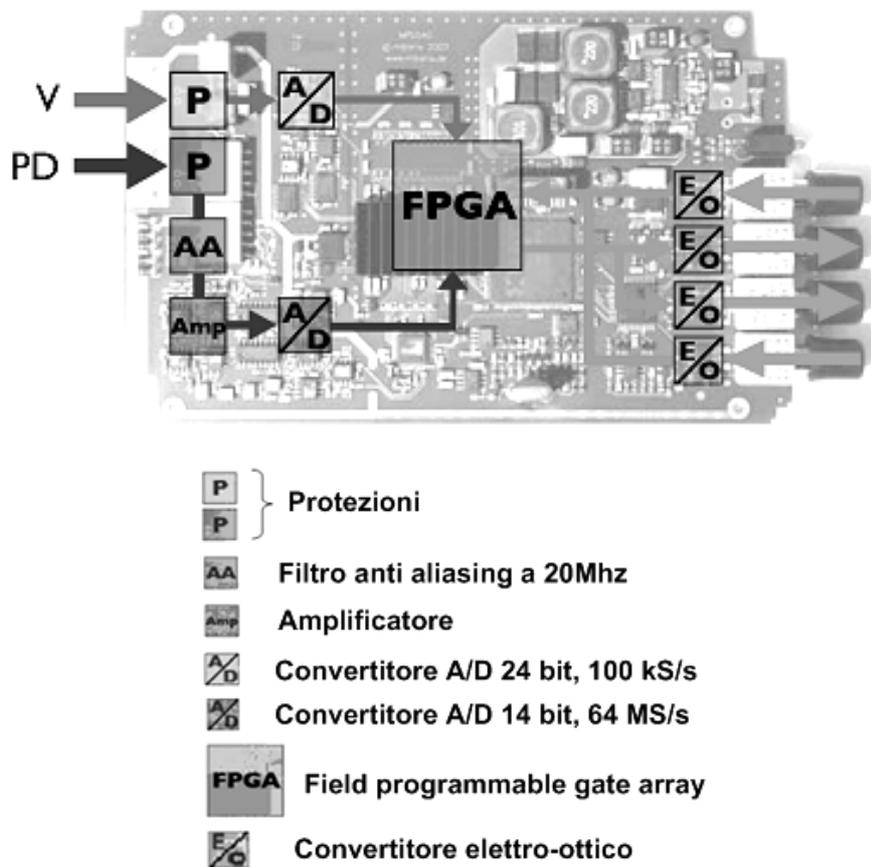


Fig. 3.9 - Schema di funzionamento di una unità remota del sistema MPD600

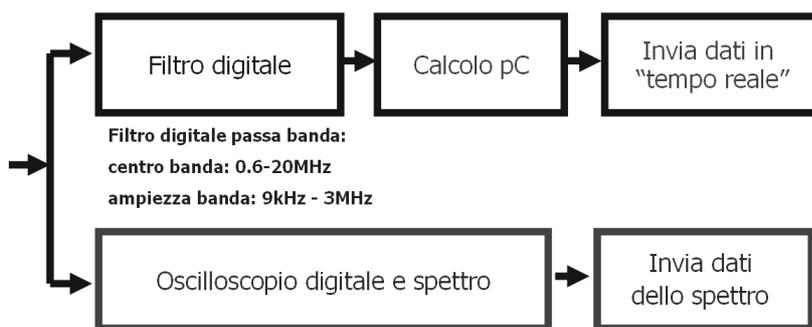


Fig. 3.10 - Schema dell'elaborazione sui segnali di scarica parziale effettuati dal FPGA dell'unità remota

3.4.3.2 Funzionalità principali offerte dall'interfaccia software

In Fig. 3.11 è possibile vedere la schermata principale del software di controllo del sistema MPD600.

Si può osservare la parte principale occupata dalla rappresentazione a intensità di colore del pattern (aggiornata in tempo reale) delle scariche parziali acquisite dall'unità remota selezionata, a destra (2) invece sono posizionati i controlli per impostare i parametri della misura. In basso (3) è possibile vedere i segnali di scarica campionati dalle unità remote (si

veda anche Fig. 3.12) oppure in alternativa, lo spettro in frequenza di questi segnali (Fig. 3.13). Viene inoltre data la possibilità di impostare i parametri di frequenza centrale e banda passante agendo su alcuni cursori posti sul grafico degli spettri in frequenza (Fig. 3.13).

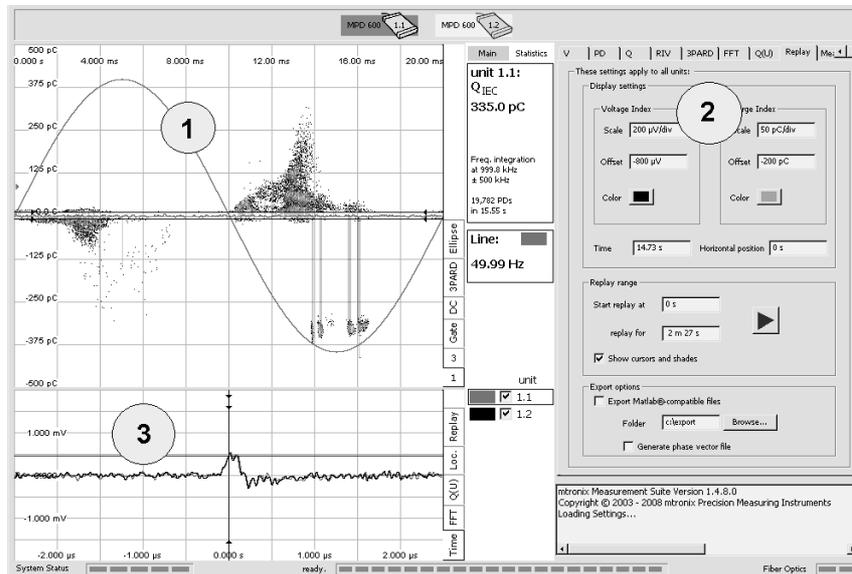


Fig. 3.11 - Interfaccia grafica del sistema MPD600

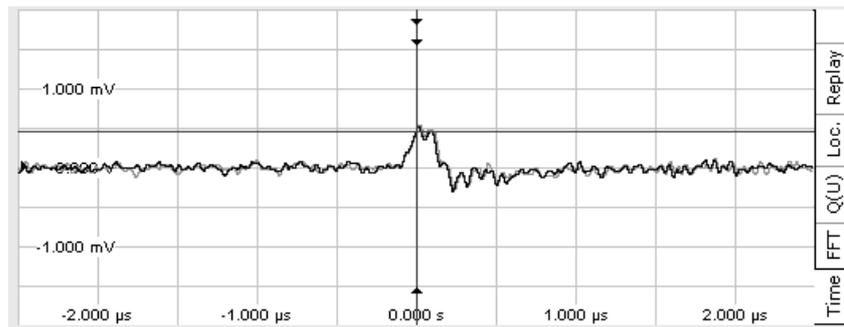


Fig. 3.12 - Segnali di scarica parziale acquisiti da due unità remote del sistema MPD600

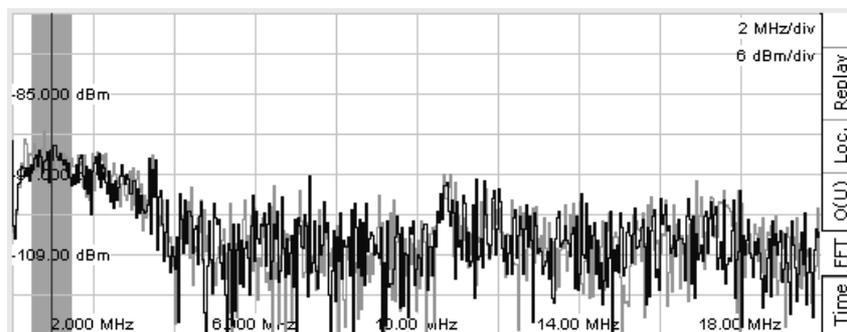


Fig. 3.13 - Spettri di frequenza di due segnali di scarica parziale acquisiti dal sistema MPD 600 e impostazione del filtro digitale ($f_c = 1\text{MHz}$, $\Delta f = 500\text{kHz}$)

4 ANALISI MULTI-BANDA PER LA SEPARAZIONE DELLE SORGENTI DI SCARICA PARZIALE

4.1 Generalità

Nei paragrafi seguenti saranno presentate alcune metodologie avanzate per la separazione in famiglie omogenee dei segnali di SP (“cluster”) mediante l’utilizzo di sistemi di misura di SP multi-terminale.

Inizialmente verrà descritta la tecnica di separazione multi-terminale chiamata “3PARD” introdotta recentemente ed utilizzata essenzialmente su macchine trifasi [74÷79]. Successivamente verrà invece proposta una generalizzazione ed estensione di questa tecnica con l’introduzione di particolari diagrammi che consentiranno una più accurata ed efficace separazione in famiglie omogenee dei segnali di SP su svariati tipi di componenti elettrici in prova (non necessariamente solo macchine elettriche trifasi).

4.2 La modalità di separazione multi terminale 3PARD

La modalità di elaborazione e separazione delle SP nota con l’acronimo 3PARD sfrutta la presenza di tre terminali remoti indipendenti e sincronizzati per cercare di separare in famiglie omogenee (cluster) impulsi di scarica parziale provenienti da diverse sorgenti in macchine rotanti o trasformatori trifase [78÷79].

Osservazione:

L’acronimo inglese 3PARD - 3 Phase Amplitude Relation Diagram, viene introdotto come estensione della sigla PRPD - Phase Resolved Partial Discharge Diagram con il quale viene indicata invece la rappresentazione della distribuzione degli impulsi di SP rispetto alla fase della tensione di alimentazione

Si consideri ad esempio una singola sorgente di SP (difetto interno) su una fase di una macchina trifase. Gli impulsi di SP provenienti da questa sorgente si propagheranno all’interno della macchina fino ai tre sensori del sistema di misura collegati alle tre fasi della macchina stessa.

Dalla sorgente di SP viaggeranno infatti dei segnali (impulsi) che si propagheranno principalmente lungo la fase interessata dal difetto, ma anche (per effetto del mutuo accoppiamento delle fasi della macchina) sulle altre due fasi. In particolare, i segnali che viaggiano lungo la fase interessata dal difetto subiranno una certa attenuazione, mentre i segnali trasferiti sulle altre fasi saranno generalmente più attenuati.

Proprio su questa differenza di attenuazione si basa l’algoritmo di separazione 3PARD.

Se si costruisce infatti su un grafico vettoriale come quello rappresentato in Fig. 4.1 un vettore le cui componenti sono rispettivamente le ampiezze dei segnali in arrivo sulle tre unità remote (Ch_1 , Ch_2 , Ch_3) del sistema di misura posizionate sui terminali delle tre fasi della macchina, si avrà un risultato come quello rappresentato in Fig. 4.2 ottenendo quindi, per ciascuna tripletta di segnali acquisiti in modo sincronizzato, un corrispondente vettore risultante (rappresentato da un singolo punto) nel piano vettoriale (Fig. 4.4).

Segnali provenienti da sorgenti differenti avranno generalmente percorsi di propagazione e quindi attenuazioni differenti e pertanto si posizioneranno in punti differenti del piano 3PARD.

Ecco quindi come questa tecnica può essere utilizzata per effettuare la separazione di segnali dei SP provenienti da sorgenti differenti in macchine trifase. Si osserva anche (Fig. 4.3) come il rumore esterno interesserà mediamente alla stessa maniera le tre fasi e pertanto produrrà un cluster (o famiglia) di punti localizzati prevalentemente verso il centro del diagramma 3PARD (Fig. 4.4).

Anche questa metodologia quindi consente di ottenere un certo grado di separazione dei segnali di scarica parziale dal rumore.

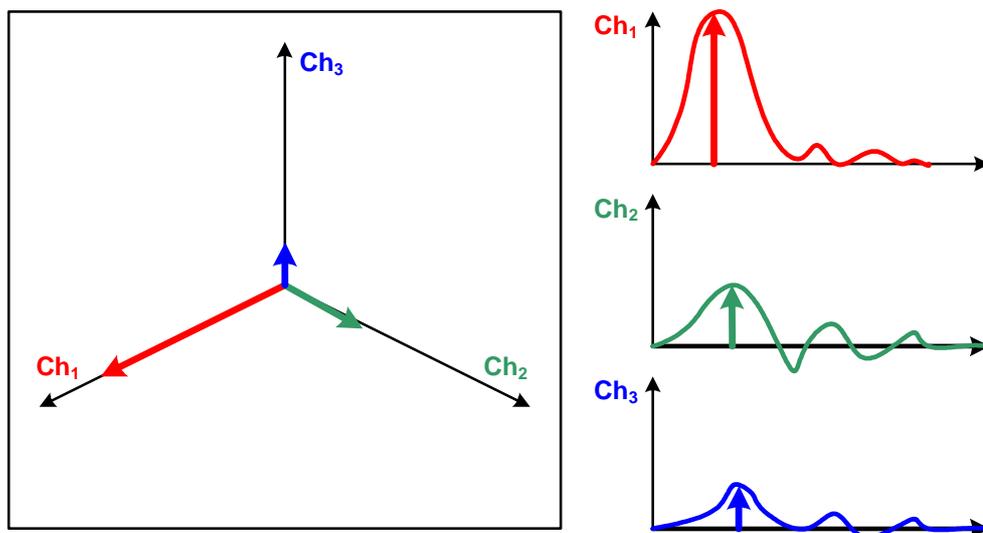


Fig. 4.1 - Generazione del diagramma 3PARD

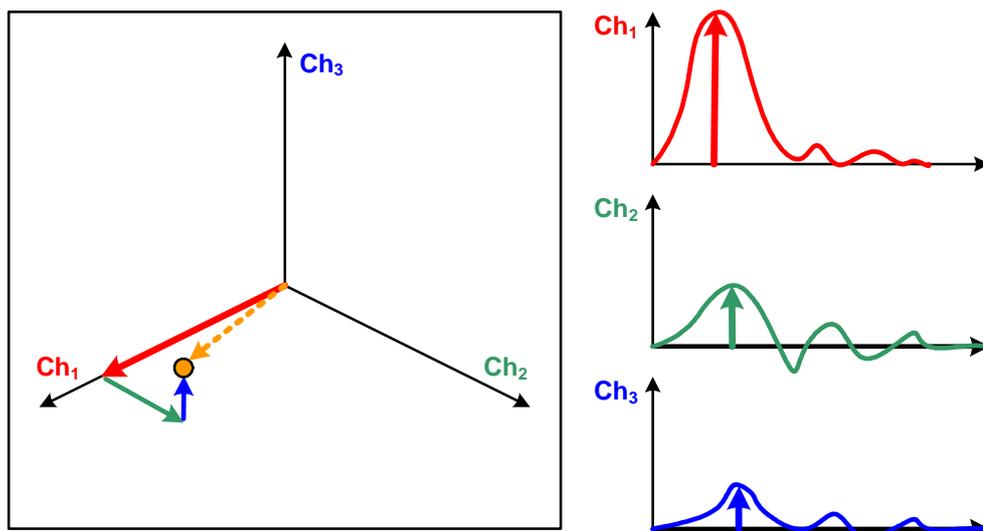


Fig. 4.2 - Diagramma 3PARD - analisi di una scarica parziale generata da una singola sorgente in un avvolgimento di un trasformatore trifase (difetto interno)

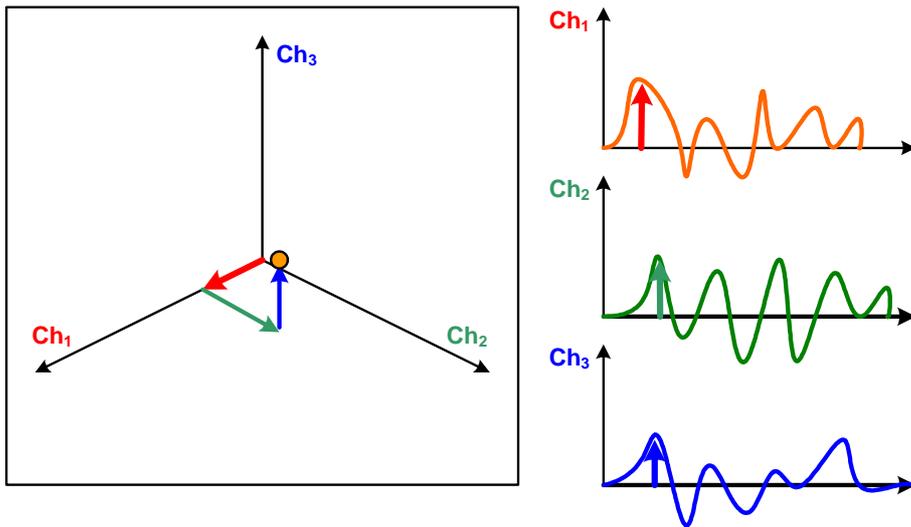


Fig. 4.3 - Diagramma 3PARD – effetto del rumore esterno

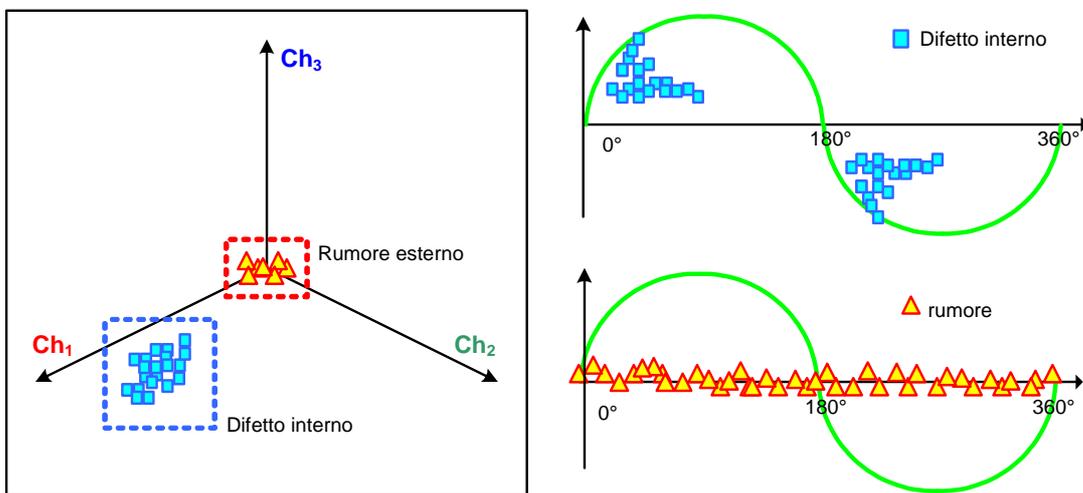


Fig. 4.4 - Schematizzazione del processo di separazione in cluster

In realtà, l'implementazione del 3PARD realizzata nel software del sistema mpd600 presenta in più una particolare normalizzazione delle componenti vettoriali come riportato nella figura seguente (Fig. 4.5)

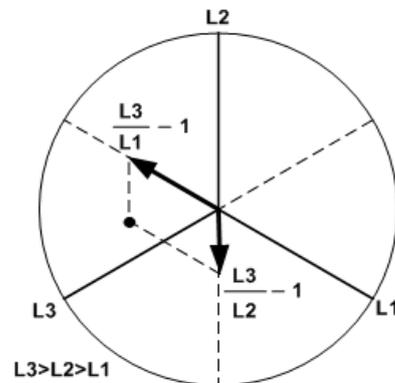


Fig. 4.5 - 3PARD implementazione con normalizzazione

Si può osservare come anche in questo caso ad ogni evento di scarica parziale corrisponde un punto nel diagramma, ma questo non risulta individuato attraverso una semplice somma vettoriale delle componenti misurate dalle tre unità, bensì risulta posizionato sull'estremo di un vettore ottenuto come somma vettoriale di due componenti opportunamente normalizzate. Nel paragrafo seguente verrà chiarita l'esigenza di utilizzare diagrammi vettoriali normalizzati come questo evidenziandone punti di forza e criticità.

In conclusione, l'efficacia dell'utilizzo del diagramma 3PARD su macchine trifasi (generatori e trasformatori in particolare) per poter separare difetti localizzati in fasi diverse, sorgenti di SP localizzati in posizioni (significativamente) differenti tra di loro ed anche le single sorgenti di SP dal rumore, è stata dimostrata in diverse pubblicazioni (ad es. [74÷79]), Vi sono però numerose situazioni dove questa metodologia, a differenza dei metodi descritti nel capitolo dei sistemi a banda ultra larga, non può fornire una separazione efficace delle sorgenti di SP. Pensiamo ad esempio ad una macchina trifase che abbia due o più difetti ed eventualmente anche del rumore presenti simultaneamente su una singola fase, ma che i segnali provenienti da queste sorgenti di SP non presentino componenti trasferite sulle altre fasi. I segnali provenienti dalle varie sorgenti risultano in ogni caso avere generalmente forme differenti e pertanto l'applicazione di un sistema a banda ultra larga, basandosi per l'appunto sull'analisi della forma dei segnali, permetterebbe egualmente la separazione in famiglie omogenee, mentre l'utilizzo di un sistema trifase con diagramma 3PARD non sarebbe in grado di individuare la molteplicità delle sorgenti né potrebbe consentire l'estrazione del segnale dal rumore.

Nel paragrafo seguente si cercherà di estendere notevolmente il campo di utilizzo dei sistemi multi-terminale sincronizzati per poterli utilizzare efficacemente anche nelle situazioni (come quella appena descritta) dove non vi sia trasferimento di segnale su tutte e tre le fasi oppure con componenti in prova differenti oltre alle macchine trifasi (come ad esempio singole tratte di cavo).

4.3 Separazione delle SP mediante analisi multi banda

4.3.1 Generalità

Si consideri nuovamente la metodologia di separazione dei segnali di SP sulla base della loro forma, introdotta in precedenza nella descrizione dei sistemi a banda ultra larga. E' stato verificato come in corrispondenza di ogni evento di SP, i singoli segnali elettrici generati, nel percorrere il tragitto dalle sorgenti al sensore del sistema di misura, vengono sottoposti a differenti attenuazioni, caratteristiche del percorso stesso, e quindi avranno forma (e di conseguenza contenuto armonico) differente, così come anche segnali provenienti da sorgenti di SP di tipologia (natura) differente avranno in generale forma e contenuto armonico differenti.

I sistemi a banda ultra larga acquisiscono i segnali e ne analizzano un insieme di parametri di forma tramite i quali realizzano la classificazione delle SP in famiglie omogenee.

Si consideri ora un sistema multi-terminale. Ciascun terminale opera come un sistema di misura di SP a banda stretta, pertanto per ogni evento di SP, il sistema non ha a disposizione il segnale originale campionato a banda piena ma unicamente un valore proporzionale alla carica apparente della SP (ottenuto come valore massimo del segnale risultato della convoluzione del segnale originale con il filtro in ingresso, a banda stretta, del sistema di misura).

In conformità a quanto detto, questo tipo di sistema non potrebbe quindi eseguire alcun tipo di separazione basata sulla forma del segnale originale.

E' possibile però ipotizzare una soluzione per aggirare il problema, considerando la caratteristica dei sistemi multi terminale di poter acquisire in modo sincrono i segnali di SP tramite due o più unità remote.

Collegando appunto due o più unità remote del sistema ad una medesima fase dell'oggetto in prova (invece che su fasi diverse) e misurando quindi il medesimo segnale originale, impostando però ciascuna di unità su bande diverse, si otterranno, in corrispondenza di ciascun segnale di SP, due o più punti caratteristici dello spettro e quindi della forma del segnale originario. [72][80].

Costruendo quindi per ciascun evento di SP, in un opportuno diagramma vettoriale, un vettore le cui componenti sono proporzionali ai valori ottenuti tramite le singole unità remote, è possibile ottenere una separazione basata sulla forma del segnale.

Questo tipo di elaborazione verrà chiamata d'ora in poi metodo di separazione "multi-banda". Nel paragrafo seguente viene ulteriormente chiarita questa metodologia descrivendo, più in dettaglio, la costruzione di alcuni tipi di diagrammi adatti a realizzare efficacemente la suddetta modalità di separazione.

Per praticità di presentazione e è perché comunque la capacità di separazione è sufficientemente buona, si è scelto di sperimentare questa tecnica con due e tre unità remote ed avere quindi diagrammi vettoriali con al massimo tre dimensioni. E' comunque intuitivo osservare come più parametri di separazione vengano utilizzati e più sarà efficace la

separazione e l'individuazione di cluster, a scapito però della complessità del sistema, del costo e della velocità di elaborazione.

4.3.2 Diagrammi vettoriali per la separazione multi-banda con due e tre dimensioni

Per semplicità consideriamo un oggetto in prova che, portato ad una certa tensione di innesco, presenti tre distinte sorgenti di SP come riportato in Fig. 4.6.

Da quanto detto nel capitolo dei sistemi a banda ultra larga si avranno tre diverse tipologie di segnali e di conseguenza tre diverse forme dello spettro ed a ciascuna tipologia corrisponderà un diverso pattern Fig. 4.7.

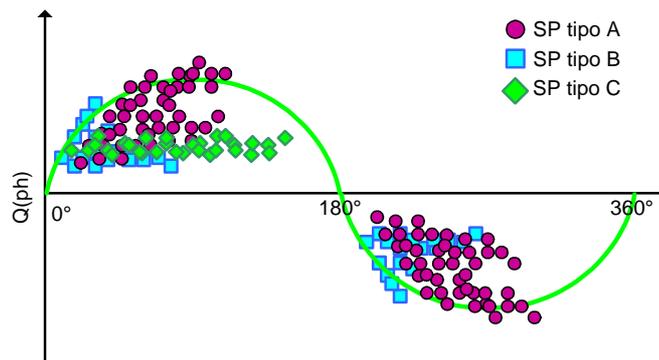


Fig. 4.6 – Esempio di pattern con tre sorgenti di SP simultanee

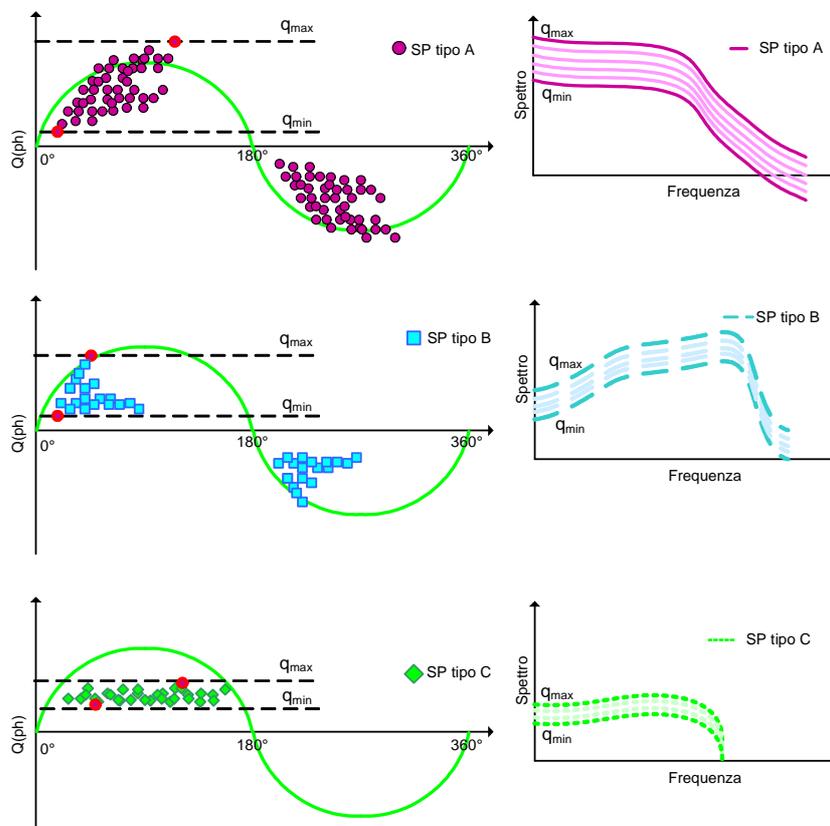


Fig. 4.7 –Pattern e relativi spettri di frequenze per ciascun tipo di SP

Per ciascuna famiglia di SP si definisca il valore “ampiezza del pattern” Δ_p come differenza tra il valore massimo q_{\max} ed il valore minimo q_{\min} dei valori di carica delle SP appartenenti al pattern stesso.

Si consideri ora il grafico degli spettri medi corrispondenti ai segnali appartenenti a ciascuna famiglia Fig. 4.8

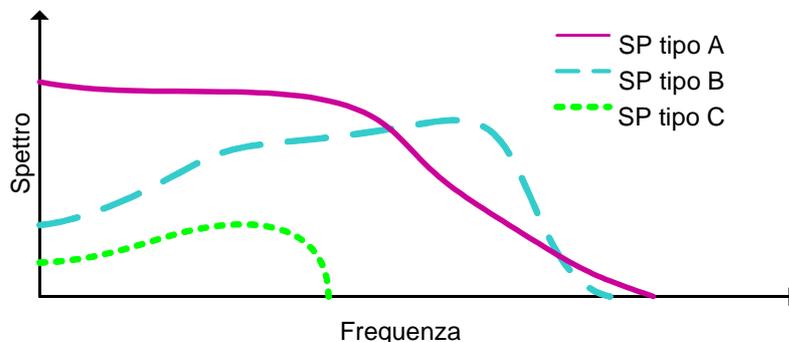


Fig. 4.8 – Spettri di frequenze (media) per ciascun tipo di SP

Se si fosse scelto di utilizzare un sistema a banda ultra larga, attraverso l’analisi tempo/frequenza equivalenti, oppure tramite qualche altro tipo di analisi dei parametri di forma, si sarebbero ottenute direttamente tre famiglie distinte. Per ottenere il medesimo risultato utilizzando i sistemi multi-terminale si può invece procedere come descritto in seguito.

Si consideri inizialmente un sistema multi-terminale con due sole unità remote sincronizzate che misurano i medesimi segnali di SP, con le bande impostate come nella Fig. 4.9 seguente.

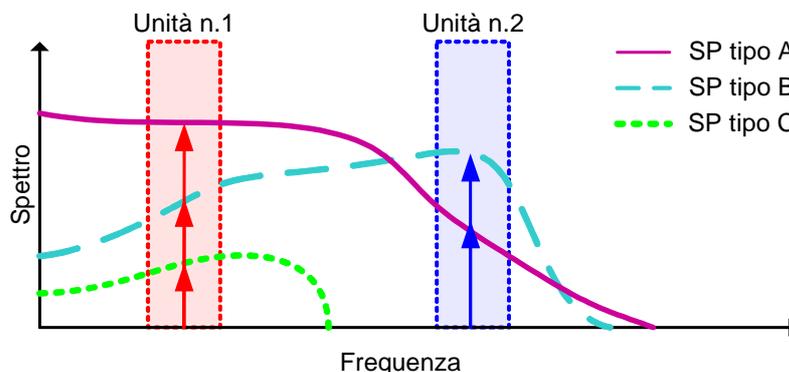


Fig. 4.9 – Separazione multi-banda - Impostazione della banda passante di un sistema con due unità remote (a banda stretta)

Si osserva immediatamente come in corrispondenza degli impulsi di tipo A, B e C le due unità misureranno valori differenti.

Si può costruire ora un diagramma vettoriale bidimensionale individuando sugli assi x ed y i valori di carica delle SP misurati dalle unità 1 e 2 rispettivamente. Come anticipato in precedenza si otterrà il diagramma vettoriale di Fig. 4.10 dove per le tre tipologie di segnali di SP A, B e C corrispondono punti in posizioni differenti del diagramma.

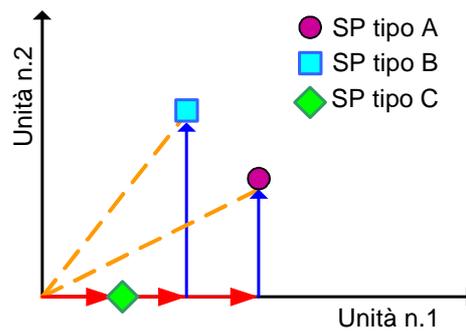


Fig. 4.10 – Separazione multi-banda –diagramma bidimensionale

Come accennato in precedenza, utilizzando più parametri per la separazione si avrà una migliore discriminazione delle famiglie. Si introduca quindi un’ulteriore unità remota (3) la cui banda sia impostata come indicato in Fig. 4.11 seguente.

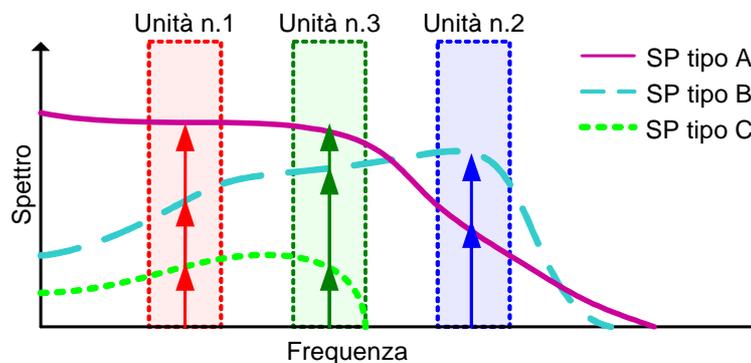


Fig. 4.11 – Separazione multi-banda - Impostazione della banda passante di un sistema con tre unità remote (a banda stretta)

Per analogia è quindi possibile costruire un diagramma tridimensionale ponendo in corrispondenza dell’asse “z” i valori di carica misurati dall’unità remota numero 3. (Fig. 4.12).

Si osserva anche in questo caso che per le tre tipologie di segnali di SP (A, B e C) corrispondono punti in posizioni differenti del diagramma. In particolare le distanze (euclidee) tra i cluster risultano maggiori rispetto al caso bidimensionale e pertanto l’individuazione dei cluster risulta più immediata. Questa caratteristica sarà particolarmente importante quando verranno introdotti i sistemi di separazione automatica dei cluster

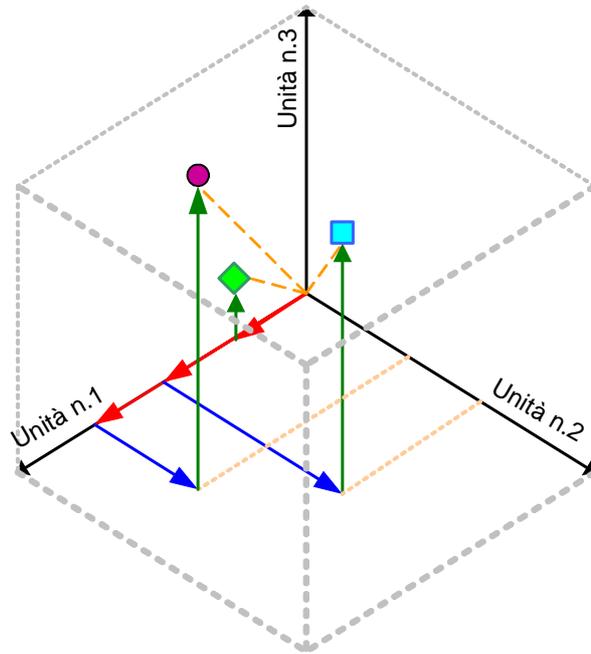


Fig. 4.12 – Separazione multi-banda – diagramma tridimensionale

L'analisi e la separazione in famiglie (specie per gli algoritmi di separazione automatica) di diagrammi e quindi sostanzialmente di matrici tridimensionali è certamente più oneroso in termini di potenza di calcolo rispetto al caso bidimensionale, per cui si può pensare (analogamente a quanto succedeva per il 3PARD) di utilizzare una proiezione del grafico tridimensionale di Fig. 4.12 nel piano in modo da ottenere un diagramma vettoriale come quello di Fig. 4.13. E' possibile estendere il concetto anche a sistemi a più di tre dimensioni pensando di proiettare opportunamente i diagrammi multidimensionali su un piano bidimensionale, ricordandosi però che insieme alla riduzione delle dimensioni del problema vi è anche una parziale perdita di informazioni che si traduce in una riduzione dell'efficacia della separazione.

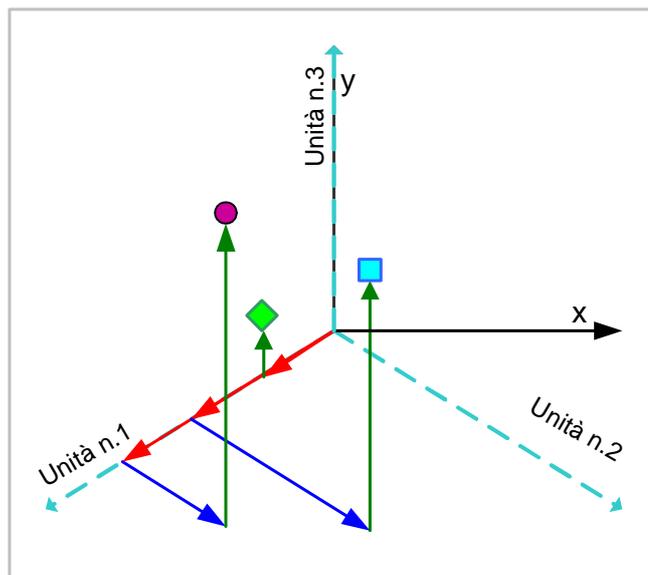


Fig. 4.13 – Proiezione del diagramma tridimensionale su un piano

Un eventuale sistema di monitoraggio basato su questo tipo di elaborazioni potrebbe quindi effettuare una separazione automatica in cluster inizialmente utilizzando diagrammi bidimensionali (più veloci da gestire) per poi, una volta verificata una non conformità rispetto ad una situazione standard, approfondire l'analisi diagnostica utilizzando matrici a più dimensioni.

4.3.3 Osservazioni sull'incidenza dell'ampiezza del pattern

Per semplicità nell'analisi effettuata fino ad ora si è ommesso di considerare l'effetto intrinseco dell'ampiezza del pattern Δ_p (definita come differenza tra il valore massimo q_{\max} ed il valore minimo q_{\min} dei valori di carica delle SP appartenenti al pattern stesso) ma, per ogni tipo di SP dell'esempio (A, B e C), si è scelto invece di considerare solamente lo spettro medio. Si osservino ora i grafici di Fig. 4.14, corrispondenti a SP di tipo "A". Supponendo di utilizzare un sistema a due unità remote le cui bande siano impostate come in Fig. 4.15, si otterrebbe un corrispondente diagramma bidimensionale come in Fig. 4.16, ovvero si non si avrebbe un singolo punto ma un luogo dei punti posizionati nell'intorno del punto ricavato in precedenza (corrispondente allo spettro medio) e più precisamente lungo una porzione di retta passante per l'origine degli assi. Per tutti i tipi di SP dell'esempio si avrà allora una situazione come quella schematizzata in Fig. 4.17. Questo effetto è tanto più accentuato quanto più Δ_p risulta elevato. Pertanto per un pattern dovuto al semplice effetto corona, caratterizzato da un Δ_p relativamente basso, non si avranno grossi problemi mentre altri tipi di sorgenti di SP, come ad esempio segnali generati da un vuoto in un isolante solido, si potrebbero avere delle difficoltà ad individuare cluster specialmente con algoritmi automatici, come si vedrà nell'esempio sperimentale presentato in uno dei paragrafi seguenti.

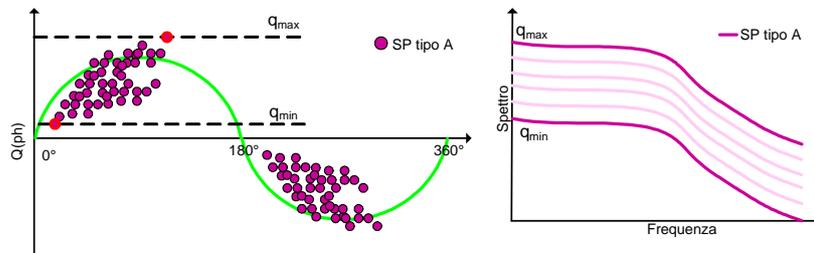


Fig. 4.14 – Pattern e spettro di frequenza per le SP di tipo A

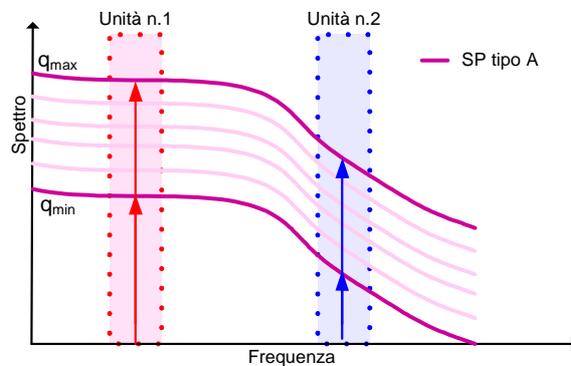


Fig. 4.15 – Impostazione delle bande passanti con un sistema con due unità remote

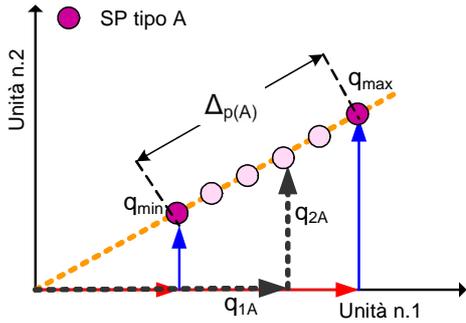


Fig. 4.16 –Esempio di effetto dell’ampiezza del pattern sul diagramma bidimensionale per le SP di tipo A

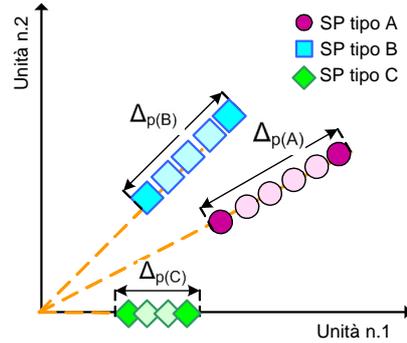


Fig. 4.17 – Esempio di effetto dell’ampiezza del pattern sul diagramma bidimensionale per le SP di tipo A, B e C

Un modo per ovviare a questo effetto indesiderato è tramite la normalizzazione, ovvero creare diagrammi vettoriali le cui coordinate, modificate opportunamente, risultino in espresse in per unità piuttosto che in valori proporzionali alla carica apparente misurata (in pC o mV di picco del segnale). Ad esempio, considerando il caso della Fig. 4.16, sostituendo le coordinate nel seguente modo:

$$(4.1) \quad q_{1a} \rightarrow \frac{q_{1a}}{q_{\text{mod } a}}$$

$$(4.2) \quad \text{dove: } q_{\text{mod } a} = \sqrt{q_{1a}^2 + q_{2a}^2}$$

Si otterrà che nel nuovo diagramma, tutti i punti corrispondenti alla famiglia delle SP di tipo A, indipendentemente dall’ampiezza del pattern, andranno a coincidere su un singolo punto posizionato a distanza unitaria dall’origine, tale normalizzazione delle componenti vettoriali ovviamente si può estendere a tutte le famiglie ottenendo il grafico di Fig. 4.18. Si osserva come tutti i punti vengono posizionati su una circonferenza di raggio unitario. E’ intuitivo verificare come in questo modo si sia ottenuta anche una riduzione della dimensionalità e, di conseguenza, si presenteranno i relativi vantaggi (riduzione della complessità e dei tempi di elaborazione) e svantaggi (perdita di informazione e riduzione delle distanze tra i cluster) descritti precedentemente.

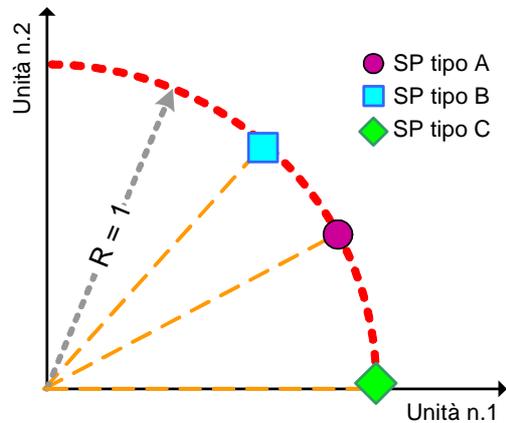


Fig. 4.18 – Esempio di diagramma bidimensionale normalizzato

E' ovviamente possibile generalizzare questo tipo di analisi anche al caso di 3 (o più) dimensioni. L'effetto dell'ampiezza del pattern su un grafico tridimensionale (o a più dimensioni) non normalizzato fa sì che i punti corrispondenti allo stesso tipo di SP si posizioneranno lungo rette distinte che passano per l'origine, mentre normalizzando, come visto in precedenza, si otterrà che tutti i punti si posizioneranno, non più su una circonferenza, bensì sulla superficie di una sfera (o multi-sfera) di raggio unitario (Fig. 4.19).

