

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA
E DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"*

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA

in

Tecnica delle Alte Tensioni M

**Accessori per sistemi in cavo nella trasmissione dell'energia elettrica in
HVDC: definizione di modelli fisici per la caratterizzazione di materiali
isolanti, semiconduttivi e varioresistivi**

CANDIDATO:

Enrico Marzio

RELATORE:

Prof. Ing. Giovanni Mazzanti

CORRELATORI:

Ing. Stefano Franchi Bononi

Ing. Ivan Troia

Anno Accademico 2015/2016

Sessione II

*Non puoi insegnare niente a un uomo,
puoi solo aiutarlo a scoprire ciò che ha dentro di sé.*

Galileo Galilei

Lo studio intrapreso si è posto come obiettivo la caratterizzazione dal punto di vista elettrico dei materiali coinvolti nella realizzazione di accessori per applicazioni in alta tensione continua, in particolare mescole isolanti, semiconduttive e varioresistive.

La necessità di un lavoro di questo tipo viene giustificata dalla costante espansione dei sistemi in corrente continua nella trasmissione dell'energia elettrica, i quali presentano caratteristiche fisiche che si differenziano sensibilmente da quelle tipiche dei tradizionali sistemi in corrente alternata, dunque richiedono componenti e materiali opportunamente progettati per garantire condizioni di servizio sicure e affidabili.

L'obiettivo della trattazione consiste nello studio di analogie e differenze tra le proprietà elettriche fornite da prove su diverse configurazioni di provini, nella fattispecie di tipo piano e cilindrico cavo. In primo luogo si studiano i provini di tipo piano al fine di ricavare informazioni basilari sul materiale e sulla mescola che lo costituisce e di prendere decisioni relative al proseguimento dei test. Questo tipo di campione è infatti riproducibile su larga scala, in tempi brevi e sostenendo costi contenuti. Dopo aver effettuato un sufficiente numero di test su varie tipologie di provini piani e aver riconosciuto le mescole più performanti dal punto di vista elettrico, meccanico e termico, si procede alla realizzazione di provini cilindrici stampati, su cui si intraprendono le medesime misure effettuate per la configurazione piana. Questa seconda fase di caratterizzazione del materiale è fondamentale, in quanto consente di verificare che le proprietà già studiate su piastra si conservino in una geometria molto più simile a quella assunta dal prodotto finale senza la necessità di sostenere costi onerosi per la produzione di un accessorio full-size.

Il lavoro è stato svolto nel laboratorio elettrico di alta tensione della divisione R&D del gruppo Prysmian di Milano, leader mondiale nella produzione di sistemi in cavo per alte e altissime tensioni, che ringrazio sinceramente per le attrezzature e il supporto forniti per lo sviluppo di questa trattazione.

Indice

1 Introduzione ai sistemi HVDC	1
1.1 Valutazioni economiche	3
1.2 Valutazioni ambientali	4
1.3 Valutazioni tecniche	6
2 Cavi e accessori.....	11
2.1 Livelli di tensione	12
2.2 Cavi per alte tensioni	13
2.2.1 Campo elettrico nei cavi.....	16
2.3 Accessori	19
2.3.1 Terminazioni	20
2.3.2 Giunti.....	27
2.3.3 Dalla corrente alternata alla corrente continua	37
2.4 Prove di qualifica su cavi e accessori HVDC.....	41
2.4.1 Prove di sviluppo.....	41
2.4.2 Prove di prequalifica	42
2.4.3 Prove di tipo	44
2.4.4 Prove di routine	45
2.4.5 Prove a campione	45
2.4.6 Prove successive all'installazione	45
3 Metodologie di caratterizzazione	47
3.1 Prove di rigidità dielettrica	48
3.1.1 Analisi statistica	51
3.2 Misure di conducibilità elettrica.....	52

3.2.1	Analisi del transitorio	61
3.3	Misure di permittività	65
4	Materiali e risultati delle prove	71
4.1	Materiali isolanti.....	71
4.1.1	Classificazione generale	76
4.1.2	EPR.....	77
4.1.3	Risultati della prova di rigidità dielettrica	77
4.1.4	Risultati della misura di conducibilità	80
4.1.5	Risultati della misura di permittività	82
4.1.6	Simulazioni numeriche.....	84
4.2	Materiali semiconduttivi.....	87
4.2.1	Risultati della misura di conducibilità	88
4.3	Materiali varioresistivi	92
4.3.1	Caratteristiche principali	96
4.3.2	Risultati della prova di rigidità dielettrica	100
4.3.3	Risultati della misura di conducibilità	103
4.3.4	Risultati della misura di permittività	106
4.3.5	Simulazioni numeriche.....	107
5	Validazione dei risultati sperimentali su sistema full-size	109
5.1	Configurazione circuitale della prova	110
5.2	Cicli termici.....	110
5.3	Prove di tenuta a impulso sovrapposto.....	113
5.4	Prova in corrente continua e ispezioni visive	114
6	Conclusioni.....	117
	Bibliografia	i

Capitolo 1

Introduzione ai sistemi HVDC

L'obiettivo dell'elaborato in oggetto consiste nello studio e nella caratterizzazione di materiali per la produzione di accessori per sistemi in cavo HVDC; risulta quindi utile delineare in primo luogo alcuni tratti distintivi di tale tecnologia.

La trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica hanno avuto origine con i sistemi in corrente continua. Nel 1882 fu realizzata una linea di trasmissione a 2 kV in corrente continua tra le città di Miesbach e Monaco su una distanza di 50 km. All'epoca, la trasformazione tra il livello di tensione dell'utenza e quello di trasmissione poteva avere luogo solamente attraverso l'impiego di macchine rotanti in corrente continua. Tuttavia, la scoperta del regime in corrente alternata ha portato a un graduale abbandono della tecnologia della corrente continua, vista la maggiore semplicità di conversione tra diversi livelli di tensione grazie al trasformatore, che permette di raggiungere alte tensioni con perdite contenute e la maggiore affidabilità del sistema trifase, grazie al quale il servizio

non viene necessariamente interrotto in caso di guasto di una delle tre fasi [1]. Per queste ragioni, la tecnologia AC è stata preferita per quanto riguarda la generazione, la trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica. Naturalmente i sistemi di trasmissione in corrente alternata presentano anche alcuni svantaggi, per esempio:

- gli elementi induttivi e capacitivi delle linee aeree e delle linee in cavo limitano sia la portata sia la distanza di trasmissione; tale limitazione è particolarmente rilevante per i cavi. A seconda della portata richiesta, della frequenza e delle perdite, la distanza massima su cui può estendersi un cavo in AC è compresa tra 40 e 100 km;
- non è possibile una connessione diretta tra reti in AC a diversa frequenza;
- la connessione diretta tra reti in AC alla medesima frequenza potrebbe essere impossibile a causa dell'instabilità del sistema, livelli troppo elevati di corrente di corto circuito, flussi di potenza indesiderati.

Per questi motivi il regime in corrente continua non è mai stato del tutto abbandonato e recentemente è divenuto protagonista di uno sviluppo notevole per mezzo della diffusione di siti di generazione da fonte rinnovabile, come per esempio eolica, solare e idroelettrica, i quali si trovano a grande distanza dai centri di consumo e dunque richiedono infrastrutture e interconnessioni opportunamente progettate e collegamenti capaci di trasportare energia su lunghe distanze minimizzando le perdite e i costi. L'attenzione verso risorse energetiche alternative a quelle tradizionali ha acquisito progressivamente maggiore rilievo, soprattutto grazie alla definizione da parte della Commissione Europea degli obiettivi da raggiungere per il clima e l'energia entro il 2020, cioè:

1. Riduzione del 20% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990;
2. Aumento della frazione di energia consumata proveniente da fonte rinnovabile al 20%;
3. Aumento dell'efficienza energetica fino al 20%.

In particolare, risulta evidente l'incremento di parchi eolici nel Mare del Nord, intorno alle isole del Regno Unito e a largo delle coste francesi e spagnole. Per raggiungere questi obiettivi, la ricerca scientifica e l'innovazione industriale hanno concentrato gli studi su livelli di tensione via via superiori, e, come accennato, al ritorno al regime in corrente continua, il quale, dopo essere stato battuto in termini di efficienza e flessibilità dalla corrente alternata alla fine del XIX secolo, è tornato al centro dell'attenzione, grazie alla scoperta di significativi punti di forza.

1.1 Valutazioni economiche

Una prima considerazione rispetto ai sistemi in corrente continua riguarda i costi di investimento: solitamente, una linea di trasmissione in corrente continua ha un costo per unità di lunghezza inferiore rispetto a una linea di trasmissione in corrente alternata, grazie a un minor numero di conduttori e all'assenza di dispositivi di compensazione della potenza reattiva, dovuta alla mancanza di effetti induttivi e capacitivi; d'altra parte è necessario considerare i costi legati alle stazioni di conversione AC/DC e DC/AC, poste alle estremità della linea HVDC; ciò risulta evidente osservando il grafico riportato in Figura 1.1:

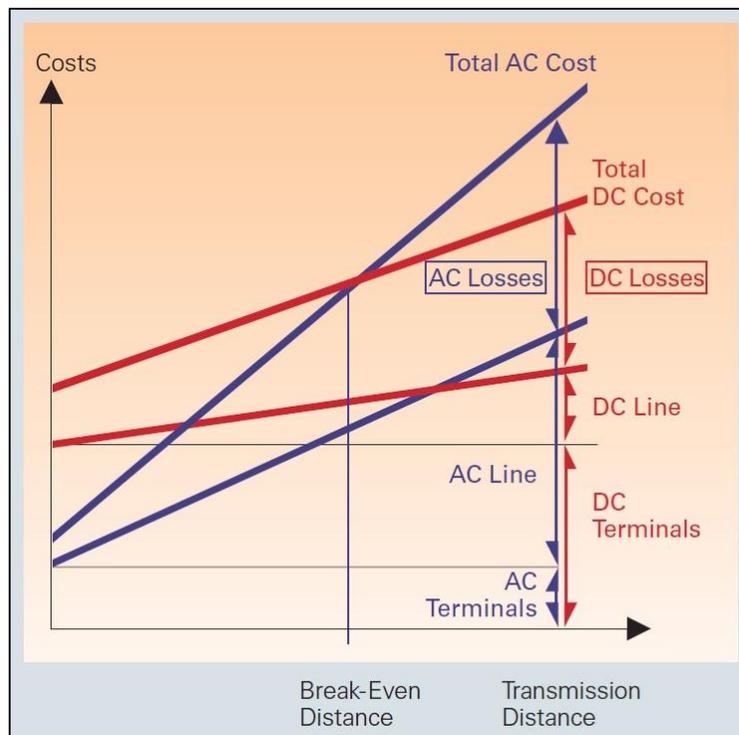


Figura 1.1 - Confronto tra costi per i sistemi DC e AC in funzione della distanza di trasmissione [2]

Come si nota, ai costi delle stazioni di trasformazione e conversione, definiti “terminal costs”, si sommano quelli relativi alla linea, proporzionali alla distanza di trasmissione. In questo caso sono state prese in esame una linea bipolare in corrente continua e una linea trifase a doppia terna in corrente alternata. All'aumentare della distanza di trasmissione, i costi delle due tipologie di impianto divengono molto simili, fino ad eguagliarsi in corrispondenza di una distanza definita “di pareg-

gio”. Questa distanza assume valori pari a circa 800 km per una linea aerea e 50 km per un cavo sottomarino. Per lunghezze di trasmissione superiori alla distanza di pareggio, i costi da sostenere per l’installazione di una linea in corrente continua sono inferiori rispetto a quelli relativi a una linea in alternata, per questo i sistemi HVDC sono particolarmente convenienti nei casi in cui sia necessario trasmettere potenza su elevate distanze.