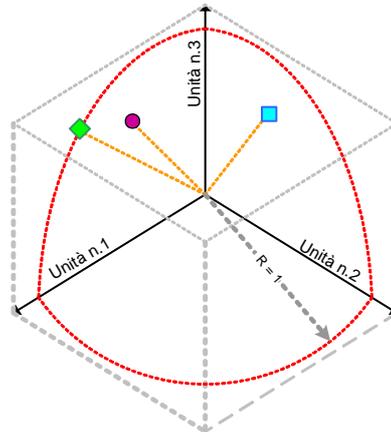


Fig. 4.19 – Esempio di diagramma tridimensionale normalizzato

Una particolare osservazione va fatta riguardo al diagramma 3PARD presentato in Fig. 4.5. Come detto, questo tipo di rappresentazione, se da un lato è comodo nell'utilizzo standard per le macchine trifasi poiché prevede intrinsecamente una normalizzazione dei dati, nel caso di utilizzo per la separazione multi-banda presenta invece una problematica di difficile soluzione. L'algoritmo, infatti, per ogni evento di SP rilevato, non è in grado di considerare punti che abbiano una o più componenti nulle. Questo limite è particolarmente sentito per l'applicazione del metodo di separazione multi banda, dove può accadere molto spesso di avere segnali di SP a banda limitata (attenuati, ad esempio, da un percorso di propagazione particolarmente lungo) e che non hanno contenuto armonico significativo nella banda di una delle unità remote (ovvero tale da superare il livello di soglia o "treshold" impostato sull'acquisitore dell'unità). Si veda l'esempio di Fig. 4.20.

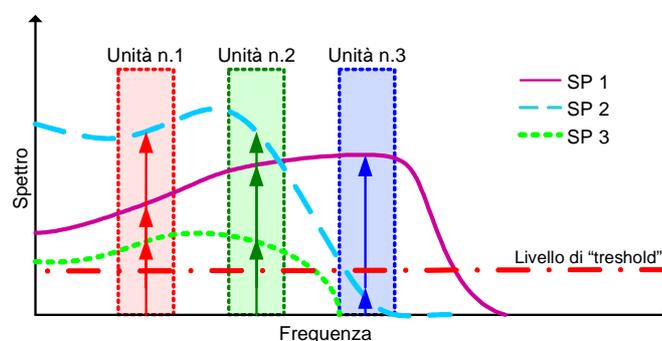


Fig. 4.20 – Esempio in cui la separazione multi banda non è realizzabile tramite l'applicazione del diagramma 3PARD

Si osserva come nell'esempio mostrato, dei tre segnali, solamente uno abbia uno spettro tale da avere componenti spettrali maggiori del livello di "treshold" in corrispondenza delle bande delle unità remote. Pertanto, in una rappresentazione normalizzata di tipo 3PARD, tale segnale sarebbe l'unico a poter essere correttamente rappresentato, mentre gli altri due segnali non avrebbero nessun punto corrispondente nel diagramma, ottenendo così una perdita di informazione inaccettabile. Il diagramma 3PARD quindi, per come è stato definito, non risulta sostanzialmente utilizzabile ai fini della separazione multi-banda.

5 ALGORITMI PER IL RICONOSCIMENTO AUTOMATICO DEI CLUSTER

5.1 Generalità

Nel seguente capitolo verranno introdotti alcuni algoritmi per l'individuazione ed estrazione automatica dei cluster.

Tutti gli algoritmi qui presentati sono in grado di operare su insiemi di punti posti in spazi a due o più dimensioni e pertanto sono in linea di principio adatti ad essere utilizzati con diagrammi ottenuti dalla separazione multi-banda con un numero arbitrario di dimensioni oppure anche per diagrammi "tempo/frequenza equivalenti" descritti nei capitoli precedenti.

5.2 Tipologie di algoritmi di clustering

L'individuazione automatica dei cluster (o "clustering"), è un insieme di tecniche di analisi multivariata dei dati volte alla selezione e raggruppamento di elementi omogenei in un insieme di dati [81][82].

Generalmente gli algoritmi di clustering raggruppano gli elementi sulla base della loro distanza reciproca, e quindi l'appartenenza o meno ad un insieme dipende da quanto l'elemento preso in esame è distante dall'insieme stesso.

Le tecniche di clustering si possono suddividere nelle seguenti categorie principali:

- **Partitional clustering: (Clustering Partitivo)**

In questo tipo di algoritmi iterativi per definire l'appartenenza ad un gruppo viene utilizzata una distanza da un punto rappresentativo del cluster (ad esempio il punto chiamato centroide, o baricentro del cluster), avendo inizialmente prefissato il numero di gruppi della partizione risultato.

Gli algoritmi di clustering di questa famiglia creano una partizione delle osservazioni minimizzando una certa funzione detta "funzione di costo"

L'algoritmo più famoso appartenente a questa famiglia è il cosiddetto "k-means".

Un altro algoritmo appartenente a questa classe è il Partitioning Around Mediod (PAM) (altrimenti noto anche come algoritmo "k-mediod").

- **Hierarchical algorithms (Clustering Gerarchico)**

Crea una decomposizione gerarchica degli oggetti sulla base di determinati criteri.

Tale gerarchia è rappresentabile mediante una serie di grafici ad albero (chiamati dendrogrammi), in cui sono schematizzati i passi di accorpamento e divisione dei singoli gruppi.

Le tecniche di clustering gerarchico non producono una semplice suddivisione dei punti in famiglie omogenee, ma una rappresentazione gerarchica dove i singoli cluster sono annidati, e organizzati all'interno di un albero gerarchico.

- **Density-based algorithms** (clustering basato su funzioni di densità degli oggetti)

Nel clustering density-based, il raggruppamento avviene analizzando l'intorno di ogni punto dello spazio. In particolare, viene considerata la densità di punti in un intorno di raggio fissato [83][84].

E' possibile suddividere ulteriormente le tecniche di clustering basandosi sulla possibilità che un elemento possa o meno essere assegnato a più cluster:

- **Hard clustering (Clustering esclusivo)**

Per questo tipo di algoritmi ciascun elemento può essere assegnato ad uno ed ad un solo gruppo. I cluster risultanti, quindi, non possono avere elementi in comune

- **Fuzzy clustering (Clustering non-esclusivo)**

Basati sulla logica Fuzzy, in questo tipo di clustering un elemento può appartenere a più cluster con diverso grado di appartenenza (espresso con un valore compreso tra 0 ed 1).

Questo approccio è noto anche con il nome di Soft Clustering

Si definisce infine “**Clustering parziale**” (opposto del “**Clustering completo**”) quello che realizza la clusterizzazione solo di una parte dei punti. Questo tipo di clustering è particolarmente indicato nei casi dove la quantità di rumore è significativa (come appunto il caso della misura delle SP) poiché è possibile evidenziare ed eliminare dei punti che risultano non appartenenti ad alcun cluster.

La caratteristica organizzazione dei cluster negli algoritmi gerarchici, sebbene sia utile ed ampiamente sfruttata in diversi ambiti, non è adatta per l'individuazione dei clusterizzazione per i sistemi di misura di SP, per cui si è scelto di utilizzare solamente gli algoritmi di clustering partitivo e quelli basati sulla densità.

5.3 Algoritmo di clustering - “K-means”

Questo tipo di clustering partitivo è basato su un metodo iterativo di ricerca euristico (ovvero di ricerca di un minimo locale) ed in particolare cerca di suddividere gli elementi in modo che siano il più vicini possibile tra loro se appartengono allo stesso cluster e il più distanti possibile dagli elementi degli altri cluster.

Ogni cluster è definito dagli elementi che lo compongono e da un centro (chiamato “centroide”). Il centroide di ogni cluster è il punto per il quale la somma delle distanze rispetto a tutti i punti del cluster è minimizzata.

L’algoritmo k-means, utilizzando un algoritmo iterativo, minimizza la somma delle distanze di ogni elemento rispetto al centroide del proprio cluster.

I passaggi principali dell’algoritmo sono schematicamente presentati in seguito:

- *Inizializzazione*
Viene inizialmente richiesto di fornire all’algoritmo il numero “k” di cluster da trovare. L’algoritmo determina (generalmente) in maniera casuale “k” punti che rappresentano i centroidi iniziali del cluster
- *Ciclo*
 - Fase 1)
Viene assegnata l’appartenenza di ciascun elemento al cluster corrispondente al centroide più vicino
 - Fase 2)
Vengono ricalcolati i centroidi (come punto tale per cui la somma delle distanze rispetto a tutti i punti del cluster è minimizzata)
- *Fine del ciclo*
Condizione verificata quando la variazione degli assegnamenti (descritti in fase 1) risulta inferiore ad un valore limite di convergenza impostato.

I punti di forza di questo algoritmo sono la possibilità di essere utilizzato anche su un elevato numero di punti, risultando uno degli algoritmi di clusterizzazione più veloci.

I punti di debolezza sono sostanzialmente due:

E’ necessario assegnare inizialmente il numero di cluster, cosa che nell’applicazione per l’analisi e la separazione delle SP è molto scomoda in quanto prevedrebbe un intervento manuale o l’utilizzo di algoritmi per la stima della numerosità dei cluster (poco efficienti e gravosi dal punto di vista computazionale).

Inoltre è un algoritmo iterativo di minimizzazione che alcune volte può convergere su un minimo locale (invece che sul minimo globale) ottenendo soluzioni sostanzialmente errate.

Essendo un algoritmo di clusterizzazione totale (e non parziale), come detto in precedenza, non è in grado di gestire i punti non appartenenti ad alcun cluster tipicamente generati da rumore esterno e pertanto da rigettare invece di includerli nei cluster adiacenti

Nelle figure riportate in seguito sono presentate una sequenza di iterazioni che, a seguito di una differente scelta (casuale) dei punti iniziali, convergono verso una soluzione di partizionamento corretto in Fig. 5.1 oppure erroneo di Fig. 5.2.

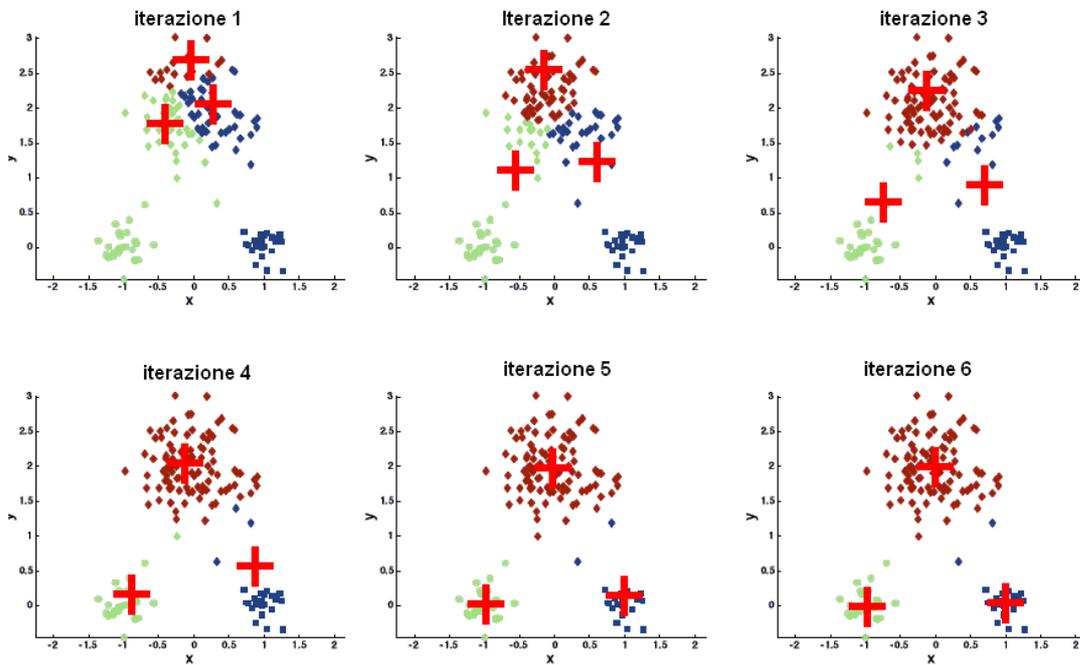


Fig. 5.1 – Esempio di convergenza corretta dell’algoritmo k-means

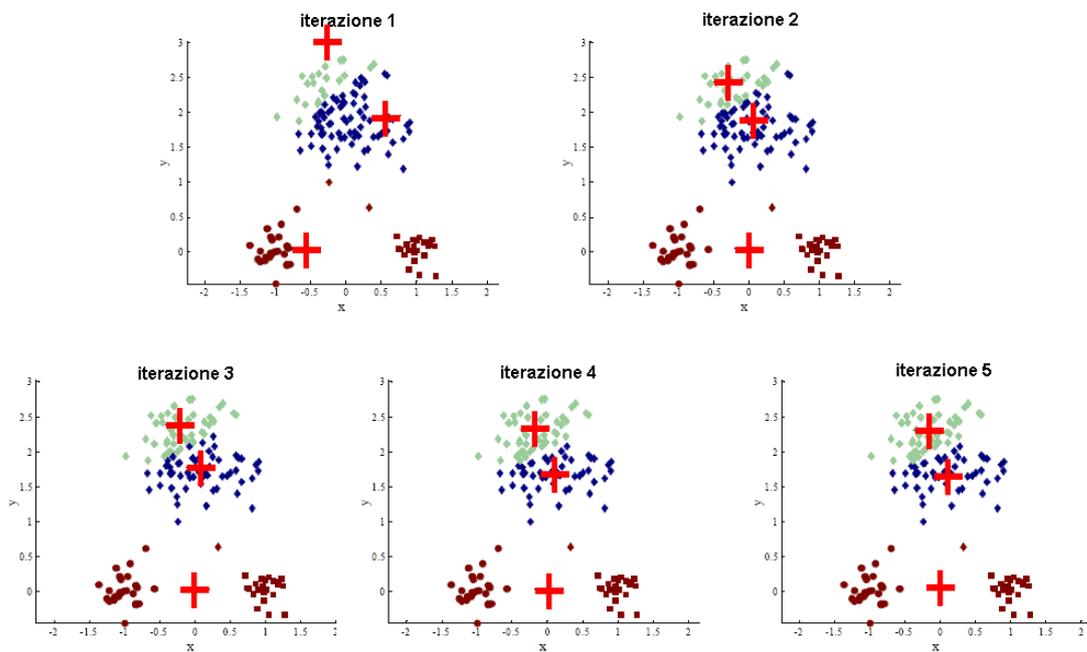


Fig. 5.2 – Esempio di erronea convergenza dell’algoritmo k-means

5.4 Algoritmo di clustering - “C-means”

Questo algoritmo, originariamente introdotto da Bezdek [83] è una estensione (in logica fuzzy) dell’algoritmo k-means descritto in precedenza.

In particolare si differenzia per il fatto che, pur procedendo iterativamente in maniera analoga all’algoritmo precedente, utilizzando però la logica Fuzzy, tiene conto non soltanto dell’appartenenza di un punto ad uno specifico cluster, ma anche al suo grado di appartenenza, tramite un valore (utilizzato come “peso”), che risulta compreso tra zero ed uno. Grazie a questo accorgimento questo algoritmo risulta avere caratteristiche di convergenza e precisione mediamente migliori del k-means a scapito però di una complessità maggiore.

Rimane comunque il grosso limite di dover preassegnare nella fase iniziale un numero di cluster. Inoltre l’algoritmo è anche in questo caso di tipo a “clusterizzazione totale”, che lo rende poco adatto in casi con un numero elevato di punti dovuti al rumore che non appartenerebbero a nessun cluster ed andrebbero rimossi.

5.5 Algoritmo di clustering basato sulla densità - “dbscan”

Come accennato in precedenza per questo tipo di algoritmi viene considerata la densità di punti in un intorno di raggio fissato. Pertanto i punti risultano “connessi”, ovvero assegnati allo stesso cluster, sulla base della densità di punti nel loro intorno. [84][85].

Le caratteristiche principali di questo algoritmo sono estremamente importanti per l’applicazione nei sistemi per la separazione dei cluster di SP.

- non ha bisogno dell’indicazione numero di cluster in ingresso
- è in grado di gestire elementi spuri indotti da rumore esterno ed escluderli automaticamente dalla clusterizzazione (algoritmo a clusterizzazione parziale)
- è in grado di scoprire cluster di forma arbitraria (potendo quindi essere usato anche per dati che non sono semplicemente addensati nell’intorno di centroidi)

Risulta però generalmente più lento dei due algoritmi proposti in precedenza.

In ingresso l’algoritmo *dbscan* richiede due parametri:

- Eps: determina il “raggio di vicinato” di un certo elemento
- MinPts: Minimo numero di elementi all’interno di un certo raggio Eps

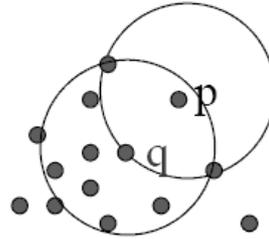
Sulla base di questi parametri l’algoritmo definisce tre tipologie di elementi:

Elemento direttamente adiacente (Directly density-reachable – DDR):

Un generico elemento p è DDR da un punto q rispetto a $(Eps, MinPts)$ se:

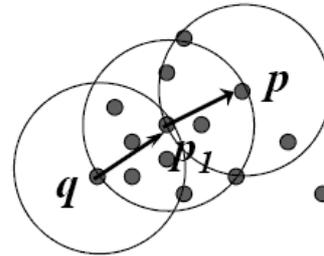
p risulta entro il raggio EPS di q

q è un elemento “core”, ovvero: il numero di punti nell’intorno Eps di q è maggiore del parametro MinPts



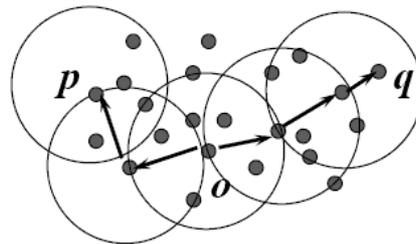
Elemento adiacente (Density-reachable - DR):

Un generico elemento p è DR da un punto q se esiste una catena di punti p_1, \dots, p_n tali che p_{i+1} è DDR da p_i dove $p_1 = q$ e $p_n = p$



Elemento connesso (Density-connected- DC):

Un generico elemento p è DC da un punto q se esiste un elemento o tale che sia p che q risultino DR da o



Elemento “core”

Elemento che ha un numero minimo di punti (MinPts) all’interno del suo raggio Eps (Questi elementi saranno i punti interni di un cluster)

Elemento “border”

Elemento che ha meno di MinPts elementi all’interno del suo raggio Eps, ma esso che comunque è un “vicino” di un elemento “core”

Elemento “noise”

E’ un elemento che non può essere classificato né come “core” e né come “border”.

Definiti questi tipi di elemento l’algoritmo procede nel seguente modo:

Inizialmente viene scelto arbitrariamente l’elemento iniziale p

- Se p risulta un elemento “core”, individua tutti i punti DR da p , e forma un cluster

- Aggiungi al cluster di p tutti gli elementi DDR
- Controlla ricorsivamente se tali punti sono a loro volta core, ecc.
- Unisci via via gli elementi DR
- Se da p raggiungi un punto border p'
 - nessun punto è DR da p'
 - per cui passa a considerare un altro punto del database non ancora considerato
- Continua fino alla completa analisi di tutti gli elementi

L'efficacia dell'algoritmo è mostrata nell'esempio di Fig. 5.3 dove la tecnica ha permesso di individuare efficacemente cluster in una situazione particolarmente complessa, con anche una significativa presenza di rumore.

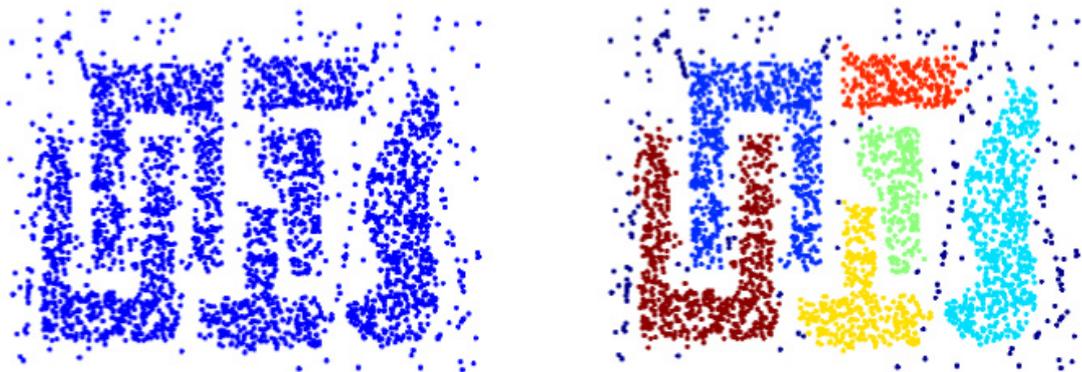


Fig. 5.3 – Esempio di applicazione dell'algoritmo dbscan

6 SVILUPPO DI UN SISTEMA PROTOTIPO PER LA MISURA DELLE SP A BANDA ULTRA LARGA

6.1 Descrizione del sistema

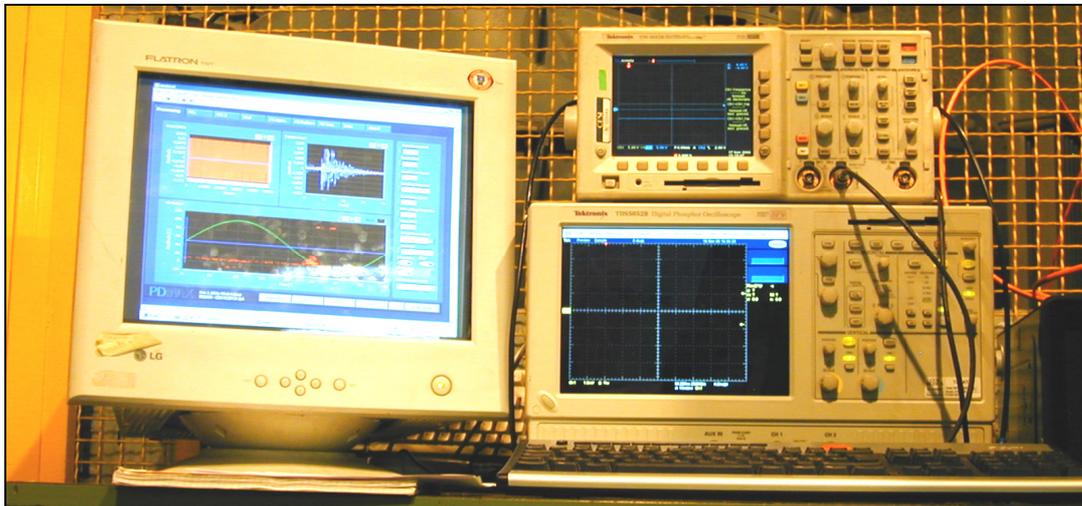


Fig. 6.1 - Sistema prototipo per la misura delle SP a banda ultra larga

Nell'ottica di sviluppare metodologie avanzate per la valutazione del degrado dell'isolamento dei componenti elettrici, verificando nel contempo la strumentazione attualmente disponibile e introducendo miglioramenti agli algoritmi di elaborazione dei dati, è stato realizzato un sistema prototipale per la misura delle SP, flessibile (in termini di modularità e scalabilità) ed aperto.

Il sistema è stato predisposto per fare misure di scariche parziali calcolando, per ciascun impulso, la quantità di carica e la posizione dell'impulso rispetto alla tensione sinusoidale di riferimento applicata all'oggetto in prova (pattern).

Il sistema implementa fra le altre funzionalità, un modulo per la riduzione del rumore tramite applicazione di filtri digitali passa-banda, un modulo per la funzione di separazione multi-banda ed uno per la separazione tempo/frequenza equivalenti (algoritmi descritti nei capitoli precedenti).

Il sistema di misura, presentato in Fig. 6.1, è essenzialmente costituito da tre parti (si veda lo schema di Fig. 6.2):

1. Digitalizzatore N.1 (oscilloscopio o scheda di acquisizione) ad ampia banda (>100MHz)
2. Digitalizzatore N.2 (oscilloscopio o scheda di acquisizione) preposto all'acquisizione della tensione applicata al componente in prova
3. PC su cui viene eseguito il software di elaborazione e controllo

Il digitalizzatore ad ampia banda (>100MHz) è preposto al campionamento ed acquisizione dei segnali di scarica parziale con frequenze di campionamento elevate in modo da poter registrare i singoli impulsi con una risoluzione sufficiente per poi poterne calcolare (mediante integrazione numerica) la carica ed i parametri di forma.

In questo caso è stato utilizzato l'oscilloscopio Tektronix TDS5052B (2 canali a 500MHz di banda e 2GS/s di campionamento) che consente di effettuare acquisizioni in modalità "a memoria segmentata" (si veda il punto 6.3) permettendo di acquisire fino a 4000 impulsi con una risoluzione di 500 campioni per impulso.

Come digitalizzatore preposto all'acquisizione della tensione applicata al componente in prova viene utilizzato un oscilloscopio Tektronix TDS 430A con campionamento a 10kS/s. Oltre a registrare la tensione applicata questo componente è dedicato ad acquisire un segnale di trigger proveniente dal digitalizzatore ad ampia banda al fine di sincronizzare i segnali di scarica parziale acquisiti con la tensione applicata all'oggetto in prova.

Il software di elaborazione e controllo risiede invece su un PC connesso, mediante interfaccia GPIB, ai due oscilloscopi. Il software scarica ed elabora i dati provenienti dai due acquisitori presentando graficamente il risultato dell'elaborazione.

Il funzionamento del sistema è schematicamente rappresentato in Fig. 6.3.

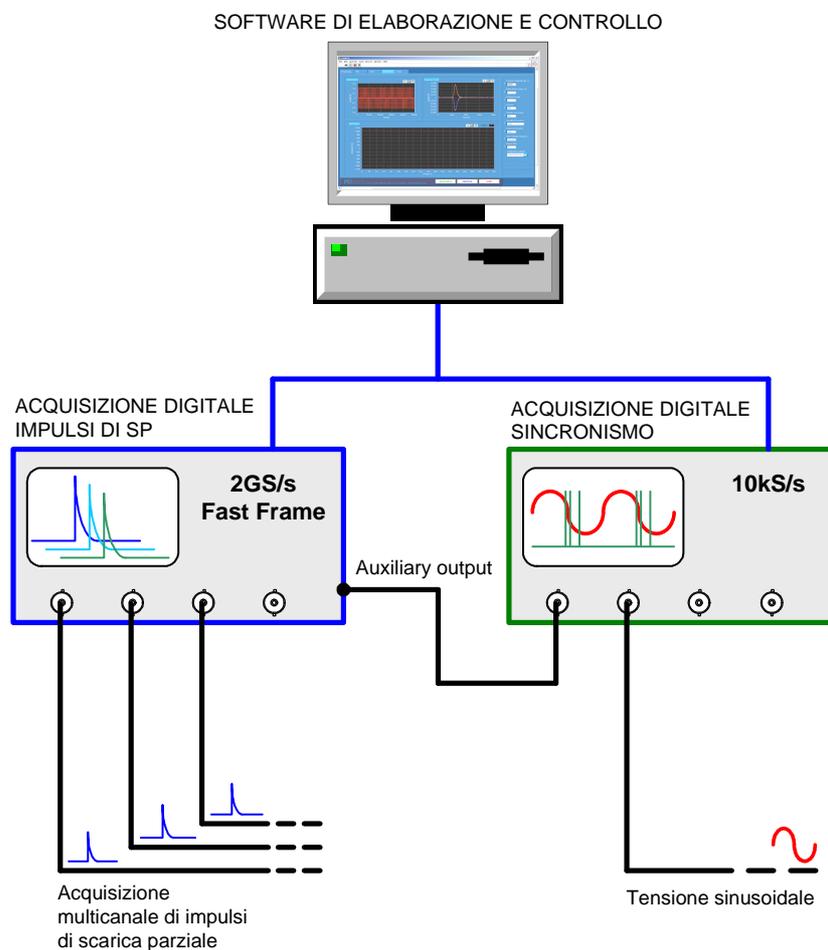


Fig. 6.2 - Rappresentazione schematica del sistema

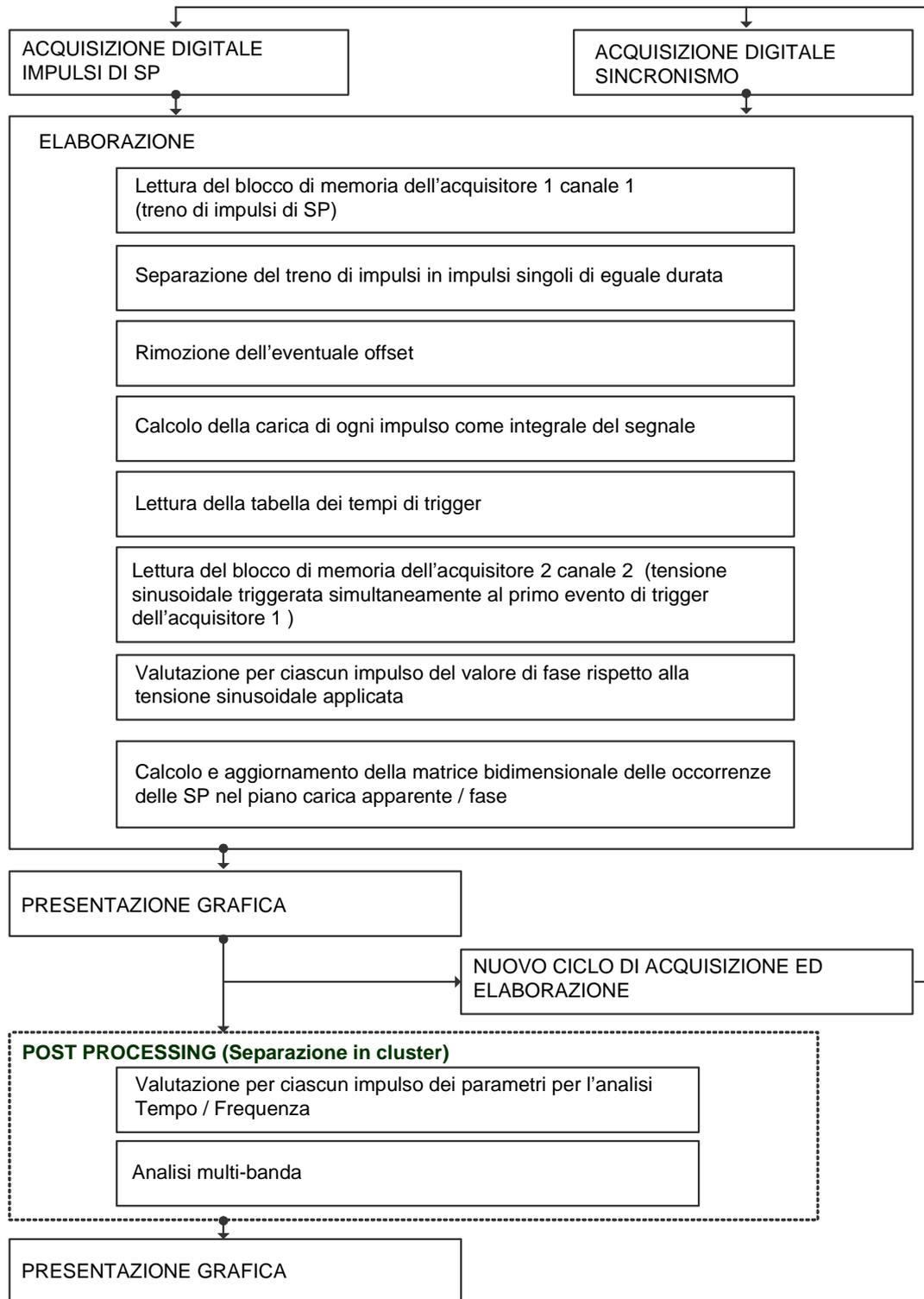


Fig. 6.3 - Schema di funzionamento del sistema

6.2 Interfaccia utente

In Fig. 6.4 viene presentata la schermata principale del software di controllo ed elaborazione dati.

La schermata presenta quattro aree:

- 1) "Raw data" - è la copia dei dati "grezzi" scaricati dalla memoria dell'oscilloscopio e non ancora elaborati
- 2) "Impulse Graph" - qui vengono visualizzati insieme tutti gli impulsi acquisiti per poter valutare la bontà dell'acquisizione e la loro forma
- 3) "PD Pattern" - una volta calcolata la carica e la fase per ciascun impulso qui viene presentata la distribuzione delle scariche parziali acquisite.
- 4) "Input area" - Qui vengono inseriti dall'utente i diversi parametri necessari per l'elaborazione.

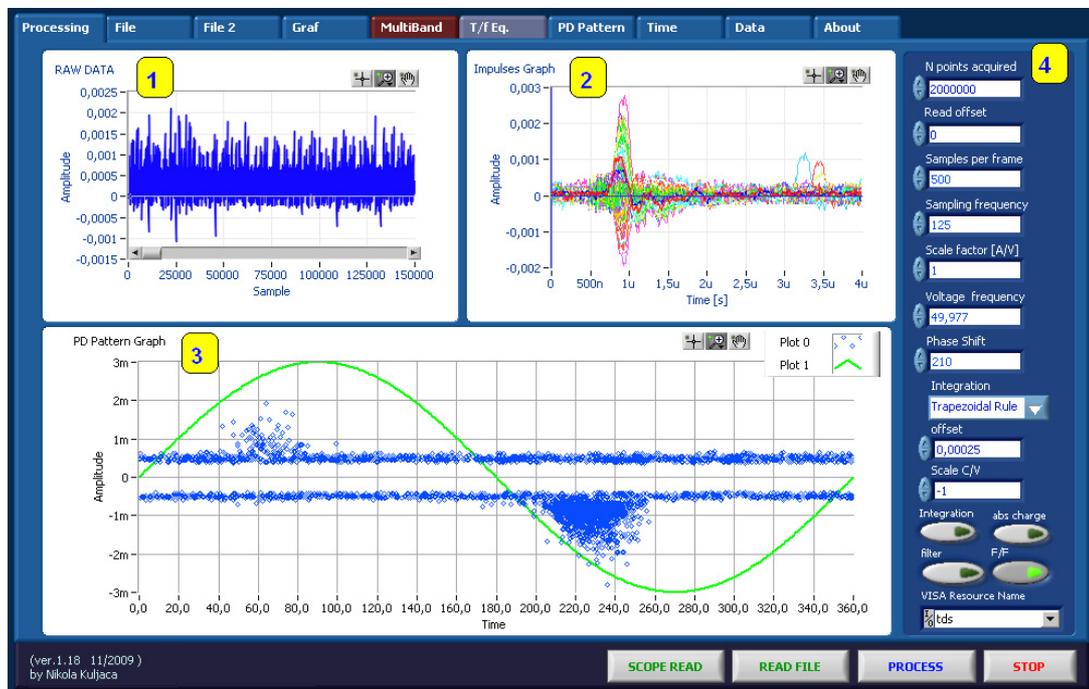


Fig. 6.4 - Schermata principale software del sistema

6.3 Il campionamento di segnali con digitalizzatori a memoria segmentata

Data la sua banda tipicamente molto ampia, per poter acquisire con un numero di campioni significativo, un singolo impulso di scarica parziale, è necessario impostare il digitalizzatore ad una frequenza di campionamento molto elevata (> 500 MS/s).

Considerando però che la memoria disponibile dei sistemi di acquisizione è limitata (tipicamente fino a qualche decina di Mb di dati per canale) risulterebbe impossibile acquisire in sequenza più di qualche impulso con una singola acquisizione.

Tale problema può essere risolto utilizzando una caratteristica degli acquisitori avanzati, ovvero la capacità di segmentare la memoria disponibile in diversi blocchi di eguale dimensione (si veda la rappresentazione schematiche di Fig. 6.5).

Impostato un livello di trigger ed innescando l'acquisizione, il digitalizzatore, individuando il primo impulso di scarica parziale (che supera il livello di trigger impostato) lo salva nel primo blocco di memoria disponibile e reimposta il trigger (in un tempo che può considerarsi trascurabile relativamente all'applicazione) in modo da essere pronto ad acquisire l'impulso successivo posizionandolo nel seguente blocco di memoria disponibile.

In un'apposita tabella vengono indicati i tempi trascorsi tra il primo evento di trigger e quelli successivi. Questa tabella (una volta noto il tempo del primo evento di trigger rispetto alla tensione applicata) viene utilizzata per poter ottenere per ciascun impulso l'esatta collocazione temporale rispetto alla tensione applicata. Questa modalità permette quindi di acquisire gli impulsi di scarica parziale alla massima frequenza di campionamento e banda disponibili dal sistema, ottimizzando parallelamente lo sfruttamento della memoria disponibile.

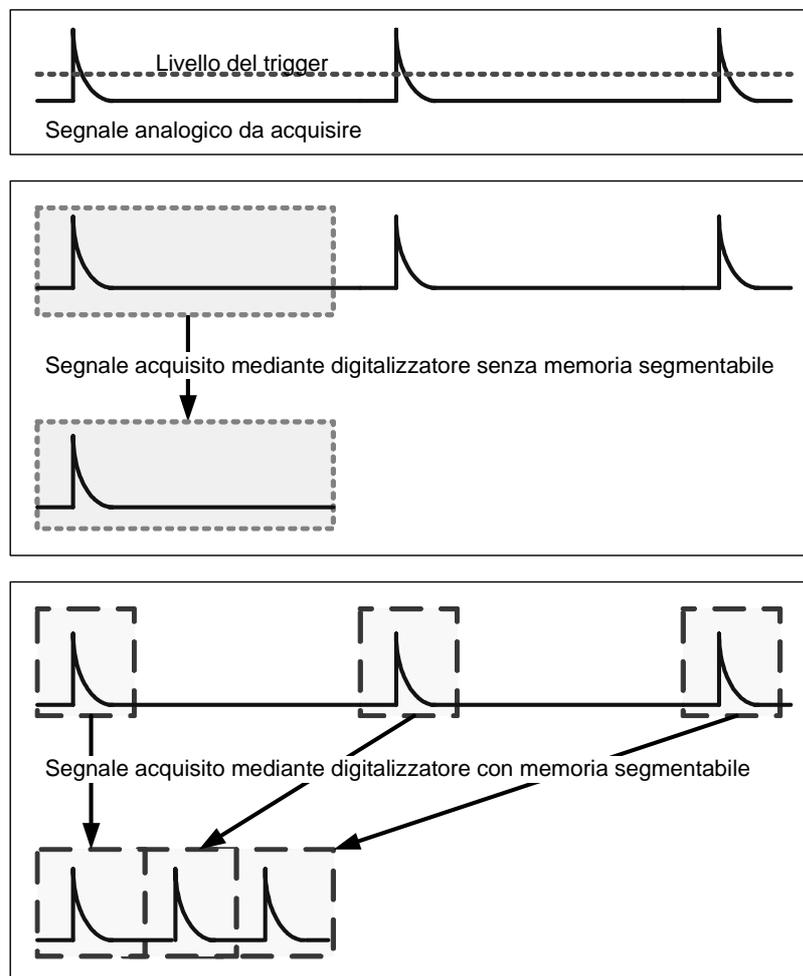


Fig. 6.5 - Acquisizione di segnali mediante digitalizzatori con memoria segmentabile

6.4 La distribuzione delle scariche ed il problema del sincronismo

Come già accennato il sistema calcola, per ciascun impulso, la quantità di carica (come integrale numerico dell'impulso di scarica parziale campionato) e la posizione dell'impulso rispetto alla tensione sinusoidale di riferimento applicata all'oggetto in prova.

Per fare questo, nel sistema qui descritto, viene utilizzato un secondo oscilloscopio (digitalizzatore N.2) preposto all'acquisizione (attraverso un trasduttore) della tensione applicata sul suo canale 2 mentre sul canale 1 vengono applicati i segnali (tipicamente brevi impulsi di tensione) generati per ogni evento di trigger dall'uscita trigger del digitalizzatore N.1 (come presentato in Fig. 6.6). In questo modo si ha una diretta correlazione temporale tra i segnali di scarica parziale acquisiti dal digitalizzatore N.1 e la tensione applicata acquisita dal digitalizzatore N.2.

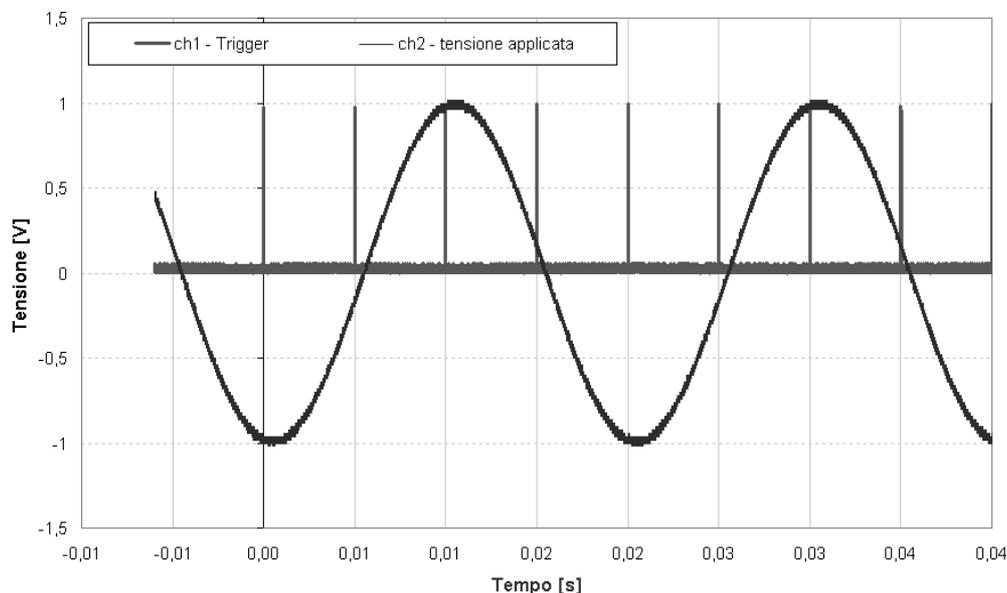


Fig. 6.6 - Acquisizione degli impulsi di trigger (ch1) e dei segnali della tensione applicata (ch2) da parte del digitalizzatore N.2

6.5 Funzionalità avanzate del software di controllo ed elaborazione dati

Oltre alle funzionalità di misura delle scariche parziali e rappresentazione del pattern associato il software presenta diverse funzionalità di elaborazione avanzata dei segnali.

6.5.1 Applicazione di filtri digitali

Per ridurre l'incidenza del rumore o comunque per mettere in rilievo alcune parti dello spettro dei segnali rispetto ad altre, il software mette a disposizione un modulo per la presentazione degli spettri di tutti i segnali di SP nel quale è possibile applicare filtri digitali passa banda di caratteristiche arbitrarie. Ad esempio dalle schermate di Fig. 6.7, Fig. 6.8 e

Fig. 6.9 è possibile vedere come l'applicazione di un filtro passa banda ha permesso di migliorare nettamente il rapporto segnale rumore attenuando sostanzialmente i segnali dovuti al rumore esterno (individuabili facilmente nel pattern in quanto non in fase con la tensione di alimentazione) rispetto ai segnali di SP dovuti ad un difetto interno all'isolamento del componente (nell'esempio in questione si trattava di un difetto in un giunto di un cavo MT).

6.5.2 Separazione multi banda

Questo modulo permette di realizzare una separazione dei segnali di SP appartenenti a sorgenti diverse attraverso la creazione di un opportuno diagramma bidimensionale (come descritto nel capitolo 3). Il modulo consente di visualizzare gli spettri di tutti i segnali acquisiti e l'utente può posizionare due filtri digitali passa-banda (tipicamente la scelta più opportuna sarà in corrispondenza di valori di picco dello spettro in modo da evidenziare le parti di segnale utile rispetto al rumore, come realizzato nell'esempio di Fig. 6.10).

A questo punto viene presentata la schermata di Fig. 6.11 dove è possibile vedere (a sinistra) il diagramma bidimensionale con i cluster da selezionare tramite appositi cursori e (a destra) il pattern corrispondente alla selezione.

Nelle Fig. 6.12 e Fig. 6.13 si può vedere come il metodo ha consentito la corretta individuazione e la separazione dei segnali appartenenti a due sorgenti di SP (ovvero una sorgente ed una serie di segnali dovuti a rumore esterno).

Il modulo consente di visualizzare sia i pattern del sottoinsieme degli impulsi del cluster scelto, che i relativi spettri e le forme d'onda corrispondenti Fig. 6.14 e Fig. 6.15).

6.5.3 Separazione tempo/frequenza equivalenti

In questo modulo invece è stata implementata la metodologia di separazione basata sui parametri tempo e frequenza equivalenti (come descritto nel capitolo 3).

Il modulo presenta la schermata di Fig. 6.16 dove è possibile vedere (a sinistra) il diagramma tempo/frequenza equivalenti con i cluster che è possibile selezionare tramite appositi cursori e (a destra) il pattern corrispondente alla selezione.

Nelle Fig. 6.17 e Fig. 6.18 si può vedere come per l'esempio considerato anche questo metodo abbia consentito la corretta individuazione e la separazione dei segnali appartenenti a due sorgenti di SP. Il modulo consente la visualizzazione sia del pattern corrispondente al sottoinsieme degli impulsi del cluster selezionato, che i relativi spettri e le forme d'onda dei segnali.

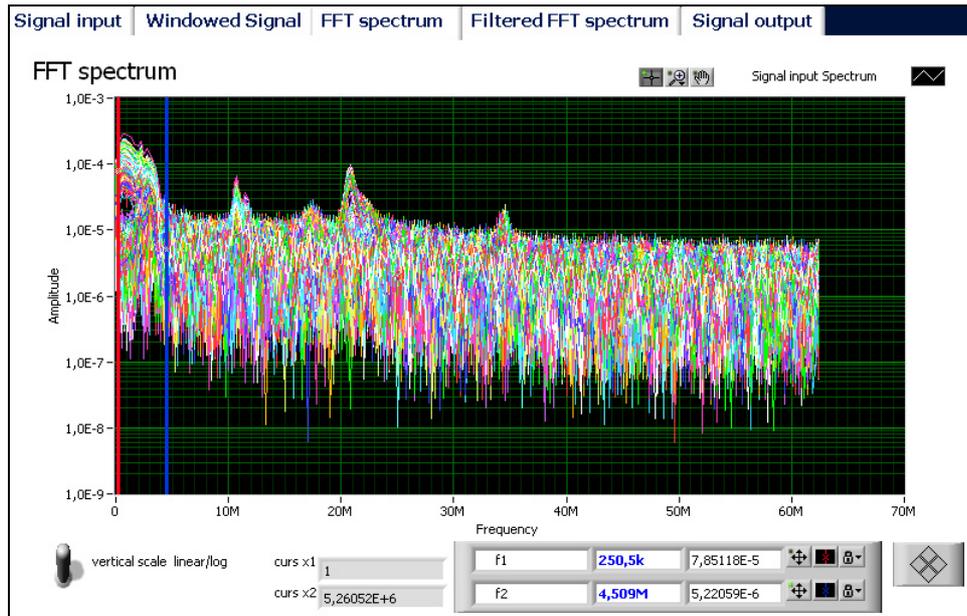


Fig. 6.7 – Esempio di utilizzo applicazione di un filtro digitale

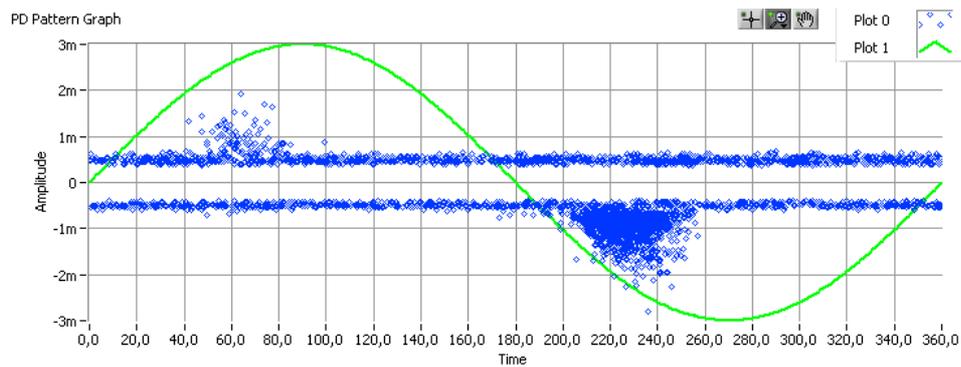


Fig. 6.8 – Segnali non filtrati

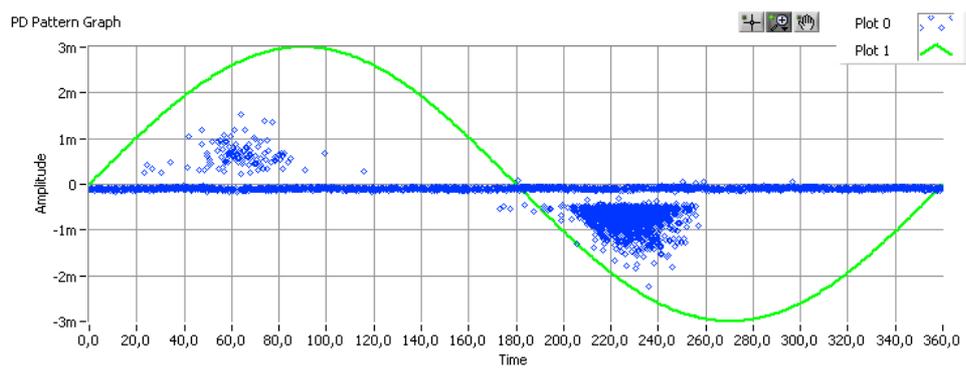


Fig. 6.9 – Segnali filtrati

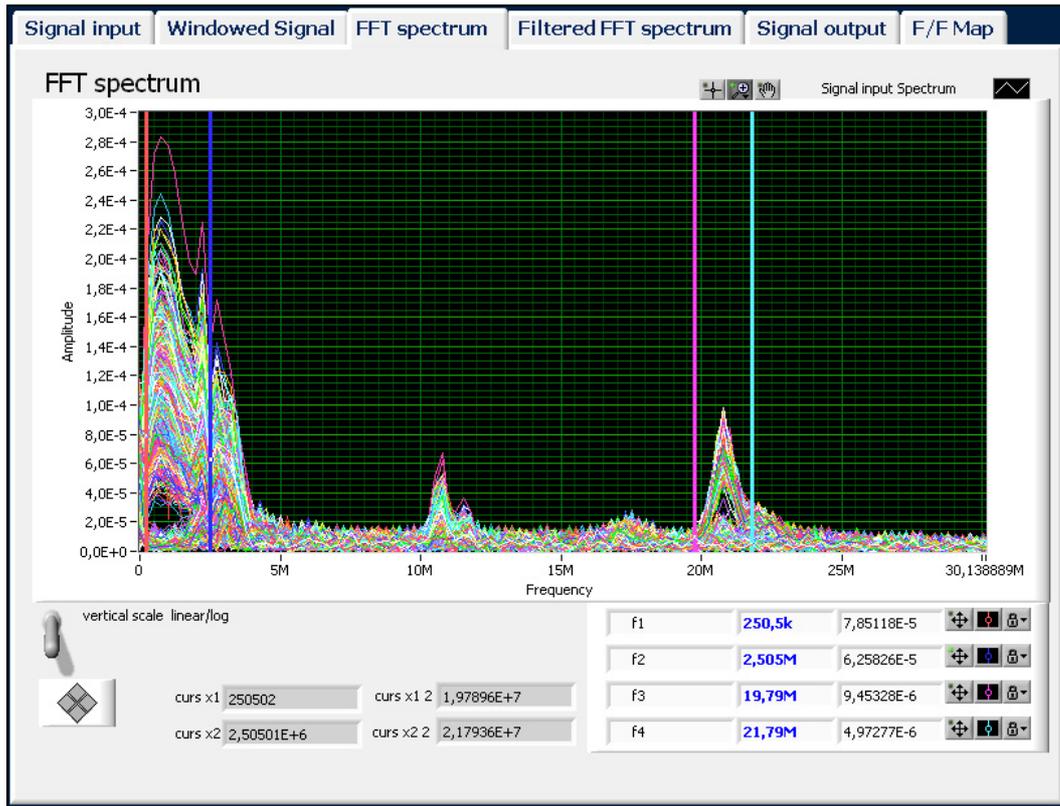


Fig. 6.10 – Esempio di utilizzo del modulo per la “separazione multi-banda” – selezione di due bande di frequenza in corrispondenza dei massimi dello spettro dei segnali

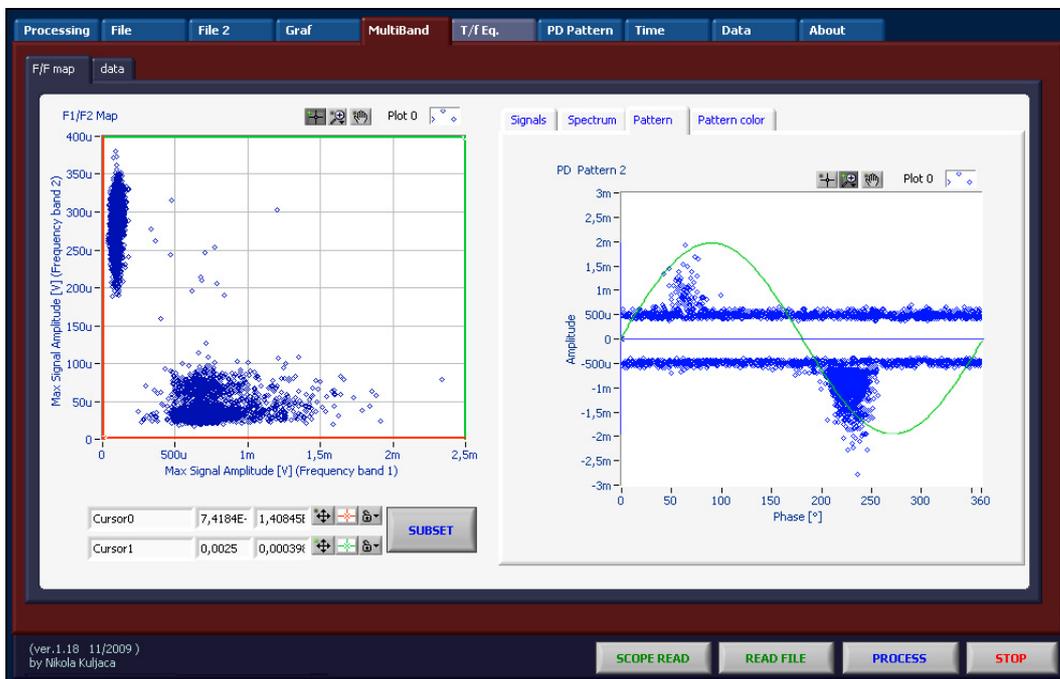


Fig. 6.11 – Esempio di utilizzo del modulo per la “separazione multi-banda”

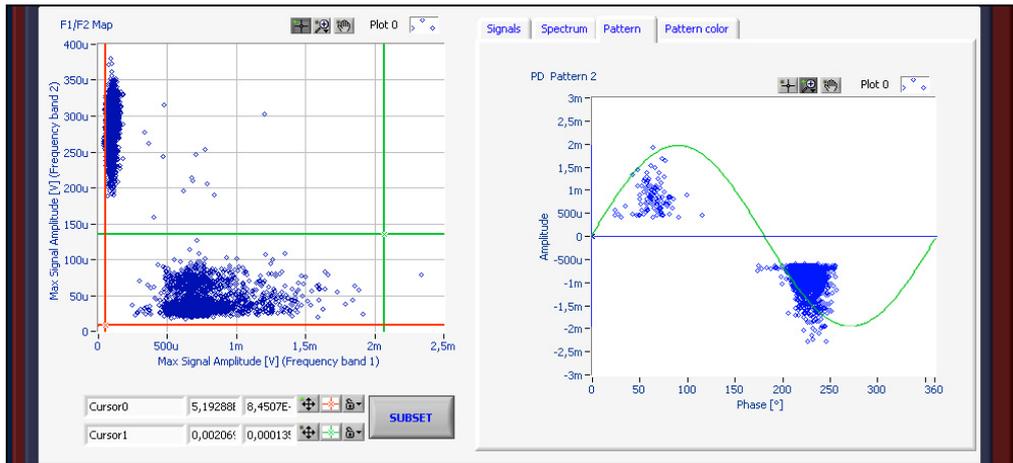


Fig. 6.12 – Selezione degli impulsi di SP del cluster N.1

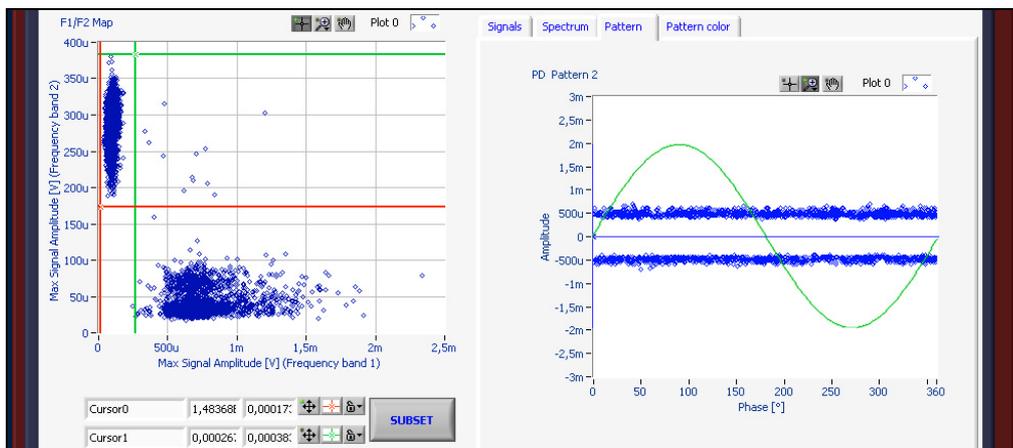


Fig. 6.13 – Selezione degli impulsi di SP del cluster N.2

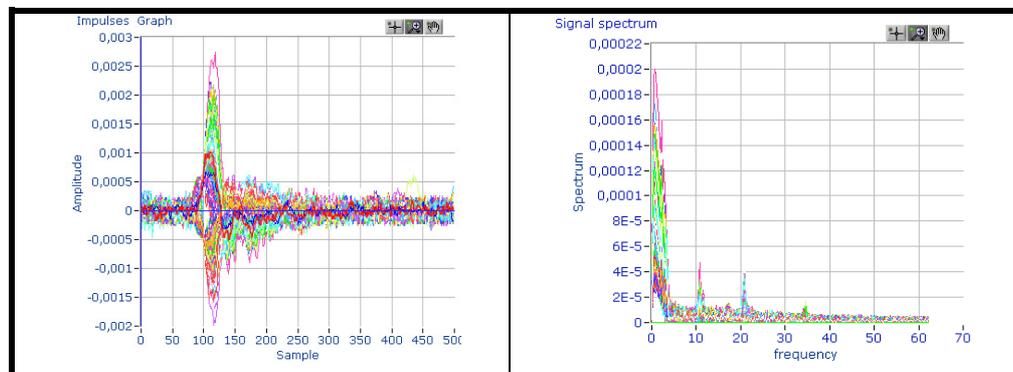


Fig. 6.14 – Selezione del cluster N.1 (Forme d'onda dei segnali e spettri)

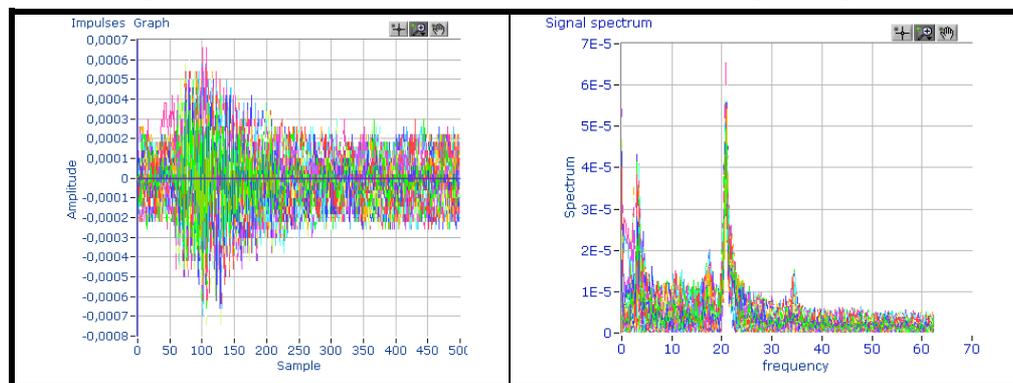


Fig. 6.15 - Selezione del cluster N.2 (Forme d'onda dei segnali e spettri)

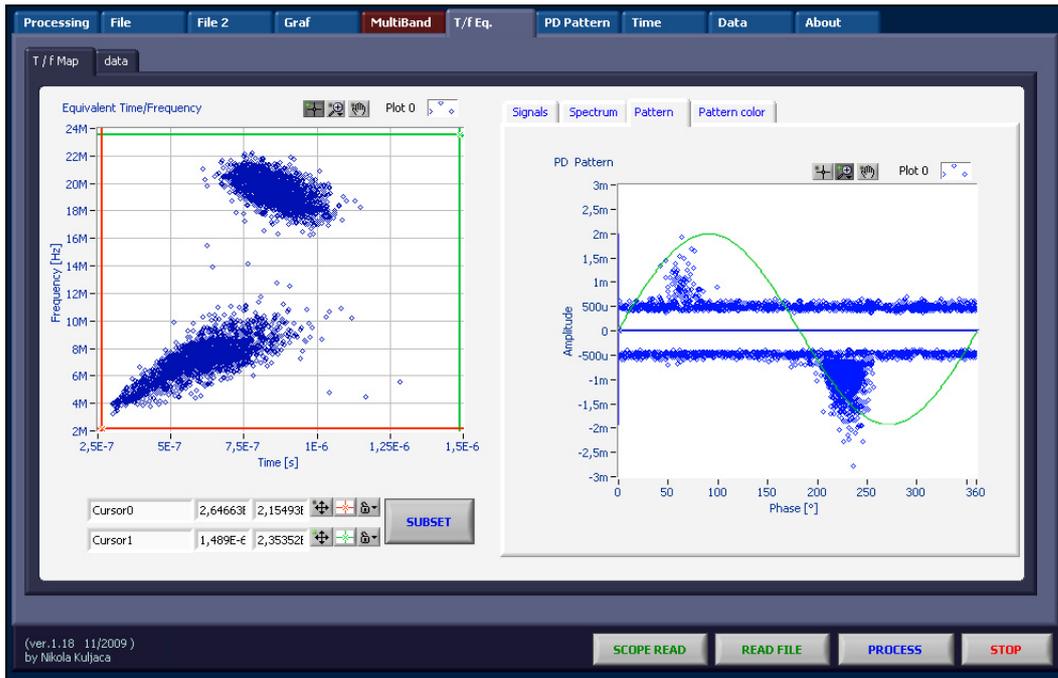


Fig. 6.16 – Esempio di utilizzo del modulo per la “separazione tempo/frequenza equivalenti”

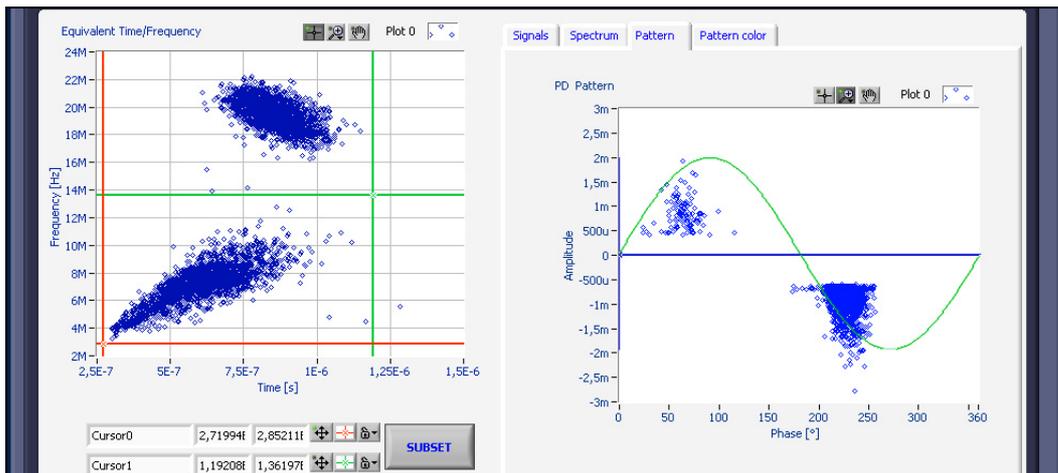


Fig. 6.17 – Selezione degli impulsi di SP del cluster N.1

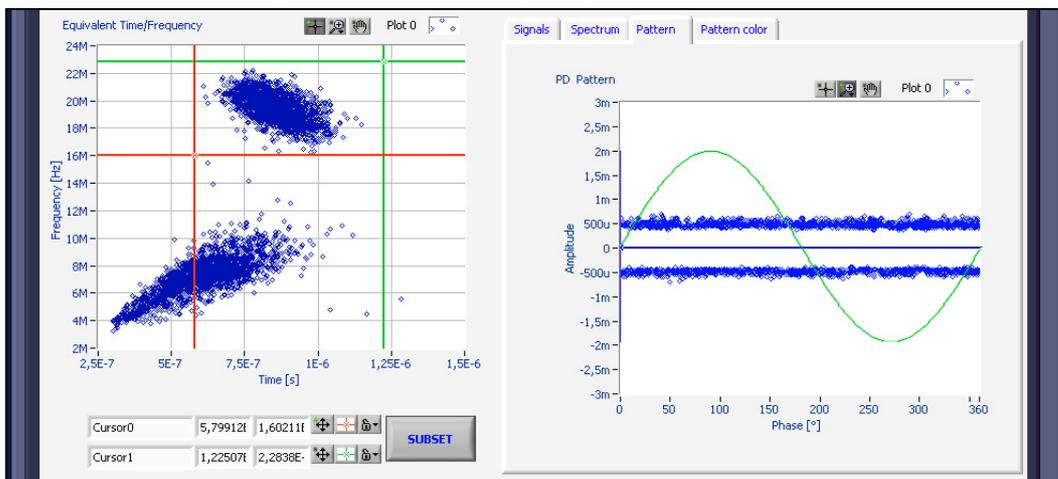


Fig. 6.18 – Selezione degli impulsi di SP del cluster N.2

6.6 Funzionalità ausiliarie del software

Oltre alle funzioni di base ed avanzate illustrate in precedenza, il software presenta diverse altre opzioni e funzioni ausiliarie. Ad esempio, per tutti i cluster è disponibile sempre anche la visualizzazione dei pattern a densità di colore (Fig. 6.19) e la visualizzazione tridimensionale della sequenza degli impulsi (Fig. 6.20) che può essere utile per verificare delle anomalie negli elementi del cluster oppure la presenza di eventuali trend.

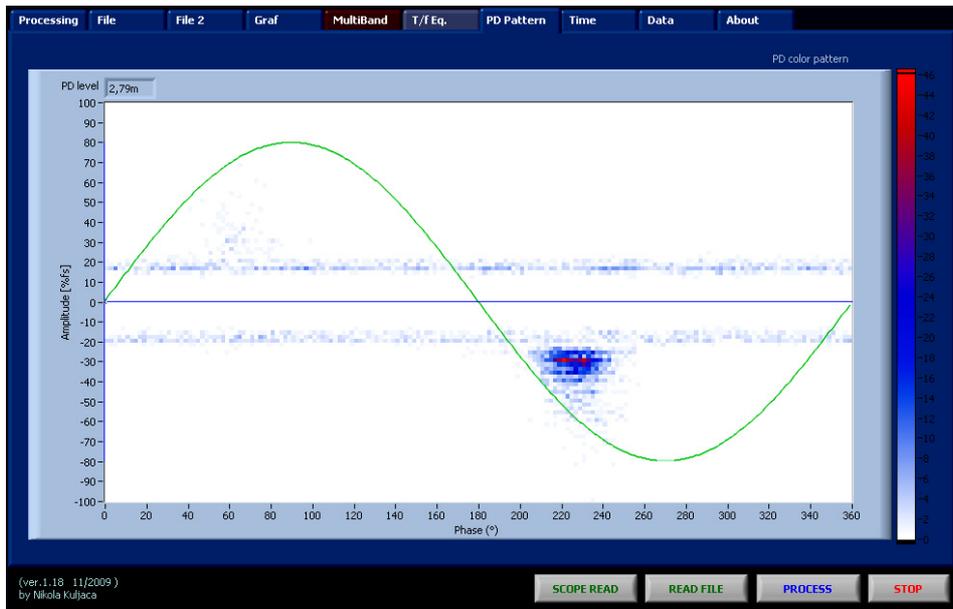


Fig. 6.19 – Visualizzazione di un pattern di SP a intensità di colore

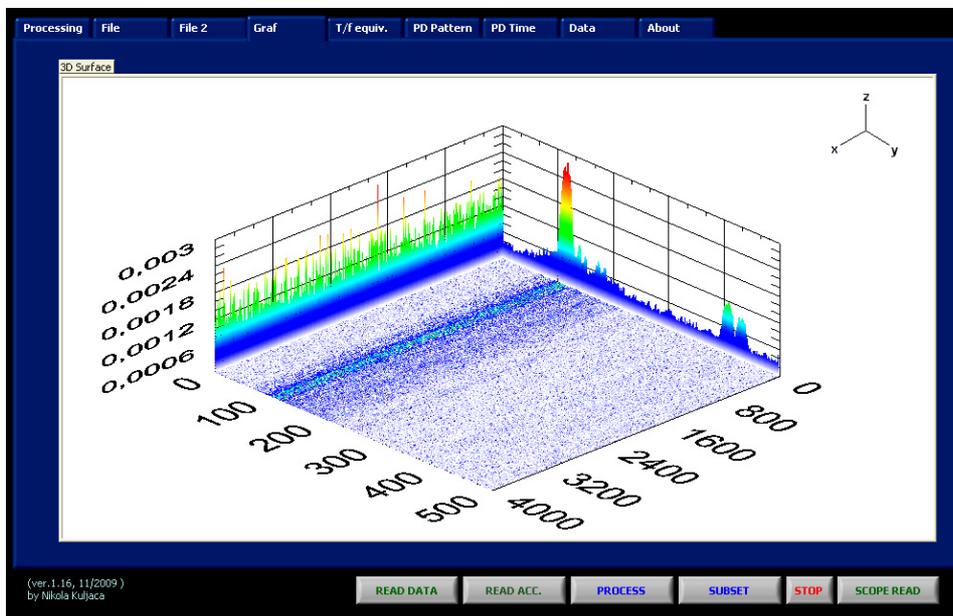


Fig. 6.20 – Visualizzazione 3D della sequenza di impulsi
(**x**: successione impulsi, **y**: campioni singolo impulso, **z**: ampiezza impulsi in V)

7 VERIFICA SPERIMENTALE DEI METODI E DEI SISTEMI PRESENTATI

In questo capitolo sono presentati i risultati di alcune prove sperimentali, allestite presso i laboratori di ERSE S.p.A. di Milano e del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova, su componenti elettrici invecchiati naturalmente ed artificialmente difettati, al fine di verificare la capacità dei sistemi di misura di SP e delle metodologie, introdotti nei capitoli precedenti, di effettuare la separazione dei segnali di SP provenienti simultaneamente da diverse sorgenti di SP, rispetto ai sistemi tradizionali (definiti nella norma IEC 60270).

Durante le prove sono stati utilizzati i seguenti sistemi di misura di SP:

Sistema "A": Sistema a banda stretta TETTEX mod. TE571.

Sistema "B": Sistema multiterminale OMICRON Mtronix mod. MPD600 (descritto nel Cap.4).

Sistema "C": Sistema prototipo a banda ultra larga (descritto nel Cap.6)

7.1 Prove su spezzone di cavo MV

Le caratteristiche dell'oggetto sono brevemente riassunte in seguito:

Cavo MT estruso con isolamento in EPR con giunto artificialmente difettato.

Tensione nominale: 12/20 kV

Lunghezza: 6m

Sezione: 185 mm²

Sullo spezzone di cavo è stato realizzato un giunto (Fig. 7.2) nel quale è stato inserito artificialmente un difetto mediante l'incisione del semiconduttore esterno (come descritto in Fig. 7.3)



Fig. 7.1 – Circuito di prova - Spezzone di cavo con giunto difettato artificialmente



Fig. 7.2 - Dettaglio del giunto con difetto artificiale

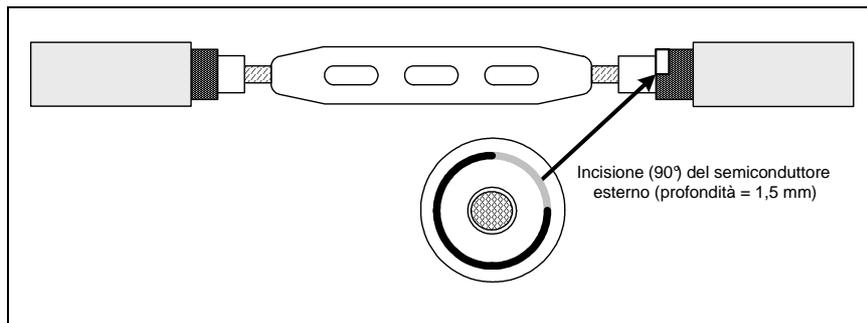


Fig. 7.3 - Descrizione del difetto realizzato nel giunto

Per generare la simultanea presenza di più sorgenti di scariche parziali, oltre a quelle generate dal difetto artificiale nel giunto, in prossimità dei terminali dello spezzone in prova, sono state aggiunte due punte (realizzate con del semplice filo metallico). Come si vede in Fig. 7.4 (a) una punta è lato alta tensione, mentre l'altra è stata realizzata lato terra (connettendo un filo allo schermo del cavo come mostrato in Fig. 7.4 (b)).

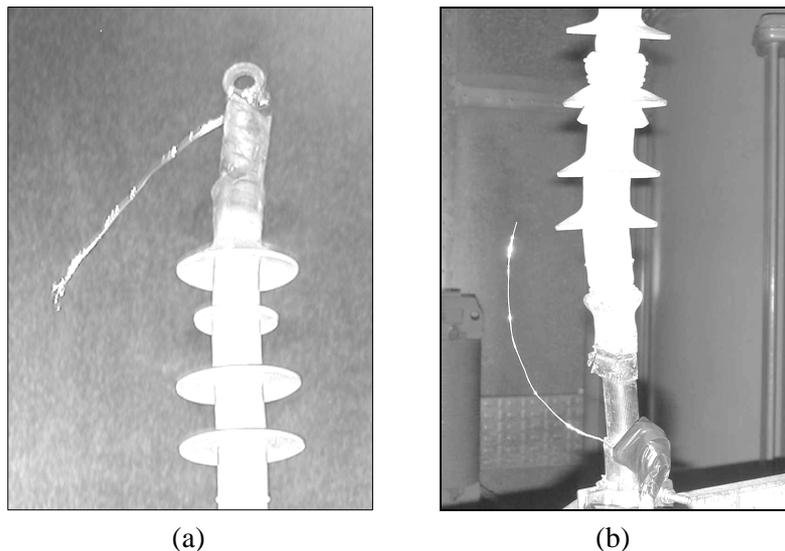
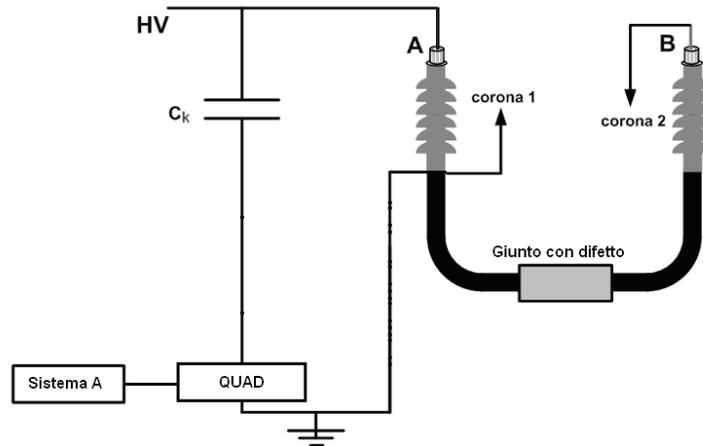


Fig. 7.4 - Foto dei terminali: (a) corona lato alta tensione, (b) corona lato terra

7.1.1 Misure con il sistema a banda stretta

7.1.1.1 Descrizione della prova



C_k - capacità dell'isolatore passante del trasformatore di alimentazione

QUAD – Quadripolo di accoppiamento

HV – Sorgente di alimentazione

Fig. 7.5 – Schema del circuito utilizzato per la misura con il sistema a banda stretta

La prova è stata realizzata mediante il sistema TETTEX TE571 (Fig. 7.6) presente nel laboratorio di ERSE S.p.A.. Si tratta di uno strumento preposto alla misura a banda stretta delle SP ed in particolare delle sole grandezze di base (carica apparente e tensione di innesco) in accordo con la IEC60270. Il sistema è stato connesso tramite un quadripolo di accoppiamento (Fig. 7.7) alla presa capacitiva del trasformatore di alimentazione.



Fig. 7.6 - Sistema TETTEX TE571



Fig. 7.7 - Quadripolo di accoppiamento del sistema TETTEX TE571

Sono state effettuate due misure alla tensione di alimentazione 13 kV.

- 1) Prova con il solo difetto nel giunto alla tensione di alimentazione di 13kV (sufficiente per far innescare le SP sul difetto artificiale nel giunto)
- 2) Come 1) ma con anche le due punte inserite (aggiungendo quindi l'effetto corona che notoriamente si manifesta con la comparsa di una distribuzione "a pettine" intorno a 270° per il corona lato alta tensione e 90° per il corona lato terra)

7.1.1.2 Analisi dei risultati

Come si può osservare dalle figure del paragrafo seguente il sistema presenta pattern di SP differenti per le due misure: solo difetto nel giunto (Fig. 7.8) e dopo l'aggiunta delle due sorgenti di tipo "corona" (Fig. 7.9).

L'aggiunta di corona (lato alta tensione) ha portato alla comparsa di una serie di segnali di SP (Fig. 7.9) disposti nell'intorno dei 270° in aggiunta al pattern dovuto al solo difetto interno (Fig. 7.8).

Come detto in precedenza però il sistema non è in grado di separare pattern di sorgenti multiple di SP, per cui dall'analisi del solo pattern di Fig. 7.9 non è di fatto possibile risalire in alcun modo né alla natura né tanto meno al numero delle sorgenti di SP.

7.1.1.3 Grafici

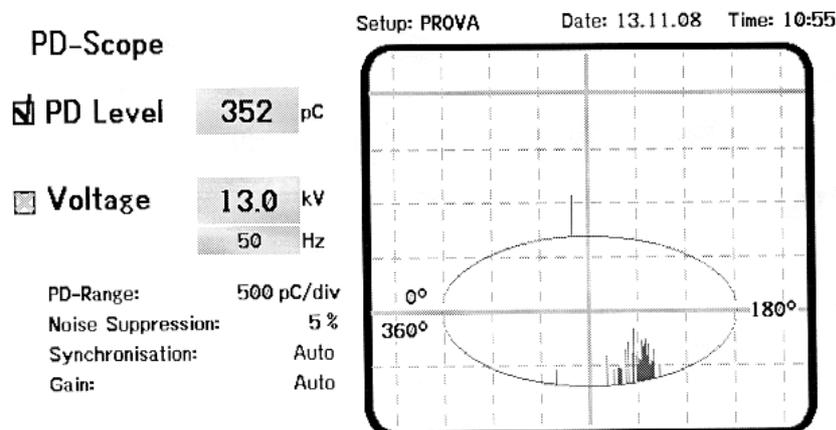


Fig. 7.8 - Misura delle SP sullo spezzone di cavo in prova con il solo difetto interno nel giunto

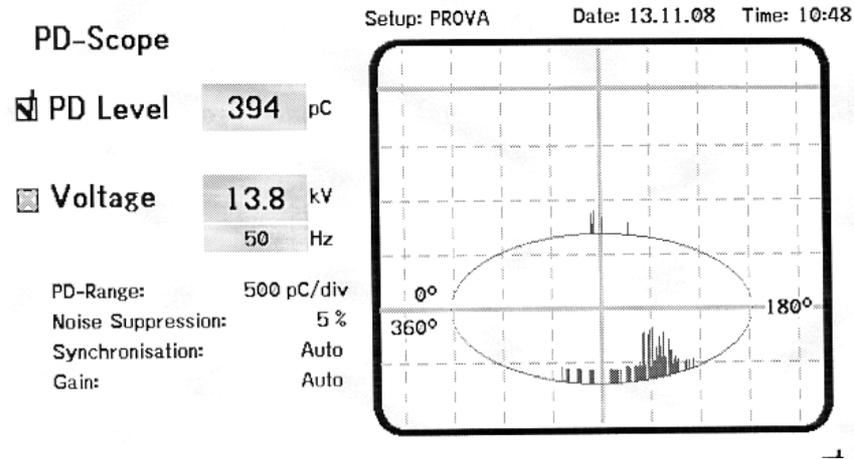
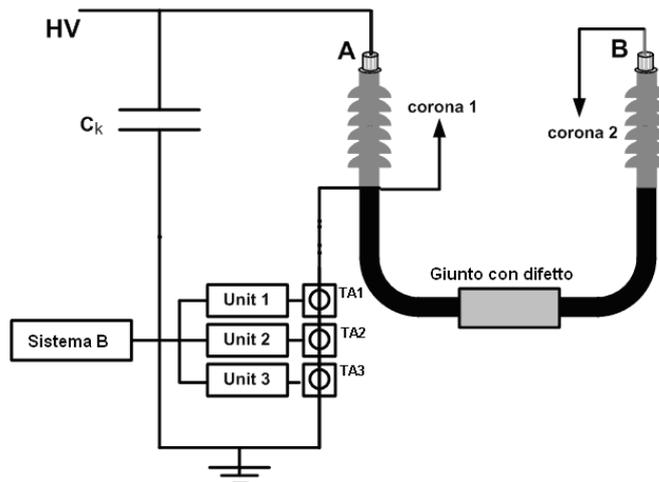


Fig. 7.9 - Misura delle SP sullo spezzone di cavo in prova con il difetto interno nel giunto e le due punte inserite che generano l'effetto corona (data la scarsa risoluzione dello strumento è possibile vedere nel grafico solamente qualche scarica corrispondente alla punta lato alta tensione oltre ai segnali provenienti dal difetto nel giunto)

7.1.2 Misure mediante sistema multiterminale

In questo caso tre unità remote del sistema Omicron MPD600 sono state connesse all'oggetto in prova tramite tre trasformatori di corrente per correnti impulsive come mostrato nello schema di Fig.7.10 e nella foto di Fig.7.11. Per poter effettuare la separazione multi-banda si è scelto di impostare la banda degli acquisitori delle unità remote come indicato in Fig. 7.12.



Ck - capacità dell'isolatore passante del trasformatore di alimentazione (valore 2 nF)

TA₁, TA₂, TA₃ - trasformatori di misura per segnali ad alta frequenza

HV – Sorgente di alimentazione

Fig. 7.10 – Schema del circuito utilizzato per la misura con il sistema multi terminale

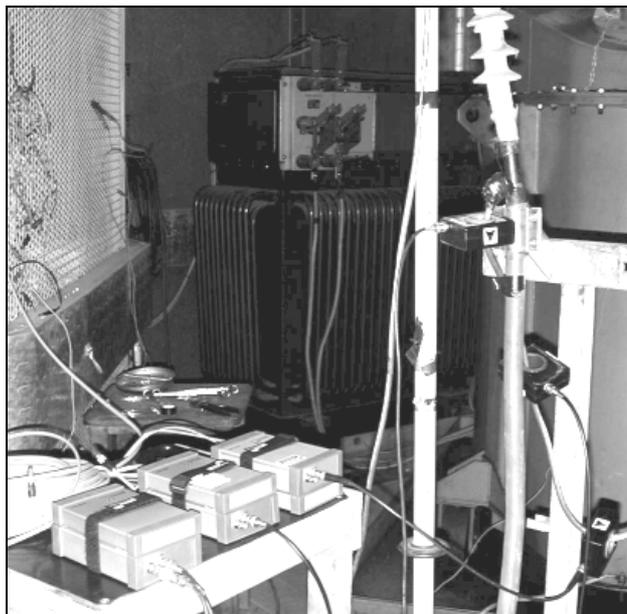


Fig. 7.11 – Connessione del sistema MPD600 all'oggetto in prova

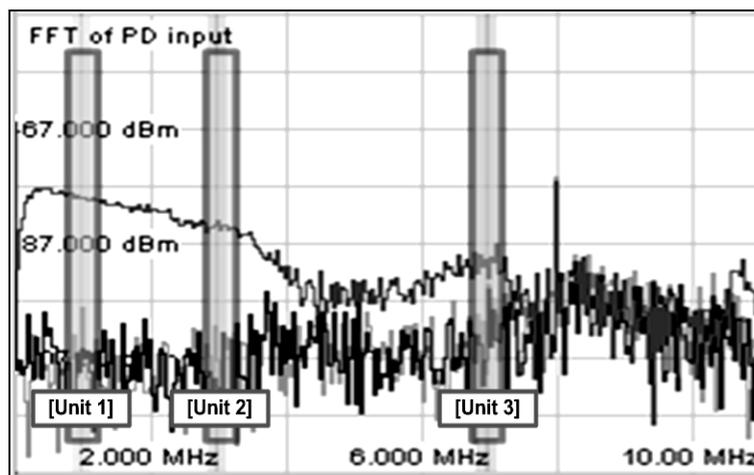


Fig. 7.12 - Impostazioni banda acquisitori sistema MPD600:

Centro banda: $Ch_1=1\text{MHz}$, $Ch_2=3\text{MHz}$, $Ch_3=7\text{MHz}$.

Ampiezza di banda: 300kHz

7.1.2.1 Segnali acquisiti dal sistema di misura

Lo spezzone di cavo è stato alimentato con tensione crescente fino alla tensione (d'innesco) di 12kV alla quale erano presenti contemporaneamente i segnali di SP provenienti dalle due sorgenti tipo corona e dalla sorgente sul giunto. Con il sistema MPD 600 sono stati registrati i segnali e si è scelto di elaborare fino a $2 \cdot 10^5$ impulsi di SP per canale, corrispondenti in questa prova a circa 2 secondi di registrazione. Nella Fig. 7.13 è presentato l'andamento nel tempo (una porzione di 0,1 secondi di registrazione) delle SP acquisite dalle tre unità (Ch 1, 2 e 3).

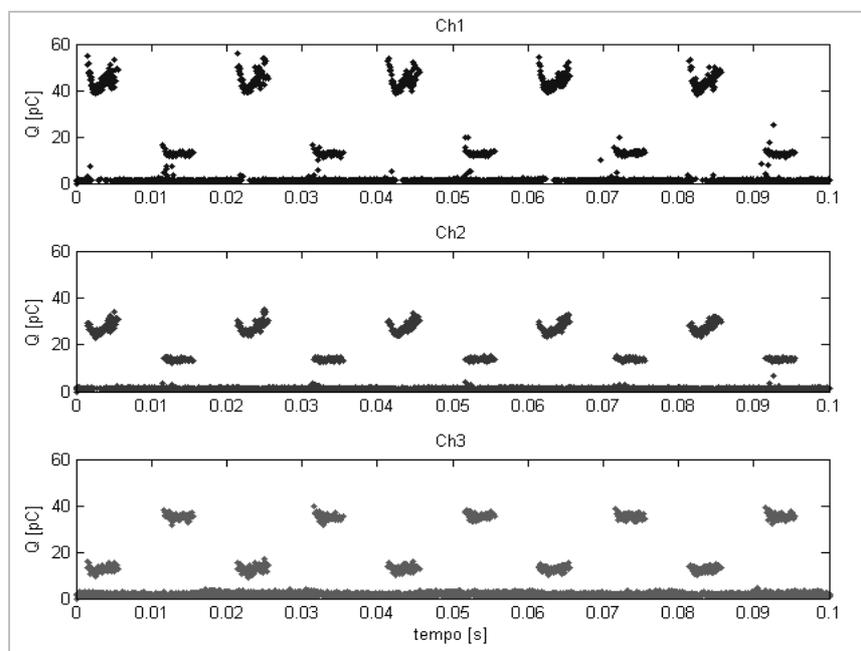


Fig. 7.13 - Andamento nel tempo delle scariche parziali per i tre canali del sistema MPD600

In Fig. 7.14 è presentato invece il “pattern”, cioè la distribuzione delle SP rispetto alla fase della tensione applicata, per le tre unità Ch 1,2,3. Il grafico è a intensità di colore, ossia

presenta colori tendenti verso il rosso dove vi è un addensamento elevato di punti mentre per zone con punti meno occorrenti il grafico tende verso l'azzurro.

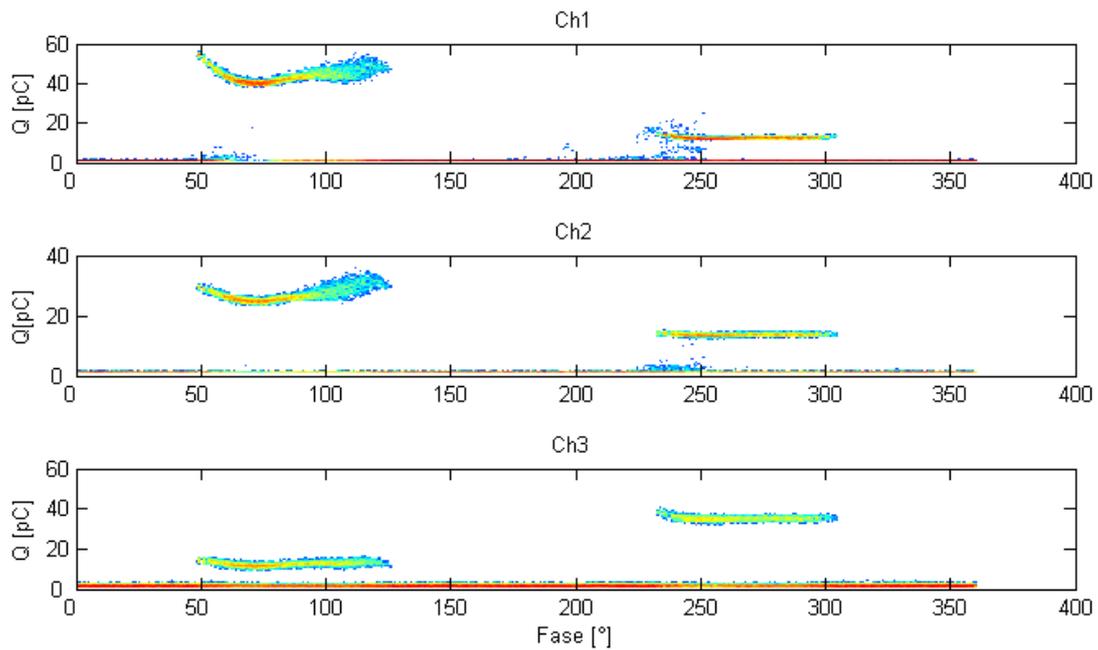


Fig. 7.14 – Andamento del valore delle SP rispetto alla fase della tensione applicata (valori cumulati – grafico ad intensità di colore)

A partire da questi dati, nei paragrafi seguenti verranno esaminate le possibilità offerte dai diversi algoritmi per la separazione delle SP descritti in precedenza.