1.2 Valutazioni ambientali

Un sistema di trasmissione HVDC è meno oneroso rispetto a un sistema HVAC per quanto riguarda l’impatto ambientale, grazie alle migliori condizioni di trasmissione, le quali consentono un utilizzo più efficiente degli impianti di generazione esistenti. Gli ingombri e di conseguenza i costi di impiego del terreno per una linea aerea di trasmissione HVDC sono inferiori se paragonati a quelli di una linea aerea in HVAC. Questo si traduce in un minor impatto visivo e in un effettivo risparmio di superfici utilizzabili, come si può osservare in Figura 1.2, dove si confrontano tre diverse configurazioni di sostegni per una linea aerea con capacità di trasmissione pari a 2 GW:

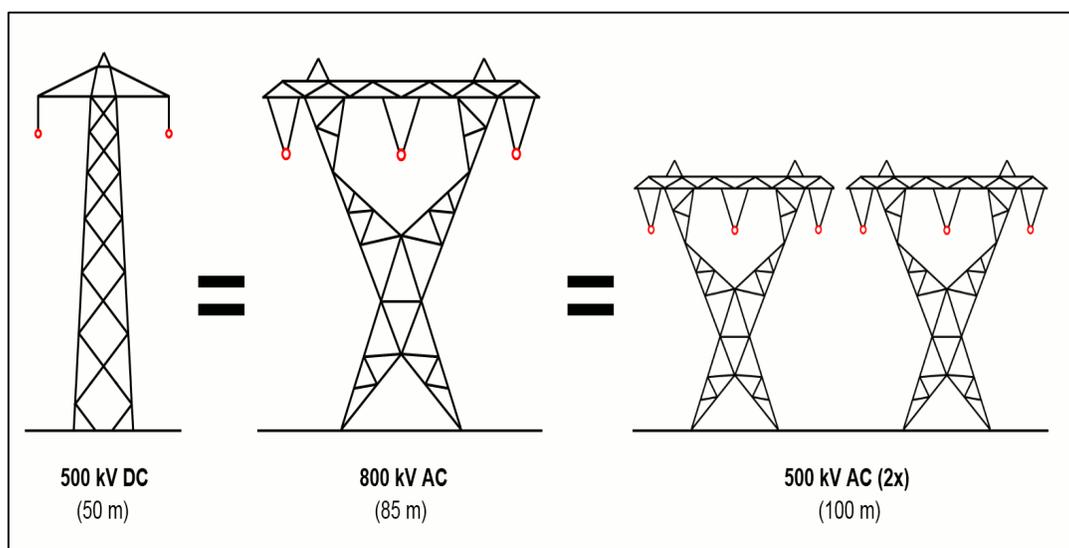


Figura 1.2 - Esempio di tre linee aeree equivalenti per la trasmissione di 2 GW [4]

Il campo elettrico presente in prossimità di una linea HVDC è generato da due componenti: la componente principale è data dal campo elettrostatico dovuto alla tensione applicata alla linea, mentre la componente secondaria è dovuta al campo generato dalle cariche di spazio accumulate a causa dell'effetto corona. Inoltre, studi hanno rilevato che i macchinari posti al di sotto di una linea aerea HVDC non si caricano elettricamente fino a livelli pericolosi, come invece può accadere nel caso di mezzi operanti vicino a una linea HVAC, nonostante l'elevata resistenza dei pneumatici (circa 10 M Ω), a causa delle forti correnti indotte dal campo magnetico variabile generato dalla linea stessa. Riguardo alle interferenze radio, esse sono provocate dall'effetto corona presente quando la linea è sottoposta a tensione positiva; nei sistemi HVDC dunque solo il polo positivo produce interferenze radio, mentre nei sistemi HVAC ogni fase contribuisce ai disturbi. È interessante notare come le avverse condizioni ambientali, per esempio la pioggia, influenzino diversamente le due tipologie di impianto: in prossimità di linee in AC le piogge aumentano le interferenze radio, mentre vicino a linee in DC le riducono. Infine, a parità di portata, una linea di trasmissione in DC produce interferenze radio minori di 6-8 dB rispetto a una linea in AC. Per quanto concerne i sistemi in cavo in DC, l'unica limitazione nell'uso del territorio consiste nel divieto di piantagione al di sopra della zona compresa tra i 2 poli della linea interrata, con un margine di 2 metri alle estremità laterali. Inoltre, i cavi devono essere posati a una profondità opportunamente calcolata per evitare danni dovuti a lavorazioni agricole e di manutenzione di altri impianti.

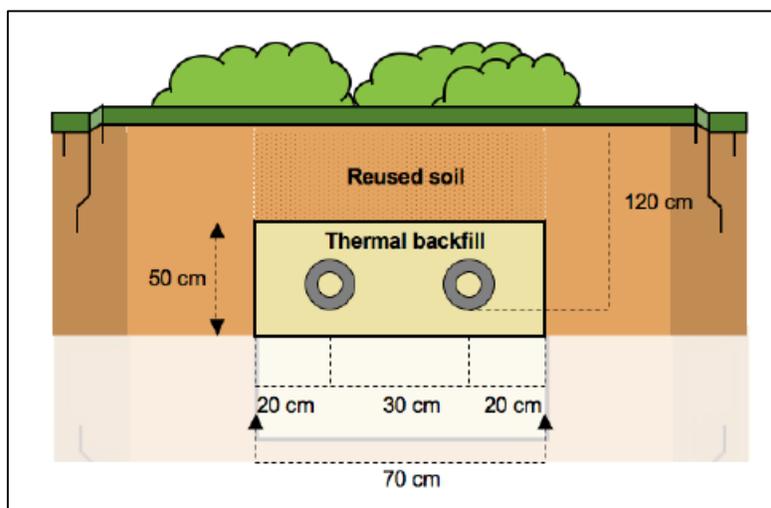


Figura 1.3 - Esempio di una linea bipolare in DC interrata [3]

Dal punto di vista dell'inquinamento elettromagnetico, i sistemi in cavo per applicazioni HVDC generano campi magnetici a bassissima frequenza, con un'intensità dell'ordine di $50 \mu\text{T}$, circa equivalente all'intensità del campo magnetico terrestre. Le raccomandazioni proposte dalla I.C.N.I.R.P. (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) suggeriscono un limite di esposizione inferiore a 400 mT dunque non si riscontrano pericoli per la salute [3].

1.3 Valutazioni tecniche

Se necessario, l'impiego di una linea di trasmissione in DC risulta utile anche in condizioni di parziale fuori servizio; infatti, confrontando ancora una linea bipolare in DC con una linea trifase a doppia terna in AC, se uno dei due poli della linea in DC subisse un guasto, l'altro continuerebbe a fornire una potenza il cui valore è determinato dai riferimenti imposti alle stazioni di conversione, mentre se si guastasse una terna della linea in AC, la terna rimasta in servizio potrebbe rimanere soggetta a problemi di sovraccarico a seconda delle condizioni che si possono instaurare nel sistema elettrico in seguito alla perturbazione. Inoltre, grazie ai sistemi in DC è possibile interconnettere reti in AC operanti a diversa frequenza oppure con diversi angoli di sfasamento. Lo schema circuitale di questa tipologia di interconnessione è riportato in Figura 1.4:

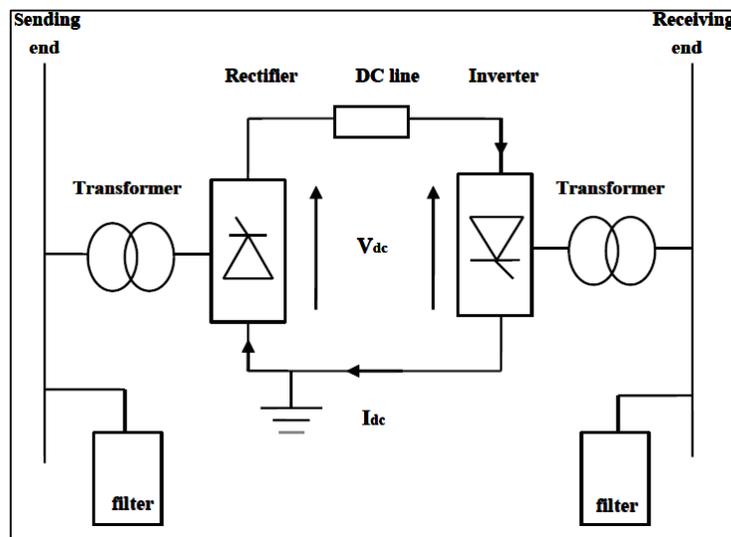


Figura 1.4 - Schema circuitale di interconnessione tra due reti AC mediante sistema DC [5]

Come si può notare, la rete in AC di sinistra è connessa, tramite un trasformatore, a un raddrizzatore, il quale produce in uscita una tensione continua applicata a una linea aerea o a un cavo o a una sbarra, in caso di distanze ridotte. All'estremità opposta è presente un inverter connesso alla rete AC di destra, sempre attraverso un trasformatore. Il flusso di potenza può essere bidirezionale, in funzione della differenza tra il valore della tensione ai capi del raddrizzatore e ai capi dell'inverter. Solitamente i trasformatori sono connessi a convertitori a 12 impulsi; la configurazione adottata prevede 2 raddrizzatori a 6 impulsi totalmente controllati, alimentati da 2 sistemi trifase sfasati tra loro di 30 gradi, come rappresentato in figura. Questo sfasamento ha l'effetto di annullare il contributo di sesta armonica sia sul lato AC sia sul lato DC.