7.1.2.2 Implementazione di diagrammi vettoriali

7.1.2.2.1 Implementazione 1

Il digramma tridimensionale mostrato in Fig. 7.15 (e nelle tre proiezioni di Fig. 7.16) corrisponde all'implementazione del diagramma tridimensionale presentato in Fig. 4.12, mentre la sua proiezione sul piano (Fig. 7.17) corrisponde al diagramma bidimensionale di Fig. 4.13. Come era lecito aspettarsi, si possono individuare sostanzialmente tre diversi cluster. Si osservi come nel diagramma tridimensionale i tre cluster risultino individuabili più facilmente rispetto al diagramma bidimensionale di Fig. 7.17. (in particolare si osservi come sulle proiezioni sui piani x-y, x-z e y-z di Fig. 7.16 i tre cluster risultino separati). Per questo motivo si è scelto di utilizzare questo diagramma 3D per l'applicazione di alcuni algoritmi di estrazione automatica dei cluster presentati più avanti (paragrafo 7.1.2.4)

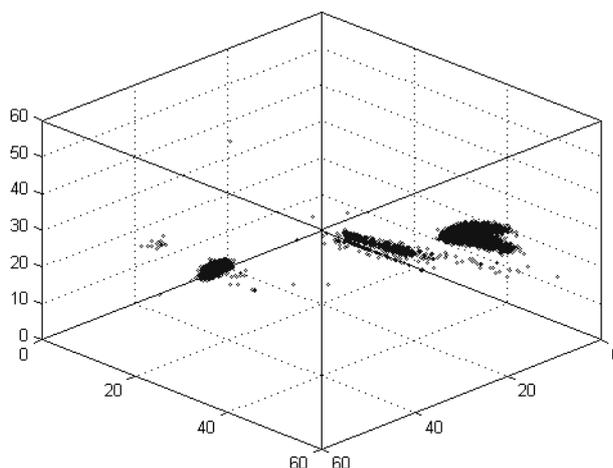


Fig. 7.15 – Diagramma vettoriale – implementazione 1 (3D)

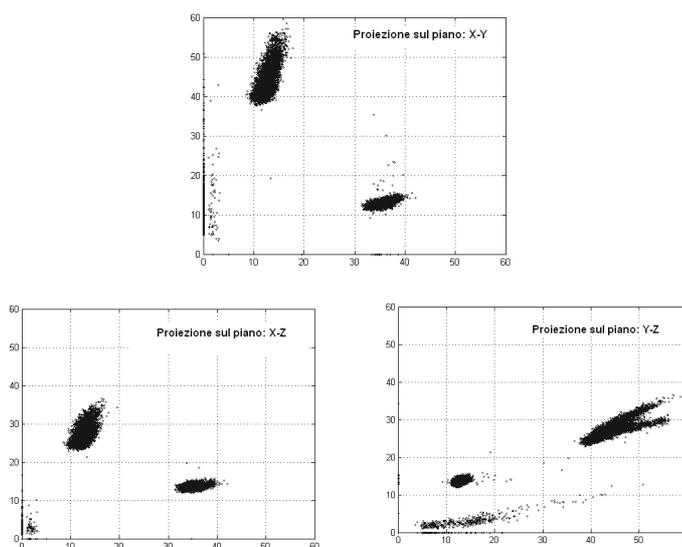


Fig. 7.16 – Proiezioni del diagramma 3D

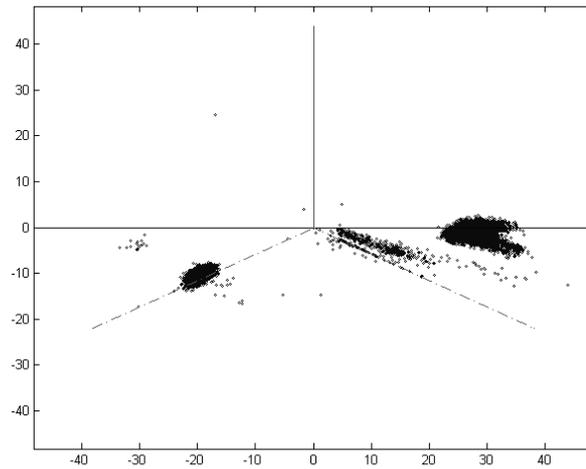


Fig. 7.17 – Diagramma vettoriale – implementazione 1 (2D)

7.1.2.2.2 Implementazione 2

Il seguente diagramma (Fig. 7.18) corrisponde all'implementazione del diagramma di Fig. 4.19. Come detto in precedenza, in questo caso tutti i punti risultano posizionati sulla superficie di una sfera di raggio unitario. Si tratta quindi in sostanza di un diagramma bidimensionale e di conseguenza ha senso utilizzare solamente la sua proiezione sul piano (Fig. 7.19) che infatti contiene le stesse informazioni ma per l'analisi dei cluster risulta molto più agevole di un diagramma tridimensionale.

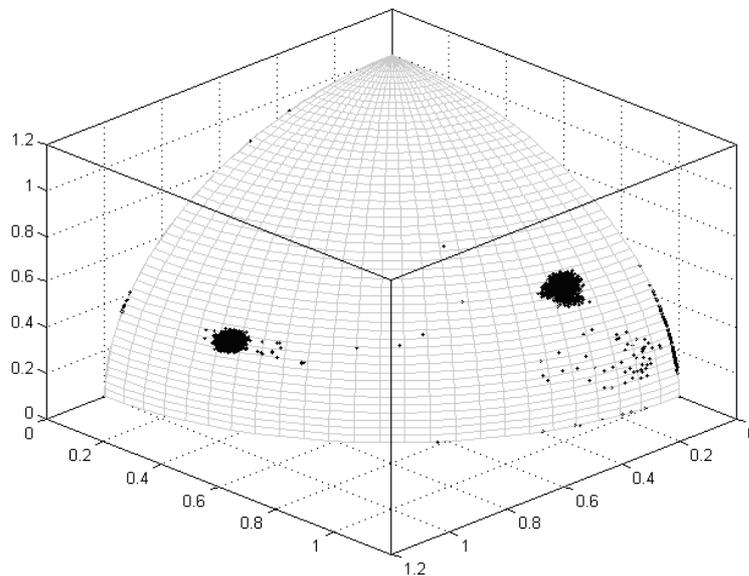


Fig. 7.18 – Diagramma vettoriale – implementazione 2 (3D)

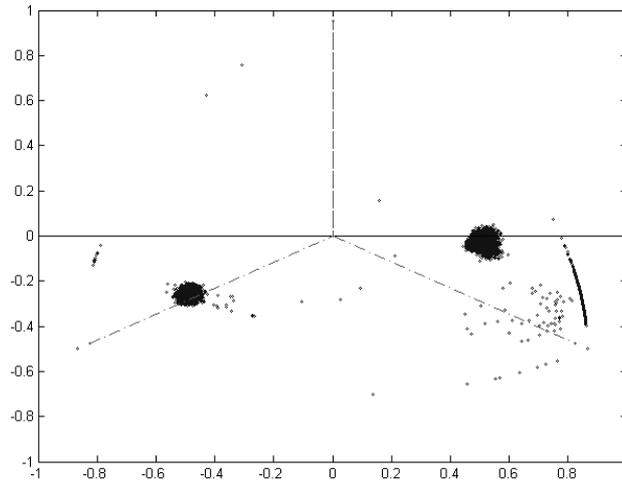


Fig. 7.19 – Diagramma vettoriale – implementazione 2 (2D)

Si può inoltre osservare come, rispetto al diagramma bidimensionale di Fig. 7.17, i cluster risultino più concentrati e definiti, il che è dovuto essenzialmente al processo di normalizzazione dei dati descritto in precedenza nel paragrafo 4.3.3.

Nel seguente paragrafo verrà presentata l'estrazione manuale dei tre cluster per le due implementazioni bidimensionali proposte evidenziando i vantaggi dell'implementazione 2 con il diagramma normalizzato.

7.1.2.3 Estrazione di cluster per mezzo di diagrammi vettoriali

7.1.2.3.1 Implementazione del diagramma di tipo 1

Utilizzando il diagramma presentato in Fig. 7.17 sono state selezionate tre famiglie omogenee (cluster) di punti come indicato nel grafico seguente.

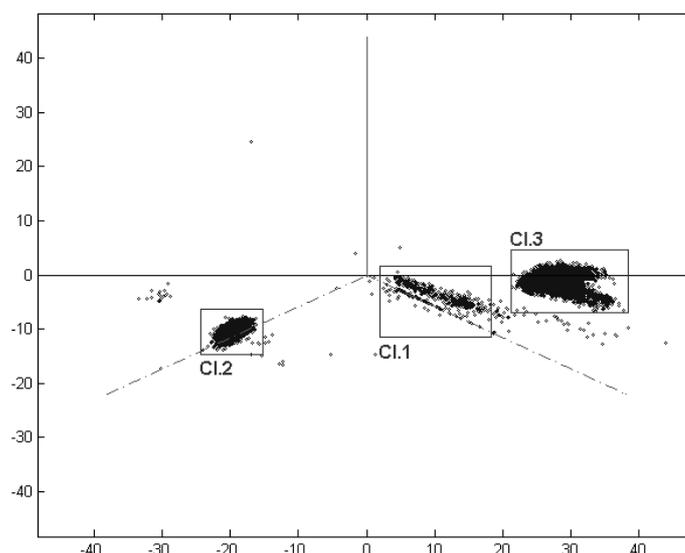


Fig. 7.20 – Estrazione di cluster - diagramma vettoriale, implementazione 1

Si osserva come il cluster 1 sia relativamente vicino al cluster 3 e pertanto rende un po' difficoltosa la selezione (in particolare tale selezione sarebbe particolarmente delicata per un sistema basato su algoritmo automatico di separazione in cluster).

In Fig. 7.21 vengono presentati i pattern di SP corrispondenti ai cluster selezionati (per ciascun canale vengono indicati in nero i punti del pattern appartenenti al cluster selezionato, mentre in grigio vengono indicati i punti non appartenenti al cluster).

Come si può verificare facilmente i cluster 2 e 3 rappresentano (a meno di qualche punto dovuto alla non perfetta separazione) un tipico comportamento da SP dovute a "effetto corona" (lato alta tensione e lato terra). Il cluster 1 presenta invece il pattern del difetto interno al giunto.

Si può però notare come la non perfetta separazione in cluster ha portato alla presenza nel pattern corrispondente al cluster 3 di qualche punto che apparterebbe, non all'effetto corona, bensì al difetto interno (cluster 1). E' possibile inoltre osservare come il difetto interno presenti una ampiezza del pattern molto maggiore rispetto ai pattern dovuti all'"effetto corona" e questo si è tradotto anche sulla forma allungata del cluster (Fig. 7.20), proprio come descritto nel paragrafo paragrafo 4.3.3. In seguito si vedrà come la normalizzazione limiterà in parte questo effetto concentrando un po' di più i vari cluster e rendendoli così più facilmente separabili.

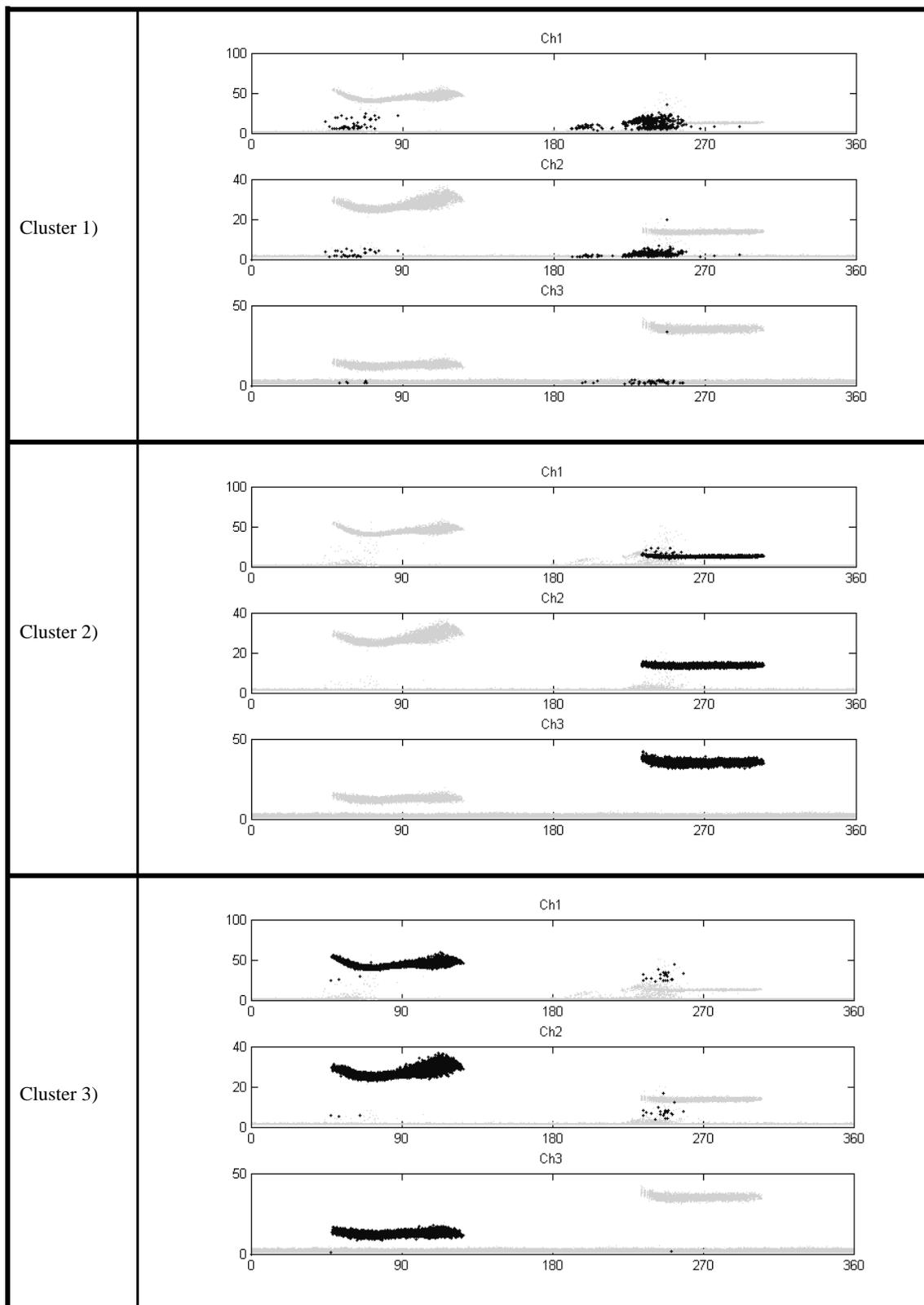


Fig. 7.21 – Estrazione dei cluster (implementazione 1) – Pattern di SP corrispondenti

7.1.2.3.2 Implementazione del diagramma di tipo 2

Utilizzando il diagramma presentato in Fig. 7.19 sono state selezionate tre famiglie omogenee (cluster) di punti come indicato nel grafico seguente.

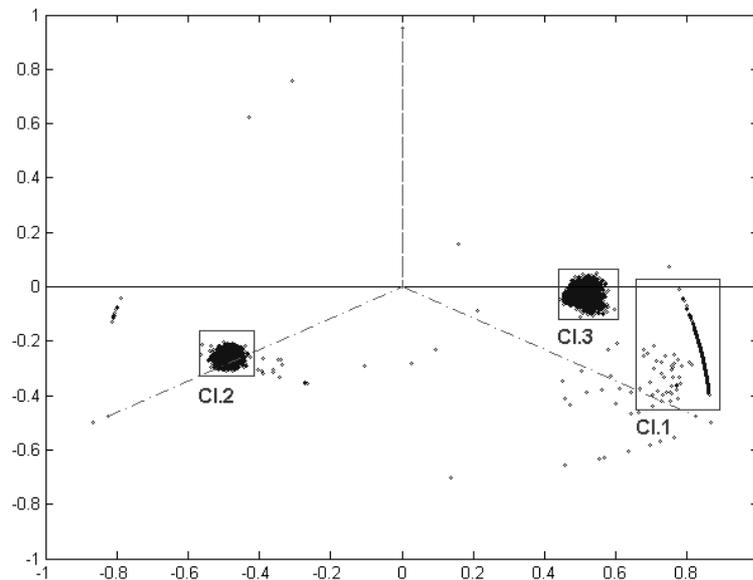


Fig. 7.22 – Estrazione cluster mediante diagramma vettoriale implementazione 2 (2D)

In questo caso i cluster 2 e 3 dovuti al “corona” risultano notevolmente più concentrati ed è pertanto ancora più facile separarli.

Il cluster 1 è anch’esso più concentrato, anche se presenta una zona dove i punti risultano molto addensati e posizionati su una curva e (pochi) altri punti dispersi intorno. Tale effetto è dovuto semplicemente al fatto che, per come sono state impostate le bande passanti delle unità remote, i segnali dovuti al difetto interno (cluster 1) non presentavano segnale superiore al livello limite (“treshold”) impostato da una unità remota. Mancando una componente nel diagramma si può facilmente dimostrare come i punti vanno a posizionarsi nello spazio tridimensionale su una porzione di circonferenza e quindi su una particolare curva nel caso della proiezione di tale porzione nel piano.

Pertanto algoritmi automatici di separazione in cluster, applicati eventualmente a questo tipo di diagrammi, dovrebbero comunque essere adattati per tener conto di questo effetto.

Analizzando la Fig. 7.23 è possibile infine verificare come i pattern estratti corrispondono ancora meglio e non vi sono casi di presenza di punti estranei nel pattern di un cluster come verificatosi con il diagramma utilizzato in precedenza (seppur solamente per qualche decina di punti su di un totale di $2 \cdot 10^5$ punti complessivi per canale).

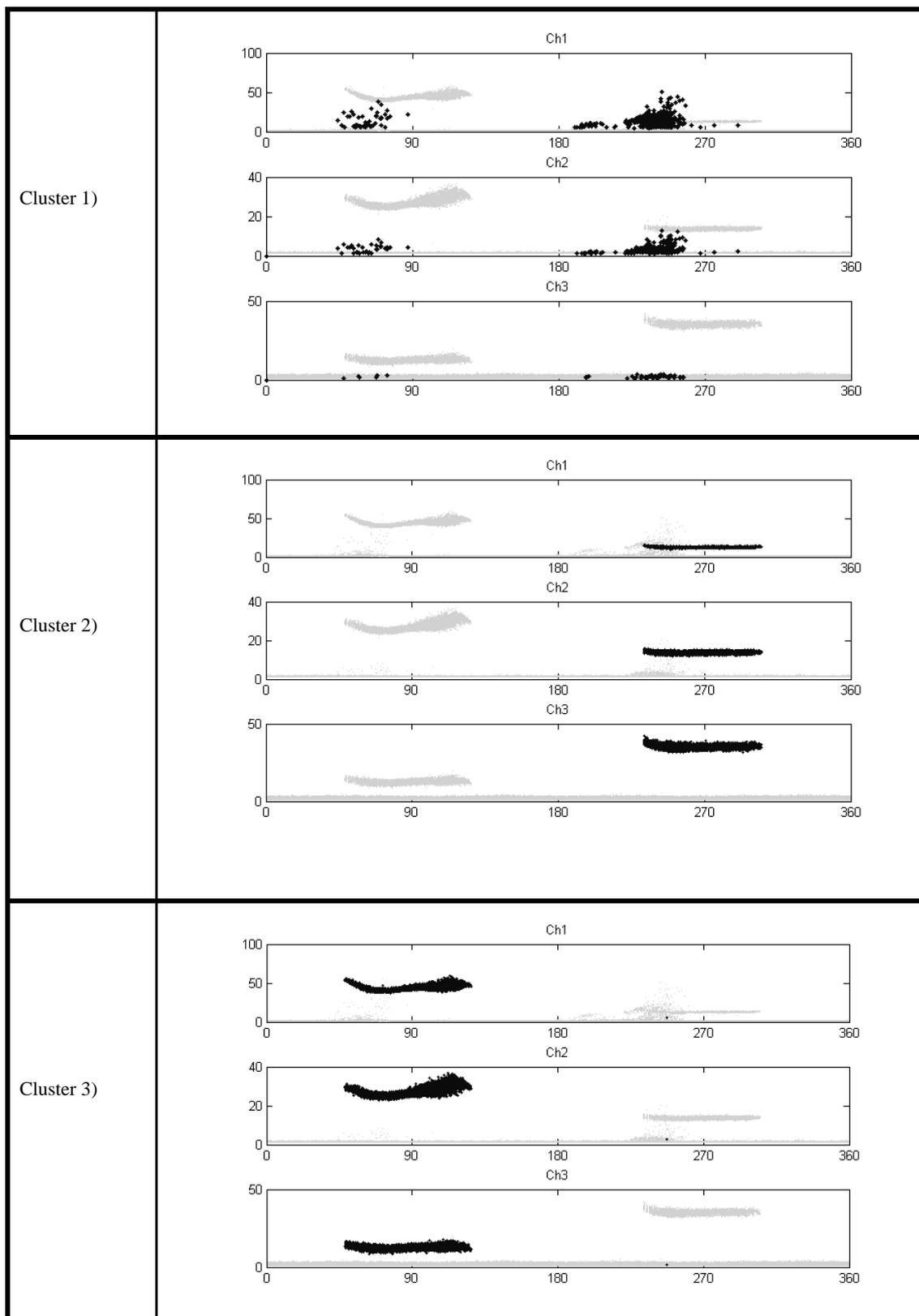


Fig. 7.23 – Estrazione dei cluster (implementazione 2) – Pattern di SP corrispondenti

7.1.2.4 Riconoscimento automatico dei cluster

In questo capitolo vengono applicati gli algoritmi di riconoscimento automatico di cluster introdotti nel capitolo 5.

L'applicazione dell'algoritmo "k-means" sul diagramma vettoriale tridimensionale di Fig. 7.15 ha permesso di individuare automaticamente i cluster, ma ha anche richiesto, come parametro di ingresso, il numero di cluster da parte dell'utente.

Il risultato del clustering è presentato nelle Fig. 7.24, Fig. 7.25 ed i rispettivi pattern corrispondenti sono mostrati in Fig. 7.26.

Si può osservare come la separazione in cluster risulti buona, a meno di qualche punto, evidenziato con un box rosso in Fig. 7.25 dovuto sostanzialmente al fatto che k-means (come anche c-means) è un algoritmo di "clustering totale" (e non parziale, si veda il capitolo 5) e pertanto non è in grado di gestire correttamente gli elementi che risultano al confine fra due cluster.

Dal punto di vista dei pattern (Fig. 7.26) questo effetto si traduce in qualche punto del pattern che avrebbe dovuto appartenere al cluster 2 (difetto interno) e che risulta incluso nel pattern corrispondente al cluster 1 (corona lato bassa tensione).

Sono stati effettuati diversi cicli di iterazione del algoritmo "k-means". Nella maggior parte dei casi l'algoritmo ha fornito risultati sostanzialmente soddisfacenti (come in Fig. 7.24), in alcuni casi sporadici però l'algoritmo non è stato in grado di convergere verso una soluzione di minimo globale ma ha portato a risultati di "minimo locale" (caratteristica tipica dei risultati ottenuti con k-means) come quelli presentati in Fig. 7.27.

Come si può osservare dalle figure Fig. 7.27 e Fig. 7.28, in un'ottica di sviluppo di sistemi diagnostici automatici basati sull'interpretazione dei pattern di SP questo tipo di risultati è da evitare assolutamente in quanto porterebbero a un'analisi diagnostica completamente sbagliata.

L'utilizzo dell'algoritmo "c-means" (Fig. 7.29, Fig. 7.30) ha portato a una maggior stabilità dei risultati, per il caso in esame, ed in particolare non si sono mai verificati casi di "minimo locale" come per il "k-means". Rimane però la considerazione che anche in questo caso alcuni punti (al confine tra due cluster) non sono stati valutati correttamente.

L'applicazione dell'algoritmo "dbscan", come si può osservare dalle fig Fig. 7.31, Fig. 7.32 e Fig. 7.33 ha portato invece a risultati particolarmente interessanti: infatti non solo l'algoritmo ha sempre individuato correttamente tutti i cluster (il che ha come diretta conseguenza l'ottima ricostruzione dei pattern di SP corrispondenti alle tre sorgenti), ma ha anche saputo trattare i punti di confine considerando quelli più prossimi alla linea di confine come punti di rumore ed escludendoli (è stato creato apposta un "cluster 0" fittizio per poterli presentare graficamente con delle X di colore rosso) a scapito però, come anticipato, di un sensibile aumento nei tempi di calcolo complessivo.

7.1.2.5 Riconoscimento dei cluster mediante algoritmo “k-means”

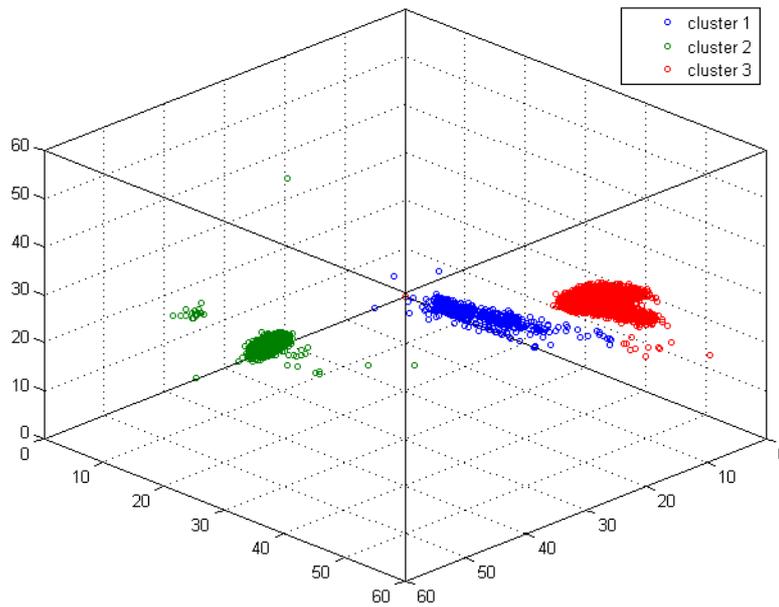


Fig. 7.24 – Diagramma vettoriale 3D – estrazione automatica dei cluster mediante “kmeans”

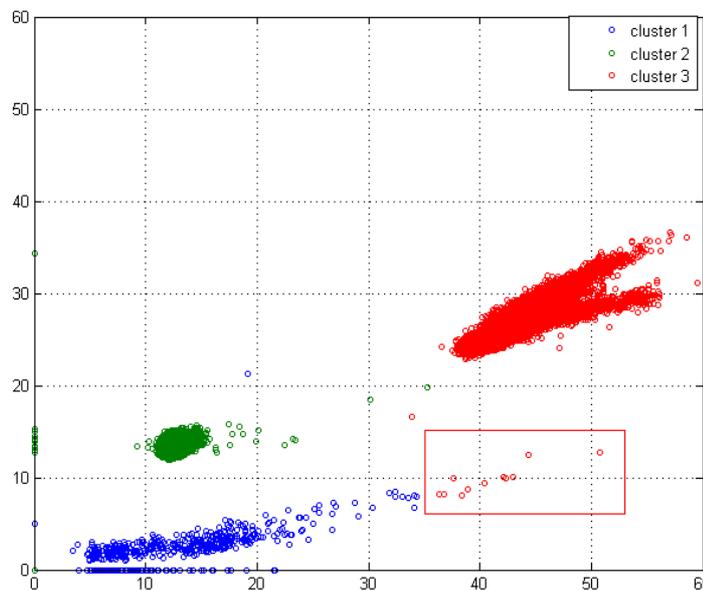


Fig. 7.25 – Diagramma vettoriale 3D – proiezione sul piano Y-Z

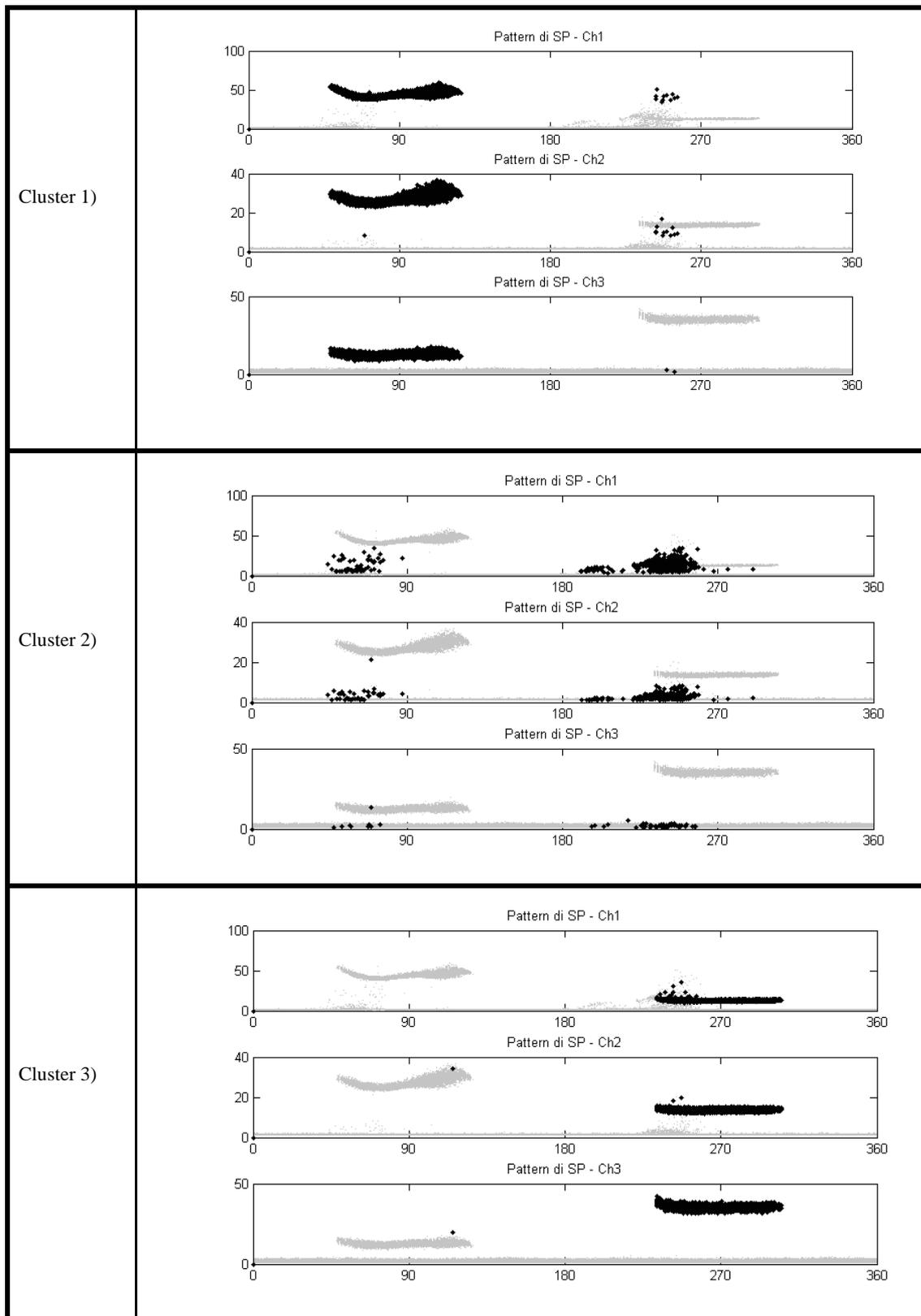


Fig. 7.26 – Estrazione automatica dei cluster (“kmeans”) – Pattern di SP corrispondenti

7.1.2.6 Riconoscimento non corretto mediante algoritmo “k-means”

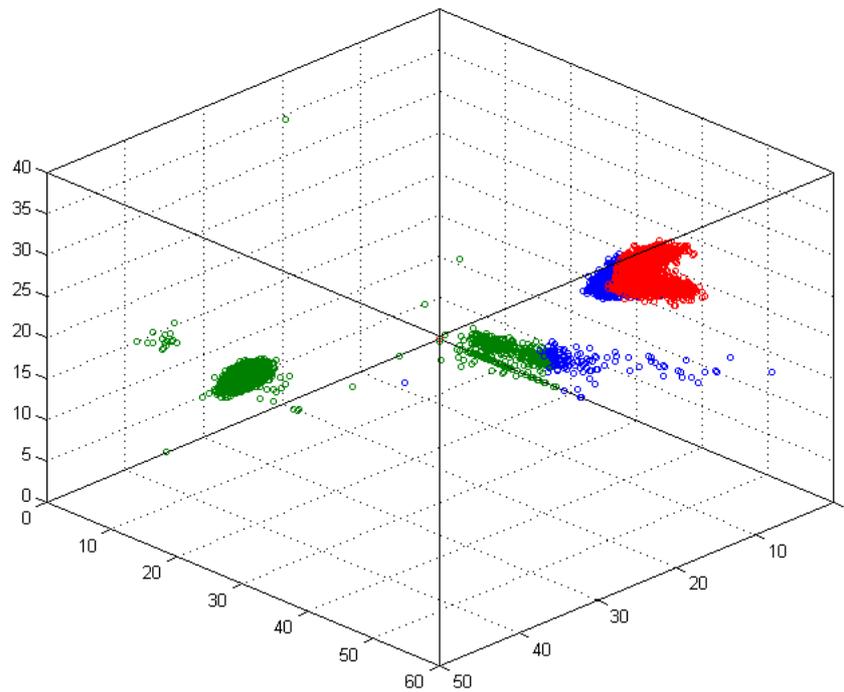


Fig. 7.27 – Diagramma vettoriale 3D – estrazione errnea dei cluster mediante “kmeans”

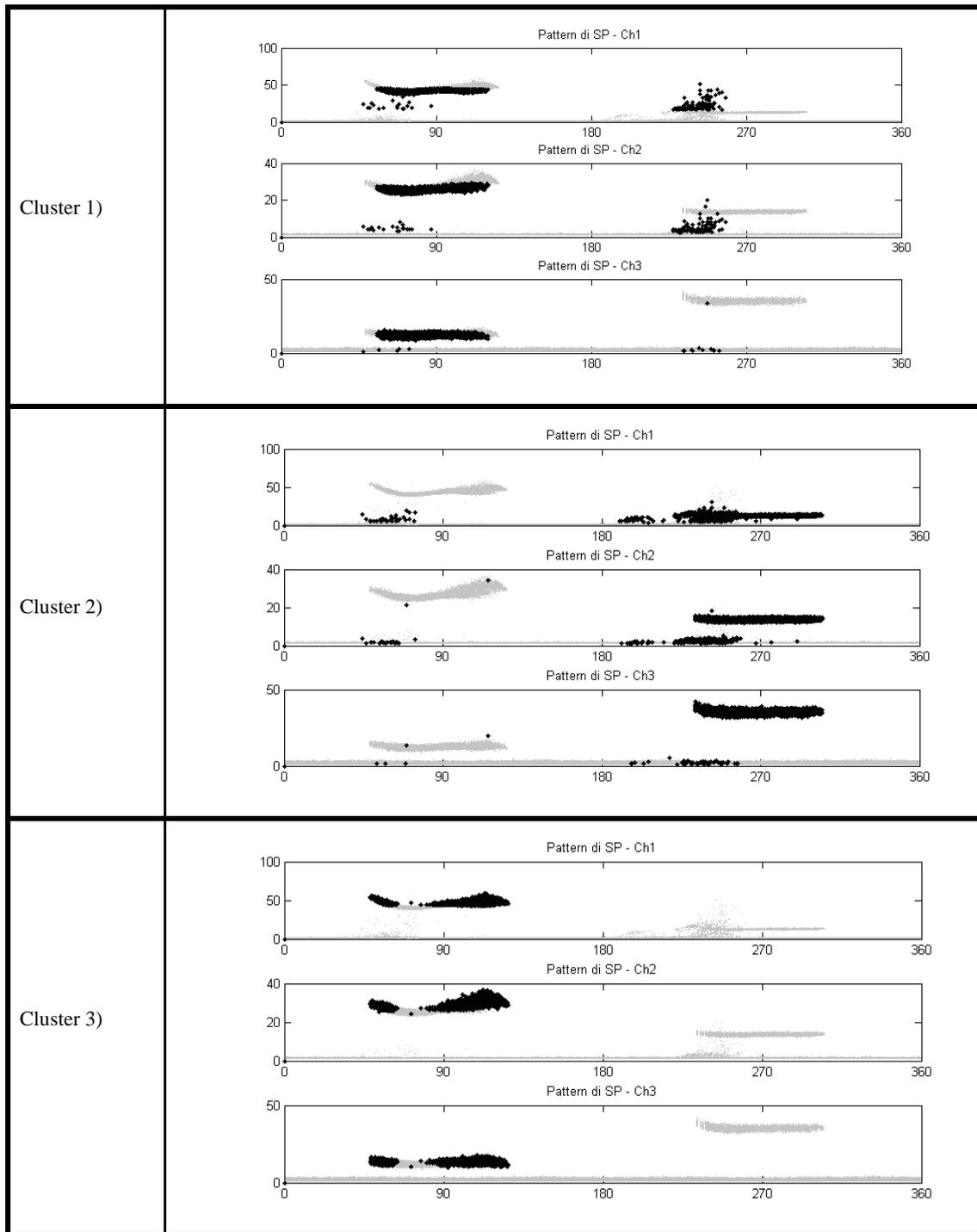


Fig. 7.28 – Estrazione erranea dei cluster (“kmeans”) – Pattern di SP corrispondenti

7.1.2.7 Riconoscimento automatico mediante algoritmo “cmeans”

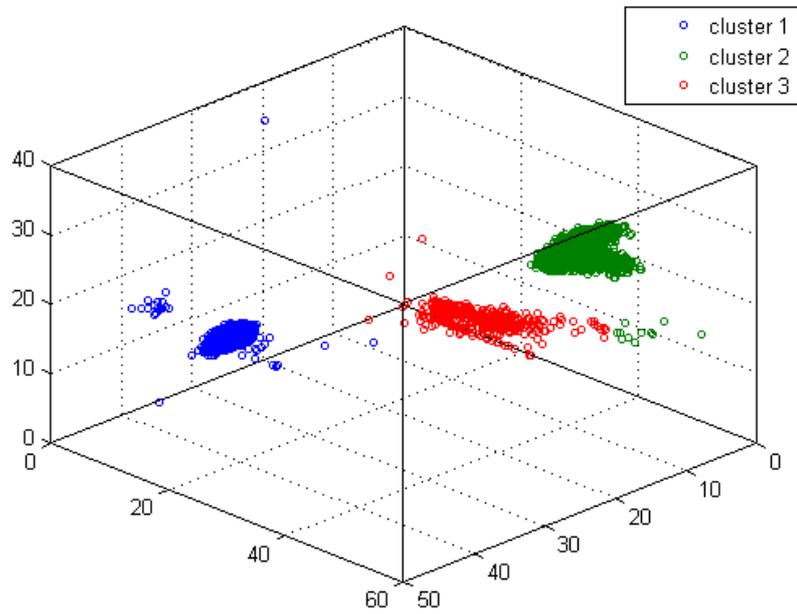


Fig. 7.29 – Diagramma vettoriale 3D – estrazione automatica dei cluster mediante “cmeans”

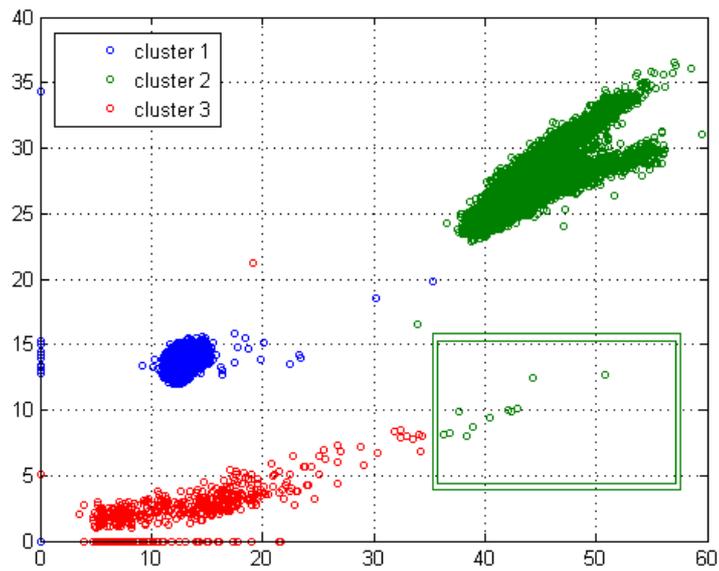


Fig. 7.30 – Diagramma vettoriale 3D – proiezione sul piano Y-Z

7.1.2.8 Riconoscimento automatico mediante algoritmo “dbscan”

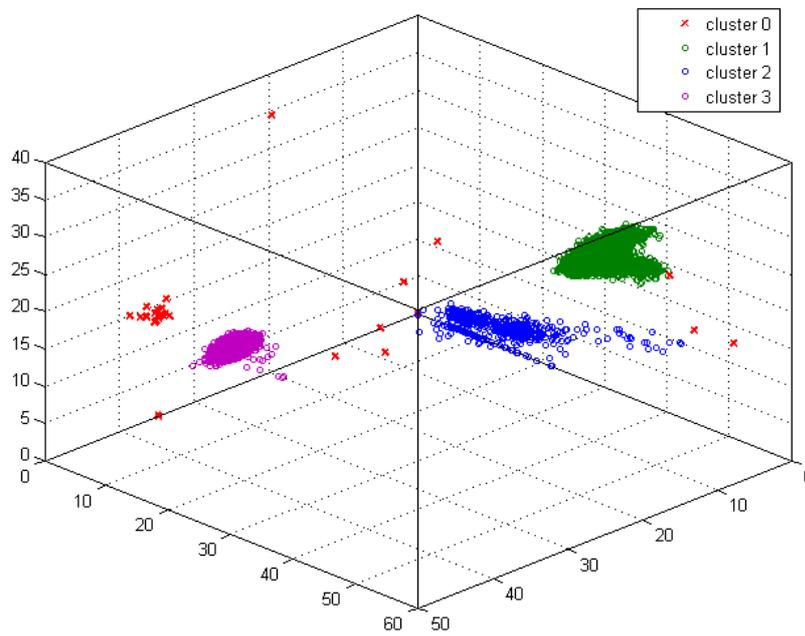


Fig. 7.31 – Diagramma vettoriale 3D – estrazione automatica dei cluster mediante “dbscan”

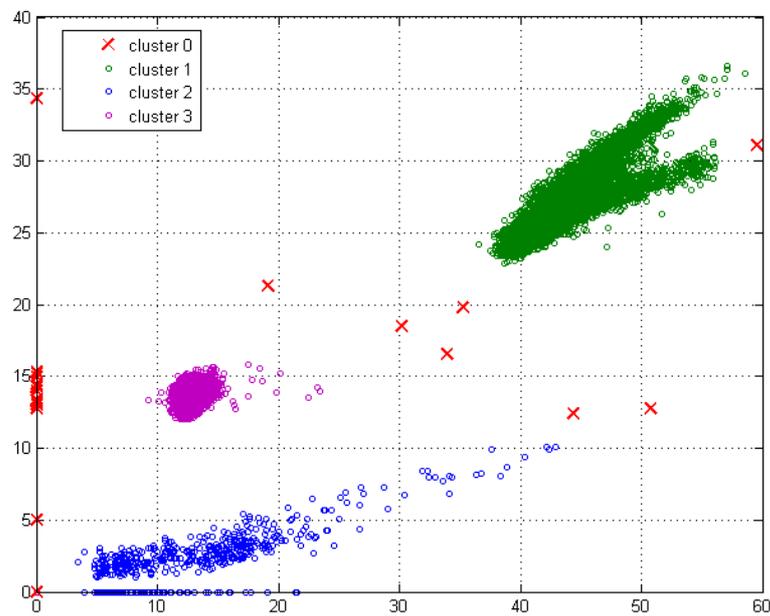
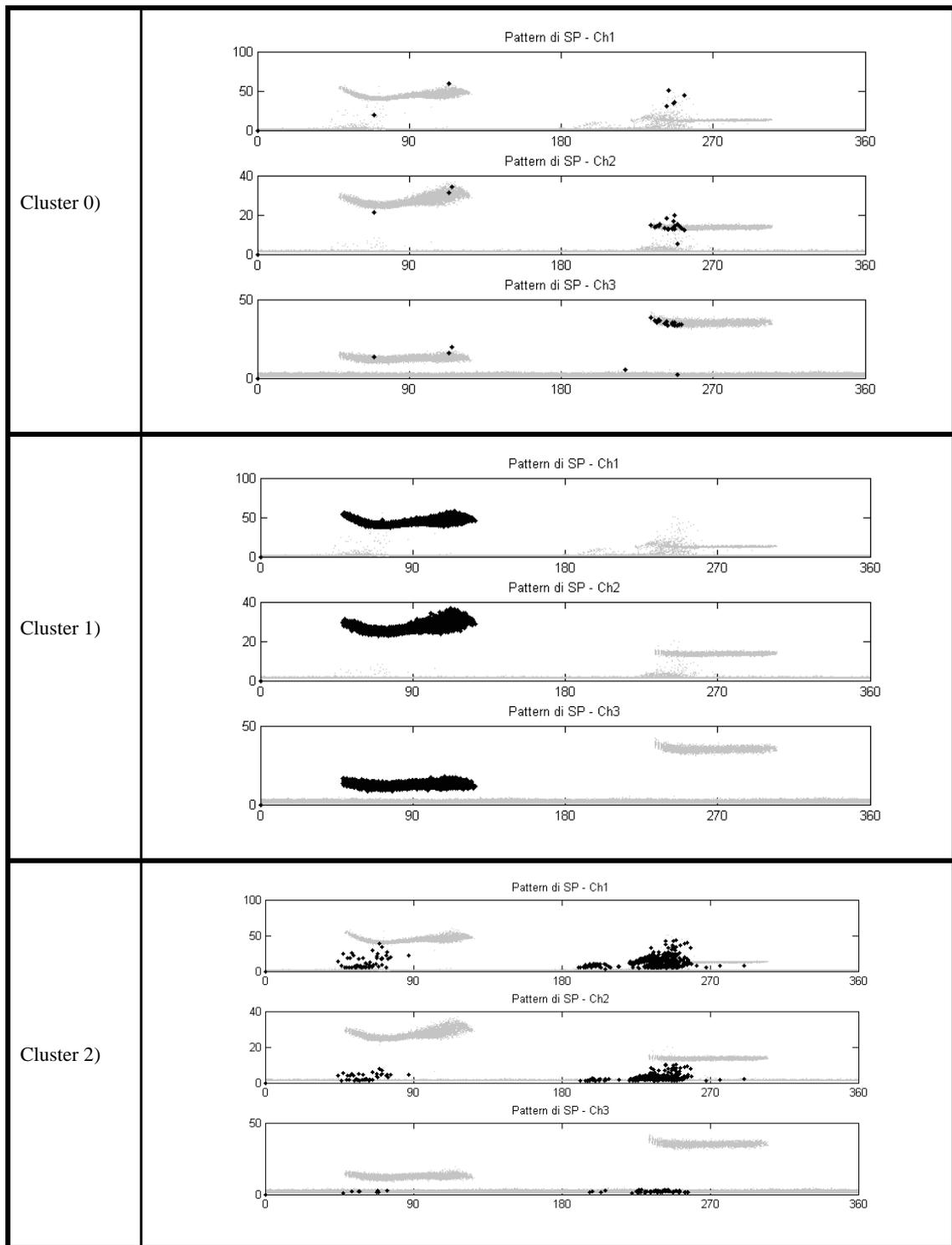


Fig. 7.32 – Diagramma vettoriale 3D – proiezione sul piano Y-Z



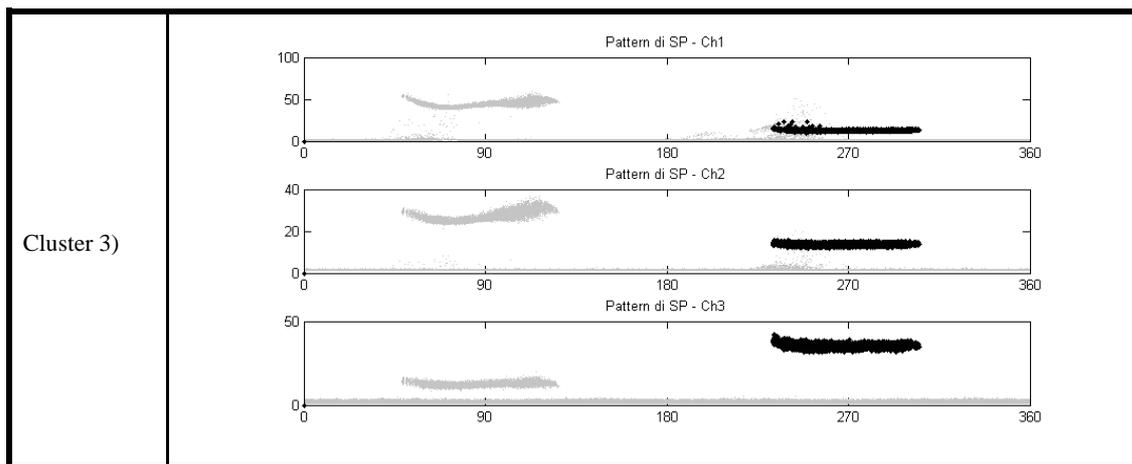
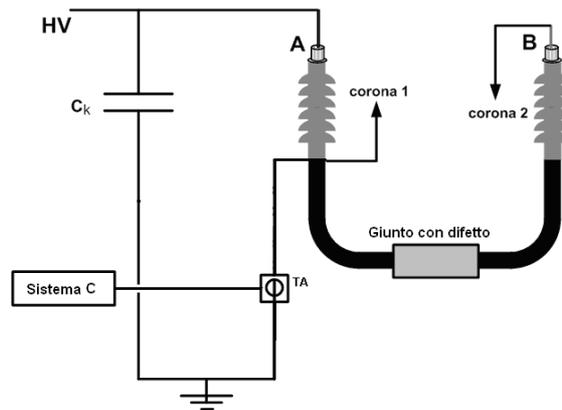


Fig. 7.33 – Estrazione automatica dei cluster (“dbscan”) – Pattern di SP corrispondenti

7.1.3 Misura con il sistema a banda ultra larga

La prova è stata ripetuta utilizzando il prototipo di sistema di misura di SP a banda ultra larga descritto nel capitolo 6. Il sistema è stato connesso come indicato dallo schema di Fig. 7.34. In Fig. 7.35 viene presentata una schermata del software di controllo durante la prova. Nelle Fig. 7.36 e Fig. 7.37 sono mostrati i diagrammi multi banda e tempo-frequenza equivalenti ottenuti tramite l'elaborazione dei dati acquisiti dal sistema. Si può osservare come in entrambi i casi vengono a formarsi tre cluster relativamente distinti e separati tra loro. Nelle Fig. 7.38 e Fig. 7.39 sono invece mostrati i risultati della separazione automatica dei cluster per mezzo degli algoritmi "kmeans" e "dbscan". Si può osservare come anche in questo caso l'algoritmo dbscan ha fornito risultati leggermente più precisi dell'algoritmo kmeans. In Fig. 7.40 sono mostrati i pattern corrispondenti ai cluster individuati dall'algoritmo dbscan.