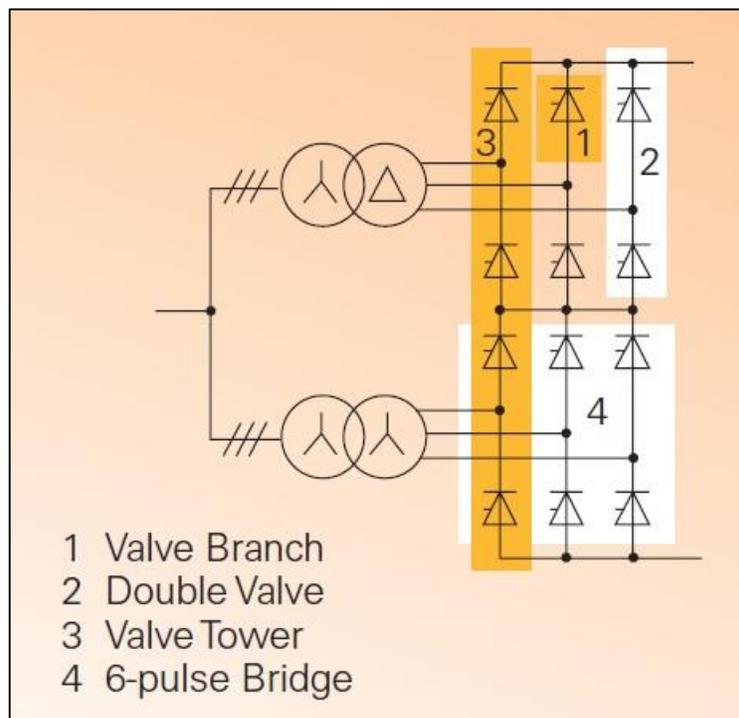


Figura 1.5 - Schema circuitale di un convertitore a 12 impulsi connesso a 2 trasformatori [2]

È facile intuire che lo sviluppo di sistemi capaci di interfacciare reti AC con reti DC risulta di primaria importanza per la diffusione dei sistemi HVDC. Più in generale, le tecnologie di conversione si suddividono in CSC (Current Source Converters), VSC (Voltage Source Converters). I sistemi CSC si distinguono a loro volta in due categorie: LCC (Line Commutated Converter) e CCC (Capacitor Commutated Converter). Essi si basano su ponti di conversione a tiristori, i quali producono

distorsioni armoniche sia sul lato AC sia sul lato DC; per questo, è necessario sia ricorrere a filtri AC al fine di annullare le componenti armoniche e di compensare in parte la potenza reattiva prodotta dal convertitore, sia installare un reattore di spianamento sul lato DC per ridurre il ripple di corrente. I convertitori CCC vengono invece utilizzati soprattutto per applicazioni back-to-back e prevedono condensatori in serie tra il ponte e il trasformatore di conversione; in questo modo si tenta di compensare la potenza reattiva erogata o assorbita dal ponte, riducendo dunque il compito dei filtri AC, impiegati unicamente per la cancellazione delle armoniche di corrente. Tali problematiche hanno reso più appetibile la tecnologia VSC, presente in commercio dalla fine degli anni '90. I convertitori di tipo VSC sfruttano la tecnica di modulazione PWM (Pulse Width Modulation), la quale consente di regolare sia la potenza attiva sia la potenza reattiva permettendo di controllare la fase e l'ampiezza della forma d'onda generata [3].

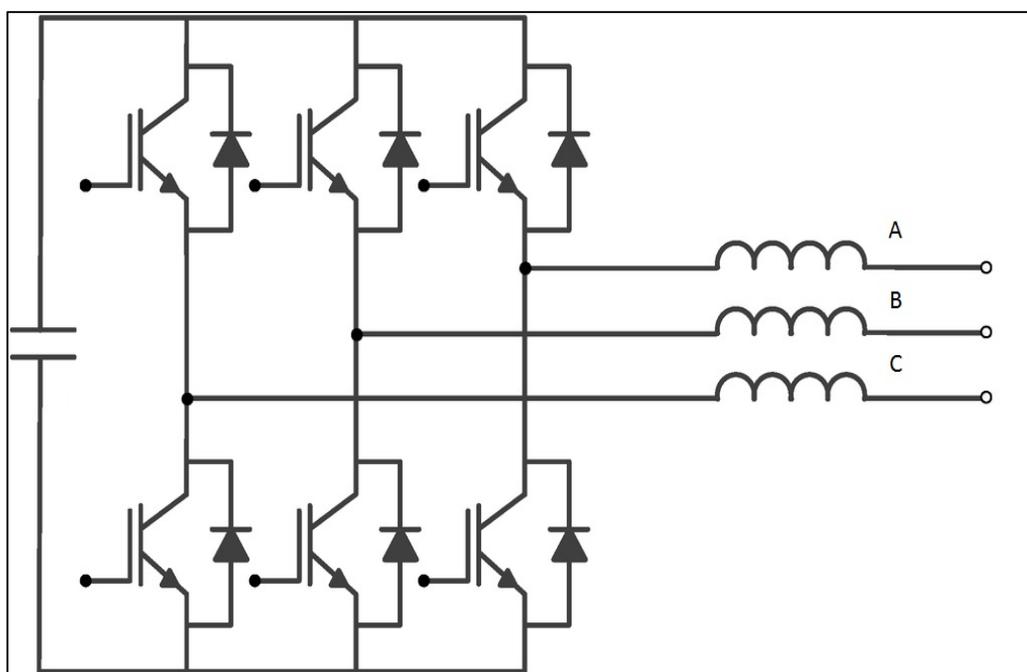


Figure 1.6 - Schema circuitale di un convertitore VSC

Mentre i sistemi CSC sono utilizzati per elevate potenze, generalmente al di sopra di 250 MW, e presentano tiristori, i convertitori VSC vengono solitamente adottati per poche decine di megawatt (50-100 MW), ma possono sostenere flussi dell'ordine del gigawatt; inoltre, essi sono caratterizzati

dalla presenza di interruttori IGBT (Figura 1.6), i quali operano ad alta frequenza annullando i disturbi provocati dall'inquinamento armonico. Attraverso la tecnologia VSC è possibile controllare i flussi di potenza attiva e reattiva variando il verso della corrente e non la polarità della tensione, in modo tale da contribuire alla regolazione della tensione e da poter operare anche durante guasti e fuori servizio della rete principale in AC. Il principale effetto collaterale derivante dall'uso di tali convertitori risiede nelle perdite energetiche piuttosto consistenti dovute sostanzialmente alla elevata frequenza di commutazione. Altri benefici prodotto dall'uso di sistemi di interconnessione in DC si riferiscono alla capacità di bloccare la propagazione di eventuali perturbazioni che possono nascere all'interno delle reti in AC e alla connessione alla rete degli aerogeneratori offshore: una connessione in AC, nonostante costituisca una soluzione economica per quanto riguarda le sottostazioni di trasformazione, comporta alcuni svantaggi come l'elevata capacità del cavo sottomarino, che oltre a causare elevate correnti reattive può indurre risonanze tra la rete offshore e quella onshore con conseguente distorsione armonica della tensione. Al contrario, una connessione in corrente continua non pone limiti sulla lunghezza del cavo in quanto non esistono effetti capacitivi, dunque non sono richieste misure di compensazione come reattori in derivazione. In Figura 1.7 si può osservare la struttura di un tipico collegamento in corrente continua tra un parco eolico offshore e la rete principale:

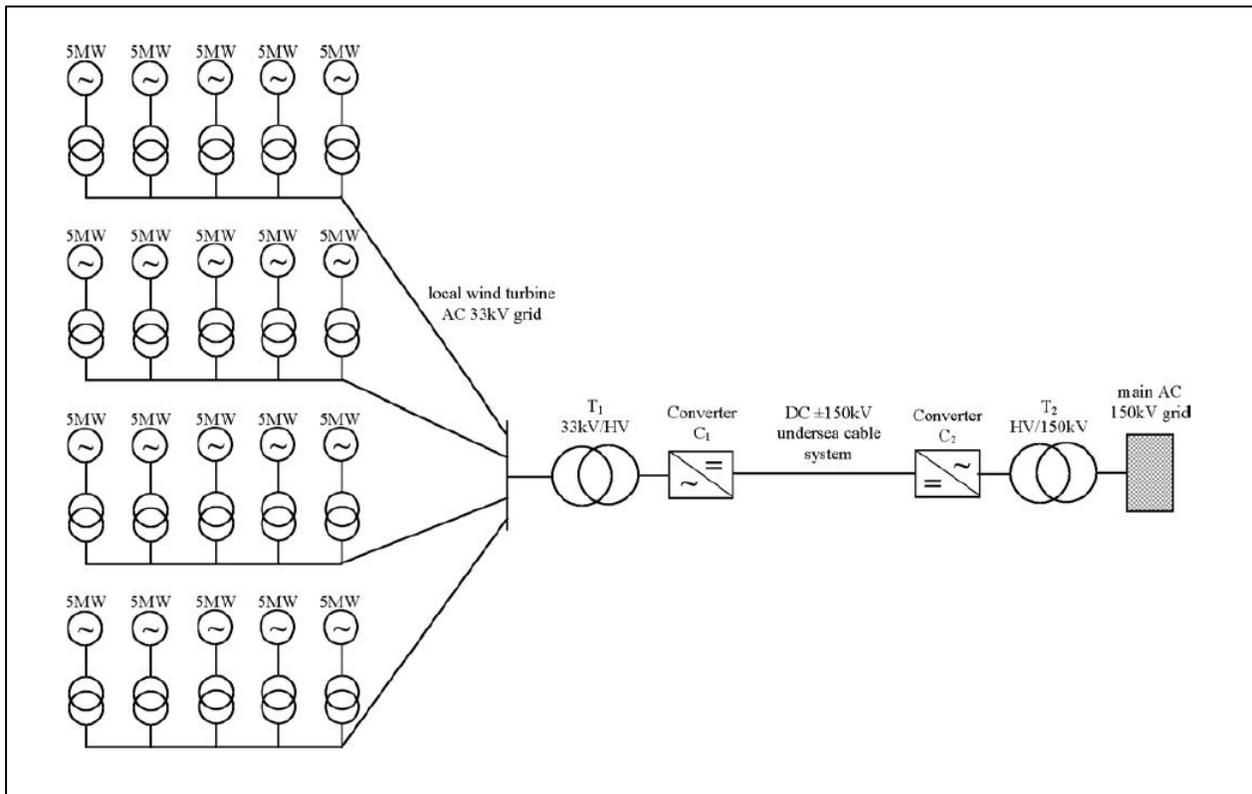


Figura 1.7 - Esempio di connessione in DC tra parco eolico e rete principale in AC [6]

Capitolo 2

Cavi e accessori

La trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica si accingono ad assumere un ruolo sempre più significativo in ogni parte del pianeta, soprattutto attraverso sistemi in cavo interrati e sottomarini. Questo è dovuto a diversi fattori:

- a) a causa dell'incremento della popolazione, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, i sistemi di approvvigionamento di energia dovranno essere rinnovati ed estesi fino alle zone non ancora servite, e questo si può ottenere, in particolar modo all'interno dei grandi agglomerati urbani, solamente attraverso cavi interrati;
- b) la crescente sensibilità rispetto ai problemi ambientali sia ha reso sempre più difficile l'installazione di linee aeree, sia ne sta comportando la sostituzione, anche lontano dai centri urbani per motivi di preservazione del territorio;
- c) la rete di cavi esistente è costituita da componenti che stanno raggiungendo il termine del

servizio e mostrano deterioramento delle proprietà elettriche, meccaniche e termiche, in particolare per quanto riguarda i cavi isolati in carta e olio, i quali dovranno essere sostituiti da nuove tipologie di sistemi isolanti, per esempio quelli polimerici estrusi [7].

Nel capitolo in oggetto saranno dunque evidenziate le caratteristiche principali sia dei cavi per alte tensioni sia dei relativi accessori descrivendo brevemente i modelli più diffusi in commercio e le loro principali proprietà elettriche, termiche e meccaniche. Inoltre, si accennerà agli aspetti normativi e alle maggiori problematiche progettuali emerse nella transizione dal regime in corrente alternata a quello in corrente continua.