Ck - capacità dell'isolatore passante del trasformatore di alimentazione (valore 2 nF)

TA - trasformatore di misura per segnali ad alta frequenza

Fig. 7.34 – Schema del circuito utilizzato per prova con il sistema a banda ultra larga

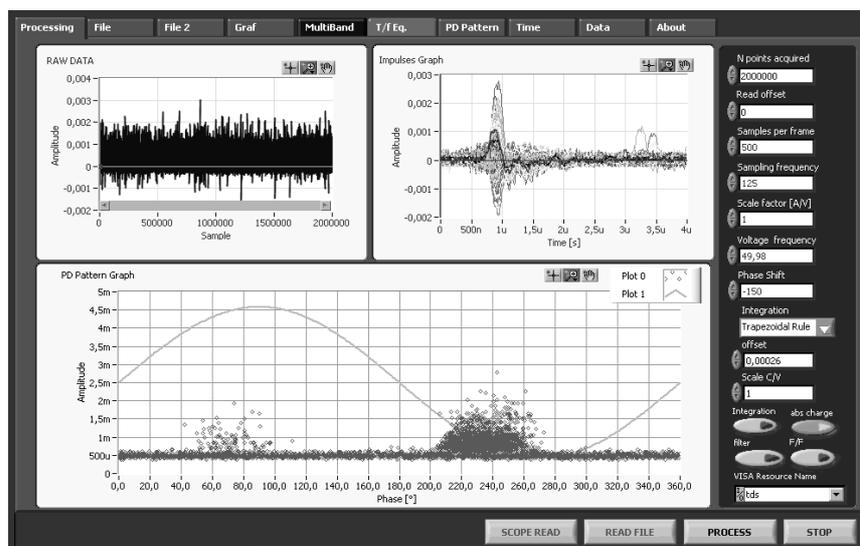


Fig. 7.35 – Schermata del programma durante la prova

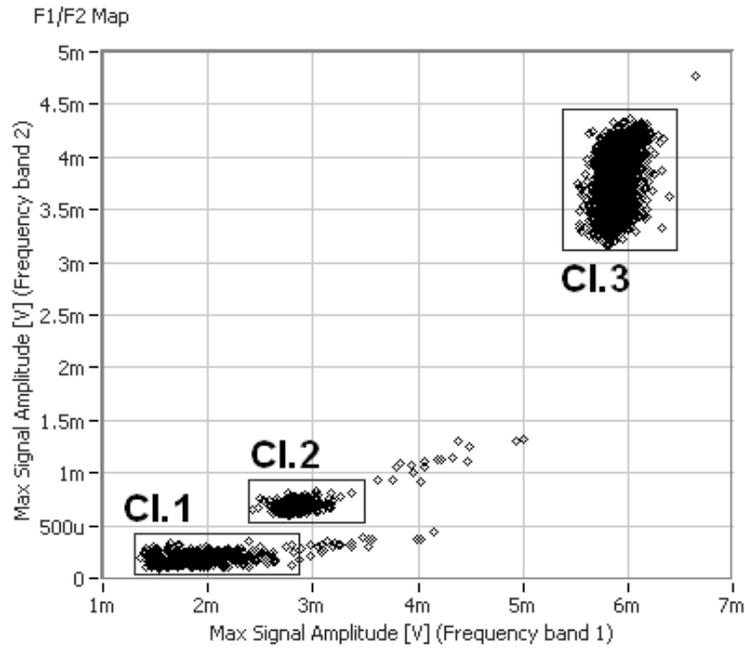


Fig. 7.36 – Diagramma di separazione multibanda

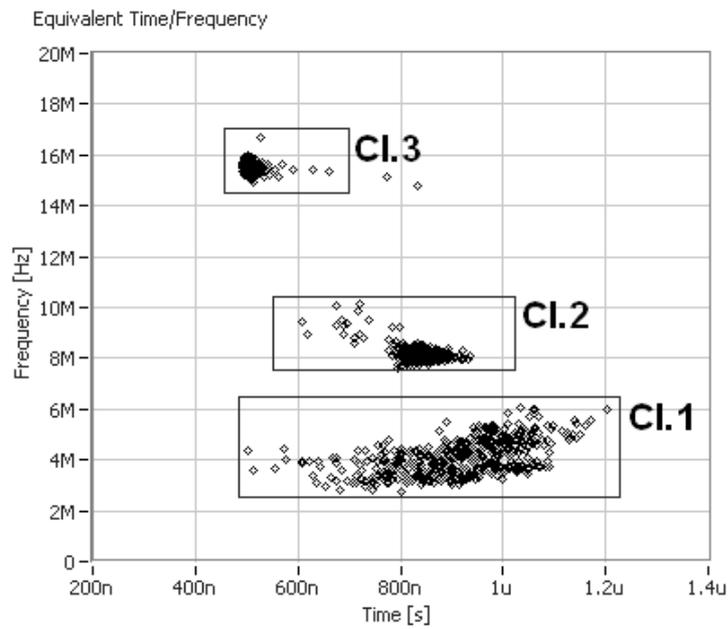


Fig. 7.37 – Diagramma di separazione tempo-frequenza equivalenti

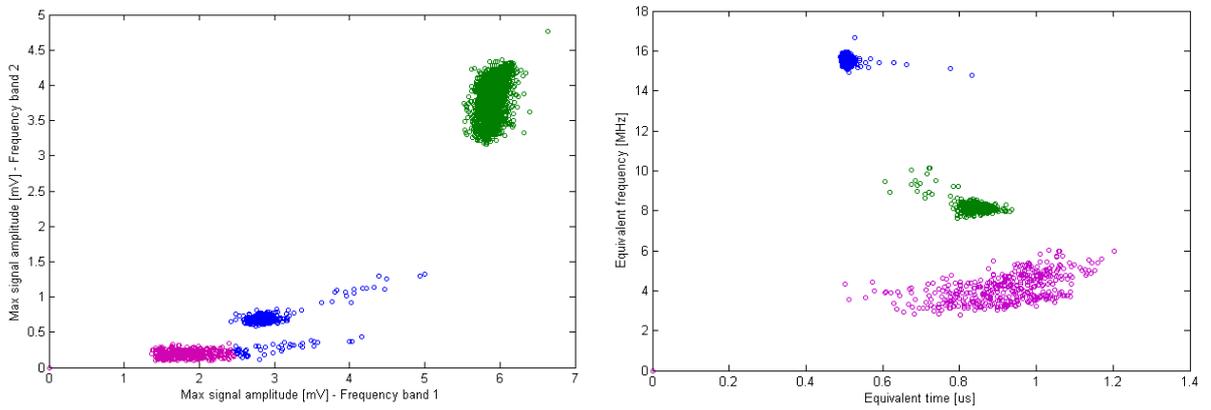


Fig. 7.38 – Individuazione automatica dei cluser mediante algoritmo “kmeans”

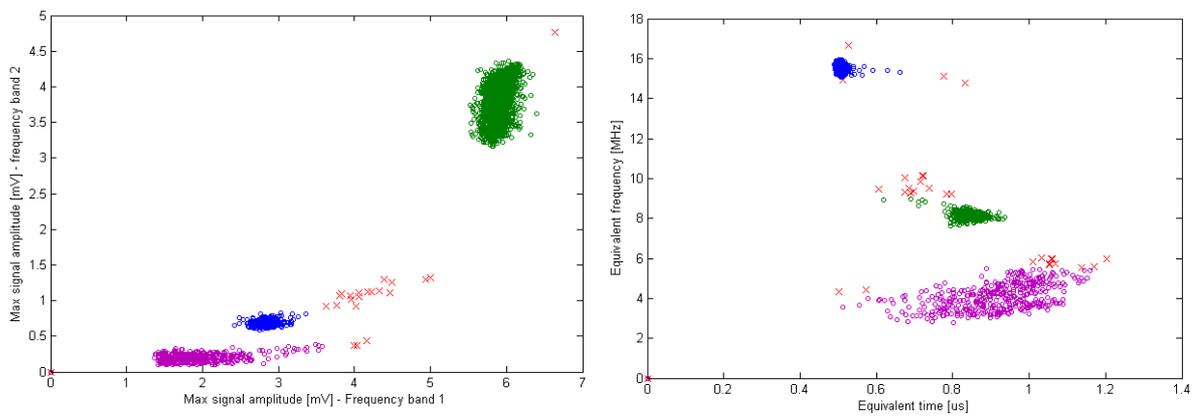


Fig. 7.39 – Individuazione automatica dei cluser mediante algoritmo “dbscan”

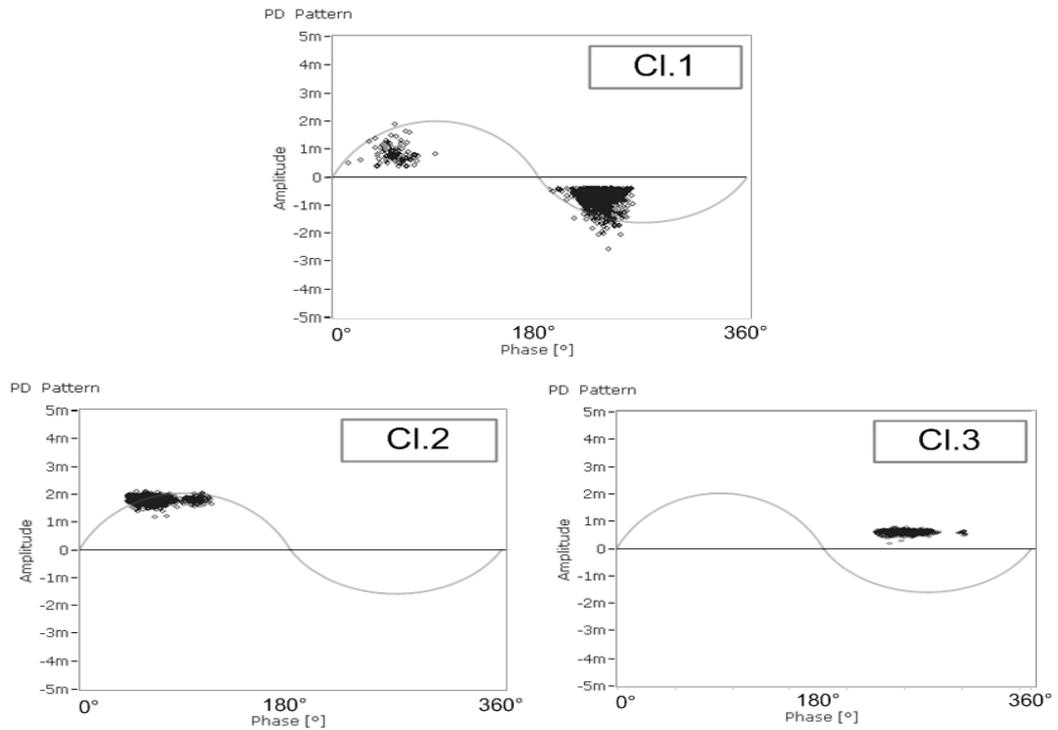


Fig. 7.40 – Pattern di SP corrispondenti ai tre cluster individuati

7.2 Prove su trasformatore di distribuzione MT

In questa sezione sono presentati i risultati di alcune prove realizzate su di un trasformatore di distribuzione di MT isolato in resina avente 17 prese accessibili per ciascuna colonna.

Ciascuna presa è connessa a una sezione dell'avvolgimento del trasformatore.

Questo ha consentito di poter realizzare artificialmente la simultanea presenza di alcuni difetti (effetto corona e iniezione di segnali di SP mediante calibratore) in diverse sezioni dell'avvolgimento e verificare in questo modo l'efficacia degli algoritmi di separazione dei segnali di SP.

Il trasformatore (presentato in Fig. 7.41) ha le seguenti caratteristiche principali:

- Potenza nominale = 630 kVA
- $U_1 = 15$ kV
- $U_2 = 400$ V

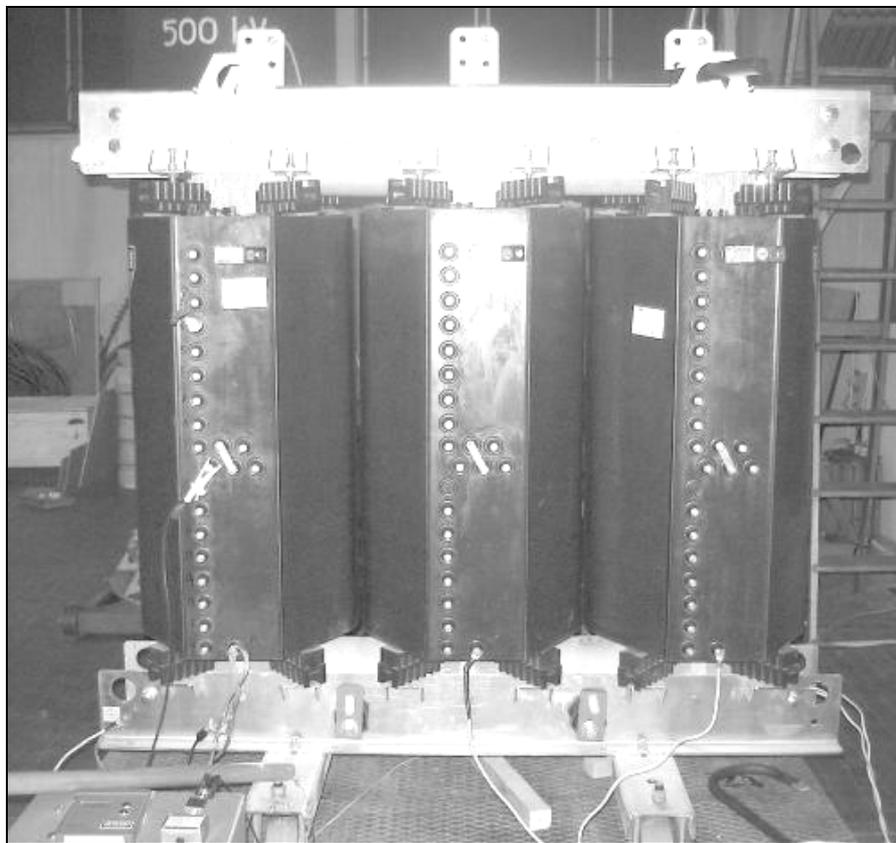


Fig. 7.41 – Trasformatore di distribuzione utilizzato per le prove

7.2.1 Prova con due sorgenti simultanee di SP di tipo corona

E' stato realizzato il circuito descritto nello schema di Fig. 7.42 (corona lato alta tensione in posizione della presa n.1 e corona lato terra in corrispondenza della presa n.10 della colonna del trasformatore).

Le misure sono state effettuate mediante il sistema multiterminale e mediante il sistema prototipo a banda ultra larga. I risultati sono presentati nei paragrafi seguenti.

7.2.1.1 Misure mediante sistema multiterminale

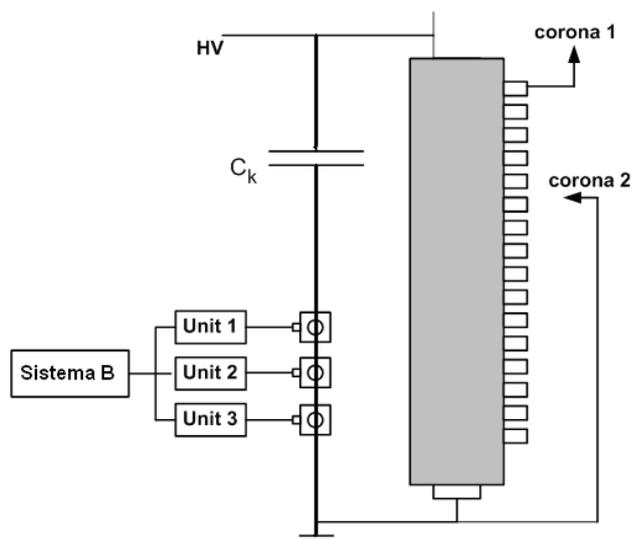


Fig. 7.42 – Schema della prova – misura con il sistema multiterminale

Mediante il sistema di misura multiterminale MPD600, in corrispondenza dei tre terminali, sono stati ottenuti inizialmente i pattern presentati nella Fig. 7.43.

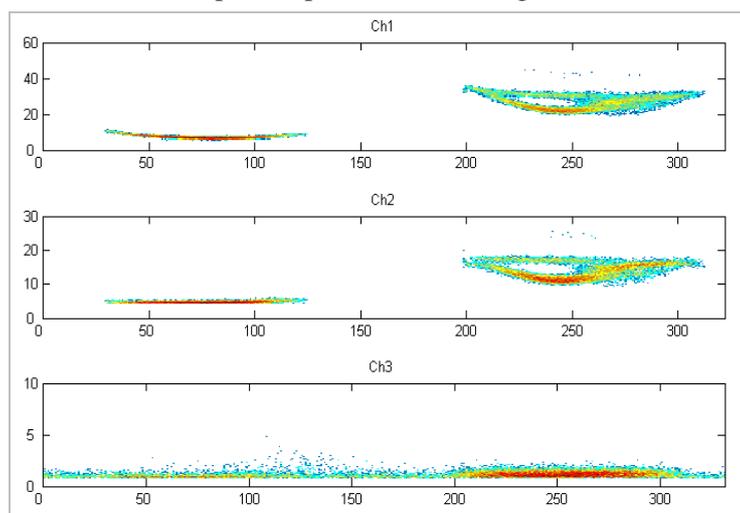


Fig. 7.43 – Pattern delle SP (valori cumulati – grafico ad intensità di colore)

Come per le prove precedenti anche in questo caso viene costruito il diagramma tridimensionale (Fig. 7.44) corrispondente alla procedura presentata in Fig. 4.12.

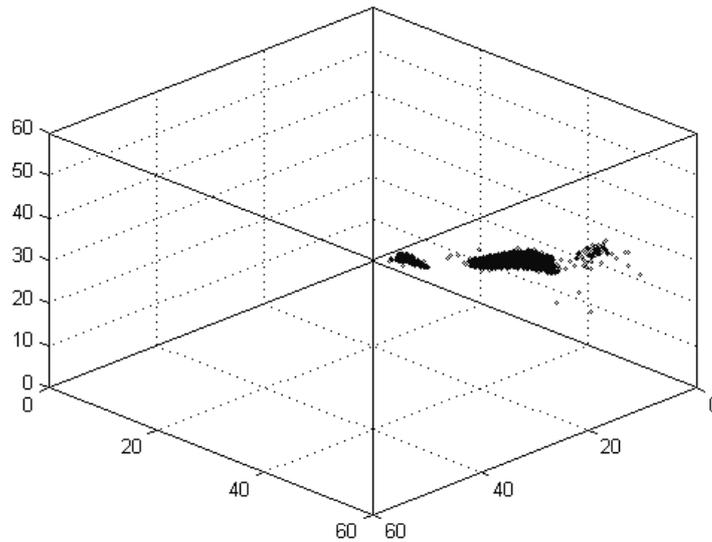


Fig. 7.44 – Diagramma vettoriale – implementazione 1 (3D)

Al diagramma così ottenuto sono stati poi applicati gli algoritmi di estrazione automatica dei cluster. In particolare, la separazione mediante l’algoritmo “kmeans” (mostrata in Fig. 7.45) individua abbastanza bene due cluster (con la solita limitazione di dover indicare preventivamente il numero di cluster da cercare). I pattern corrispondenti ai cluster così individuati sono mostrati in Fig. 7.46.

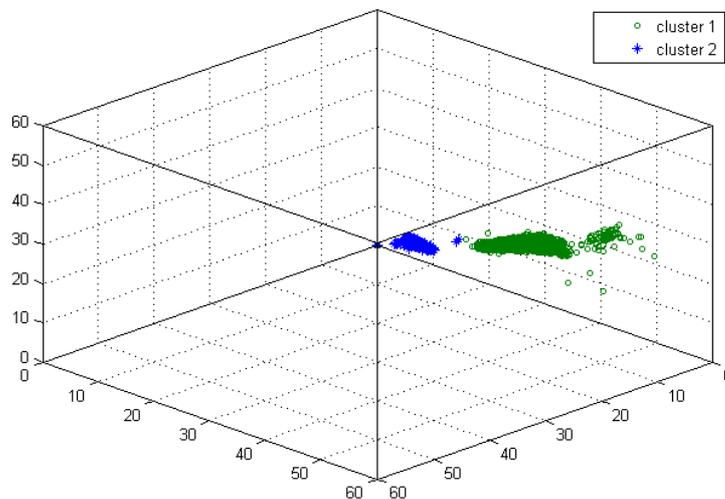


Fig. 7.45 – Diagramma vettoriale 3D – estrazione automatica dei cluster mediante “kmeans”

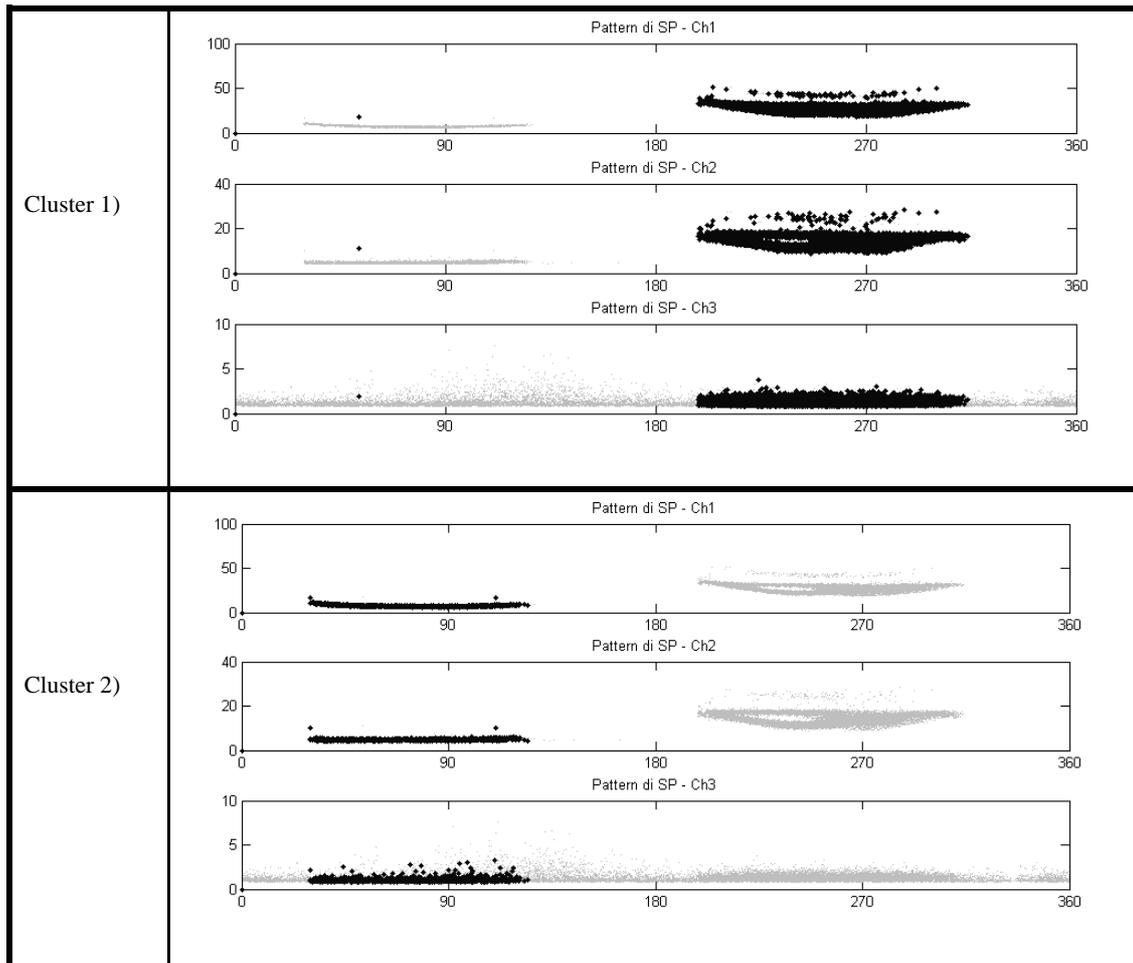


Fig. 7.46 – Estrazione automatica dei cluster (“kmeans”) – Pattern di SP corrispondenti

Allo stesso diagramma vettoriale è stato applicato anche l’algoritmo di estrazione automatica dei cluster “dbscan”. L’algoritmo in questo caso ha individuato tre cluster (Fig. 7.47 e Fig. 7.48) oltre ad una serie di punti ritenuti non appartenenti a nessun cluster.

Dall’analisi dei cluster corrispondenti (Fig. 7.49) si può osservare come vi sono due cluster principali (molto numerosi) che individuano perfettamente i due fenomeni del corona mentre il terzo cluster (molto meno numeroso) individua un gruppo di punti dovuti probabilmente a segnali riflessi del corona lato alta tensione.

Anche in questo caso bisogna evidenziare come l’algoritmo abbia individuato alcuni punti, qui indicati come appartenenti al “cluster 0”, che non risultano appartenere in maniera significativa a nessuno dei cluster individuati e che sono stati quindi stati correttamente esclusi dal processo di separazione in famiglie omogenee.

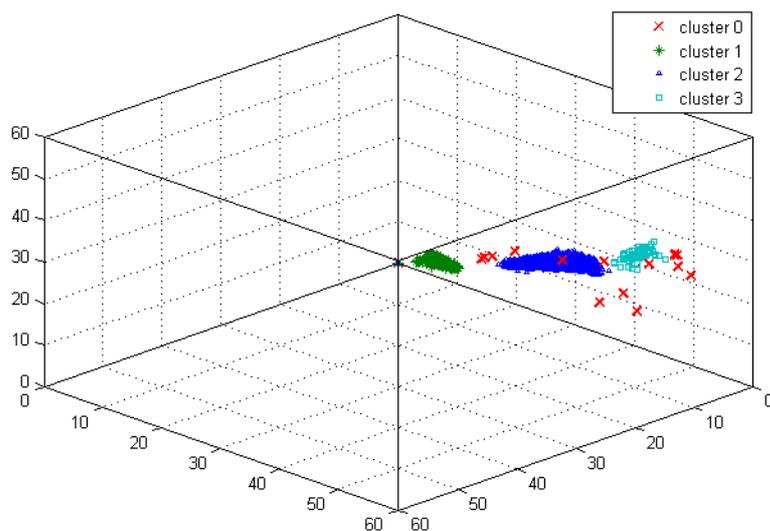


Fig. 7.47 – Diagramma vettoriale 3D – estrazione automatica dei cluster mediante “dbscan”

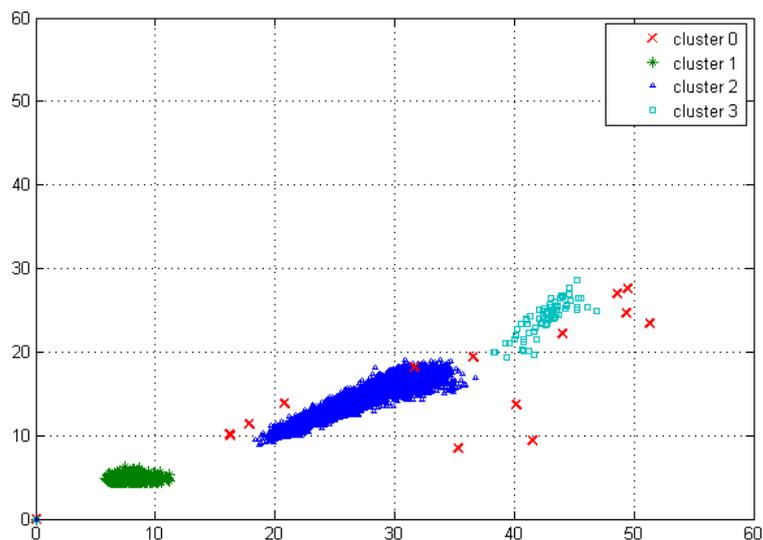


Fig. 7.48 – Diagramma vettoriale 3D (estrazione “dscan”) – proiezione sull’asse Y-Z

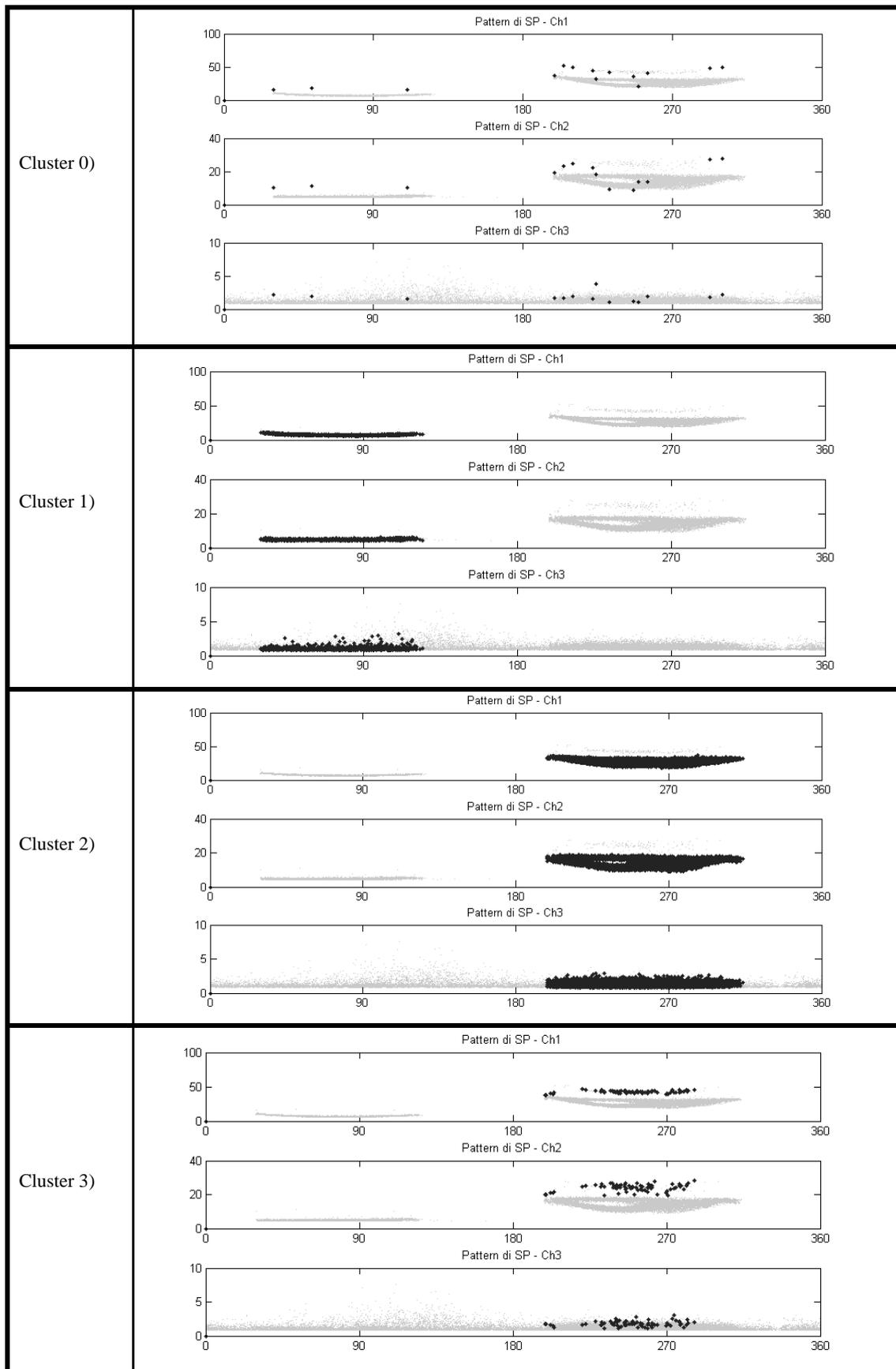


Fig. 7.49 – Estrazione automatica dei cluster (“dbscan”) – Pattern di SP corrispondenti

7.2.1.2 Misure mediante sistema a banda ultra larga

La prova è stata ripetuta utilizzando il prototipo di sistema di misura di SP a banda ultra larga. Il sistema è stato connesso come indicato dallo schema di Fig. 7.50.

Nelle Fig. 7.52 e Fig. 7.53 sono mostrati i diagrammi multi banda e tempo-frequenza equivalenti ottenuti tramite l'elaborazione dei dati acquisiti dal sistema. Si può osservare come in entrambi i casi vengano a formarsi due cluster relativamente distinti e separati tra loro. Nelle Fig. 7.54 e Fig. 7.55 sono invece mostrati i risultati della separazione automatica dei cluster per mezzo degli algoritmi "kmeans" e "dbscan". Si può osservare come anche in questo caso l'algoritmo dbscan abbia fornito risultati leggermente più precisi dell'algoritmo kmeans. In Fig. 7.56 sono mostrati i pattern corrispondenti ai cluster individuati.

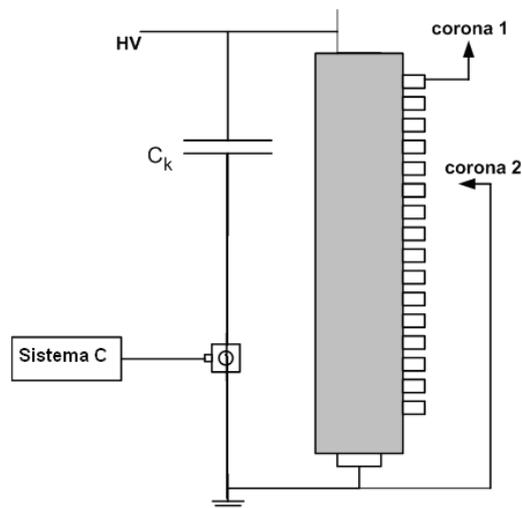


Fig. 7.50 – Schema della prova – misura con il sistema prototipo a banda ultra larga

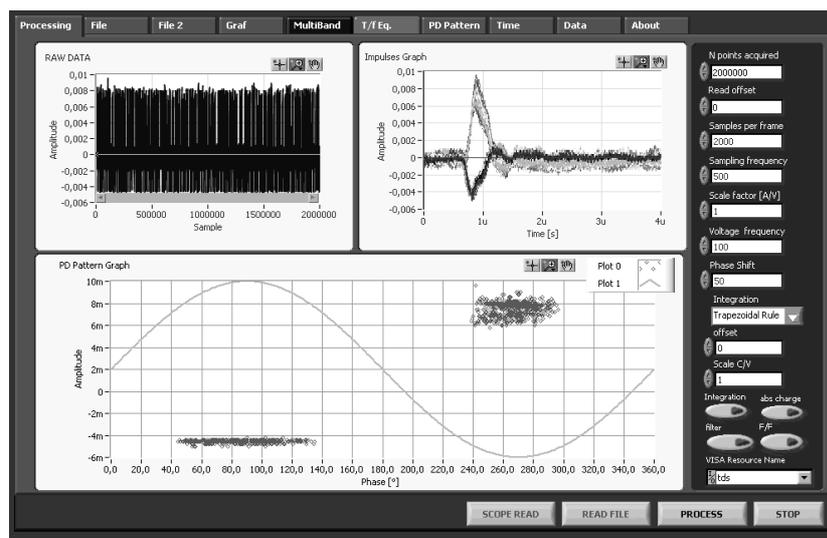


Fig. 7.51 – Schermata del programma durante la prova

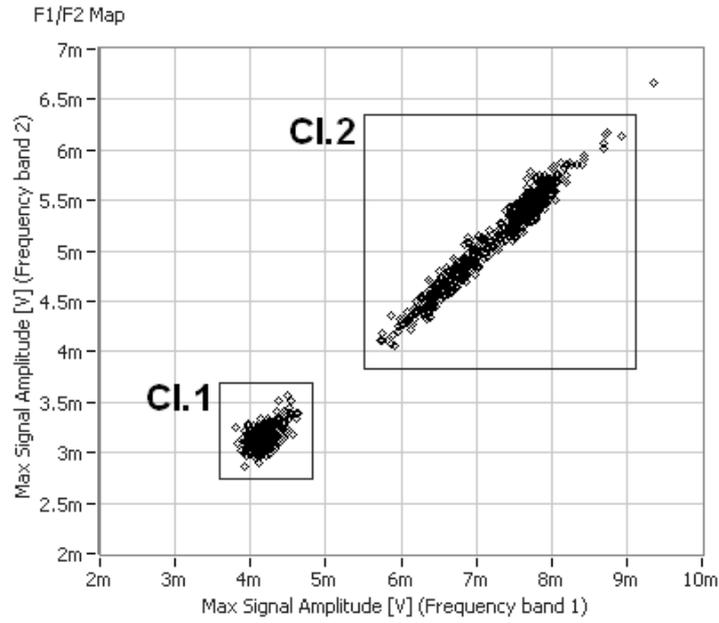


Fig. 7.52 – Diagramma di separazione multibanda

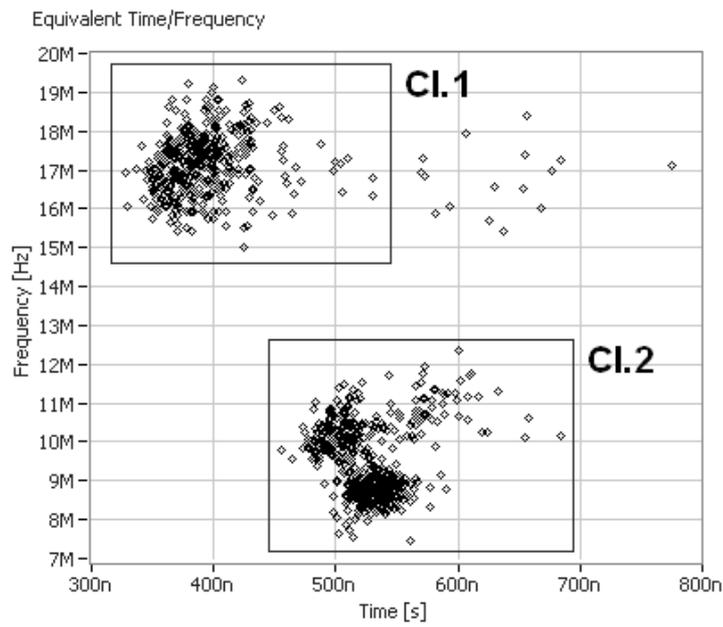


Fig. 7.53 – Diagramma di separazione tempo-frequenza equivalenti

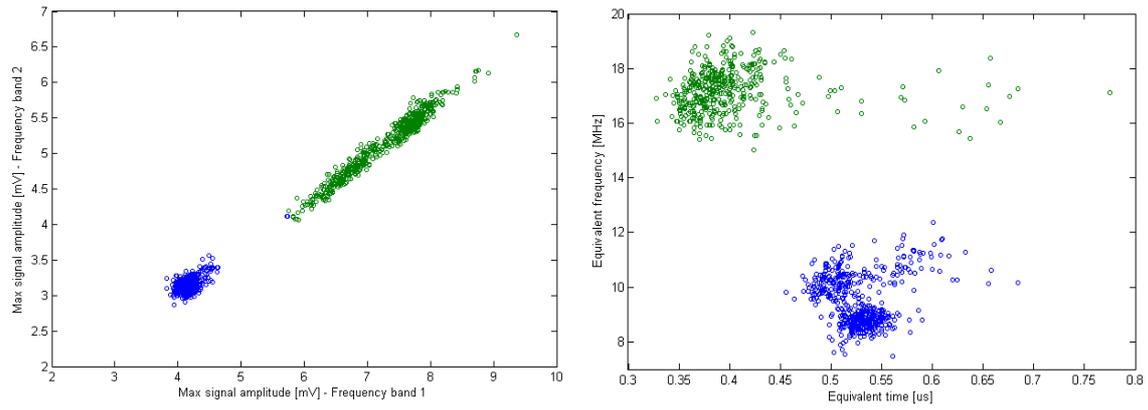


Fig. 7.54 – Individuazione automatica dei cluser mediante algoritmo “kmeans”

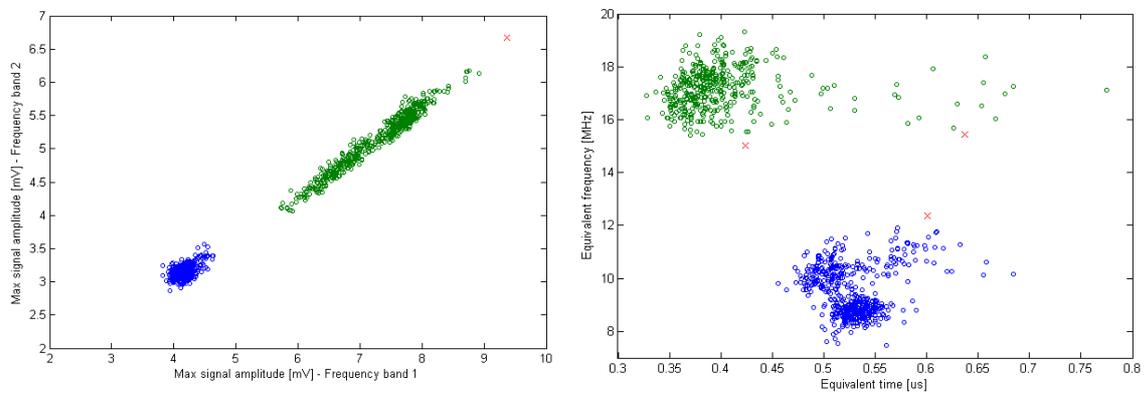


Fig. 7.55 – Individuazione automatica dei cluser mediante algoritmo “dbscan”

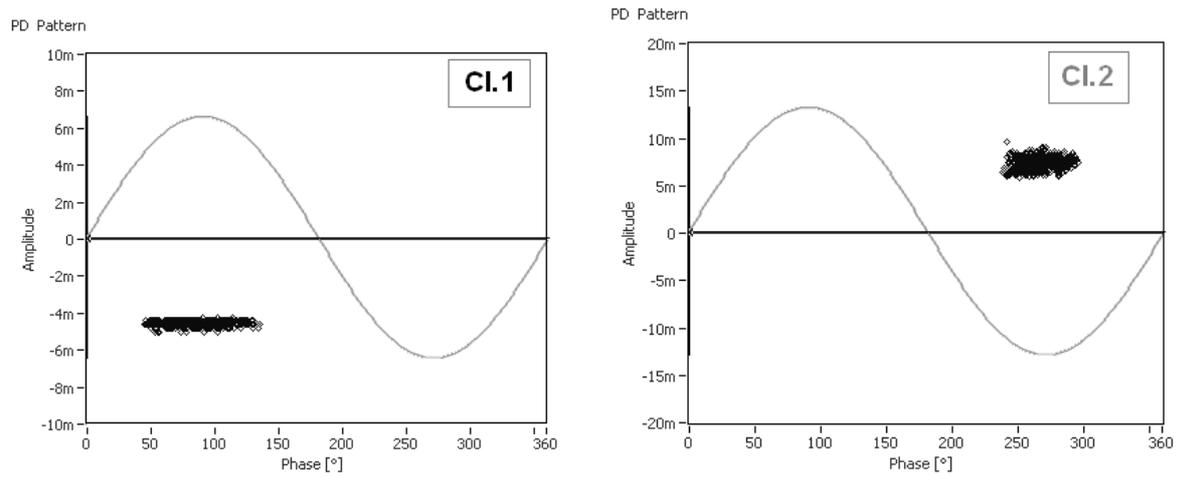


Fig. 7.56 – Pattern di SP corrispondenti ai cluster individuati

7.2.2 Prova di caratterizzazione della risposta del trasformatore MV mediante calibratore di SP

Un calibratore (generatore di impulsi) di SP è stato applicato in corrispondenza di ciascuna presa del trasformatore MT, come indicato nello schema di Fig. 7.57.