2.1 Livelli di tensione

Così come accade per tutti gli apparati elettrici, anche le specifiche relative alla produzione e all'esercizio dei sistemi in cavo caratterizzate da una serie di normative a livello nazionale e internazionale. L'International Electrotechnical Commission (IEC) identifica i sistemi trifase attraverso la massima tensione sopportabile da un componente U_m , cioè il massimo valore efficace della tensione concatenata che può essere applicata in maniera continuativa al sistema. I valori di U_m sono stati standardizzati dalla norma IEC 60038 come riferimento per il progetto dei sistemi in cavo. Per quanto riguarda i cavi a isolante estruso i livelli di tensione sono stati suddivisi nel modo seguente:

- low voltage (LV): tensioni inferiori a $U_m=1.2$ kV;
- medium voltage (MV): da $U_m=1.2$ kV a $U_m=36$ kV (IEC 60502);
- high voltage (HV): da $U_m=36$ kV a $U_m=170$ kV (IEC 60840);
- extra high voltage (EHV): da $U_m=245$ kV a $U_m=550$ kV (IEC 62067);
- ultra high voltage (UHV): tensioni superiori a $U_m=550$ kV.

Attualmente i livelli di tensione per i sistemi HVDC non sono standardizzati [8].

2.2 Cavi per alte tensioni

Nella Figura 2.1 è rappresentata la struttura interna di un cavo unipolare per alte tensioni:

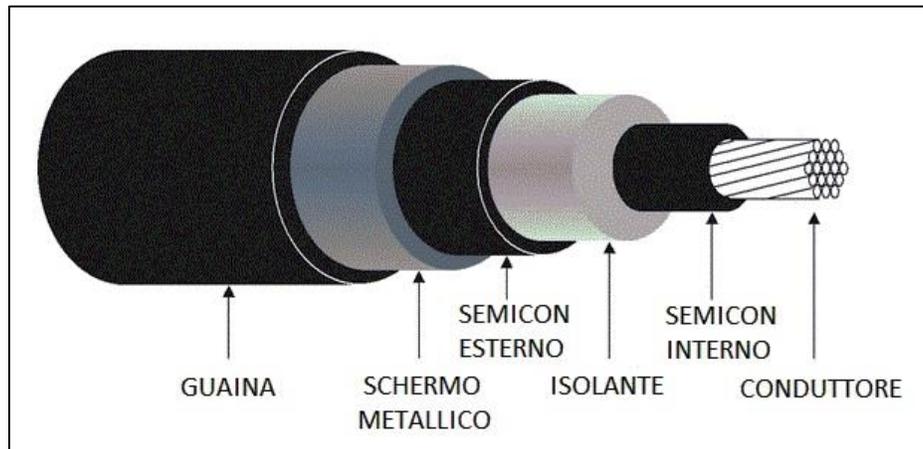


Figura 2.1 - Struttura di un cavo unipolare per alte tensioni [11]

Come si può osservare, le parti costituenti un cavo di alta tensione sono molteplici e hanno diverse funzioni:

- **CONDUTTORE**: la funzione del conduttore è di trasmettere la corrente con le minori perdite possibili e questa caratteristica si ottiene con una opportuna scelta del materiale e una apposita progettazione. I materiali conduttori maggiormente utilizzati sono rame e alluminio. La scelta più economica è costituita dal rame poiché consente di utilizzare, a parità di portata corrente, cavi di sezione minore, dato che la sua resistività è pari al 60% di quella dell'alluminio. Inoltre, il rame presenta una resistenza a trazione circa tre volte superiore, dunque il suo impiego risulta vantaggioso anche dal punto di vista della produzione. Il punto di forza dell'alluminio si basa sulla sua densità, circa tre volte inferiore a quella del rame, la quale permette di ridurre notevolmente il peso del cavo, a parità di portata. Le sezioni trasversali dei cavi di alta tensione sono standardizzate e coprono il range compreso tra i 240 mm² e i 2500-3000 mm².
- **ISOLANTE**: lo strato isolante ha la forma di un cilindro cavo ed è costituito generalmente da un materiale dielettrico con alcuni additivi. Ne esistono due tipologie principali, una è rappresentata da più strati di carta impregnata, mentre l'altra da un singolo strato di iso-

lante polimerico estruso. Soprattutto nel campo delle alte tensioni, lo strato isolante costituisce la componente più importante e complessa da progettare e analizzare per quanto riguarda il comportamento a lungo termine. Generalmente ci si attende un periodo di servizio compreso tra i 30 e i 40 anni. Negli anni Novanta, dopo il successo ottenuto con l'isolamento in carta e olio, che ha dimostrato grande affidabilità e durabilità, l'introduzione del polietilene reticolato, generalmente indicato con la sigla XLPE (cross-linked polyethylene), ha sancito un'evoluzione significativa nella tecnologia dei materiali isolanti. Grazie all'uso dell'XLPE, la lunghezza dei cavi può essere aumentata non essendo necessari sistemi per il rabbocco dell'olio; inoltre, a parità di dimensioni, la portata del cavo è maggiore, poiché il conduttore può raggiungere una temperatura di servizio di 90°C, mentre con i cavi in carta e olio il limite si ferma a 60°C. Per ottenere risultati soddisfacenti, è quindi necessaria una stretta collaborazione tra le aziende produttrici di sistemi in cavo ed esperti di polimeri, in modo tale da perfezionare le tecniche di produzione per ottenere gradi di purezza sempre più elevati, limitare la diffusione di umidità all'interno del materiale, minimizzare le disomogeneità di bordo tra lo strato isolante e lo schermo semiconduttivo.

- **STRATI SEMICONDUTTIVI:** strati adibiti alla riduzione ed equalizzazione del campo elettrico, si interpongono tra il conduttore e l'isolante e tra l'isolante e lo schermo metallico. Sono definiti dalle norme rispettivamente come strato semiconduttivo interno o schermo del conduttore e strato semiconduttivo esterno o schermo del nucleo. Essi hanno due funzioni: equalizzare e ridurre lo stress elettrico all'interno dell'isolante, annullando le irregolarità e le disomogeneità provocate dai fasci del conduttore, e prevenire la formazione di cavità interne e vuoti tra i componenti in tensione e l'isolante, causate per esempio da stress meccanici o dalle diverse modalità di dilatazione termica degli elementi che formano il cavo. Un'adesione efficace tra lo strato semiconduttivo e lo strato isolante evita il verificarsi di scariche parziali, fenomeno estremamente dannoso in quanto accelera sensibilmente l'invecchiamento dei materiali fino a causarne, a volte, il fuori servizio.
- **SCHERMO METALLICO:** con questo termine si indicano le varie tipologie di conduttore esterno che circonda concentricamente il nucleo del cavo, come per esempio le lamine di alluminio spesso usate nei cavi a isolante polimerico. Tali componenti non sono im-

piegati solamente per fungere da schermo elettrostatico, ma anche per altre funzioni, quali:

- ritorno per la corrente capacitiva durante il servizio, evitando una eccessiva caduta di tensione sullo schermo metallico (questa funzione non è necessaria in regime in corrente continua) ;
- via preferenziale per la corrente di cortocircuito nel periodo che intercorre tra il guasto e l'apertura delle protezioni, evitando il superamento della temperatura massima ammissibile per il cavo in servizio;
- riduzione delle influenze di natura elettromagnetica esercitate dal cavo sull'ambiente circostante in caso di guasto, soprattutto nel caso di guasto fase-terra;
- protezione contro contatti accidentali;
- protezione meccanica dell'isolante nei punti in cui il cavo si flette.

Tra le caratteristiche non appena elencate, quelle relative al comportamento in caso di guasto rivestono un ruolo fondamentale ed esigono l'impiego di una sezione trasversale minima per lo schermo metallico. Inoltre, tale parametro risulta influenzato anche da altri fattori, come la massima corrente di cortocircuito trasportabile, il coordinamento tra protezioni e sistemi di messa a terra nella rete, la configurazione di posa del cavo e le condizioni ambientali.

- **GUAINA ESTERNA:** nella maggior parte dei casi, lo schermo metallico necessita a sua volta di una protezione dagli sforzi meccanici, presenti soprattutto in fase di posa, e dalla corrosione, causata dalla reazione dell'acqua con specie elettroliticamente attive presenti nel terreno. Per esempio, un rivestimento esterno polietilene ad alta densità (HDPE) garantisce una buona protezione, meccanica, eccellente resistenza all'abrasione e minime infiltrazioni di umidità; per questo l'HDPE ha sostituito del tutto il polivinilcloruro (PVC), precedentemente assai diffuso. Tuttavia, l'elevata impermeabilità dell'HDPE non è sufficiente a preservare totalmente il cavo da attacchi corrosivi, quindi è necessario impiegare la cosiddetta protezione passiva alla corrosione, cioè uno strato ad alta viscosità a base bituminosa insieme con un nastro di tessuto prima dell'estrusione della guaina esterna [7].

2.2.1 Campo elettrico nei cavi

A questo punto risulta utile fornire alcune indicazioni in merito alla distribuzione del gradiente all'interno dello strato isolante ed evidenziare le differenze che intercorrono tra il caso in cui il cavo sia energizzato tramite una tensione alternata e quello in cui il medesimo procedimento avvenga attraverso una tensione continua.

Applicando la legge di Gauss per il campo elettrico a un cavo di lunghezza unitaria, si ottiene che il flusso del campo elettrico all'interno dell'isolante a una distanza x dal centro del conduttore risulta:

$$\Phi(E) = E \cdot 2\pi x = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.2.1.1)$$

quindi il campo elettrico si calcola in questo modo:

$$E = \frac{Q}{2\pi x \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.2.1.2)$$

Supponendo che ϵ_r rimanga costante, in regime AC il campo elettrico diminuisce con legge iperbolica partendo dalla superficie del conduttore, dove assume il valore massimo ($x = r$), verso la guaina metallica, connessa a terra, di raggio $R > r$.

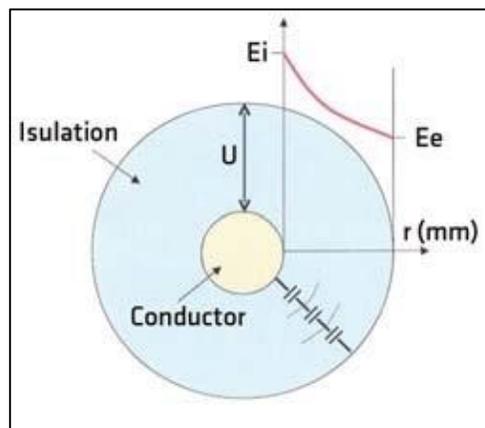


Figura 2.2 - Distribuzione del campo elettrico all'interno dell'isolante in regime AC [8]

La differenza di potenziale tra il conduttore e la guaina metallica, poiché il campo elettrico è definito come:

$$E = \frac{dV}{dx} \quad (2.2.1.3)$$

si ottiene calcolando l'integrale:

$$\int_r^R E dx = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \int_r^R \frac{dx}{x} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{R}{r} \quad (2.2.1.4)$$

di conseguenza, il gradiente risulta pari a:

$$E = \frac{V}{x \ln \frac{R}{r}} \quad (2.2.1.5)$$

Per ottenere tale risultato è stato fatto riferimento alle leggi dell'elettrostatica, ma è possibile pervenire alla medesima conclusione attraverso l'elettrodinamica, considerando la caduta di tensione provocata dalla corrente che fluisce nell'isolante; in regime AC, la corrente è essenzialmente capacitiva e, trascurando le perdite, la si può indicare con:

$$i_c = \omega CV \quad (2.2.1.6)$$

in cui C rappresenta la capacità del cavo per unità di lunghezza. Supponendo di suddividere l'isolante in elementi concentrici di spessore infinitesimo dx e superficie $2\pi x$, il campo elettrico, diretto radialmente, risulta avere un'intensità pari a:

$$E = \frac{dV}{dx} = \frac{i_c}{2\pi\omega\epsilon_0\epsilon_r x} = \frac{k}{\epsilon x} \quad (2.2.1.7)$$

dove ϵ_r può essere considerata in prima approssimazione costante, in quanto la sua dipendenza dalla temperatura è trascurabile rispetto al salto presente nell'isolante. Considerando invece il caso della tensione continua, l'unica corrente che attraversa il dielettrico è quella di tipo resistivo, quindi si ha:

$$i_G = GV \quad (2.2.1.8)$$

in cui G è la conduttanza per unità di lunghezza. Analogamente al caso in AC, si può concludere che:

$$E = \frac{dV}{dx} = \frac{i_G}{2\pi\sigma x} = \frac{k'}{\sigma x} \quad (2.2.1.9)$$

dove σ è la conducibilità elettrica. In questo caso, se quest'ultima rimane costante, allora il campo elettrico assumerà un andamento iperbolico come nel caso in corrente alternata, tuttavia, la conducibilità è molto più dipendente dalla temperatura rispetto alla permittività, cosicché i punti vicini al conduttore possono essere caratterizzati, a cavo carico, da una conducibilità maggiore rispetto a quelli prossimi alla guaina, dato che i materiali isolanti diminuiscono la propria resistività all'aumentare della temperatura, al contrario dei conduttori. Dunque, il prodotto σx può risultare decrescente al crescere di x e la distribuzione di campo invertirsi, con un massimo sull'isolante [14]. Un chiaro esempio è indicato in Figura 2.3, in cui viene esaminata la distribuzione del gradiente per un cavo a 500 kV DC isolato in carta e olio.

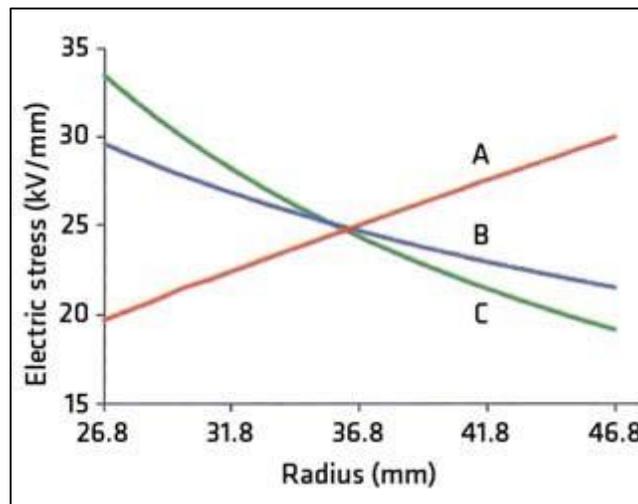


Figura 2.3 - Distribuzione del campo elettrico all'interno dell'isolante in regime DC [8]

la curva C mostra la distribuzione del gradiente all'istante di energizzazione del cavo: in questo caso la distribuzione del gradiente è capacitiva e coincide con quella presente in regime AC; la curva B indica invece la ripartizione dello stress elettrico nel funzionamento a vuoto: in questo caso la conducibilità dell'isolante varia solamente in dipendenza dal gradiente; infine, la curva A corrisponde a un funzionamento a pieno carico dunque la conducibilità è funzione anche della temperatura, quindi è talmente più elevata in prossimità del conduttore rispetto ai punti vicini alla guaina esterna da provocare l'inversione del campo. Inoltre, nei cavi a isolante estruso, l'accumulo di carica di spazio costituisce un ulteriore fattore di influenza sulla distribuzione del gradiente; rispetto a questa problematica si chiariranno i punti fondamentali in seguito [8].

2.3 Accessori

Nonostante la loro denominazione, gli accessori sono i componenti principali di un sistema in cavo perché consentono sia la connessione alla rete principale sia il raggiungimento della lunghezza necessaria per coprire una determinata distanza. Essi influenzano profondamente l'affidabilità dell'intero sistema in quanto sono realizzati totalmente o in parte in situ, mentre il cavo viene

prodotto e testato in fabbrica in condizioni strettamente controllate. La progettazione e la produzione degli accessori, in particolar modo per quanto riguarda i componenti prefabbricati, è sostanzialmente diversa da quelle relative al cavo associato e di conseguenza richiede una conoscenza specifica e approfondita che solamente pochi produttori possono vantare. Con il termine *accessori* si fa riferimento a due principali categorie in cui essi si dividono: terminazioni e giunti.

2.3.1 Terminazioni

Secondo la norma IEC 60050-461, le terminazioni sono definite come “apparati installati alle estremità di un cavo con il compito di garantire una connessione elettrica con le altre parti del sistema e assicurare l’isolamento fino al punto di connessione”. Le terminazioni possono costituire un’interfaccia con una linea aerea, una sbarra di una stazione blindata, o un passante di un trasformatore isolato in olio. In particolare, esistono 3 tipologie di terminazioni:

1. terminazioni per servizio interno o esterno, le quali connettono il cavo a una sbarra o a una linea aerea;
2. terminazioni per sistemi isolati a gas (GIS), le quali connettono il cavo a una sbarra isolata tramite gas in pressione (generalmente SF₆ o miscela di SG₆ e N₂);
3. terminazioni per trasformatori isolati in olio, le quali connettono il cavo a una sbarra placcata e isolata in olio.

Per assolvere correttamente alla propria funzione, ogni tipo di terminazione deve includere:

- a) una connessione che permette il passaggio di elevate correnti dal conduttore del cavo a un componente elettrico esterno facente parte del sistema;
- b) un sistema di isolamento tra il conduttore e la terra avente le stesse caratteristiche dell’isolante del cavo e comprendente un componente adibito al controllo del campo;
- c) un sistema capace di sostenere il cavo e di sopportare sia i relativi sforzi termomeccanici sia forze esterne causate dal vento, ghiaccio o dal peso stesso della sbarra stessa alla quale il cavo è connesso;
- d) un sistema di isolamento atto a proteggere l’isolante del cavo dall’ingresso di umidità o di fluidi isolanti relativi alla parte di sistema alla quale il cavo è connesso, per esempio SF₆

in pressione o olio di trasformatori;

- e) una connessione di terra per drenare l'eventuale corrente di cortocircuito presente sullo schermo del cavo.

Dal punto di vista progettuale, una terminazione costituisce un punto di transizione tra un campo elettrico radiale molto elevato presente nel cavo (15 kV/mm in condizioni di servizio) e i relativamente bassi gradienti presenti negli apparati blindati (3 kV/mm) o insistenti sulle sbarre isolate in aria (1 kV/mm). Il design della terminazione deve quindi essere concepito tenendo presente che il picco di gradiente si ha in corrispondenza dell'interruzione dello schermo e non del conduttore del cavo; in questa zona, infatti, l'effetto delle punte contribuisce in maniera significativa all'incremento del campo, soprattutto sulla superficie dell'isolante. Per queste ragioni è necessario adottare i necessari accorgimenti per minimizzare gli stress elettrici di tipo radiale e longitudinale, nocivi per la tenuta e la vita del sistema. Attualmente si fa riferimento a tre diverse metodologie per il controllo del gradiente:

- controllo di campo geometrico-capacitivo, ottenuto per mezzo di un cono costituito da materiale elastomerico o da una resina termoidurente; all'interno del cono viene incorporato un elettrodo con geometria opportunamente adattata;
- controllo di campo capacitivo, ottenuto tramite l'impiego di un cono capacitivo contenente una serie di lamine conduttive concentriche oppure elementi toroidali connessi in serie;

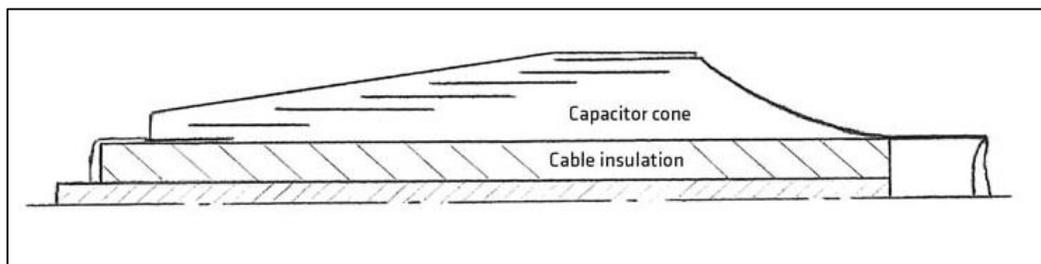


Figura 2.4 - Controllo di campo tramite cono capacitivo [8]

- controllo di campo resistivo o ad alta permittività, ottenuto grazie all'uso di uno strato di materiale elastomerico additivato con polveri conduttive.

Come già sottolineato, mentre l'isolante del cavo è sottoposto solamente a uno stress elettrico di tipo radiale, nelle terminazioni è presente un gradiente provvisto anche di componente longitu-

dinale. Per una corretta progettazione della terminazione è necessario calcolare questi stress e confrontarli con i gradienti massimi sostenibili dai diversi materiali costituenti l'accessorio. Questo avviene grazie all'impiego di software che implementano il metodo ad elementi finiti per simulare la distribuzione delle linee equipotenziali e del gradiente nelle zone critiche dell'accessorio; in Figura 2.5 se ne mostra un esempio.



Figura 2.5 - Distribuzione delle linee equipotenziali in una terminazione per uso esterno [10]

Risulta fondamentale tenere presente che la maggior parte dei picchi di gradiente si localizza in corrispondenza delle interfacce, la cui rigidità dielettrica è relativamente bassa e dipende da numerosi fattori come il grado di rugosità delle superfici, la pressione reciproca tra le interfacce e la qualità della lubrificazione. Inoltre, il progetto elettrico deve essere accompagnato da una corretta previsione dei fenomeni termici e meccanici che possono agire sull'accessorio; è necessario infatti controllare che l'isolante possa sostenere sia la pressione del fluido all'interno o all'esterno della terminazione sia gli stress meccanici trasferiti sulla terminazione dall'ambiente circostante, come per esempio il peso del ghiaccio sulle sbarre, terremoti, vibrazioni. Il progettista deve inoltre assicurarsi che la terminazione non costituisca un collo di bottiglia termico per la portata della corrente rispetto a quella del cavo; infatti, nonostante il suo diametro sia superiore a quello del cavo, la sua portata risulta maggiore poiché il calore viene dissipato soprattutto in direzione longitudinale dal conduttore verso l'esterno o verso il dielettrico fluido, invece che in direzione radiale. Per le terminazioni che prevedono l'uso di dielettrici fluidi è possibile inoltre prevedere dei sistemi di raffreddamento per migliorare ulteriormente l'espulsione di energia termica.