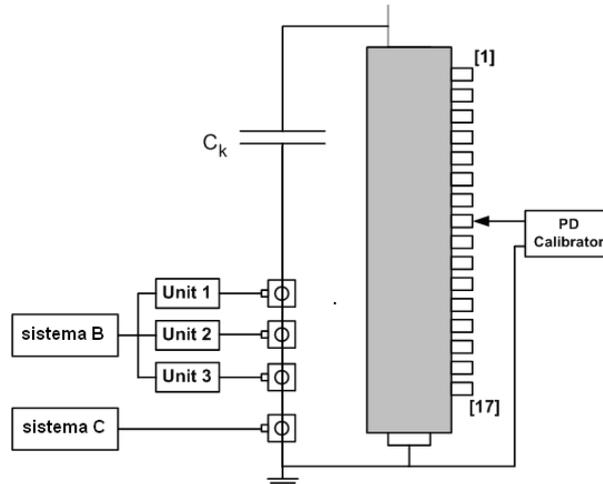


Fig. 7.57 – Schema della prova

In corrispondenza dei sensori sono stati registrati i segnali a banda larga. I segnali corrispondenti alle prime cinque prese ed i corrispondenti spettri sono mostrati nella Fig. 7.58. Come era lecito aspettarsi, all'aumentare della distanza che il segnale percorre dalla sorgente (individuata dalla posizione del calibratore in questo caso) al punto di misura (dove sono posizionati i sensori), aumenta in modo significativo anche l'attenuazione e la distorsione dei segnali rilevati.

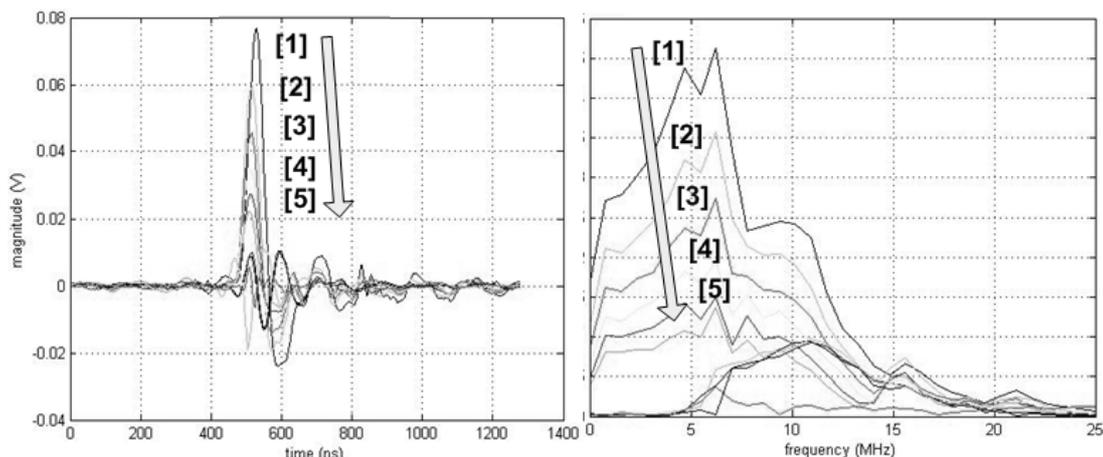


Fig. 7.58 – Forma d'onda e spettro dei segnali al variare della posizione del generatore di SP – sono indicati i segnali corrispondenti all'applicazione del calibratore di SP alle prese da 1 a 5

Per quanto riguarda il sistema multiterminale, per questa prova le bande passanti delle unità remote sono state impostate con ampiezza di banda pari a 300kHz e bande centrate su

1MHz, 8MHz and 15 MHz rispettivamente (come indicato nella schermata di configurazione di Fig. 7.59).

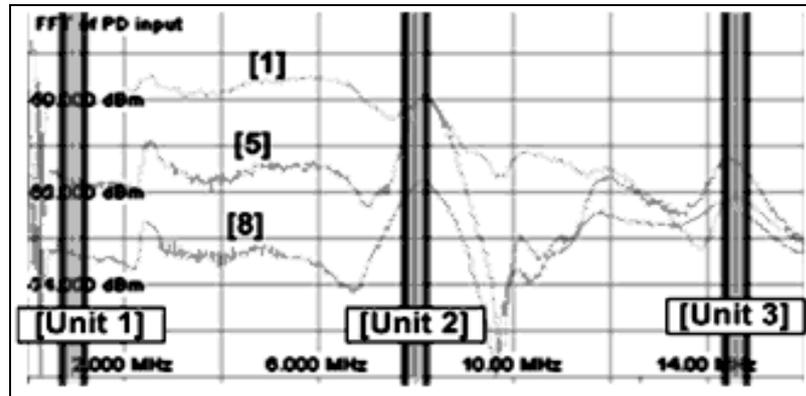


Fig. 7.59 – Impostazione della banda passante delle unità remote del sistema multiterminale MPD600 durante la prova – sono indicati anche gli spettri di segnali corrispondenti all’applicazione del calibratore di SP alle prese 1, 5 e 8

Il diagramma vettoriale (3PARD) ottenuto è mostrato qui in Fig. 7.60. Come si può osservare, a segnali generati in posizione diverse della colonna del trasformatore, corrispondono, anche in questo caso, cluster in posizioni differenti del diagramma tridimensionale.

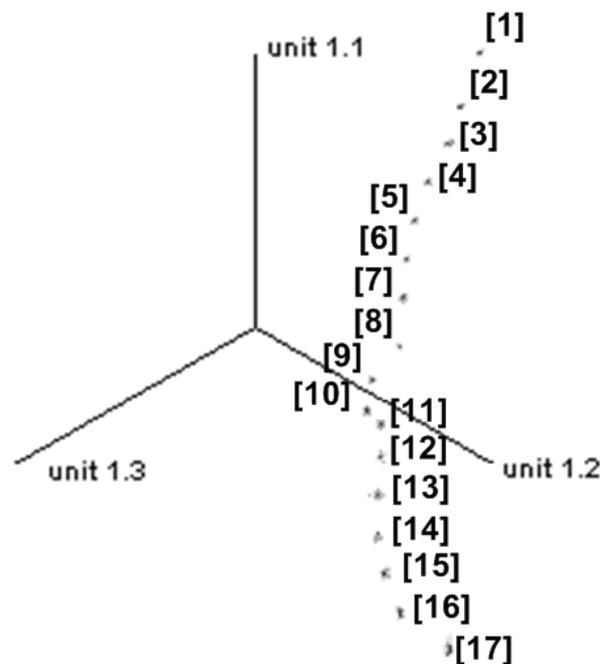


Fig. 7.60 – Diagramma vettoriale (3PARD) – sono indicati i cluster corrispondenti a differenti posizioni del calibratore di SP lungo la colonna del trasformatore in prova

8 CONSIDERAZIONI SULLA MISURA DELLE SCARICHE PARZIALI NEI CAVI

8.1 Introduzione

Fino a poco tempo fa la rilevazione delle SP nei collegamenti in cavo è stata condotta mediante prove off-line [86][87][95], che richiedono cioè la messa fuori servizio della linea per il tempo necessario alla messa in sicurezza della tratta, il suo scollegamento dal resto della linea, il collegamento del sistema di generazione della tensione e del sistema di misura, dell'esecuzione della misura stessa ed infine per il ripristino delle condizioni di esercizio. Ciò comporta, evidentemente, una certa interferenza nella gestione della rete di distribuzione.

I sistemi di monitoraggio on-line, ancora in via di sviluppo [88÷94], prevedono invece che la linea da verificare venga mantenuta in tensione o al massimo, che il tempo del “fuori servizio” sia limitato alle sole operazioni di applicazione dei sensori del sistema diagnostico. Gli approcci on-line e off-line presentano aspetti molto diversi tra di loro, sia, come detto, dal punto di vista dell'impatto sulla rete, sia per quanto riguarda alcuni aspetti prettamente tecnici che riguardano la misura vera e propria.

Tra questi ultimi si può citare, per esempio, nel caso dei sistemi on-line, l'impossibilità di variare il livello di tensione della prova (che necessariamente viene eseguita al valore di rete). Ciò significa, in pratica, poter rilevare solo le attività di scarica già ‘presenti’ in rete senza poterne innescare alcuna sfruttando valori di tensione più elevati.

La conseguenza di una indagine on-line è quella di avere a disposizione uno strumento che risulta sicuramente meno invasivo e che può permettere delle misure su tempi più prolungati, ma, anche, con minori possibilità di variare i parametri di misura risultando quindi meno ‘sensibile’ rispetto a quello off-line.

Oggi si va affermando una nuova filosofia secondo la quale le due metodologie off-line ed on-line non dovrebbero essere considerate come ‘alternative’ ma consequenziali [6][105].

Ad un primo ‘sondaggio’ mediante i sistemi di monitoraggio, potrebbe poi seguire una azione più mirata, condotta con una misura off-line, nel caso in cui venga evidenziata, con una buona confidenza, la presenza di SP lungo la linea.

Durante il monitoraggio, proprio a causa delle minori possibilità di agire sui parametri di prova oltre che per la presenza di disturbi sul collegamento in cavo (che in tal caso è direttamente collegato ai suoi estremi alle cabine elettriche) devono essere prese tutte le precauzioni affinché il segnale delle SP sia rilevabile con la massima sensibilità possibile.

Pertanto è necessario che il processo di monitoraggio sia ottimizzato in tutte le sue componenti.

Proprio per sfruttare al meglio le informazioni che possono essere rilevate tramite la tecnica del monitoraggio, il presente capitolo presenta le modalità per effettuare una caratterizzazione dei sensori (in particolare dei trasformatori di corrente (TA) ad alta frequenza) destinati alla rilevazione dei segnali di scarica e la stima dell'attenuazione subita

dagli stessi segnali durante il loro percorso lungo i cavi di media tensione comunemente utilizzati nelle reti di distribuzione italiane.

La correlazione tra i due aspetti investigati può permettere di individuare e scegliere la tipologia di sensori più indicata da impiegare per la rilevazione dei fenomeni di interesse oltre che stimare la massima lunghezza della linea in cavo che si riesce a coprire installando i sensori alle estremità [100÷104].

8.2 Caratterizzazione di trasduttori per la rilevazione delle SP nei cavi

In questo paragrafo vengono proposti alcuni possibili metodi per la caratterizzazione metrologica dei trasduttori di scariche parziali, non essendovi ancora una normativa specifica. I trasduttori che vengono qui considerati sono i trasformatori di corrente (TA) per alte frequenze (indicati in inglese con la sigla HFCT – High Frequency Current Transformers), sia apribili che di tipo a nucleo chiuso; molte delle osservazioni continuano comunque ad essere valide anche per trasduttori di SP di altro tipo.

La caratterizzazione metrologica consiste sostanzialmente nella valutazione del comportamento dinamico del trasduttore mediante la determinazione della sua funzione di trasferimento e la verifica della linearità.

8.2.1 Caratterizzazione della risposta in frequenza

La risposta in frequenza di un TA può essere idealmente determinata mediante l'applicazione di un segnale di corrente, ad ampio spettro, in ingresso $i_1(t)$ e rilevando, mediante un sistema di acquisizione digitale, l'uscita del TA $i_2(t)$ come mostrato in Fig. 3.4

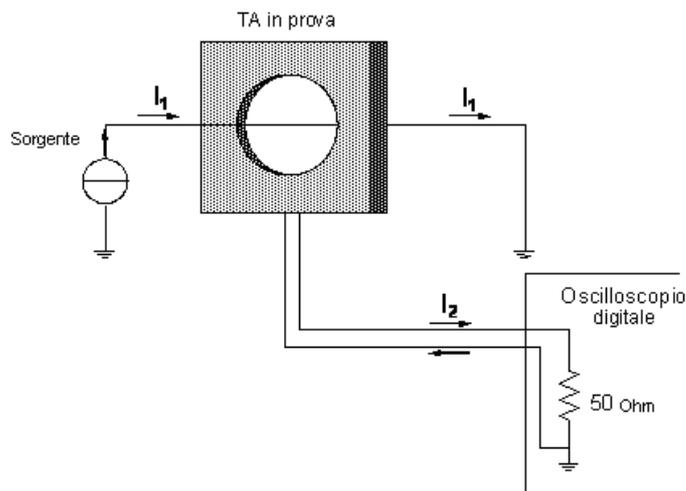


Fig. 8.1 - Caratterizzazione di un TA (caso ideale)

E' possibile dimostrare come il segnale $i_2(t)$ è dato dalla convoluzione di $i_1(t)$ con la risposta all'impulso del TA $h(t)$:

$$(8.1) \quad i_2(t) = i_1(t) \otimes h(t)$$

mediante la trasformata discreta di Fourier la (8.1) può essere riscritta nella seguente formulazione:

$$(8.2) \quad I_2(f) = I_1(f) \cdot H(f)$$

dove $H(f)$ è la risposta in frequenza del TA mentre $I_1(f)$ ed $I_2(f)$ sono rispettivamente le trasformate di Fourier di $i_1(t)$ e $i_2(t)$.

La risposta in frequenza del TA è dunque calcolabile come:

$$(8.3) \quad H(f) = \frac{I_2(f)}{I_1(f)}$$

8.2.2 Caratterizzazione in frequenza mediante generatore di tensione sinusoidale

Data la difficoltà di avere a disposizione sorgenti di corrente sinusoidali che operano su frequenze superiori alle decine di MHz, è possibile comunque ottenere una corrente con queste caratteristiche utilizzando un generatore di tensione sinusoidale con frequenza arbitrariamente variabile collegato ad un carico come mostrato in Fig. 8.2.

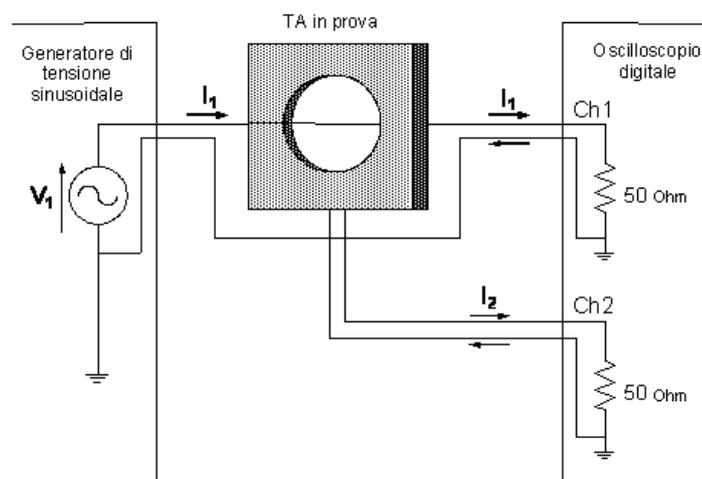


Fig. 8.2 - Caratterizzazione di un TA (utilizzo di un generatore di tensione a frequenza variabile)

La risposta in frequenza del TA risulta essere ancora data dalla (8.3).

8.2.3 Caratterizzazione in frequenza mediante generatore di tensione a gradino

Alternativamente è possibile utilizzare anche un generatore di tensione a gradino (oppure ad impulso) come descritto nella seguente figura:

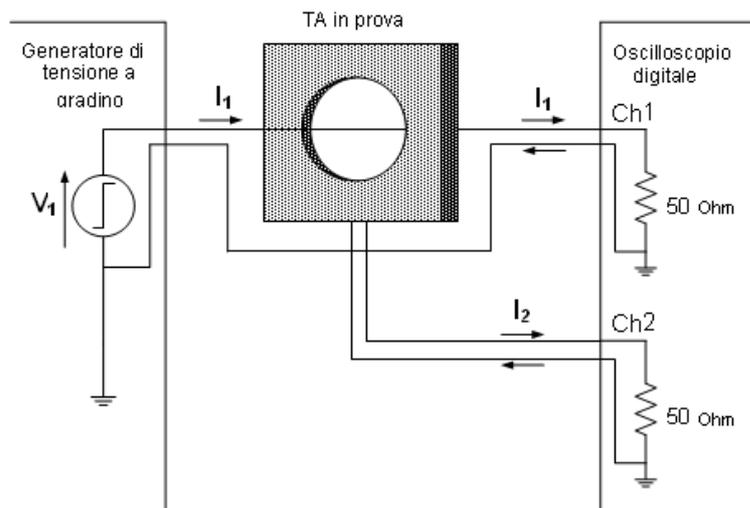


Fig. 8.3 - Caratterizzazione di un TA (utilizzo di un generatore di tensione a gradino)

La risposta in frequenza sarà ancora data dalla (8.3).

In appendice 2 viene descritta una metodologia di calcolo basata sulla correlazione e densità spettrale che consente, mediante un procedimento di media nel dominio delle frequenze, di avere una migliore stima della funzione di trasferimento, ottenendo anche una indicazione dell'incertezza della misura.

8.2.4 Verifica della linearità

E' possibile effettuare la verifica della linearità (ovvero dell'andamento del segnale in uscita dal TA al variare dell'intensità della corrente primaria) utilizzando il medesimo circuito di Fig. 8.2. Con il generatore di segnale si dovrà generare un segnale sinusoidale di ampiezza variabile e con una frequenza compresa nella banda del trasduttore.

8.3 Caratterizzazione metrologica di alcuni trasduttori commerciali

A titolo di esempio vengono illustrati i risultati della caratterizzazione metrologica di alcuni TA per la misura delle SP disponibili commercialmente (Fig. 8.4).

Sono stati considerati sia TA di tipo chiuso (indicati con le sigle TA1 e TA3) che TA di tipo apribile (TA2 e TA4).

Nella Fig. 8.5 sono presentati i risultati della misura della risposta in frequenza (espressa in per unità per facilitare il confronto fra TA con diverso rapporto di trasformazione) dei trasduttori. Si può osservare come i trasduttori TA1 e TA3 abbiano una banda passante posizionata tra le centinaia di kHz alle decine di MHz mentre TA2 e TA4 hanno la banda passante spostata su frequenze mediamente più elevate.

La misura è stata fatta mediante l'utilizzo di generatori di segnali di tensione sinusoidale a frequenza variabile (come spiegato in un paragrafo precedente).

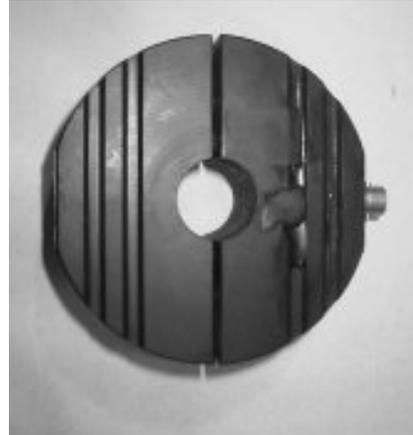
In Fig. 8.6 sono mostrati invece i risultati della verifica della linearità. Si può osservare come tutti i trasduttori presentino una buona linearità (con valori generalmente compresi

entro 1%). La prova è stata eseguita applicando segnali sinusoidali a frequenza fissa (scelta entro la banda passante del trasduttore) ed ampiezza variabile.

Nelle Fig. 8.7 ÷ Fig. 8.10 vengono invece mostrati i passaggi per ottenere la stima della risposta in frequenza del trasduttore mediante l'applicazione di un segnale a gradino, utilizzando la metodologia descritta in appendice 2.



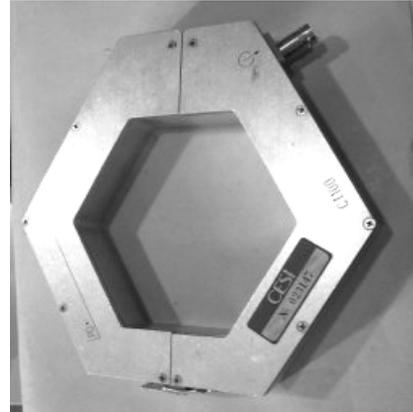
TA 1



TA 2



TA 3



TA 4

Fig. 8.4 – Trasduttori commerciali caratterizzati metrologicamente

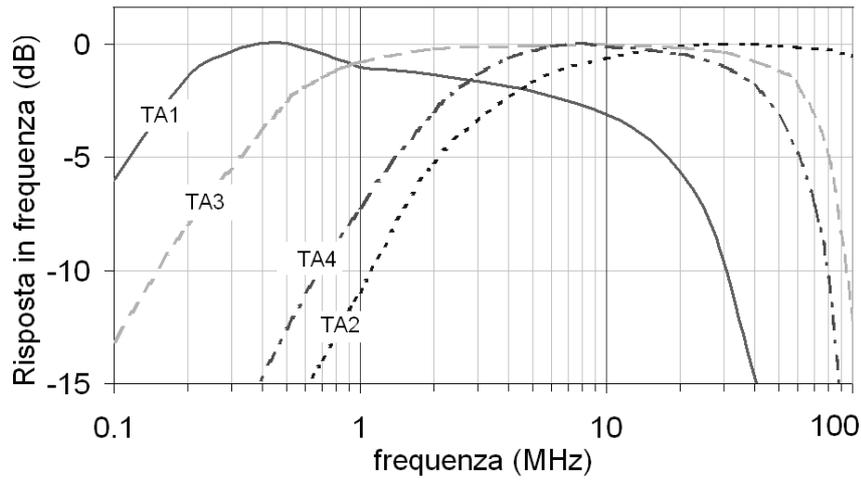


Fig. 8.5 – Verifica della risposta in frequenza dei trasduttori

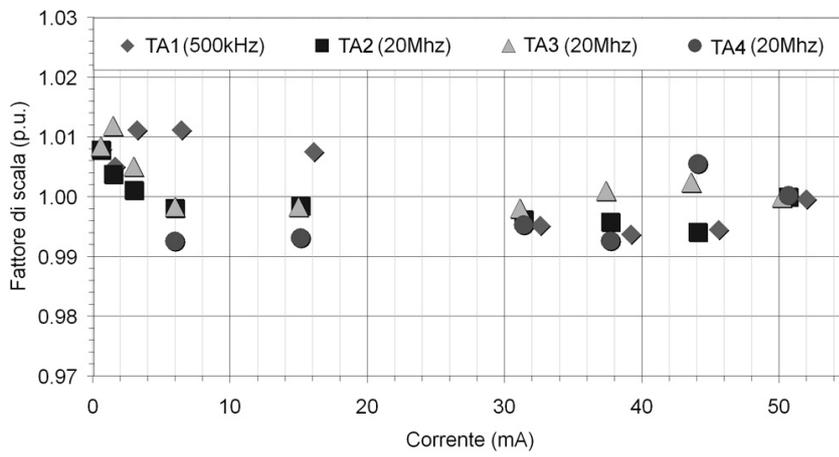


Fig. 8.6 – Verifica della linearità dei trasduttori

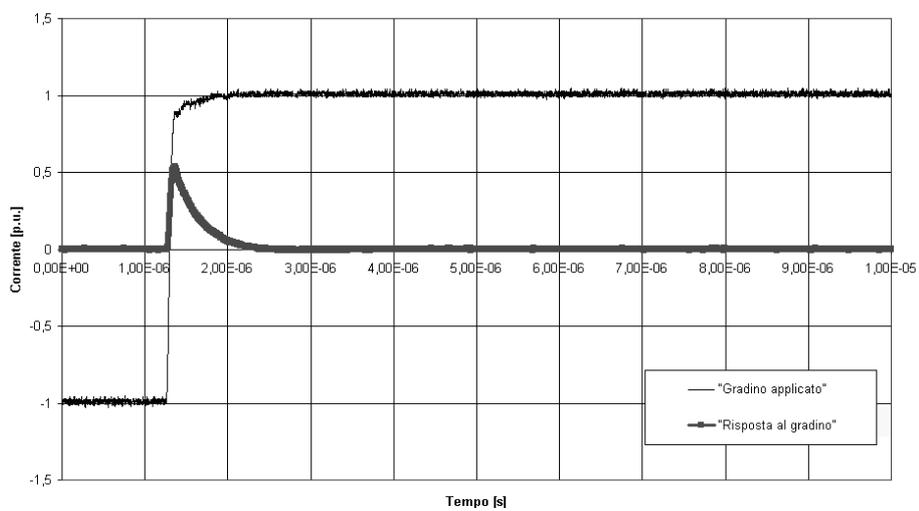


Fig. 8.7 – Risposta al gradino di corrente del trasduttore TA1

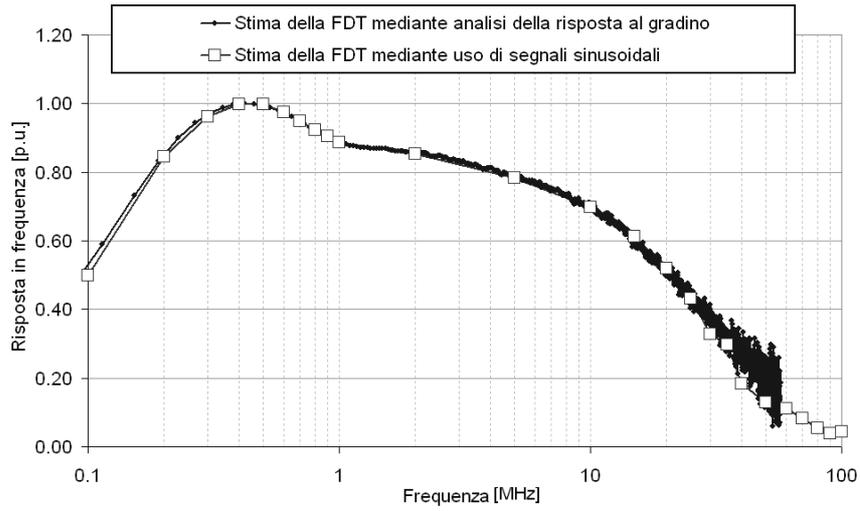


Fig. 8.8 – Stima della funzione di trasferimento (FDT) del trasduttore TA1 in per unità

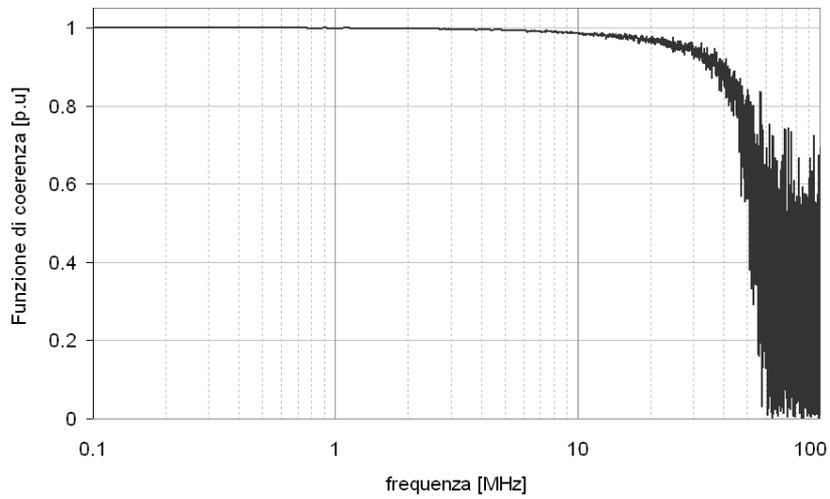


Fig. 8.9 – Calcolo della funzione di coerenza associata alla stima della FDT

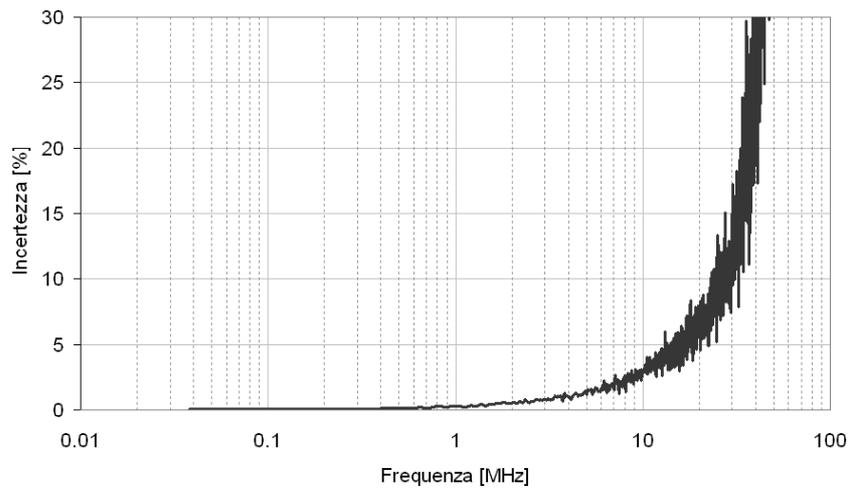


Fig. 8.10 – Calcolo dell'incertezza di misura associata alla stima della FDT

8.4 Propagazione ed attenuazione delle scariche parziali nei cavi

8.4.1 Descrizione del fenomeno fisico

Le SP sono dei fenomeni impulsivi caratterizzati da frequenze molto superiori a quella di rete, che si estendono fino alle centinaia di MHz.

Per analizzare il comportamento dei segnali in alta frequenza che si propagano all'interno di un cavo è necessario ricorrere alla teoria delle linee di trasmissione che descrive i segnali di tensione e corrente come delle onde migranti [100-102].

Questa teoria si basa sul modello elettrico di linea rappresentato dal circuito equivalente presentato qui in Fig. 8.11

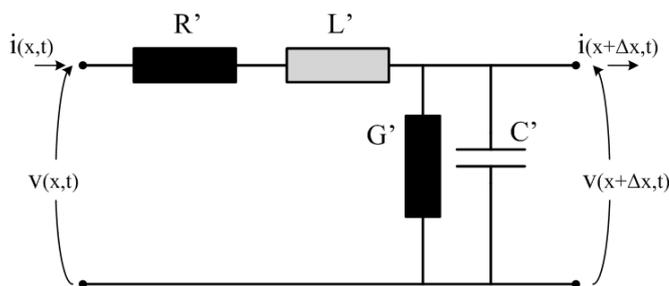


Fig. 8.11 – Modello circuitale semplificato di una linea di trasmissione

Dove L' , C' , R' e G' rappresentano l'induttanza, la capacità, la resistenza e la conduttanza della linea per unità di lunghezza [95].

In realtà, per tener conto di ulteriori perdite dovute essenzialmente alla presenza dello strato di semiconduttore nei cavi è stato proposto un modello più complesso [100] (presentato in Fig. 8.12) dove i parametri G_1' , G_2' , C_1' e C_2' sono stati introdotti per rappresentare l'effetto dello strato di semiconduttore (interno ed esterno).

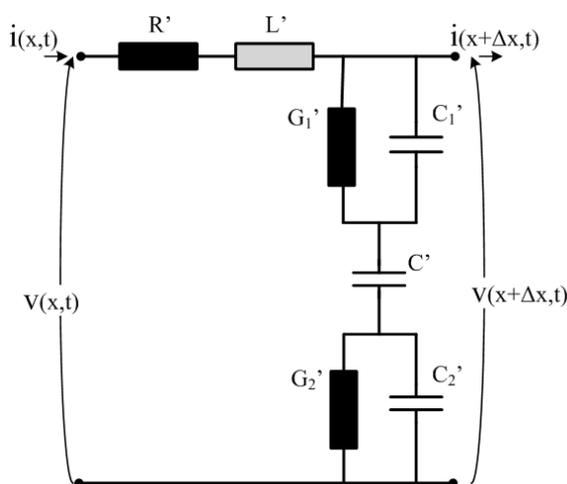


Fig. 8.12 – Modello circuitale di una linea che tiene conto anche delle perdite nel semiconduttore

La validità di tale modellizzazione è stata dimostrata per frequenze fino alle centinaia di MHz, ma per frequenze fino alla decina di MHz, più di interesse per l'applicazione della

misura delle SP che si propagano nei cavi, è comunque possibile semplificare il circuito e riportarlo a quello di Fig. 8.11 (tenendo conto delle ulteriori perdite attraverso degli opportuni coefficienti correttivi [95]).

Le equazioni della linea di trasmissione di Fig. 8.11 sono esprimibili come:

$$(8.4) \quad \begin{aligned} -\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} &= R'i(x,t) + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} &= G'v(x,t) + C' \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \end{aligned}$$

Passando alla notazione fasoriale si ottiene:

$$(8.5) \quad \begin{aligned} -\frac{dV(x)}{dx} &= (R' + j\omega L')I(x) \\ -\frac{dI(x)}{dx} &= (G' + j\omega C')V(x) \end{aligned}$$

Si può dimostrare che [95][101]:

$$(8.6) \quad \begin{aligned} \frac{d^2V(x)}{dx^2} &= \gamma^2 V(x) \\ \frac{d^2I(x)}{dx^2} &= \gamma^2 I(x) \end{aligned}$$

Dove è stata introdotta la costante di propagazione γ uguale a:

$$(8.7) \quad \gamma = \alpha + j\beta$$

Ovvero:

$$(8.8) \quad \gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')}$$

Con:

$\alpha = \text{Re}(\gamma)$ - costante di attenuazione della linea di trasmissione espressa in [Np/m]

$\beta = \text{Im}(\gamma)$ - costante di fase della linea di trasmissione espressa in [rad/m]

La soluzione della 8.6 è data allora dalla somma di due onde che viaggiano in senso opposto:

$$(8.9) \quad \begin{aligned} V(x) &= V_0^+ e^{-\gamma x} + V_0^- e^{+\gamma x} \\ I(x) &= I_0^+ e^{-\gamma x} + I_0^- e^{+\gamma x} \end{aligned}$$

Si può dimostrare che la velocità di propagazione di queste onde risulta data da:

$$(8.10) \quad v = \frac{\omega}{\beta}$$

8.4.2 Propagazione e localizzazione delle SP nei cavi mediante analisi riflettometrica

Si consideri il caso di una scarica parziale che avviene all'interno di un cavo (schematizzato in Fig. 8.13 con il relativo circuito equivalente di Fig. 8.14), posizionato a distanza L dal terminale T_1 (alimentato da una sorgente di alta tensione) in prossimità del quale è stato connesso un sistema di misura di SP tramite un sensore, mantenendo invece aperto (non connesso) il cavo dal lato del terminale T_2 .

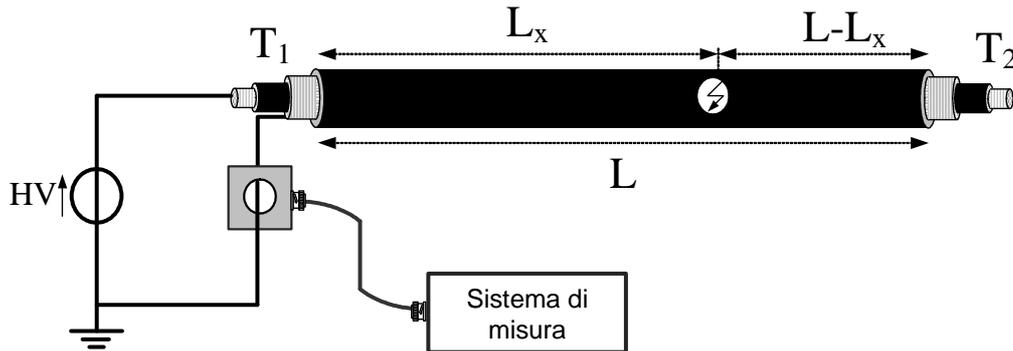


Fig. 8.13 – Propagazione degli impulsi generati da una scarica parziale in un cavo

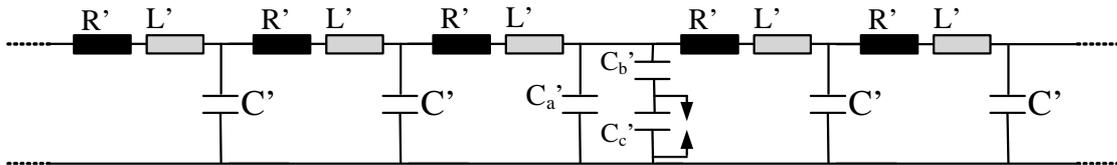


Fig. 8.14 – Circuito equivalente

A seguito della scarica vengono generati due impulsi eguali che si propagheranno lungo il cavo in senso opposto. Un oscilloscopio digitale connesso al sensore vedrà quindi l'impulso (i1) in arrivo dopo aver percorso la distanza L in un tempo t_1 ed un impulso più attenuato che avendo percorso la distanza di $(L-L_x)$ è arrivato al terminale T_2 dove (essendo il cavo aperto e quindi con impedenza pressoché infinita) viene completamente riflesso e percorrendo una distanza ulteriore pari a L arriva al sensore in un tempo t_2 , come rappresentato in Fig. 8.15.

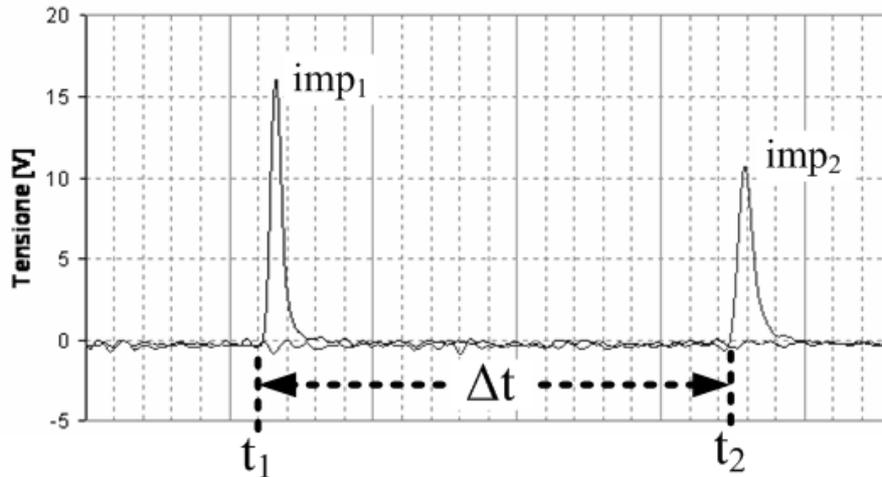


Fig. 8.15 – Segnali acquisiti dal sistema di misura

Nota la lunghezza del cavo L e la velocità di propagazione degli impulsi nel cavo v (calcolabile anche sperimentalmente mediante un generatore di impulsi posto ad un terminale e misurando la distanza tra le riflessioni con un acquisitore ad ampia banda) si possono esprimere le distanze percorse dai singoli impulsi come:

$$(8.11) \quad \begin{aligned} L_x &= v \cdot t_1 \text{ per l'impulso 1} \\ L + (L - L_x) &= v \cdot t_2 \text{ per l'impulso 2} \end{aligned}$$

Da cui si ottiene facilmente che la distanza del punto dove è avvenuta la SP alla posizione del sensore è data da:

$$(8.12) \quad L_x = L - v \cdot \left(\frac{t_2 - t_1}{2} \right)$$

8.4.3 Metodo di misura dell'attenuazione

In questo capitolo si vuole quindi analizzare un metodo per la stima dell'attenuazione caratteristica dei cavi.

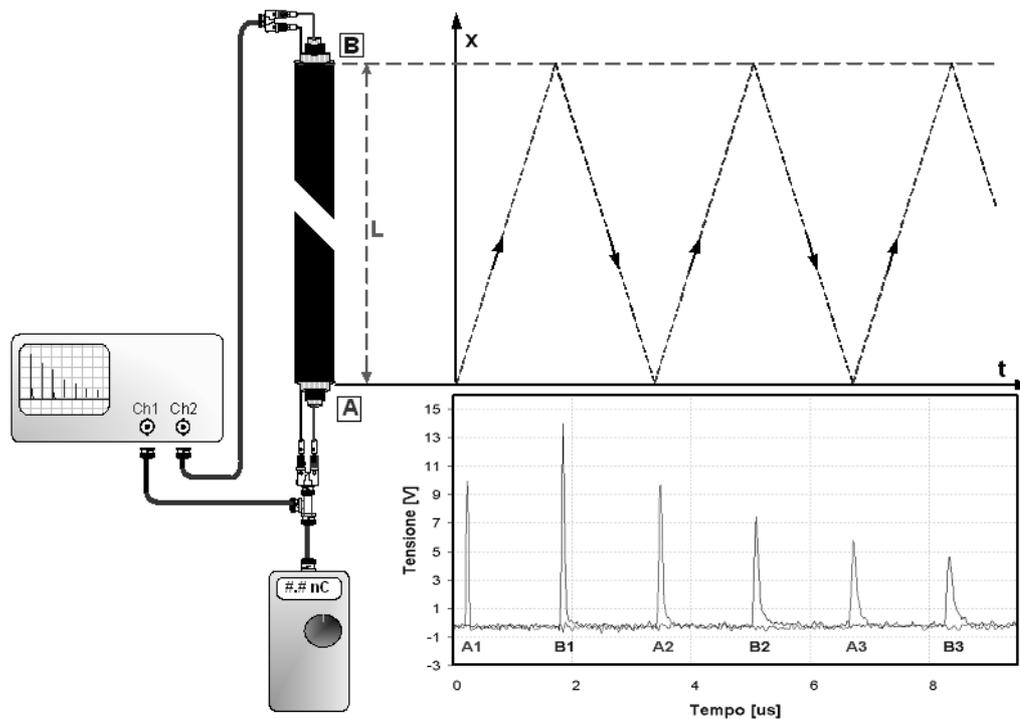


Fig. 8.16 – Circuito per la verifica dell'attenuazione in un cavo

Si consideri la Fig. 8.16 dove si è scelto di rappresentare un cavo al cui estremo, mediante generatore di scariche parziali viene applicato un impulso di corrente. L'intensità di questo impulso (indicato con A1) dipende, sostanzialmente, dalla combinazione delle impedenze caratteristiche viste dal generatore di scariche parziali al nodo A. Tale impulso (A1) partendo dall'estremo A e percorrendo l'intera lunghezza del cavo, incontrerà all'estremo opposto (B) un punto di discontinuità, dove subirà una riflessione.

L'entità di tale riflessione, che si esprime mediante un coefficiente variabile tra 0 e 1 (dove '0' significa che non c'è riflessione - cioè l'impulso vede una impedenza uguale a quella del cavo, '1' significa che l'impedenza vista al terminale è infinita o comunque molto maggiore di quella del cavo) modificherà l'ampiezza dell'impulso misurato dal canale CH2 dell'oscilloscopio.

Nel nostro caso, nel punto B l'impedenza è di qualche ordine di grandezza superiore a quella del cavo, per cui si può stimare che vi sia un coefficiente di riflessione praticamente unitario che fa sì che l'impulso visto al terminale (B1) abbia valore doppio di quello incidente (cioè di A1, attenuato però dall'aver percorso la lunghezza di cavo L) in quanto ottenuto dalla somma degli impulsi incidente e riflesso.

L'impulso riflesso in B ripercorrerà inversamente lo stesso tratto di cavo verso il terminale A, subendo, ancora nel suo percorso 'L' un'ulteriore attenuazione.

Arrivato all'estremo A, e incontrando anche qui (come in B), un'impedenza caratteristica di valore molto maggiore di quella del cavo, subirà una ulteriore riflessione (con coefficiente unitario). Il picco dell'impulso (A2), tuttavia, sarà minore del precedente (B1) a causa dell'attenuazione subita lungo L.

Poiché il tempo di transito tra A e B è maggiore della durata dell'impulso, non si hanno sovrapposizioni degli effetti (a parte, come sopra detto, ai terminali) ed il fenomeno di riflessione ed attenuazione prosegue continuamente fino alla completa estinzione del treno di impulsi smorzato (come rappresentato dalla Fig. 8.17).

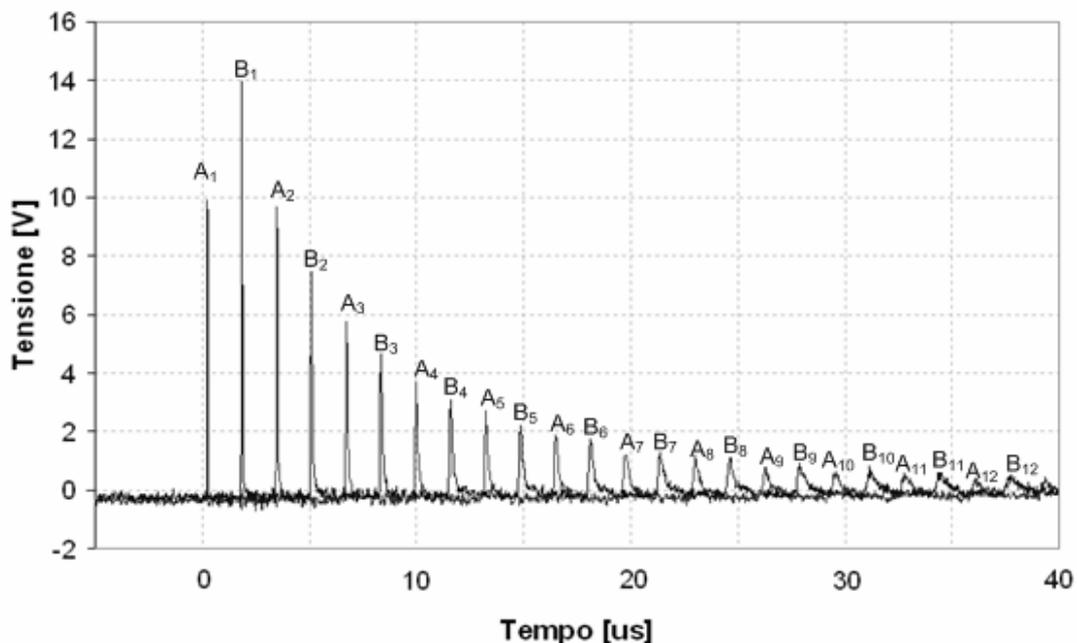


Fig. 8.17 – Andamento delle riflessioni di un impulso di corrente in un cavo XLPE lungo 260m

Se consideriamo ora un sistema lineare, la cui grandezza in ingresso è l'impulso di corrente B1 e la grandezza in uscita è B2, la sua funzione di trasferimento può essere calcolata come il rapporto delle trasformate di Fourier del segnale di uscita e del segnale in ingresso. In questo modo si può risalire all'attenuazione che il cavo introduce per una lunghezza pari a $2xL$, dove L è la lunghezza totale del cavo, mentre $2xL$ è il percorso effettuato dall'impulso per andare e tornare all'estremo B. Per simmetria, l'attenuazione così calcolata deve essere uguale all'attenuazione ottenibile mediante l'analisi degli impulsi A2 ed A3 e lo stesso vale ovviamente per B2 e B3 ecc.

In realtà l'uguaglianza delle funzioni di trasferimento delle coppie $A_{i+1} - A_i$ e $B_{n+1} - B_n$ dipende, oltre che dall'attenuazione dei segnali lungo il cavo, anche dall'impedenza caratteristica vista ai terminali A e B. Questa comunque, come descritto precedentemente, può essere ritenuta di valore pressoché 'infinito' per entrambe i terminali

In appendice 2 viene presentata una metodologia di calcolo più sofisticata, ma che sostanzialmente non si discosta molto da questo approccio semplificato.

A titolo di esempio, viene proposto in Fig. 8.18 l'andamento della funzione di trasferimento (attenuazione) per un cavo XLPE di $L = 260$ m. Come si può osservare dal grafico le stime della funzione di trasferimento ottenute mediante l'analisi delle coppie di impulsi B2/B1, A3/A2, B3/B2 risultano praticamente coincidenti a riprova anche della validità del metodo.

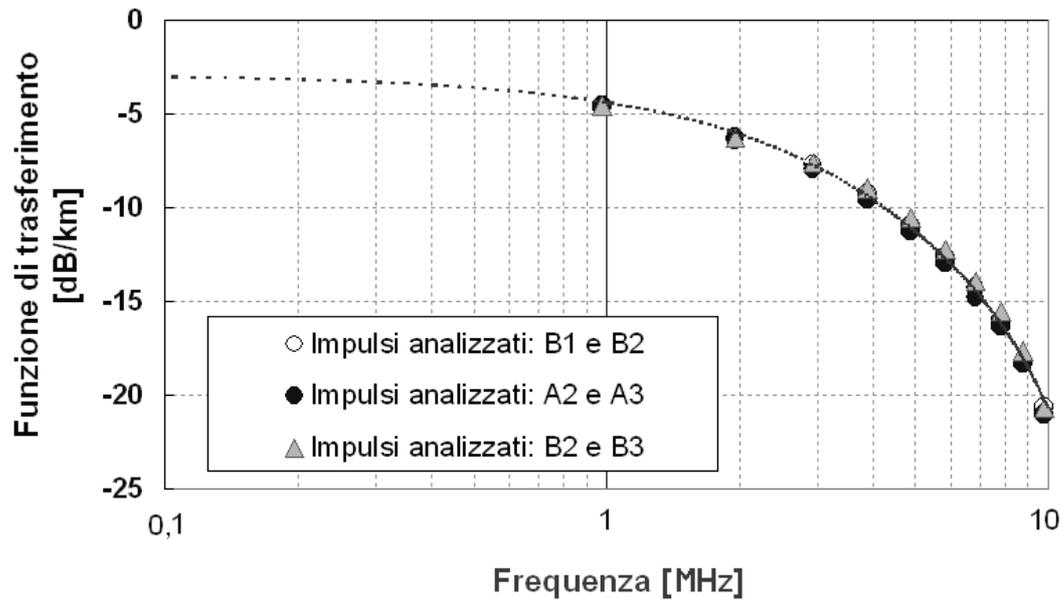


Fig. 8.18 – Stime di funzioni di trasferimento per un cavo XLPE ($L=260$ m) ottenute mediante analisi di diverse coppie di impulsi riflessi.

8.5 Valutazione sperimentale in laboratorio dell'attenuazione per alcuni tipi di cavo MT

Per verificare l'attenuazione tipicamente introdotta dai cavi MT si è scelto di analizzare sperimentalmente il comportamento di alcuni cavi diffusamente utilizzati nelle reti di distribuzione italiane.

Sono stati presi alcuni spezzoni di diverse tipologie di cavo MT (con isolamento estruso in XLPE ed EPR o in carta impregnata) e, per ciascun cavo, è stato realizzato il circuito di misura di Fig. 8.16. Sono stati acquisiti ed analizzati un numero significativo di impulsi riflessi e, mediante la metodologia descritta in appendice 2, si è ottenuta, per ciascun cavo, la stima dell'attenuazione espressa in dB/km.

I campioni presi in esame, costituiti dal solo cavo, senza la presenza di alcuna giunzione intermedia, hanno le seguenti caratteristiche:

CAVO 1) Tipologia di isolamento: XLPE

Caratteristiche: $V_n = 12/20$ kV – 185 mm² Al

Lunghezza dello spezzone analizzato: 260m

CAVO 2) Tipologia di isolamento: Carta impregnata

Caratteristiche: $V_n = 12/20$ kV – 150 mm² Al

Lunghezza dello spezzone analizzato: 50m

CAVO 3) Tipologia di isolamento: EPR

Caratteristiche: $V_n = 12/20$ kV – 95 mm² Cu

Lunghezza dello spezzone analizzato: 30m

Nei grafici Fig. 8.19 e Fig. 8.20 vengono presentati (con diverse scale per poter essere facilmente confrontabili anche con quanto ottenuto per i trasduttori) i risultati delle misure eseguite sugli spezzoni descritti.

Si può notare come l'attenuazione introdotta dai cavi con isolamento in carta impregnata è notevolmente superiore a quella dei cavi estrusi. Questo risultato è, dal punto di vista teorico, giustificato dal più elevato valore dei parametri dissipativi dei cavi in carta rispetto a quelli estrusi.

Nella Fig. 8.21 vengono confrontati l'andamento dell'attenuazione ottenuta sullo spezzone di cavo XLPE qui analizzato e di alcuni cavi XLPE (di caratteristiche nominali simili) ritrovati in alcune pubblicazioni scientifiche [95][100]. A conferma della bontà del metodo qui utilizzato si può osservare come l'andamento dell'attenuazione risulti concorde con quanto ottenuto con altri due approcci differenti.

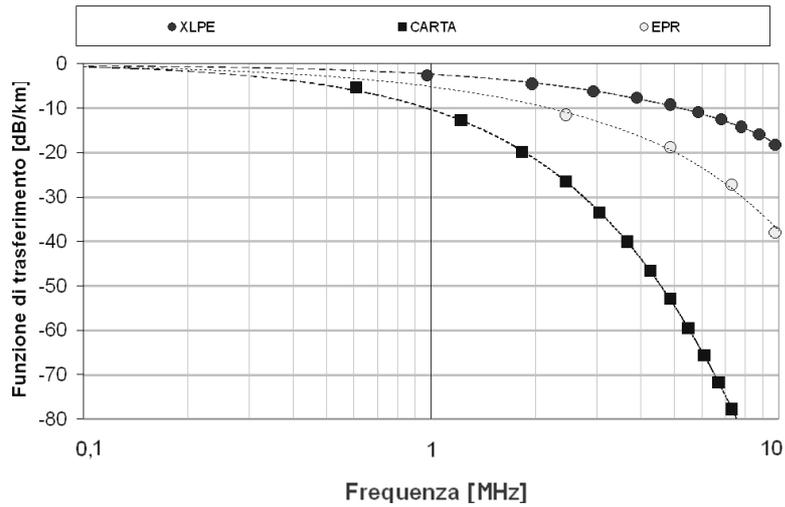


Fig. 8.19 – Funzioni di trasferimento per diverse tipologie di cavi MT (scala logaritmica)

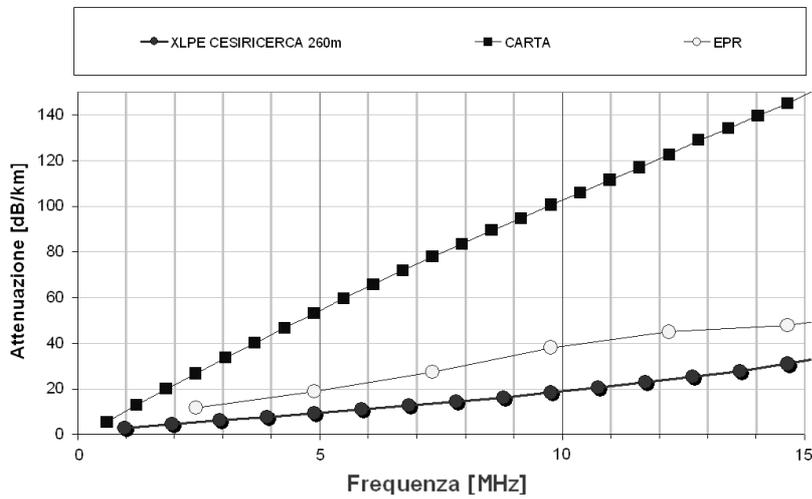


Fig. 8.20 – Attenuazione di alcuni tipi di cavi MT (dB/km)

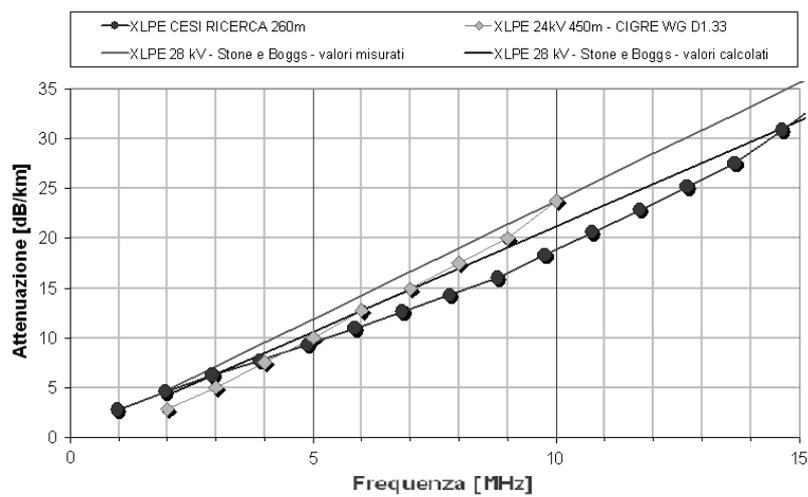


Fig. 8.21 – Confronto tra misure di attenuazione su alcuni cavi MT di tipo XLPE, utilizzando differenti metodologie di calcolo.

8.6 Verifica sperimentale del comportamento di alcuni trasduttori di scariche parziali su uno spezzone di cavo

Per poter verificare il comportamento di alcuni trasduttori (descritti in precedenza) su uno spezzone di cavo XLPE lungo 260 m. è stato realizzato il circuito di misura di Fig. 8.22. Mediante un calibratore di scariche parziali è stato applicato all'estremo A un impulso di corrente (A1) che è stato poi misurato tramite oscilloscopio all'estremo B (questa volta l'estremo B è stato chiuso su una impedenza di 50 Ohm per ricreare in Laboratorio una situazione più simile ad un caso reale di monitoraggio delle SP, dove i terminali non sono aperti ma il cavo risulta generalmente connesso al carico).

Successivamente sono state eseguite le misure utilizzando in sequenza i diversi trasduttori (descritti nel paragrafo 8.3) posizionati all'estremo B.

I segnali in uscita dai trasduttori sono stati acquisiti mediante un canale dell'oscilloscopio digitale e qui presentati in Fig. 8.23 e Fig. 8.24 (sono riportati anche in p.u., in modo da permettere di riscontrare meglio la distorsione che ciascuno dei trasduttori introduce nel misurare il segnale B1).

Come si può osservare in questi due grafici, i TA di tipo apribile (TA2 e TA4), che risultavano (si veda il paragrafo 8.3) avere una risposta in frequenza spostata verso frequenze più elevate rispetto ai comuni TA di tipo chiuso (TA1 e TA3), risultano deformare il segnale in maniera molto più accentuata.

In particolare il fronte di salita dell'impulso originale B1 risulta ben riprodotto ma la forma dell'impulso presenta una sovra elongazione negativa non presente nel segnale originale.

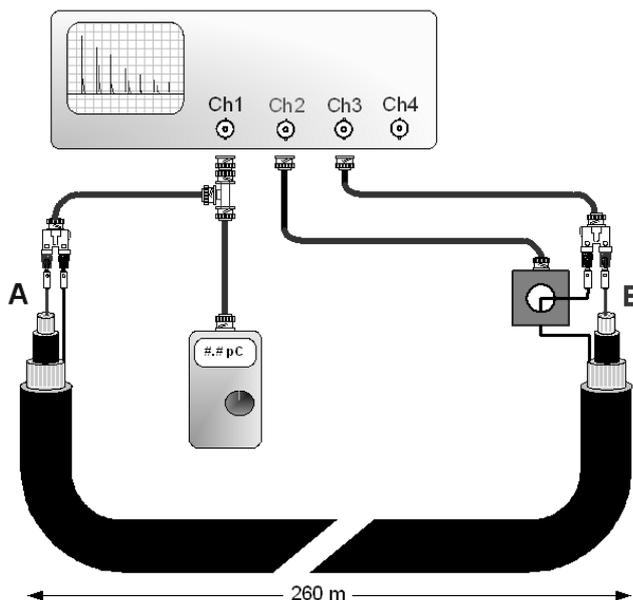


Fig. 8.22 – Circuito di misura per la verifica del comportamento dei trasduttori di SP su un cavo MT di tipo XLPE (L=260m)

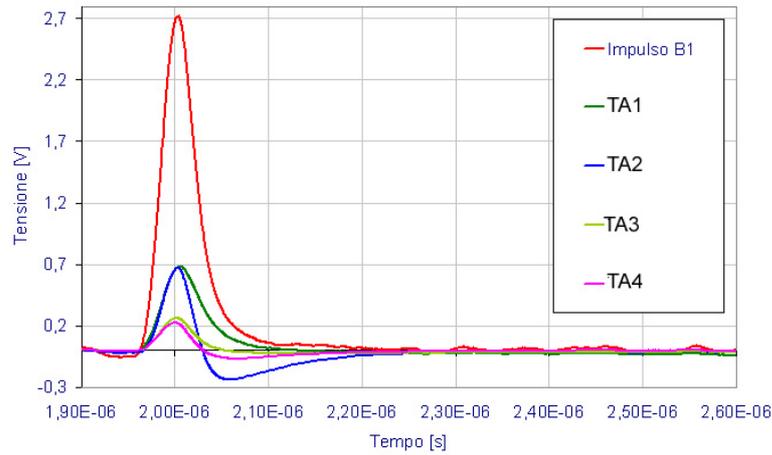


Fig. 8.23 – Confronto tra l'impulso (B1) misurato direttamente dall'oscilloscopio e gli impulsi misurati da diversi modelli di TA

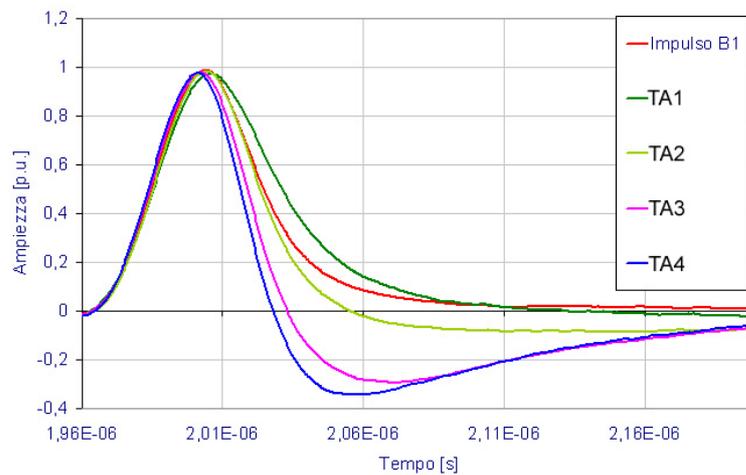


Fig. 8.24 – Confronto tra impulsi misurati da diversi modelli di TA (p.u.)

E' intuitivo constatare come misurare il fenomeno di SP in cavi di distribuzione senza aver opportunamente scelto il trasduttore più adatto (in termini soprattutto di banda passante) in relazione alla tipologia di cavo ed in particolare all'attenuazione che i segnali di SP subiscono nel propagarsi al suo interno, può creare non pochi problemi legati all'accuratezza ed alla ripetibilità della misura nel suo complesso.

8.7 Verifica sperimentale dell'attenuazione di alcuni cavi MT in esercizio

Per ottenere l'indicazione dell'attenuazione dei segnali di SP in cavi effettivamente installati ed in esercizio si è deciso di verificare la possibilità di utilizzare dati ottenuti da campagne di prove precedenti effettuate con differenti scopi. In particolare sono stati utilizzati parte dei dati ottenuti durante prove per l'individuazione di difetti localizzati su cavi MT.

Le prove erano state eseguite utilizzando il metodo fuori linea che prevede di mettere fuori esercizio il cavo, scollegarlo dai sezionatori associati e di alimentarlo con un generatore di tensione ausiliario ed effettuare la misura dell'attività di scariche parziali.

Nel caso specifico era stato utilizzato un sistema OWTS [87] che comprende un generatore di tensione oscillante trasportabile (che genera una sinusoide smorzata con una frequenza d'oscillazione variabile tra 300 Hz e 50 Hz in funzione della lunghezza del cavo) ed un sistema di misura di SP digitale che utilizza il classico condensatore d'accoppiamento con annesso quadripolo come trasduttore. I segnali acquisiti sono inviati ad un convertitore analogico digitale ed elaborati con un programma proprietario (che però consente l'esportazione dei dati in formato excel).

Preliminarmente all'esecuzione di ogni sessione di misura delle SP con il sistema OWTS è necessario effettuare la taratura del circuito, che si esegue applicando un calibratore di SP al cavo in prova; il segnale viene acquisito per un tempo sufficientemente lungo da poter visualizzare sia l'impulso applicato sia l'impulso di ritorno (il cavo è aperto all'estremità opposta a quella di applicazione del segnale e questo particolare consente la riflessione del segnale stesso). Lo scopo della taratura non è solo quello di stabilire la costante di lettura (analogamente alle prove specificate dalla Norma IEC 60270) ma anche quello di stimare la lunghezza del cavo sulla base del tempo d'andata e ritorno dell'impulso.

In tabella 1 sono presentate le caratteristiche dei cavi (cavi isolati in carta impregnata e cavi con isolamento misto, ovvero spezzoni di cavo isolato in carta impregnata ai quali sono stati giuntati spezzoni di cavo con isolamento estruso) i cui dati di prova è stato possibile analizzare.

Tabella 1: Principali caratteristiche dei cavi selezionati

Lunghezza (m)	Giunti (n)	Isolante
177	1	Carta
382	3	Carta
730	6	Carta
795	9	Carta
705	5	Carta
685	6	Carta
1020	5	Carta
1100	8	Carta
2350	6	Carta
2550	7	Carta
2050	8	Carta
2580	10	Carta
220	2	Misto
490	4	Misto
1740	10	Misto
1930	7	Misto
3600	11	Misto
1910	7	Misto

Per l'analisi delle acquisizioni sopra indicate è stato realizzato (in Visual Basic™ 6.0 e National Instruments™ Measurement Studio 6) un apposito software che consente l'analisi e l'elaborazione dei segnali di calibrazione importati dal sistema OWTS ed il calcolo dell'attenuazione introdotta sui segnali di SP (in db/km) dai cavi in prova, per unità di lunghezza. La Fig. 8.25 mostra l'interfaccia principale del programma sviluppato, mentre la Fig. 8.26 mostra un tipico impulso di calibrazione con la relativa riflessione.

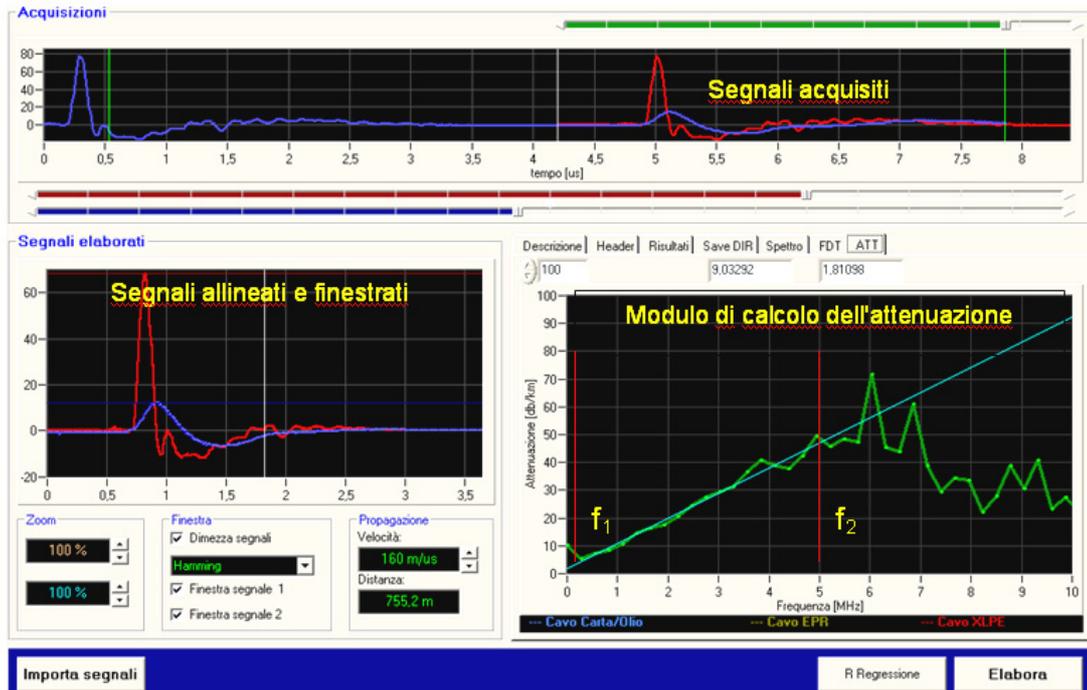


Fig. 8.25 – Interfaccia principale del software di elaborazione del segnale

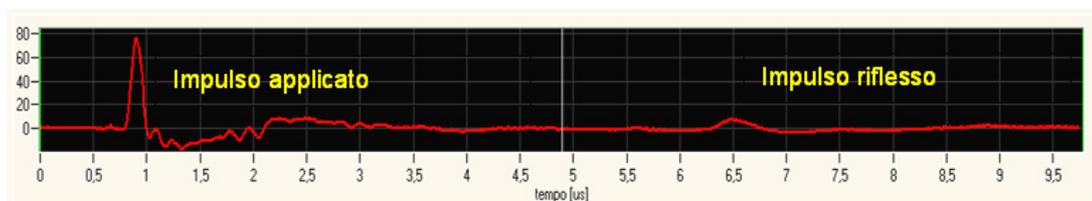


Fig. 8.26 – Esempio di un impulso di calibrazione acquisito con il sistema OWTS

Qui in seguito sono descritte schematicamente le fasi dell'elaborazione (Fig. 8.27):

- A) Importazione dei segnali: il software importa il segnale di calibrazione.
- B) Allineamento: in questa fase l'impulso iniettato del primo file e quello riflesso del secondo file vengono allineati rispetto ai loro punti di origine. Questa operazione consente di calcolare la distanza elettrica del cavo a partire dal tempo di andata dell'impulso e ipotizzando una velocità di propagazione di $160\text{m}/\mu\text{s}$

- C) Finestratura: per poter essere elaborati in frequenza i segnali devono essere "finestrati" applicando una finestra digitale (a scelta tra diverse opzioni: hamming, hanning, flat-top ecc)
- D) Vengono poi calcolati gli spettri dei due segnali così ottenuti. In questa fase viene anche determinato un intervallo "utile" di frequenze degli spettri (compreso tra le frequenze f_1 ed f_2) caratterizzato da un rapporto segnale rumore impostabile dall'utente. Si può osservare come il valore di f_2 può ritenersi un indicatore del valore limite inferiore della frequenza di taglio di un trasduttore per poter misurare con sufficiente sensibilità l'attività di scariche parziali nel cavo considerato, senza introdurre ulteriori distorsioni ai segnali di SP.
- E) Viene effettuato il calcolo dell'attenuazione (dB/km) come rapporto tra gli spettri dell'impulso riflesso ed applicato nell'intervallo di frequenze utile f_1 - f_2 . Dato che l'attenuazione relativa di un cavo (in scala logaritmica) risulta avere, con buona approssimazione, l'andamento di una retta, il grafico dell'attenuazione ottenuto con il procedimento descritto viene poi interpolato mediante una retta di regressione per poter essere confrontato direttamente con quanto ottenuto in precedenza nelle prove in laboratorio su cavi dello stesso tipo.

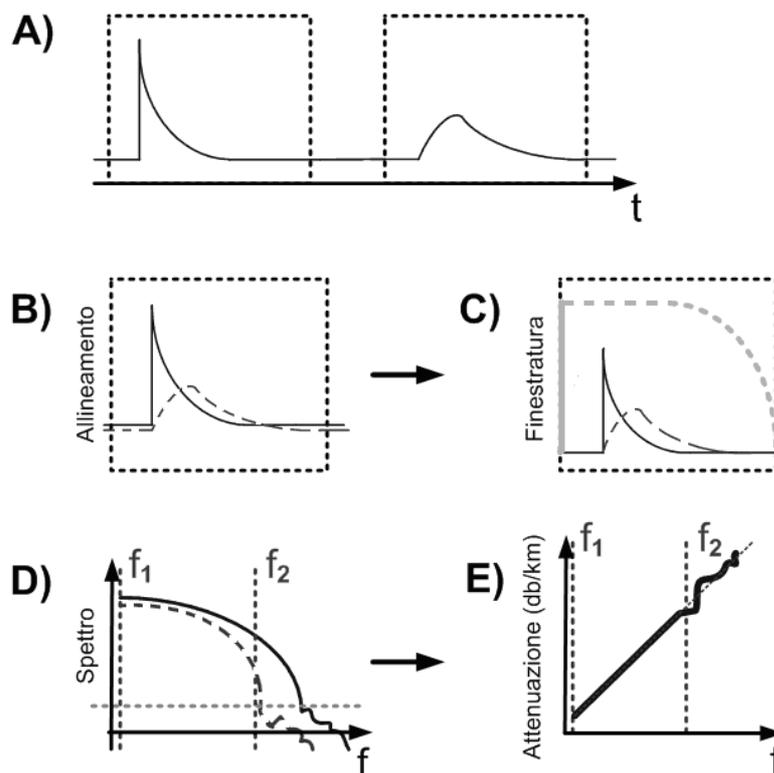


Fig. 8.27 – Principali fasi da eseguire per il calcolo dell'attenuazione

I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 8.28 e Fig. 8.29. Le figure presentano le attenuazioni calcolate dei soli cavi senza accessori, caratterizzati nelle prove di laboratorio descritte nel paragrafo 8.5 (curve tratteggiate blu per cavi isolati con carta impregnata, verde per cavi isolati con EPR e rossa per cavi isolati con XLPE). Per ogni cavo della tabella 1 sono invece mostrati due punti che rappresentano i valori in corrispondenza dei valori di f_1 e f_2 e uniti da una linea dello stesso colore che rappresenta una stima dell'attenuazione del cavo.

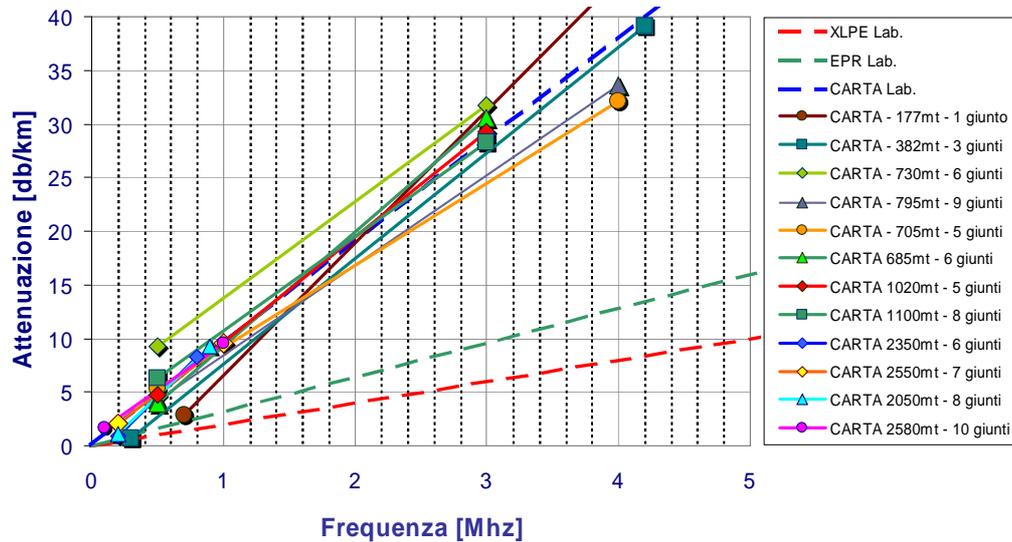


Fig. 8.28 – Attenuazione di cavi isolati in Carta/Olio

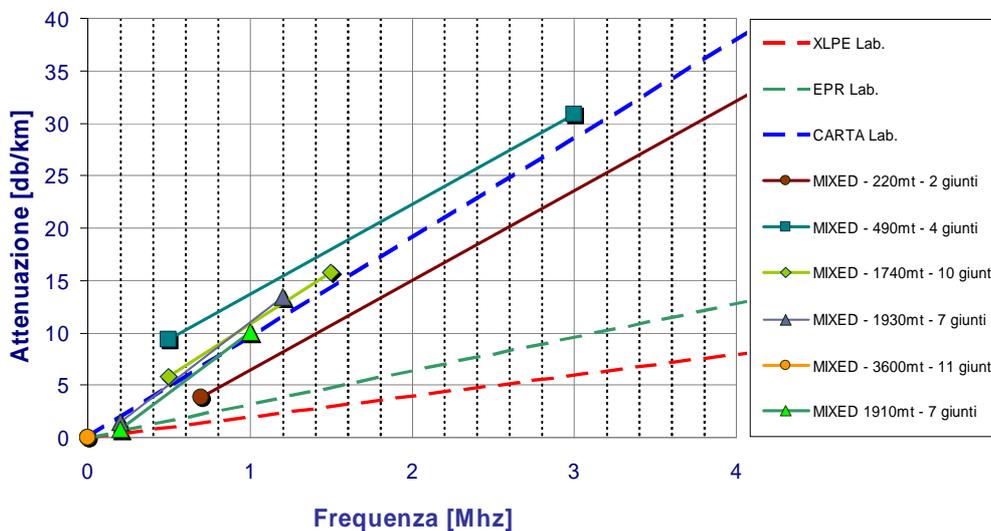


Fig. 8.29 – Attenuazione di cavi misti (Mixed)

Le figure evidenziano come le attenuazioni dei cavi in carta impregnata in esercizio siano in buon accordo con le attenuazioni misurate in laboratorio su uno spezzone di cavo.

I cavi misti presentano attenuazioni molto simili ai cavi in carta probabilmente perché le tratte in esame sono costituite principalmente da cavi con isolamento in carta impregnata alle quali sono stati giuntati spezzoni di cavo con isolamento estruso (ma la parte di attenuazione predominante è, come visto anche dalle prove di laboratorio, da imputarsi alla sola parte con isolamento in carta impregnata).

La Fig. 8.30 riporta i valori di f_2 in funzione della lunghezza dei cavi e le rette di regressione per i cavi isolati in carta e per quelli di tipo misto.

Sulla base della Fig. 8.30 è possibile, in prima approssimazione, determinare i limiti della risposta in frequenza dei trasduttori da utilizzare per il monitoraggio di scariche parziali in cavi MT in funzione della lunghezza del cavo.

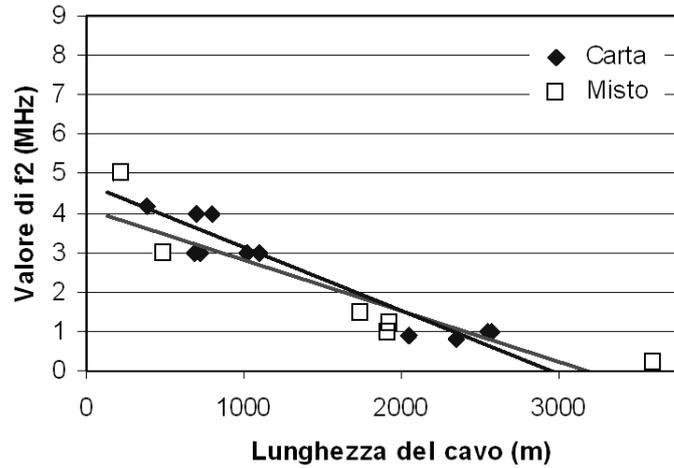


Fig. 8.30 – Valori di f_2 in funzione della lunghezza del cavo

8.8 Prova di localizzazione di SP in un cavo MT mediante analisi riflettometrica

In questo paragrafo vengono presentati i risultati di una verifica sperimentale della modalità di localizzazione dei difetti in un cavo tramite analisi riflettometrica descritta nel paragrafo 8.4.2. Le misure sono state effettuate su un cavo di media tensione (24kV) isolato in XLPE, di lunghezza pari a 300 metri, sul quale è stato realizzato un giunto difettato a distanza di 200 metri dal terminale (indicato con T1) dove è stato posto il sensore di misura (Fig. 8.13) al quale è stato connesso il sistema di misura prototipo a banda ultra larga descritto nel capitolo 6. Il software di controllo ed elaborazione dati del sistema è stato aggiornato per poter effettuare anche l'analisi riflettometrica.

In Fig. 8.31 è possibile vedere la schermata di elaborazione dove in (1) viene rappresentata l'acquisizione di un segnale di SP con le relative riflessioni successive.

Il programma consente diverse operazioni accessorie come l'applicare filtri o effettuare medie di più acquisizioni per la riduzione del rumore.

All'utente viene richiesto di posizionare dei cursori (indicati in Fig. 8.31 con *a*, *b* e *c*) in corrispondenza del primo impulso (*a*), della finestra di durata del primo impulso (*b*) e dell'inizio del primo impulso riflesso (*c*). Gli impulsi così selezionati vengono presentati in Fig. 8.31 nel grafico (2) mentre i loro spettri di frequenza vengono presentati in (3). In (4) viene indicata una stima dell'attenuazione introdotta dal cavo sulla base dell'analisi degli spettri dei due impulsi (come descritto al paragrafo 8.4.3).

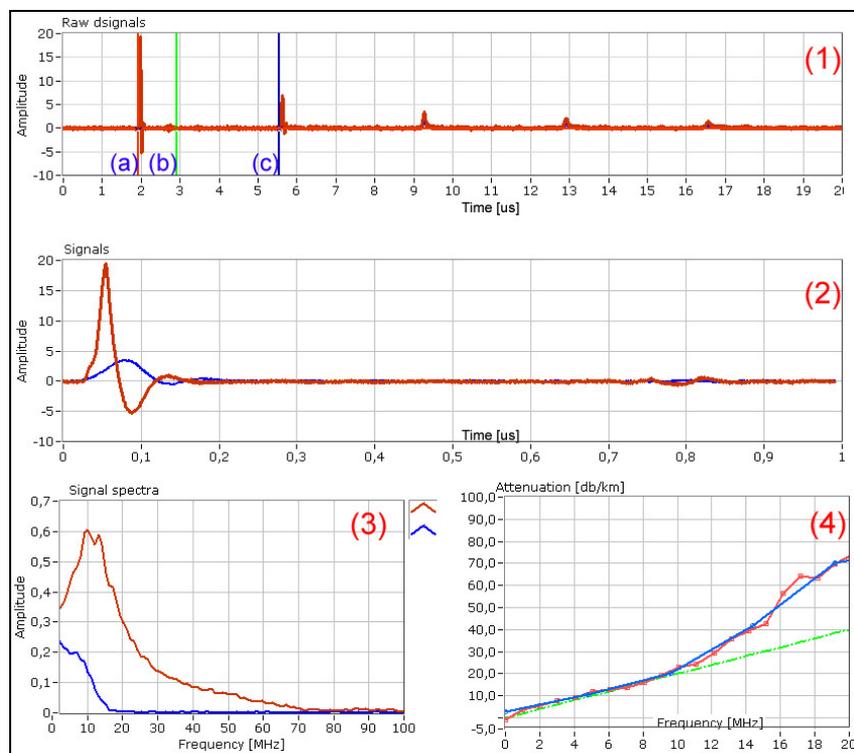


Fig. 8.31 – Analisi di un impulso di calibrazione generato da un calibratore di SP

Selezionati i segnali, il software calcola, tramite le formule, descritte nel paragrafo 8.4.3, la distanza della sorgente che ha originato gli impulsi di SP selezionati.

In Fig. 8.31 è fornito l'esempio di un impulso applicato da un calibratore di SP connesso al terminale T1. In Fig. 8.32 e Fig. 8.33 vengono invece presentati i grafici relativi a difetti sui terminali T1 e T2 (ottenuti per mezzo di punte metalliche che generano effetto). In Fig. 8.34 viene infine presentato il caso di segnale di SP proveniente dal giunto posizionato a 200 metri dal sensore. In tutti i casi il sistema è stato in grado di individuare correttamente e localizzare i difetti con un'approssimazione di un metro circa.

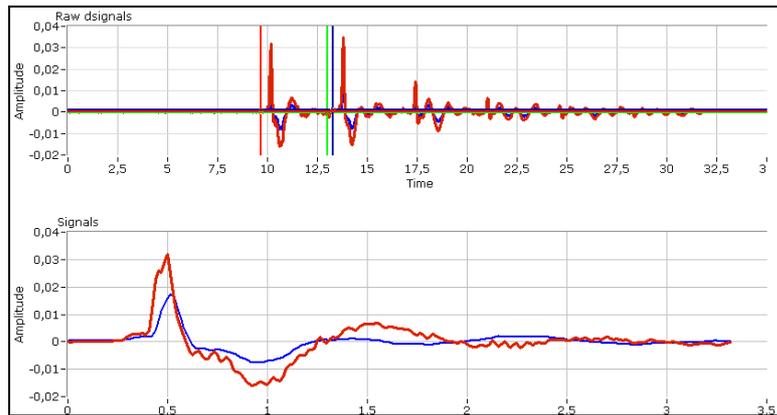


Fig. 8.32 – Analisi di impulsi provenienti dal difetto sul terminale "vicino" T1

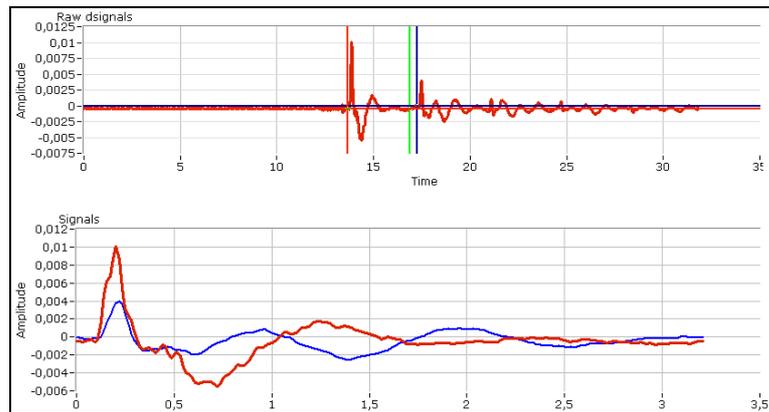


Fig. 8.33 – Analisi di impulsi provenienti dal difetto sul terminale "lontano" T2

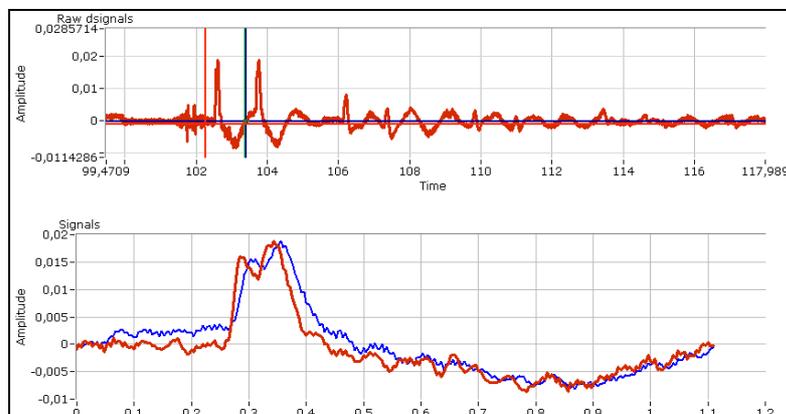


Fig. 8.34 – Analisi impulsi provenienti da un difetto su un giunto posizionato a 200 metri dal sensore

8.9 Conclusioni

Sono stati affrontati due aspetti riguardanti la tecnica della rilevazione delle scariche parziali nei cavi elettrici di media ed alta tensione effettuata con la modalità del monitoraggio:

- la caratterizzazione di sensori commerciali utilizzati per la rilevazione di SP
- la misura della attenuazione subita dalle SP cioè da segnali in alta frequenza.