2.3.1.1 Componenti principali delle terminazioni

Una terminazione è composta da svariati componenti e materiali, ognuno dei quali è adibito a specifiche funzioni. Per esempio, il connettore, presente anche nei giunti, unisce il conduttore del cavo a quello della terminazione. Quest'ultimo, essendo solitamente esposto in parte all'aria, è fabbricato in rame per resistere meglio alla corrosione; nel caso in cui il conduttore del cavo sia in alluminio, si adotta una sbarra bimetallica alluminio-rame. Alle estremità della terminazione sono installati degli apparati metallici: quello superiore fissa l'isolamento della terminazione sopra lo stelo del conduttore ed ancora il conduttore del cavo a quello della terminazione; quello inferiore sigilla l'isolamento della terminazione sullo schermo metallico del cavo, ne assicura la messa a terra, sobbarcandosi la corrente di fuga e comprende una piastra di supporto. Le piastre di supporto sono costituite generalmente da acciaio amagnetico o inossidabile e sono isolate dalla struttura reggente l'accessorio per favorire la connessione a terra dello schermo metallico del cavo, come si può notare in Figura 2.6.

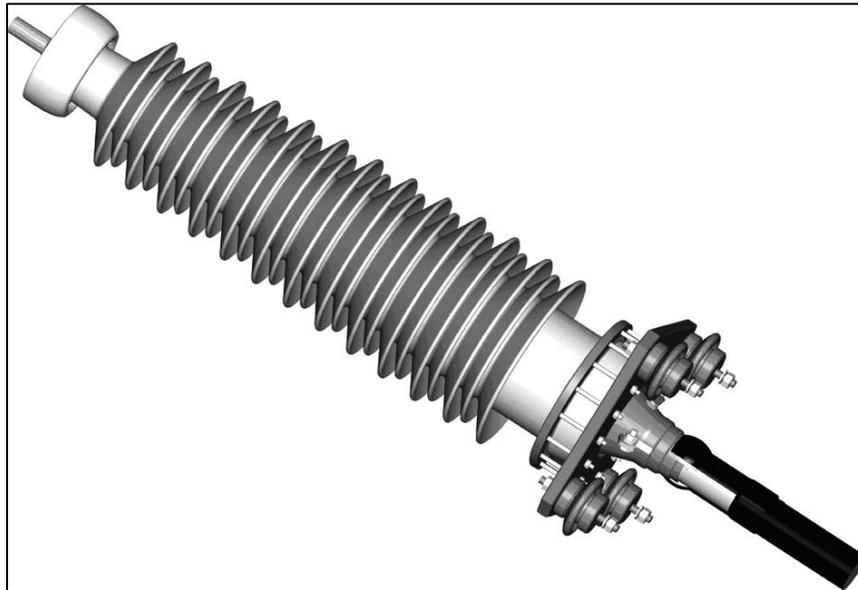


Figure 2.6 - Terminazione per uso esterno con relativa piastra di supporto [8]

L'installazione di una terminazione prevede generalmente una sequenza di operazioni di questo tipo:

1. posizionamento della struttura portante e fissaggio della piastra di supporto;
2. determinazione della lunghezza della testa del cavo;
3. installazione del connettore;
4. rimozione dello schermo metallico e dello strato semiconduttivo esterno;
5. installazione dell'apparato comprendente il cono elastomerico o termoindurente;
6. fissaggio delle guarnizioni;
7. verifica in pressione dell'integrità dell'accessorio (per sistemi pressurizzati);
8. riempimento con fluido dielettrico se necessario.

2.3.1.2 Terminazioni per cavi a isolante estruso

Una terminazione per cavi a isolante estruso comprende un singolo conduttore, uno strato di materiale dielettrico estruso, un apparato per la riduzione del gradiente e un'ulteriore rivestimento isolante. Una particolare categoria di terminazioni riguarda quelle per uso esterno.

Le terminazioni per uso esterno, anche chiamate "outdoor terminations", per definizione sono sottoposte a tutte le condizioni atmosferiche, dovendosi interfacciare con apparati isolati in aria. Generalmente, per tensioni superiori a 138 kV, le terminazioni per uso esterno possono essere a secco oppure riempite con dielettrici fluidi non in pressione e sigillate all'interno di corpi isolanti in porcellana oppure compositi. Questi ultimi sono più leggeri rispetto a quelli di tipo ceramico e possono essere facilmente installati su pali e sostegni. La preparazione di queste terminazioni avviene a terra e ad essa segue l'installazione sul palo per mezzo di una gru.



Figura 2.7 - Terminazioni esterne per un cavo a 420 kV in XLPE [10]

Le terminazioni a secco vengono utilizzate per livelli di tensione fino a 138 kV e richiedono un supporto che può essere fornito da uno scaricatore o da un isolatore. L'apparato adibito al controllo del campo può essere costituito o da guaine in materiale elastomerico prestampato adattate sul cavo per interferenza o da strati ad alta permittività termorestringenti. Nel caso dei materiali elastomerici, l'installazione della guaina isolante avviene prima della sigillazione della parte superiore e della connessione allo stelo del conduttore.

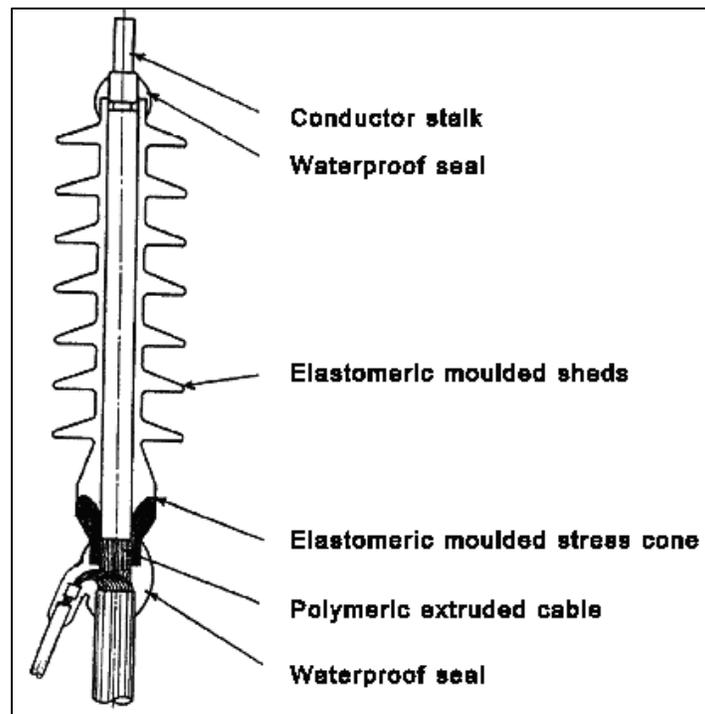


Figura 2.8 - Terminazione esterna con cono elastomerico prestampato [10]

Per quanto riguarda le terminazioni a dielettrico fluido, l'intero apparato è protetto da un involucro isolante in ceramica o in resina termoindurente oppure da una struttura composita rigida sulla quale sono estrusi o stampati strati di materiale polimerico. Non esiste una sola tipologia di terminazione a dielettrico fluido, ma diverse, a seconda della modalità con cui riducono lo stress elettrico. Si può ricorrere per esempio a un cono o "stress cone" adattato al cavo o a strati semiconduttivi rivestiti da un materiale ad alta permittività. Un approccio più tradizionale e specifico per le applicazioni in AC prevede l'uso di condensatori attraverso avvolgimenti opportunamente progettati per ottenere una distribuzione lineare di tensione oppure applicando alternativamente strati di materiale conduttivo e isolante in fase di montaggio. Altre tipologie di terminazioni si differenziano a seconda del sistema a cui connettono il cavo e all'ambiente circostante: le terminazioni per uso interno ad esempio connettono il cavo a un conduttore isolato in aria in un ambiente protetto dagli agenti atmosferici, quindi sono sprovviste di alette, le quali hanno la funzione di proteggere la terminazione stessa dalle intemperie e di allungare la via di fuga della corrente superficiale; altri tipi di terminazione sono concepiti per i sistemi isolati a gas (GIS) oppure per la connessione a passanti di trasformatori in olio.

2.3.2 Giunti

Secondo la norma IEC 60050-461, i giunti sono definiti come "accessori che realizzano una connessione tra due o più cavi per formare un circuito continuativo". Così come per le terminazioni, esistono diverse tipologie di giunti, concepite in funzione sia delle condizioni di servizio sia delle caratteristiche dei cavi che sono chiamati a connettere; tuttavia si possono distinguere alcuni componenti fondamentali presenti in ogni caso:

- a) una connessione meccanica ed elettrica tra i conduttori delle diverse porzioni di cavo;
- b) un isolamento interposto tra la connessione e le parti a terra avente le medesime prestazioni dell'isolante del cavo;
- c) un rivestimento esterno che protegge l'isolamento dall'ambiente circostante e assicura la continuità degli schermi oppure la trasposizione, se necessaria.

Un giunto ideale non dovrebbe presentare discontinuità elettriche, termiche e meccaniche, ovvero dovrebbe avere le stesse proprietà del cavo, caratteristiche tecnicamente ottenibili soprattutto quando non si tollera un incremento del diametro per ragioni di stabilità meccanica. Tuttavia, per motivi pratici ed economici e per limitazioni sulla lunghezza, solitamente si fa riferimento a giunti con diametro superiore a quello dei cavi che connettono. Infatti, maggiori diametri comportano semplificazioni nella progettazione e riducono gli stress nel dielettrico a regime; parallelamente si instaurano stress di tipo longitudinale, difficilmente sopportabili da parte di alcuni tipi di isolante, come per esempio i laminari e i multistrato. Generalmente, per i cavi in alta tensione, si possono produrre pezzature di lunghezza piuttosto elevata, per esempio diversi chilometri; tuttavia questo non è sempre possibile a causa delle necessità di trasporto. Le bobine, infatti, non devono superare certi limiti dimensionali nel caso in cui debbano essere trasportate da automezzi o per via ferroviaria. Tale vincolo risulta assai meno stringente per i cavi sottomarini, trasportati via mare attraverso apposite navi, capaci di provvedere anche alla posa. La primaria funzione dei giunti è dunque quella di connettere diversi spezzoni di cavo, la cui lunghezza dipende, oltre che dalle condizioni ambientali e di trasporto, dalla sezione del conduttore, dalla tensione nominale, dal processo di fabbricazione. A seconda del tipo di isolamento delle pezzature di cavo da connettere, si ricorre a giunti tradizionali, nel caso in cui i dielettrici siano i medesimi, oppure a giunti di transizione se necessario connettere una linea a isolante estruso con una isolata in carta e olio.

Dal punto di vista progettuale, l'impiego di materiali di isolamento con caratteristiche elettriche

differenti rispetto all'isolante del cavo, come la permittività relativa e la rigidità dielettrica, costituisce una delle problematiche di maggiore importanza. Infatti, è necessario sia tenere conto della componente longitudinale del gradiente che insiste sulle interfacce influenzando in maniera sostanziale l'affidabilità del prodotto, sia fare in modo che le gli ingombri radiali del giunto vengano proporzionati in modo tale da mantenere l'intensità del campo elettrico entro i limiti di sicurezza. Le maggiori problematiche di tipo meccanico si concentrano invece sulla flessibilità del cavo e sulle forze causate dai fenomeni di dilatazione e compressione termica in prossimità del giunto. Come già osservato per le terminazioni, la dissipazione del calore costituisce un requisito fondamentale per il sistema e si ottiene o minimizzando lo spessore del dielettrico compatibilmente con le proprietà elettriche richieste o facendo uso di materiali altamente performanti a livello termico. La progettazione del giunto ha inizio una volta stabiliti i gradienti massimi ammissibili per ogni tipo di materiale impiegato e in corrispondenza delle interfacce; tali valori emergono sia da prove di rigidità dielettrica sia da un accurato studio delle proprietà elettriche nelle diverse condizioni di servizio, come sarà illustrato nel capitolo 3. Innanzi tutto si procede calcolando la distribuzione delle linee equipotenziali e l'intensità del campo elettrico nei punti critici del giunto, come alle estremità degli elettrodi, dei calici e delle interfacce tra differenti materiali. Se i valori ottenuti superano i livelli di sicurezza stabiliti, si apportano modifiche alle dimensioni e, se necessario, ai materiali stessi.

Gli sforzi meccanici a cui i giunti sono sottoposti durante il servizio sono causati sia dalla corrente circolante nel conduttore sia dalle condizioni di installazione. La situazione peggiore si ha nel caso in cui il giunto debba connettere un sistema flessibile in cui il cavo presenta curve e piegamenti, con un sistema rigido in cui il cavo risulti fissato rigidamente o sigillato: infatti, il sistema rigido trasmette al giunto una spinta che non è bilanciata e può provocare danni all'accessorio stesso se non si prendono le adeguate precauzioni tramite mezzi di compensazione.

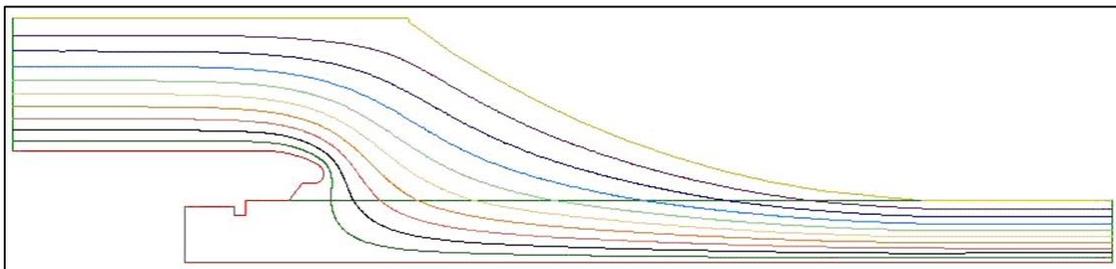


Figura 2.9 - Distribuzione delle linee equipotenziali in un giunto prestampato [8]

Esaminando invece gli effetti legati alle perdite per effetto Joule, i giunti presentano solitamente un ingombro radiale maggiore rispetto ai cavi che connettono, quindi una maggiore resistenza termica. Tuttavia, ciò viene controbilanciato da una minore resistenza termica dell'interfaccia tra il giunto e l'ambiente esterno. I giunti prefabbricati, i quali adottano componenti in resina epossidica, oppure i giunti pre-stampati, provvisti di dispositivi di dissipazione del calore in prossimità del connettore, tendono ad assumere resistenze termiche inferiori e costituiscono dunque una tipologia di accessori le cui pre-stazioni si avvicinano di più a quelle del cavo. Sebbene i giunti installati su cavi sottoposti a carichi di trasmissione elevati possano limitare la normale capacità di sovraccarico del sistema, va comunque sottolineato come la capacità di sovraccarico di emergenza a breve termine di questi accessori possa risultare molto simile a quella del cavo; questo è dovuto alla maggiore inerzia termica del cavo, e di conseguenza alla sua maggiore costante di tempo. Per questo motivo, come si può osservare dal grafico riportato in Figura 2.10, nel momento in cui avvenga un aumento istantaneo del carico, la velocità di incremento della temperatura nel giunto risulterebbe minore rispetto a quella registrabile nel cavo.

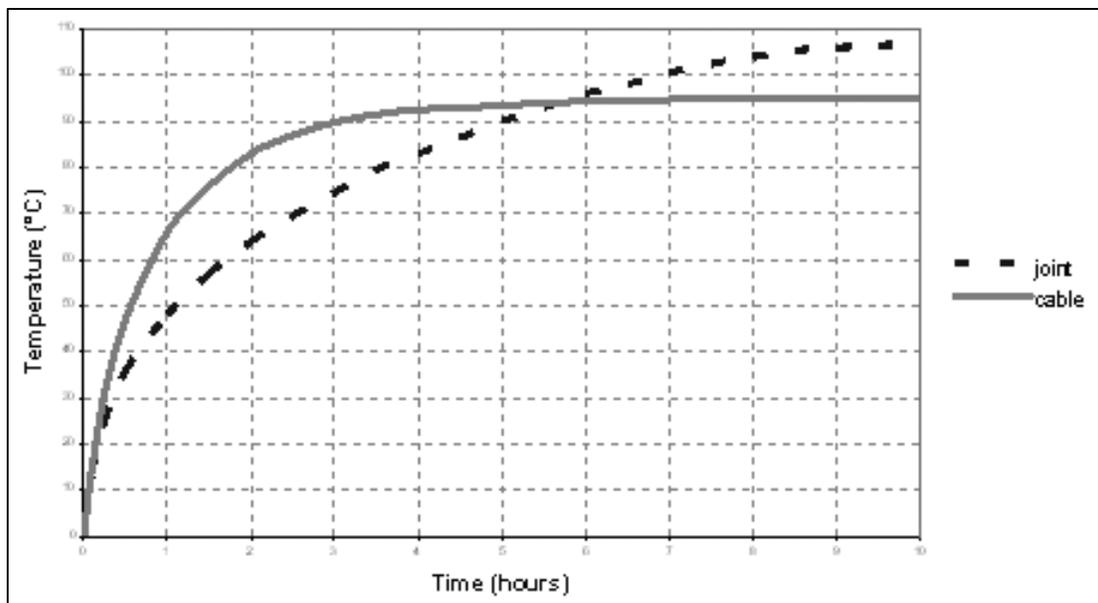


Figura 2.10 - Curve di riscaldamento di un cavo estruso a 132 kV e di un giunto prestampato [10]

Questo fenomeno non si riscontra invece nei giunti assemblati in situ, a causa delle infiltrazioni di umidità che avvengono in fase di montaggio e che portano a un aumento repentino delle perdite

dielettriche accompagnato da un incremento di temperatura più rapido rispetto a quello subito dal cavo; tutto ciò conduce spesso al raggiungimento dell'instabilità termica del giunto a una temperatura inferiore a quella massima tollerabile dal cavo.

2.3.2.1 Componenti principali dei giunti

Come nelle terminazioni, è previsto l'uso di **connettori** anche nei giunti per assicurare una buona continuità elettrica e meccanica. In particolare, i connettori devono presentare sia una buona conducibilità elettrica al fine di evitare sovratemperature rispetto al conduttore del cavo in condizioni di servizio sia un'elevata resistenza a trazione e compressione per sostenere gli sforzi meccanici. Le tipologie di connettori più diffuse sono:

- **A COMPRESSIONE:** sono costituiti da un cilindro cavo dello stesso materiale dei conduttori da connettere, nel quale questi vengono inseriti. In seguito il cilindro viene compresso con una pressa idraulica;
- **A SIGILLATURA MECCANICA:** in questo caso, la compressione dei conduttori all'interno del connettore avviene per mezzo dell'inserimento di bulloni la cui testa viene in seguito levigata allo stesso livello della superficie del connettore; connettori di questo tipo possono essere usati nei sistemi in alta tensione solo con sezioni trasversali del conduttore relativamente ridotte, fino a circa 630 mm^2 a causa della loro limitata capacità di sostenere elevate correnti di cortocircuito.
- **A SALDATURA:** i connettori a saldatura possono essere realizzati in due diversi metodi: il primo prevede il posizionamento intorno ai conduttori un tubo metallico il quale viene poi riempito con una lega di piombo fuso e, così come i connettori a sigillatura meccanica, è adatto per sezioni non superiori ai 630 mm^2 poiché a temperature molto elevate la lega potrebbe fondere; il secondo metodo si basa invece sulla saldatura dei due conduttori tramite l'applicazione di un metallo fuso e si adotta per conduttori in alluminio di elevata sezione o conduttori in rame smaltato.
- **A SALDATURA ESOTERMICA:** la saldatura esotermica viene effettuata soprattutto su accessori per cavi estrusi; essa comporta considerevoli vantaggi, come la formazione

di una connessione a livello molecolare tra i due conduttori e non semplicemente di tipo meccanico e l'indipendenza da fonti di energia esterne. La saldatura esotermica, infatti, sfrutta come fonte energetica una reazione chimica di ossido-riduzione; in particolare, si inseriscono in un apposito crogiolo ossido di ferro e polvere di alluminio che vengono fatti reagire tramite ignizione:



La reazione è esotermica, quindi sprigiona una elevata quantità di calore che fonde il ferro prodotto. Quest'ultimo costituisce il materiale della saldatura e confluisce attraverso un canale intorno ai due conduttori da unire.

- **PLUG-IN:** una connessione tramite connettori plug-in è formata da due connettori posti alle estremità dei conduttori e uniti tramite l'interposizione di contatti elastici o provvisti di molle capaci di trasportare la corrente.

Un altro componente fondamentale dei giunti è il **contenitore metallico esterno**, che connette elettricamente lo schermo del cavo con il guscio in cui è alloggiato il giunto; esso deve soddisfare alle seguenti necessità :

- a) sostenere la pressione del dielettrico fluido se impiegato;
- b) condurre a terra la corrente capacitiva in applicazioni in AC e, nel caso, la corrente di cortocircuito;
- c) sostenere gli sforzi termomeccanici durante il servizio.

Per realizzare l'involucro metallico esterno si adottano tre principali metodologie: intubazione, saldatura o sigillatura meccanica.

Infine, si applica una **protezione contro la corrosione** come ultimo tipo di rivestimento del giunto.

Anche in questo caso le funzioni di tale componente sono molteplici:

- a) proteggere le parti metalliche del giunto dalla corrosione;
- b) impedire l'infiltrazione di acqua all'interno del giunto;
- c) isolare elettricamente da terra lo schermo dell'isolante e l'involucro metallico a seconda del tipo di giunto.

In genere la protezione consiste in un contenitore in fibra di vetro riempito con un composto idrofobico come bitume o resina. In altri casi si ricorre a un contenitore stampato che, in combinazione con tubi termorestringenti risulta anche impermeabile assicurando così una barriera doppia. In accordo con le norme IEC e IEEE si effettuano cicli termici e prove a impulso in immersione per valutare la corretta progettazione dello strato anticorrosione.

2.3.2.2 Giunti per cavi a isolante estruso

I giunti stampati sono i più utilizzati per le applicazioni in alta tensione su cavi a isolante estruso. Essi vengono installati aggiungendo sopra il connettore e le interruzioni del cavo strati di materiale non vulcanizzato per poi posizionare lo stampo e riscaldare il tutto per alcune ore. La pressione generata dalla dilatazione termica fissa saldamente i materiali stratificati, cioè gli isolanti e i semiconduttivi, in modo da ottenere una massa libera da cavità interne e simile al dielettrico del cavo. In Figura 2.11 si può osservare la struttura interna di un giunto stampato installato su un cavo a isolante estruso.