La caratterizzazione è stata eseguita con diversi tipi di forme d'onda, utilizzando cioè differenti generatori di segnale (segnale di corrente sinusoidale, a gradino ed a impulso) ed ha riguardato sia la risposta dinamica (comportamento in frequenza) sia la linearità del sensore.

Sono stati presi in considerazione anche i TA di tipo apribile, in quanto questa tipologia si fa preferire dal punto di vista dell'installazione perché permette di minimizzare l'impatto sul cavo (possono essere installati sui collegamenti di messa a terra, senza richiederne l'interruzione).

Le misure eseguite sui diversi trasformatori di corrente hanno evidenziato differenze nella forma della risposta in frequenza calcolata, sia in termini di intensità del segnale in uscita (ovvero il guadagno del trasduttore che dipende sostanzialmente dal rapporto spire) sia, soprattutto, dalla tipologia di nucleo, che può determinare differenze anche rilevanti nella banda passante del trasduttore.

Successivamente è stato affrontato il problema della propagazione ed attenuazione dei segnali di SP lungo i cavi. In particolare è stata adottata una metodologia che consente di stimare l'attenuazione (per unità di lunghezza) introdotta dal cavo. Il cavo infatti si comporta da filtro passa basso attenuando maggiormente le frequenze più elevate. Sono quindi state effettuate misure per la stima della funzione di trasferimento (attenuazione espressa in dB/km) su differenti tipologie di cavi MT, comunemente utilizzate nelle reti italiane. Le misure di attenuazione sono state confrontate con quelle riportate in letteratura (ottenute con metodologie di misura differenti) per le stesse tipologie di cavo, mostrando una buona concordanza dei risultati.

Al fine di verificare come l'attenuazione introdotta dal cavo e le differenti risposte in frequenza dei trasduttori influiscono complessivamente sulla misura delle SP è stata realizzata una prova comparativa misurando su un tipico cavo di distribuzione, con i diversi TA, lo stesso segnale di SP. Le misure effettuate hanno messo in evidenza una problematica legata ad alcuni trasduttori commerciali di tipo apribile. Rispetto ai TA di tipo chiuso questi presentano una banda passante spostata verso frequenze più elevate. Dello spettro di frequenza degli impulsi da misurare, i TA apribili riproducono correttamente le componenti a frequenza elevata (che determinano la forma del fronte di salita degli impulsi) mentre attenuano maggiormente le componenti a bassa frequenza. L'impulso in uscita dal TA avrà quindi un fronte di salita ben riprodotto mentre la rimanente parte sarà deformata e caratterizzata da un'area sottesa minore.

Lo studio ha preso in considerazione i cavi MT in quanto si suppone, per questo livello di tensione, che siano accessibili (dal punto di vista dell'installazione di sensori) solo i terminali alle estremità della linea. Nei collegamenti AT invece, possono essere presenti dei punti di misura anche lungo il tracciato (in corrispondenza delle giunzioni) e questo cambia sostanzialmente la modalità di prova. Molte delle considerazioni fatte possono comunque essere estese anche al caso dei cavi AT. In particolare le modalità di propagazione ed attenuazione dei segnali di SP nei cavi ed anche concetti legati alla metodologia di caratterizzazione dei trasduttori.

Per la stima dei limiti di banda dei trasduttori di SP da utilizzare per il monitoraggio di scariche parziali di cavi MT, sono stati ricavati le curve di attenuazione di un gruppo di cavi

rappresentativi della rete di distribuzione italiana. Sono stati utilizzati dati di prove precedenti effettuate con lo scopo di individuare eventuali difetti localizzati e la loro criticità. L'utilizzo di questi dati ha comportato la necessità di realizzare un programma per il calcolo per la determinazione dell'attenuazione dei segnali di scariche parziali a causa del transito su cavi MT. I limiti così individuati (f_2 limite superiore) possono essere utilizzati come valori per definire la banda dei trasduttori da impiegare durante le prove di monitoraggio.

E' stato infine verificato in laboratorio il corretto funzionamento del metodo di calcolo della posizione (localizzazione) della sorgente di SP lungo il cavo basato sull'analisi dei ritardi degli impulsi riflessi (analisi riflettometrica), implementato nel sistema di misura di SP prototipo, utilizzando un cavo di MT di 300 metri avente un giunto difettato posizionato a 200 metri e con la presenza simultanea di un difetto su uno dei terminali.

9 CONCLUSIONI

Dopo una breve introduzione sulle principali tecniche diagnostiche utilizzate nei sistemi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica a supporto dell'Asset Management è stato affrontato l'argomento della misura delle scariche parziali in quanto uno degli indicatori più interessanti per la stima delle condizioni dell'isolamento interno di un componente elettrico.

E' stato sviluppato un sistema di misura di scariche parziali prototipale a banda ultra larga in modo da avere a disposizione per le prove di verifica sperimentale un sistema flessibile ed aperto che potesse essere utilizzato sia come strumento di misura di scariche parziali tradizionale (come definito nella norma IEC 60270 [31]), che come piattaforma per lo sviluppo di algoritmi e metodi innovativi per l'analisi e l'elaborazione numerica dei segnali di scarica parziale.

Sono quindi stati affrontati diversi argomenti e punti critici (ancora argomento di ricerca da parte della comunità scientifica internazionale) dei moderni sistemi diagnostici basati sull'analisi delle scariche parziali:

È stata studiata la propagazione delle scariche parziali nei cavi MT tipicamente utilizzati nella rete italiana in modo da fornire informazioni utili a supporto dei futuri sistemi di monitoraggio delle scariche parziali per le reti di MT.

Sono stati caratterizzati alcuni sensori tipicamente utilizzati per la misura delle scariche parziali nei cavi di media ed alta tensione, sviluppati diversi metodi per la loro caratterizzazione metrologica e ne sono state messe in evidenza alcune criticità in relazione alle caratteristiche di attenuazione dei cavi.

Sono stati verificati e sviluppati alcuni algoritmi avanzati per l'analisi e la separazione automatica dei segnali di scarica parziale provenienti da sorgenti multiple all'interno dei componenti elettrici in esame.

Al fine di poter realizzare in futuro sistemi diagnostici completamente automatici basati su algoritmi di intelligenza artificiale sono stati sperimentati e verificati alcuni metodi di individuazione automatica di cluster particolarmente adatti per essere utilizzati nei nuovi sistemi diagnostici basati sull'analisi dei segnali di scarica parziale.

Gli algoritmi ed i metodi descritti sono poi stati implementati nel sistema di misura prototipo ed utilizzati in diverse prove in laboratorio.

E' stato sviluppato ed integrato nel sistema di misura a banda ultra larga, un modulo software per la localizzazione dei difetti nei cavi attraverso l'analisi riflettometrica degli impulsi di scarica parziale che viaggiano e si riflettono lungo i cavi.

E' stata condotta un'ampia campagna di prove sperimentali per la verifica dei sistemi e dei metodi sviluppati presso i laboratori di ERSE S.p.A. di Milano e del Dipartimento di Ingegneria Elettrotecnica dell'Università di Padova.

I risultati di questo lavoro di ricerca quindi possono fornire utili informazioni per lo sviluppo dei futuri sistemi diagnostici automatici per il monitoraggio delle condizioni dell'isolamento interno dei componenti elettrici di media ed alta tensione

10 APPENDICE 1) ESEMPIO DI INNESCO DEL FENOMENO DEL TREEING IN UN DIELETTRICO SOLIDO

In quest'appendice sono brevemente presentati i risultati di una prova sperimentale nella quale è stato generato il fenomeno del "treeing" in un campione di materiale dielettrico solido. La prova è stata realizzata presso i laboratori dell'ERSE S.p.A. di Milano, utilizzando la configurazione di prova presentata in Fig. A.1.1.

In un campione in prova, un dischetto trasparente di materiale plastico PMMA (polimetilmetacrilato) appoggiato su un elettrodo di terra piano, è stata inserita una punta metallica (raggio della punta $35\mu\text{m}$). La punta è stata gradualmente portata ad una tensione di 9kV in corrispondenza della quale si è avuto l'innesco del fenomeno del treeing.

Per evitare il fenomeno delle scariche superficiali il tutto è stato inserito in un recipiente trasparente riempito di olio siliconico isolante.

Sfruttando la trasparenza del PMMA e dell'olio siliconico è stato possibile riprendere con una videocamera la nascita e l'evoluzione del fenomeno del treeing.

Sul conduttore di terra è stato posizionato un sensore (TA per alte frequenze) connesso ad uno strumento digitale per la misura delle scariche parziali (Omicron MPD 600 descritto nel Cap.3.4.3) In Fig. A.1.2 è possibile vedere alcuni fotogrammi della registrazione insieme ai corrispondenti pattern di scarica parziale.

I pattern sono stati ottenuti acquisendo con lo strumento per un periodo di un minuto (corrispondente in questo caso a circa 10^5 impulsi di scarica parziale) ad intervalli regolari.

Si può facilmente osservare che al progredire del fenomeno vi è una notevole variazione della forma del pattern e dell'intensità delle scariche parziali.

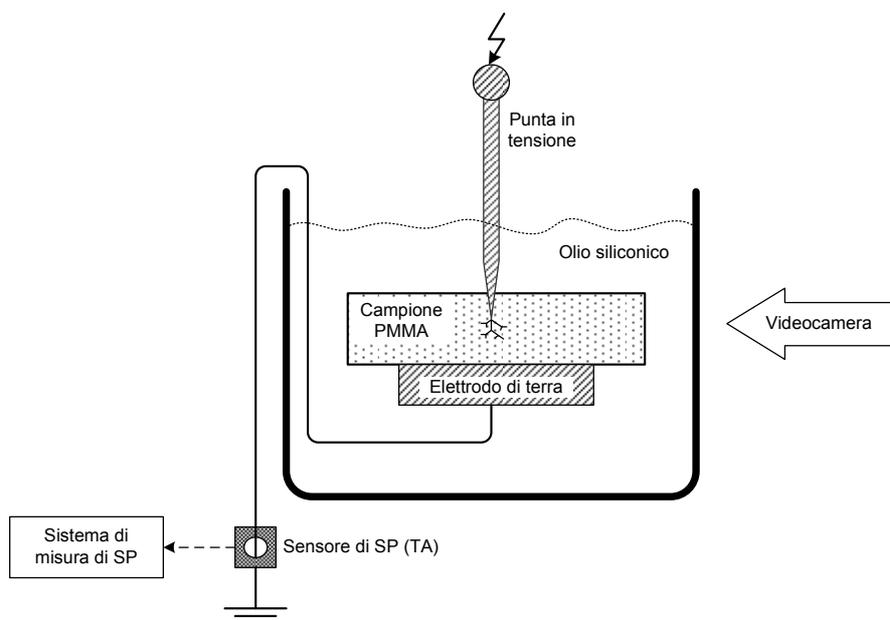
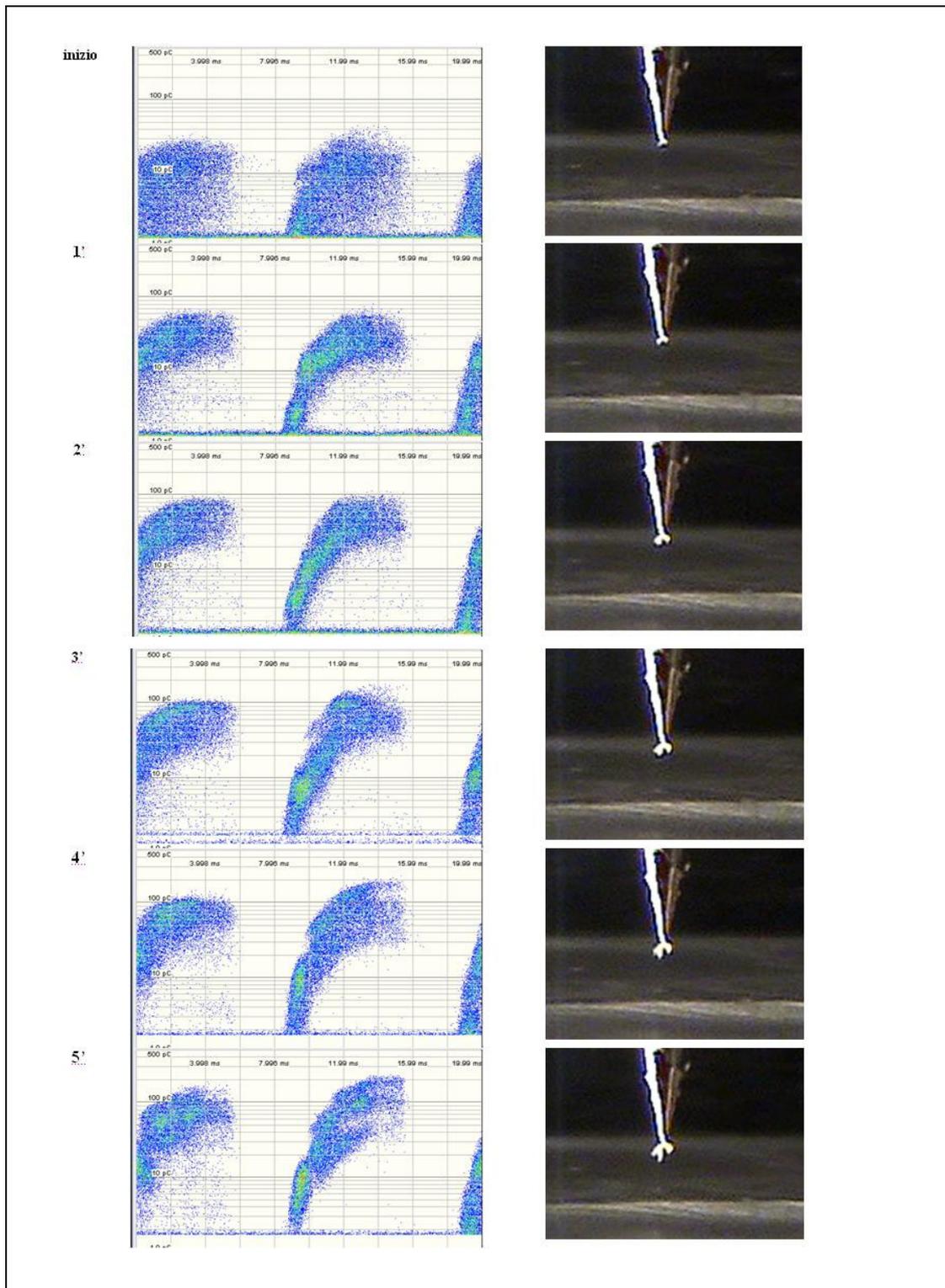


Fig. A.1.1 – Schema circuito di misura per la generazione del treeing in un campione di PMMA



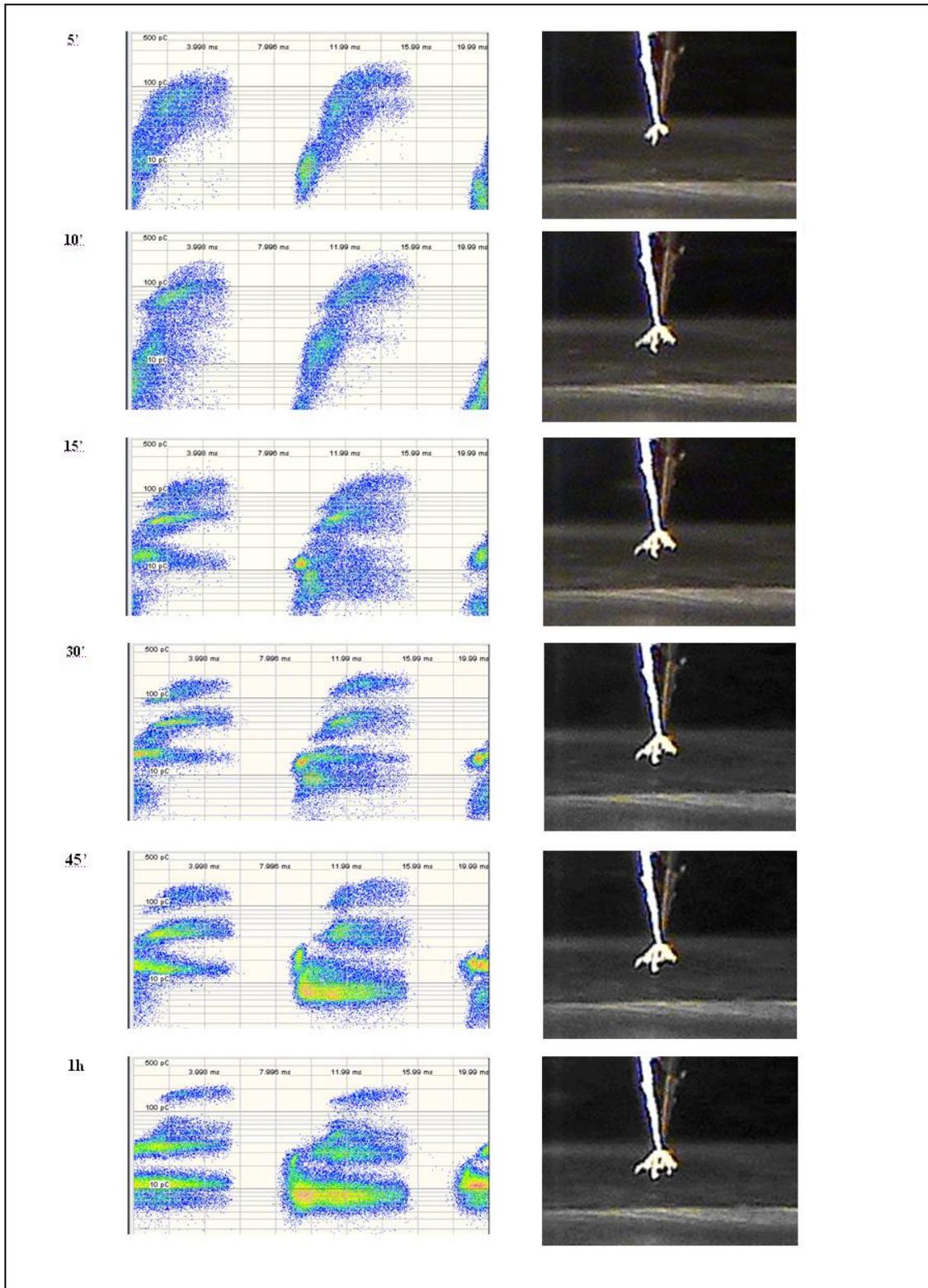


Fig. A.1.2 – Evoluzione di un “tree” in un campione di materiale dielettrico solido (PMMA): sequenza temporale di fotogrammi e pattern di scarica parziale corrispondenti

11 APPENDICE 2) METODOLOGIA PER LA STIMA DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

La metodologia qui presentata si basa su concetti di correlazione e densità spettrale di cui verrà fatta una breve descrizione.

Per una spiegazione più approfondita della teoria si può fare riferimento a [98] e [99].

Definizioni

La funzione di cross-correlazione R_{xy} rappresenta il “contributo” del segnale $x(t)$ al segnale $y(t)$ e viene definita nel seguente modo:

$$(1) \quad R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt$$

Ponendo $y(t)=x(t)$ è ora immediato definire la funzione di autocorrelazione:

$$(2) \quad R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt$$

Dal punto di vista dell'analisi dei segnali risultano però più significative le densità spettrali (intese come densità di spettro di potenza) che verranno ora introdotte come le trasformate di Fourier delle funzioni di correlazioni viste. Si definisce allora la funzione densità cross-spetttrale (cross-spectral density) di $x(t)$ ed $y(t)$ e la funzione densità auto-spetttrale di $x(t)$ le:

$$(3) \quad S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

Nelle applicazioni ingegneristiche si preferisce usare le seguenti funzioni, definite per le sole frequenze positive:

$$(4) \quad G_{xy}(f) = \begin{cases} 2S_{xy}(f) & f > 0 \\ S_{xy}(f) & f = 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & f > 0 \\ S_{xx}(f) & f = 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases}$$

Per quanto riguarda il significato della funzione $G_{xx}(f)$, si può dimostrare che questa fornisce un'indicazione sullo spettro di $x(t)$ mentre la $G_{xy}(f)$ può essere vista come indice del contributo al segnale $y(t)$ del segnale $x(t)$.

Funzione di trasferimento – caso ideale

Si consideri ora il sistema lineare “ideale” di Fig A.2.1

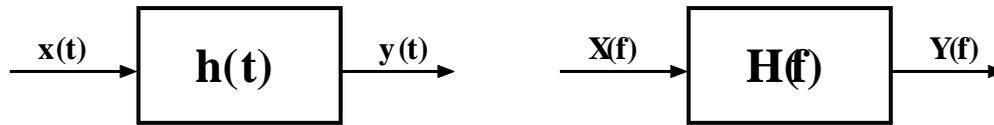


Fig. A.2.1 - sistema lineare con risposta all'impulso h(t) e funzione di trasferimento H(f) (rappresentato sia nel dominio del tempo che delle frequenze)

E' immediato dimostrare che:

$$(5) \quad \begin{aligned} S_{yy}(f) &= |H(f)|^2 S_{xx}(f) & G_{yy}(f) &= |H(f)|^2 G_{xx}(f) \\ S_{xy}(f) &= H(f) S_{xx}(f) & G_{xy}(f) &= H(f) G_{xx}(f) \end{aligned}$$

e quindi:

$$(6) \quad \boxed{|H(f)|_{(a)} = \sqrt{\frac{G_{yy}(f)}{G_{xx}(f)}}} \quad \boxed{|H(f)|_{(c)} = \frac{|G_{xy}(f)|}{G_{xx}(f)}}$$

Risultano quindi due diversi metodi per il calcolo del modulo della funzione di trasferimento (indicati nelle (6) con i pedici (a)(auto-spettrale) e (c)(cross-spettrale)).

Nel caso ideale esposto essi coincidono, ma in seguito, per il caso generale, verrà dimostrato come il metodo (c) sia da preferire. Una funzione interessante risulta essere la funzione di coerenza, definita come:

$$(7) \quad \boxed{\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}} \quad \boxed{0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1}$$

che risulta essere sempre compresa tra 0 ed 1, valendo la seguente disuguaglianza:

$$(8) \quad |G_{xy}(f)|^2 \leq G_{xx}(f)G_{yy}(f)$$

Per il caso ideale esposto si ha immediatamente che tale funzione risulta unitaria.

Se però si abbandona il caso ideale e se risulta:

$\gamma_{xy}^2(f) = 0$	si ha che, per le frequenze per cui ciò si verifica, x(t) e y(t) risultano completamente scorrelate.
$0 < \gamma_{xy}^2(f) < 1$	<p>si ha che per quelle frequenze si verifica una delle seguenti condizioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Vi è nella misura l'influenza di rumore esterno ➤ Vi sono altri ingressi, oltre a x(t), di cui non si è tenuto conto nel modello ➤ Nelle stime della densità di spettro la risoluzione in frequenza non risulta sufficiente ➤ Il sistema considerato non risulta lineare

Funzione di trasferimento – caso generale

Si consideri ora il sistema ideale affetto da rumore di Fig A.2.2.

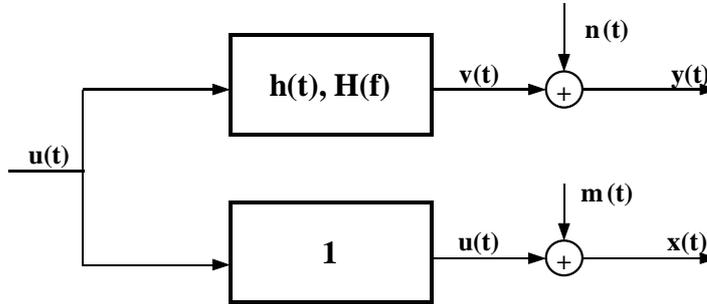


Fig. A.2.2 - Sistema lineare con funzione di trasferimento H(f) e presenza di rumore esterno. (Contributi di rumore esterno n(t) ed m(t) non correlati)

Nella Fig A.2.2 sono stati messi in evidenza due sistemi: uno di riferimento con funzione di trasferimento unitaria, ed uno con funzione di trasferimento H(f) (che invece nel nostro caso rappresenta il sistema lineare in prova).

E' immediato dimostrare che:

$$(9) \quad \begin{cases} x(t) = u(t) + m(t) \\ y(t) = v(t) + n(t) \end{cases}$$

La H(f) non è allora calcolabile direttamente. Se si usano i metodi (a) e (c) visti si ottiene:

$$(10) \quad |H(f)|_{(a)}^2 = \frac{G_{yy}}{G_{xx}} = \frac{G_{vv} + G_{nn}}{G_{uu} + G_{mm}} \quad |H(f)|_{(c)} = \frac{|G_{xy}|}{G_{xx}} = \frac{|G_{uv}|}{G_{uu} + G_{mm}}$$

$$(11) \quad |H(f)|_{(a)} = |H(f)| \sqrt{\frac{1 + \frac{G_{nn}}{G_{vv}}}{1 + \frac{G_{mm}}{G_{uu}}}} \quad |H(f)|_{(c)} = |H(f)| \frac{1}{1 + \frac{G_{mm}}{G_{uu}}}$$

Come accennato in precedenza sarà la funzione di coerenza a dire se vi sia eventualmente presenza di rumore e la sua incidenza. Infatti si ottiene:

$$(12) \quad \gamma_{xy}^2(f) = \frac{G_{uu} + G_{vv}}{(G_{uu} + G_{mm})(G_{vv} + G_{nn})}$$

che risulta minore di uno quando i segnali sono affetti da rumore.

Stime di densità spettrali e trattamento statistico dell'errore

Si supponga di aver eseguito n_p prove sperimentali ottenendo n_p registrazioni, che indicheremo con $x_k(t)$ ($k = 1,2..n_p$), con frequenza di campionamento finita (si hanno pertanto segnali discretizzati), di un processo casuale $\{x(t)\}$, ed analogamente per $\{y(t)\}$.

Le migliori stime delle densità spettrali, considerate in precedenza, risultano essere:

$$(13) \quad \hat{G}_{xy}(f) = \frac{2}{n_p T} \sum_{K=1}^{n_p} \bar{X}_k(f, T) Y_k(f, T) \quad \hat{G}_{xx}(f) = \frac{2}{n_p T} \sum_{K=1}^{n_p} |X_k(f, T)|^2$$

Attraverso queste due stime delle densità spettrali si può risalire, mediante i metodi indicati in precedenza come (a) e (c), alle stime della funzione di trasferimento che indicheremo con:

$$(14) \quad \hat{H}_{xy}(f)_{(a)} \quad \hat{H}_{xy}(f)_{(c)}$$

Mediante l'analisi statistica dei processi casuali e delle stime di densità spettrale, si può ora dimostrare che l'incertezza estesa relativa associata alla stima del modulo della funzione di trasferimento, nei due casi (a) e (c), risulta data da:

$$(15) \quad U_{(a)} = 2 \frac{\sqrt{2} \sqrt{1 - \gamma_{xy}^2(f)}}{\gamma_{xy}^2(f) \sqrt{n_p}} \quad U_{(c)} = 2 \frac{\sqrt{1 - \gamma_{xy}^2(f)}}{|\gamma_{xy}(f)| \sqrt{2n_p}}$$

Si osserva, anche in questo caso, quanto il metodo (c) risulti migliore rispetto al metodo (a) infatti:

$$(16) \quad U_{(a)} = \frac{U_{(c)}}{|\gamma_{xy}|} \geq U_{(c)} \quad 0 \leq \gamma_{xy}^2 \leq 1$$

12 BIBLIOGRAFIA

- [1] Brown R.E., Humphrey B.G. "Asset management for transmission and distribution" Power and Energy Magazine - IEEE, 2005
- [2] Kostic T. "Asset management in electrical utilities: how many facets it actually has" Power Engineering Society General Meeting - IEEE, Vol.1, 2003
- [3] "Asset Management Series: Principles, polices and practices" Management improvement initiative by Victorian Government, 1995
- [4] Bartlett S. "Asset Management in a Deregulated Environment," on the behalf of Cigrè TF23.18 - Cigrè Session 2002
- [5] Eyles T., Wester Ph., Brennan G., Wilson A., on the behalf of Cigrè SCs. 23 and 39, "Outsourcing of maintenance in view of market liberalisation" - Cigrè Session 2000
- [6] Montanari G.C. "Fundamental Research in Electrical Insulation and Electrical Asset Management: Is There Any Link?" Electrical Insulation, 2008. ISEI – IEEE, 2008
- [7] Smit J.J., Gulski E. "Condition Assessment of Transmission Network Infrastructures" Power Tech - IEEE Lausanne, 2007
- [8] Gulski E., Wester F.J., Boone N., Van Schaik W., Steennis E.F., Groot E.R.S., Pellis J., Grotenhuis B.J., "Knowledge Rules Support for CBM of Power Cable Circuits" - Cigrè Session 2002
- [9] Norma CEI EN 60216 "Materiali isolanti elettrici: Proprietà di resistenza alla sollecitazione termica"
- [10] Bengtsson C. "Status and trends in transformer monitoring", IEEE Trans. In power delivery, vol. 11, 1996
- [11] Berti R., Borghetto J., Passaglia R., "Studi e valutazioni dello stato di invecchiamento dei sistemi isolanti in carta-olio di componenti elettrici in media-alta tensione" Rapporto di Ricerca di Sistema N.06/007144 del 29/12/2006
- [12] Neimanis R., "Dielectric Diagnostics of Oil-Paper Insulated Current Transformers", Technical report for Lic., Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1997
- [13] Basak A., "condition monitoring of power transformers" Engineering Science and educational Journal, vol. 8, 1999
- [14] Hauhanessian V., "Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems". Ph.D. Thesis, ETH Zurich, 1998
- [15] Shuzhen Xu., Middleton R., Fetherston F., Pantalone D., "A comparison of Return voltage measurement and frequency domain spectroscopy test on high voltage insulation" IEEE - Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003
- [16] Zaengl W.S., "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for power equipment - theoretical considerations" Electrical Insulation Magazine, IEEE 2003

- [17] "Guide for sampling of gases and oil from oil filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases", IEC publication 567, 1992
- [18] Fallou B. "Detection of and research for the characteristics of an incipient fault from the analysis of dissolved gases in the oil of an insulation" – *Electra* N. 42, pp31-52, 1975
- [19] "Guide for the interpretation of gases generated in oil immersed transformers" IEEE Std. C57.104-1991, 1991
- [20] Bradley R., "Cable temperature monitoring", IEE Seminar Digests, 1997
- [21] Goehlich L., Donazzi F., Gaspari R. "Monitoring of HV cables offers improved reliability and economy by means of power sensors" IEEE Power Engineering Journal, 2002
- [22] Golubev A., Tsvetkov, V. "On-line shock vibration diagnostics of large electric machines" Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1999
- [23] Mechefske CK, "Correlating Power Transformer Tank Vibration Characteristics To Winding Looseness", *The Journal of the British Society of Non-Destructive Testing*, Vol 37, No 8, 1995
- [24] Duke G., "Predictive Maintenance a case study in infrared thermography" Electrical maintenance, 1998
- [25] Hyde T.R. "On-line condition monitoring technology and applications" ERA Technology, 1995
- [26] Ryder S.A., "Diagnosing transformer faults using frequency response analysis" *Electrical Insulation Magazine*, IEEE Volume 19, Issue 2, 2003
- [27] Kreuger F. "Partial discharge detection in High-voltage equipment", Butterworths, London, 1989
- [28] Simoni L. "Proprietà dielettriche e scarica dei materiali isolanti", CLUEB, Bologna, 1996
- [29] Morshuis P.H.F. "Partial discharge mechanism", Ph.D Thesis, TU-Delft, 1993
- [30] Morshuis P.H.F. "Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 12, No. 5; 2005
- [31] IEC 60270 " High-voltage test techniques - Partial discharge measurements " Ed. 3^o, 2000
- [32] CIGRE - WG D1-33 "Guide on Partial Discharge mechanism in compliance to IEC 60270", 2008
- [33] Dissado L.A., Fothergill J.C. "Electrical degradation and breakdown in polymers" Peregrinus, London, 1992.
- [34] "Recognition of discharges" CIGRE Proceedings, *Electra* 11, 1969

- [35] Bartnikas R. "A commentary on partial discharge measurement and detection", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.22 N. 5, October 1987
- [36] Gulski E., Kreuger F.H. "Digital computer system for measurement of partial discharge in insulation structures", Proceedings of 3rd International conference on conduction and breakdown in solid dielectrics, 1989
- [37] Steiner J.P., Weeks W.L. "A new method for locating partial discharges in transformers", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Annual Report., 1990
- [38] Contin A., Cavallini A., Montanari G. C., Pasini G., Puletti F. "Artificial Intelligence Methodology for Separation and Classification of Partial Discharge Signals", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000
- [39] Wang Z. D., Crossley P. A. "Partial discharge location in power transformers using the spectra of the terminal current signals", High Voltage Engineering Symposium. 22-27 August 1999 Conference Publication No. 467, IEE, 1999
- [40] Cacciari M., Contin A., Mazzanti G., Montanari G. C. "Identification and Separation of Two Concurrent Partial Discharge Phenomena", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996
- [41] Contin A., Montanari G. C., Cavallini A., Pasini G., Puletti F. "Stochastic Analysis of Partial Discharges Signals for Diagnosis of Insulation Systems of AC Rotating Machine Stator Windings", IEEE IAS, pp. 359-366, Roma, Italia, October 2000
- [42] Montanari G. C., Contin A., Cavallini A. "Random Sampling and Data Processing for PD pulse Height and Shape Analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 7, No. 1, February 2000
- [43] Cavallini A., Conti M., Contin A., Montanari G. C., Pasini G. "An integrated diagnostic tool Based on PD measurement," EIC 2001, pp 219-224, Cincinnati, USA, October 2001
- [44] Hozumi N., Okamoto T., Imajo T. "Discrimination of Partial Patterns Using a Neural Network", International Conference on Proprieties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo 8-12 July 1991.
- [45] Gulski E., Krivda A. "Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28 No. 6, December 1993
- [46] Krivda A., Gulski E. "Neural networks as a tool for recognition of partial discharges", International Conference on Partial Discharge, 1993
- [47] Mirelli G., Schifani R. "A Novel Method for the Recognition of PD Patterns by Neural Network", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999
- [48] Gulski E., Kreuger F.H. "Computer-aided analysis of discharge patterns" Journal of Applied Physics, 1990
- [49] Gulski E., Kreuger F.H. "Recognition of partial discharge sources using statistical tools", International Conference on Proprieties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo 8-12 July 1991.

- [50] Gulski E., Kreuger F.H., "Computer aided recognition of discharge sources", IEEE Transactions on Electrical insulation discharge sources", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.27 N.1 February 1992
- [51] Gulski E. "Computer aided measurement of partial discharges in HV equipment", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.28 N. 6, December 1993
- [52] Golubev A., Paoletti G. "Partial discharge theory and applications to electrical systems" IEEE IAS Paper Industry Conference, Seattle, USA 1999
- [53] Sahoo N. C., Salama M. M. A., Bartnikas R. "Trends in Partial Discharge Pattern Classification: A Survey", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2; April 2005.
- [54] Contin A., Cavallini G.C., Montanari G., Pasini G., Puletti F. "Artificial Intelligence Methodology for Separation and Classification of Partial Discharge Signals", IEEE-CEIDP 2000, pp. 522-526, Victoria (Canada), October 2000.
- [55] Cavallini A., Contin M., Montanari G. C. "Digital Detection and Fuzzy Classification of Partial Discharge Signals", IEEE Transactions on dielectrics and Electrical insulation, Vol. 9, No. 3, 2002.
- [56] Cavallini A., Conti M., Contin A., Montanari G. C., Puletti F. "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part 2: Identification of Defects in Solid Insulation Systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 3; June 2003
- [57] Cavallini A., Conti M., Montanari G. C., Contin A., Puletti F. "Partial Discharge Cross-Talk Recognition in Rotating Machines by Pulse Shape Analysis: Preliminary Results", IEEE EIC 2001, pp 33-38, Indianapolis, USA, September 2003
- [58] Cavallini A., Contin A., Montanari G. C., Puletti F. "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part I: Noise Rejection", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 2; April 2003
- [59] Cavallini A., Montanari G. C., Contin A., Puletti F. "A New Approach to the Diagnosis of Solid Insulation Systems Based on PD Signal Inference", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 19, No. 2, pp. 23-30, April 2003
- [60] Cavallini, G.C. Montanari, M. Olivieri, F. Puletti "Diagnostic evaluations of electrical apparatus by a novel partial discharge measurement system", 2004 International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004 Singapore, 21-24 November 2004
- [61] Borghetto J., Cavallini A., Contin A., Montanari G. C., De Nigris M., Pasini G., Passaglia R. "Partial Discharge Inference by an Advanced System. Analysis of Online Measurements Performed on Hydrogenerator", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 19, N. 2, June 2004
- [62] Cavallini A., Ciani F., Montanari G. C. "Improved identification level for defects generating partial discharges in solid insulation systems", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report 2004
- [63] Cavallini A., Conti M., Contin A., Montanari G. C., Puletti F. "A New Algorithm for the Identification of Defects Generating Partial Discharges in Rotating Machines", IEEE

- International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis. IN USA, 19-22 September 2004
- [64] Cavallini A., Conti M., Montanari G. C., Arlotti C., Contin A. "PD Inference for the Early Detection of Electrical Treeing in Insulation Systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 4; August 2004
- [65] Cavallini A., Montanari G. C., Ciani F., Folesani M. "Artificial Intelligence Algorithms for the Recognition of PD-Generating Defects in Rotating Machines", International Symposium on Electrical Insulating Materials, June 5-9, 2005, Kitakyushu, Japan, 2005
- [66] Cavallini A., Montanari G. C., Codet B., Vetu P. "Condition assessment of Instrument Transformer by Partial Discharge Analysis: a Comprehensive Approach", IEEE T&D, pp. 1- 8, Dallas, USA, May 2006.
- [67] Cavallini A., Montanari G. C., Puletti F. "Partial Discharge Analysis and Asset Management: Experiences on Monitoring of Power Apparatus", IEEE PES T&D, pp. 1- 5, Caracas, Venezuela, August 2006; Best Paper Award, 2006.
- [68] Contin A., Pastore S. "Classification of Partial Discharge Signals by Means of Auto-Correlation Function Evaluation", IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference Record of the 2006.
- [69] Ceretta C., Gobbo R., Pesavento G. "Valutazione Dell'influenza Del Rumore Nelle Analisi Tempo frequenza", XXIII Congresso Nazionale GMEE 2006
- [70] Ceretta, R. Gobbo, Pesavento G. "Application of ultra wide band partial discharge measuring systems for diagnostic purposes" XV ISH - International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, 2007
- [71] Ceretta C., Gobbo R., Pesavento G. "Valutazione Dei Sistemi Di Acquisizione Delle Scariche Parziali In Modalità UWB (Ultra Wide Band)", XXIV Congresso Nazionale GMEE 2007
- [72] Kuljaca N., Meregalli S., Rizzi G., Ceretta C., Gobbo R., Pesavento G. "Development and application of innovative partial discharge analysis algorithms using advanced measuring systems" ISH - International symposium on high voltage Test Techniques, Cape Town, 2009
- [73] Plath R.: "Multi-channel PD measurements" XIV International Symposium on High Voltage Engineering, 2005
- [74] Kalkner W., Obralic A., Bethge A., Plath R.: "Synchronous 3-Phase Partial Discharge Detection on Rotating Machines" XIV International Symposium on High Voltage Engineering, 2005
- [75] Rethmeier K., Kruger M., Kraetge A., Plath R., Koltunowicz W., Obralic A., Kalkner W. "Experiences in on-site partial discharge measurements and prospects for PD monitoring" International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2008) Beijing, April 2008
- [76] Rethmeier K., Vandiver B., Obralic A., Kalkner W., Plath R. "Benefits of synchronous multi-channel PD measurements" Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007. CEIDP 2007

- [77] Obralic A., Kalkner W., Plath R., Kaufhold M., Bethge A., "Synchronous 3-phase partial discharge detection on rotating machines", INSUCON Conference, Birmingham, 2006
- [78] Schaper S., Obralic A., Kalkner W., Plath R.: "Synchronous multi-terminal on-site PD measurement on power transformers with an enhanced time differential evaluation method" XV International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, 2007
- [79] Obralic A. "Wicklungs diagnose an rotierenden elektrischen Maschinen mittels synchroner Mehrstellen-TE-Analyse" Ph.D. Thesis, T.U.Berlin, 2008
- [80] Rethmeier, K.; Kraetge, A.; Vandiver, B.; Balkon, C.; Kalkner, W.; Plath, R. "Separation of Superposed PD Faults and Noise by Synchronous Multi-Channel PD Data Acquisition" electrical Insultaion conference ISEI 2008, Vancouver 2008
- [81] Seber, G. A. F., "Multivariate Observations", Wiley, 1984
- [82] Spath, H., "Cluster Dissection and Analysis" Halsted Press, 1985
- [83] Bezdek, J.C., "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms", Plenum Press, New York, 1988
- [84] Ester M., Kriegel H., Sander J., Xu X., "A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise", proc. 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, OR, p. 226, 1996
- [85] Daszykowski M., Walczak B., Massart D. L., "Looking for Natural Patterns in Data. Part 1: Density Based Approach", Chemom. Intell. Lab. Syst. 56 (2001)
- [86] Pultrum E., Hetzel E. "VLF PD Detection as a Diagnostic Tool for MV Cables", Proceedings IEEE PES Summer Meeting 1997
- [87] Gulski E., Smit J.J., Seitz P.N., Smit J.C., Turner M. "On-site PD diagnostics of power cables using oscillating wave test system" 11th International Symposium on High-Voltage Engineering ISH, 1999
- [88] Van der Wielen P., Veen J., Wouters P., Steennis E.F. „On-line partial discharge detection of MV cables with defect localisation (PDOL) based on two time synchronised sensors“ 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED 2005
- [89] Wagenaars P., Wouters P., Van der Wielen P., Steennis E.F. „Propagation of PD pulses through ring-main-units and substations“ Properties and Applications of Dielectric Materials, 2009. ICPADM 2009
- [90] Cavallini A., Montanari G. C., Puletti F., Franchi Bononi S., Ombrello F., Butt I.: "Experenceof testing polymeric HV cable systems by an innovative partial discharge measurement approach" International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004 Singapore, 21-24 November 2004.

- [91] Puletti F., Olivieri M., Cavallini A., Montanari G. C., "Localization of Partial Discharge Sources along HV and MV Cable Routes", IPEC, pp. 1-6, Sigapur, November 2005.
- [92] Puletti F., Olivieri M., Cavallini A., Montanari G. C., "Risk Management of HV Polymeric Cables Based on Partial Discharge Assessment", IEEE T&D, pp. 1-8, Dallas, USA, May 2006.
- [93] Montanari G. C., Cavallini A., Puletti F., "A New Approach to Partial Discharge Testing of HV Cable Systems", IEEE Electrical Insulation Magazine January/February 2006 — Vol.22, No. 1 pp. 14-23, 2006.
- [94] Weissenberg W., Farid F., Plath R., Rethmeier K., Kalkner W. "On-site PD detection at cross bonding links of HV cables" CIGRE Session 2004
- [95] CIGRE - WG D1-33, Tf 05: "Practical aspects of the Detection and Location of Partial Discharges in Power Cables", Cigre Brochure draft N.4, 2004
- [96] Kuljaca N., Meregalli S., Rizzi G. "Characterization of sensors used for partial discharge monitoring in cables" ISH - International symposium on high voltage Test Techniques, Ljubljana, 2007
- [97] Kuljaca N., Meregalli S.: "Caratterizzazione di sensori e misura dell'attenuazione dei cavi per applicazioni di monitoraggio" – Rapporto di Ricerca di Sistema 2006, Progetto Trasmissione e Distribuzione - WP 4.1
- [98] Cherbaucich C., Crotti G., Kuljaca N., Novo M.: "Evaluation of dynamic behaviour of heavy current shunts" - XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik (Croatia) - June 2003
- [99] Bendat S., Piersol A.G., "Engineering applications of correlation and spectral analysis " 2nd edition – Wiley Interscience pub. – 1993
- [100] Stone G.C., Boggs S.A.: "Propagation of partial discharge pulses in shielded power cables" IEEE 1982, paper V.6, pp 275-280
- [101] Mugala G., Papazyan R., Nakov P. "High frequency characteristics of MV cables using time domain reflectometry techniques" 17th NORD-IS pp.211-218, 2001
- [102] Papazyan R., Eriksson R.: "Calibration for time domain propagation constant measurements on power cable" IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement 52, pp.415-418, 2003
- [103] Tozzi M., Cavallini A., Montanari G.C., Burbui G.L.G. "PD detection in extruded power cables: an approximate propagation model" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, June 2008
- [104] Tozzi M., Montanari G.C., Cavallini A. "PD detection limits in extruded power cables through wide and ultra-wide bandwidth detectors" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, August 2008
- [105] Kuljaca N., Meregalli S., Rizzi G., Fratti S., Pugliese S., Ravetta C. "Laboratory and On-site Tests for the Determination of the Ageing Condition of MV PILC Cables" CIRED Prague, 2009

Autore:

Ing. Nikola Kuljaca

kuljaca@gmail.com