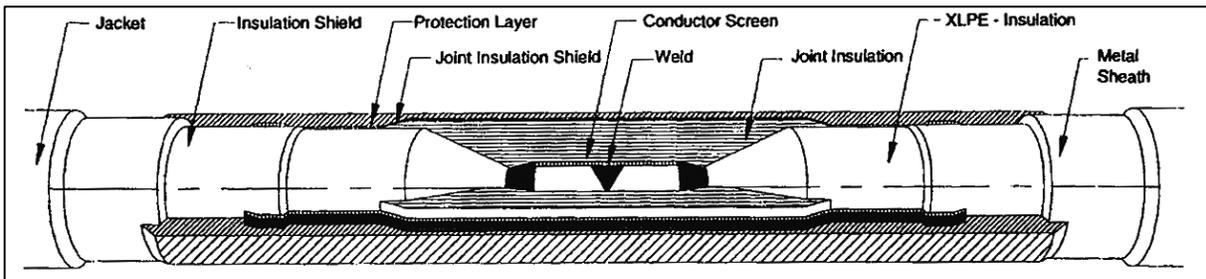


Figura 2.11 - Giunto stampato per cavi a isolante estruso [10]

Un metodo alternativo consiste nel posizionamento dello strato isolante per mezzo di una estrusione all'interno di un apposito stampo. Una volta terminata la fase di estrusione, il giunto viene riscaldato e pressurizzato con azoto in modo tale da attivare la reticolazione dell'isolante.

Uno dei passi fondamentali per la progettazione del giunto consiste nel selezionare il miglior design compatibile con il cavo estruso da connettere e con le condizioni di servizio. Tale compatibilità viene assicurata grazie alle varie prove di prequalifica e di tipo; inoltre, le prestazioni degli acces-

sori dipendono non solo dalla progettazione, ma anche dalla qualità del lavoro del personale adibito all'installazione e degli strumenti di lavoro utilizzati. Le dimensioni dell'accessorio sono un fattore fondamentale per ottenere prestazioni soddisfacenti durante il servizio: conoscere il diametro esterno dell'isolante del cavo e la sua tolleranza è importantissimo per poter scegliere con cura l'accessorio più adatto, specialmente se contiene componenti prestampati come il cono elastomerico o lo strato isolante, poiché questi sono prodotti per essere posizionati su cavi compresi in un certo range di diametri, limitato inferiormente e superiormente; in particolare, il limite inferiore è dato dalla necessità di ottenere una pressione all'interfaccia con l'isolante del cavo tale da evitare la formazione di cavità, mentre il limite superiore è imposto da accorgimenti precauzionali atti a impedire danni durante l'installazione dovuti a una compressione eccessiva tra i componenti. Anche il connettore viene selezionato partendo dal diametro e dalla tolleranza del conduttore, affinché presenti conducibilità elettriche e resistenza meccanica soddisfacenti. Infine, i diametri e le tolleranze degli schermi metallici e degli involucri consentono una scelta di flange capaci di scorrere facilmente sul cavo in fase di assemblaggio.

Per cavi a isolante estruso si utilizzano le seguenti tipologie di giunti, ognuna delle quali comprende diverse varianti in termini di progettazione e di materiali:

- **giunti termorestringenti:** i materiali termorestringenti impiegati in questo tipo di giunti sono a base di poliolefine e subiscono in fabbrica un riscaldamento fino alla temperatura di transizione vetrosa, poi espansione e raffreddamento. Il giunto viene dunque trasportato in situ espanso e, una volta posizionato, è sottoposto a un ulteriore riscaldamento al di sopra della temperatura di transizione vetrosa (circa 120°C), il quale attiva la restrizione.
- **giunti multistrato:** sono costituiti da strati applicati manualmente, che possono essere adesivi oppure in gomma elastomerica, in particolare EPR (Ethylene-Propylene Rubber). Il vantaggio principale derivante dall'impiego di questi giunti consiste nel fatto che sono realizzati con materiali economici e diffusi in commercio e risultano molto semplici da montare; tuttavia, avendo diametri piuttosto elevati e non essendo installati automaticamente, possono essere scelti solamente per applicazioni in cui sono coinvolti gradienti modesti.
- **giunti stampati:** in questo caso l'isolamento del giunto viene fuso e applicato sul campo in corrispondenza delle zone rastremate dei dielettrici estrusi dei cavi da connettere, osser-

vabili nella Figura 2.11; i metodi per l'applicazione dell'isolamento sono vari, come la **nastratura**, che consiste nello stendere strati di materiale che viene poi fuso, oppure l'**iniezione** da parte di uno stampo, il quale accoglie il materiale precedentemente riscaldato e fuso all'interno di un apposito crogiolo. Altre tecniche fanno riferimento all'**estrusione**, secondo cui il materiale viene fuso in un estrusore poi iniettato in uno stampo riscaldato, e allo **stampaggio a blocchi**, che prevede la realizzazione di due diversi blocchi stampati, ciascuno posizionato ad una estremità rastremata del dielettrico. Tutte le metodologie descritte prevedono un successivo riscaldamento per attivare gli agenti reticolanti presenti nel materiale. Servendosi dunque della tecnica di installazione idonea è possibile ottenere una quasi perfetta adesione del materiale stampato allo schermo e all'isolante del cavo, la quale sia impedisce la formazione di cavità sia rende il componente isotropo rispetto alla rigidità dielettrica. Ciò consente di raggiungere gradienti elevati anche con giunti di lunghezza e ingombro radiale ridotti. Se si fa uso di connettori a sigillatura meccanica, il giunto può essere realizzato con diametro di poco superiore a quello del cavo; tuttavia questo rende le sue prestazioni elettriche molto più sensibili alle modalità di assemblaggio e alle condizioni ambientali, il che richiede grande esperienza e competenza da parte degli installatori.

- **giunti prefabbricati**: solitamente sono prodotti con materiali in gomma prestampati che, in alcuni casi, sono impiegati insieme con componenti in resina e vengono detti giunti compositi. Altre tipologie di giunti prefabbricati sono classificate come monocomponenti, bicomponenti o tricomponenti. I principali vantaggi derivanti da questi giunti risiedono nella produzione in fabbrica in condizioni controllate e alla verifica tramite prove routinarie prima della consegna così come avviene per i cavi. D'altra parte, le problematiche più significative si concretizzano negli elevati costi di produzione e nelle maggiori dimensioni rispetto ai giunti stampati. In questo tipo di giunti, il massimo gradiente ammissibile alle interfacce dipende dalla loro rugosità e dalla pressione relativa; precisamente, al diminuire della rugosità e all'aumentare della pressione relativa, la rigidità dielettrica delle interfacce cresce, come indicato in Figura 2.12.

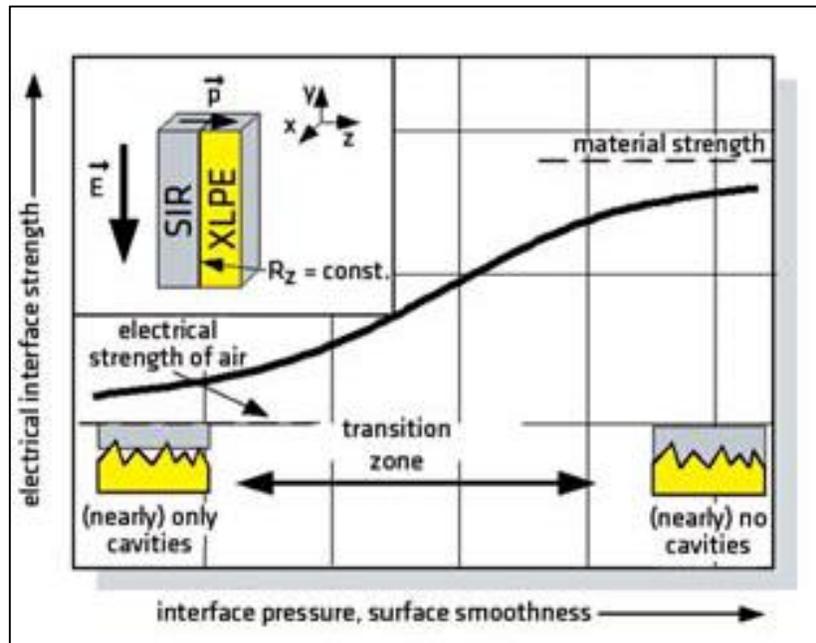


Figura 2.12 - Rigidità dielettrica delle interfacce in funzione della pressione e della rugosità [10]

- **giunti back-to-back:** costituiscono una particolare categoria di giunti che connettono due cavi ospitandone le terminazioni in un singolo involucro. Per esempio possono essere sfruttati per connettere una terminazione di un sistema isolato in gas (GIS) con una isolata in olio. Le terminazioni all'interno dei giunti back-to-back sono formate da un contenitore riempito di dielettrico fluido oppure direttamente inserite nel giunto senza alcuna struttura di contenimento.

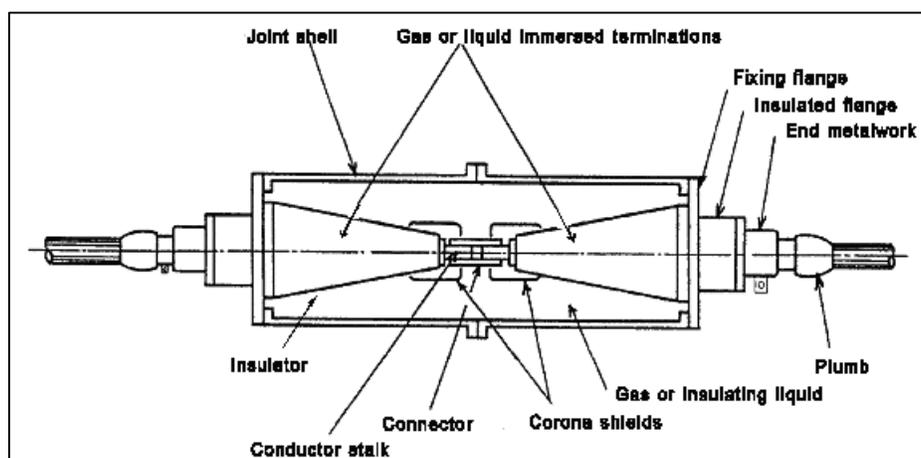


Figura 2.13 - Giunto back-to-back a due isolatori [10]

Esaminando in dettaglio le varie tipologie, si distinguono tre diversi giunti back-to-back, clas-sificati in funzione del numero dei sistemi di isolamento impiegati:

- **a 2 isolatori:** entrambe le terminazioni sono provviste di un involucro che separa l'isolante della terminazione da quello del giunto (Figura 2.13);
 - **a 1 isolatore:** in questo caso solo una delle due terminazioni è rivestita da un involucro per il contenimento del dielettrico, mentre l'altra è direttamente immersa nell'isolante del giunto;
 - **senza isolatori:** entrambe le terminazioni sono immerse nell'isolante del giunto; risulta quindi necessario adottare opportuni accorgimenti per minimizzare i movimenti causati da sforzi termomeccanici.
- **giunti a Y:** si ricorre ai giunti a Y quando è necessario connettere tre cavi. I giunti a Y vengono realizzati secondo ciascuna delle tecniche descritte, anche se la più adottata è quella tipica dei giunti prefabbricati. In questo caso tre coni di materiale polimerico vengono inseriti all'interno di un isolatore centrale in resina, che comprende anche un elettrodo di alta tensione al cui interno vengono connessi i cavi. Si comprende intuitivamente che una maggiore pressione tra le interfacce diminuisce le dimensioni delle cavità presenti, innalzando la rigidità dielettrica. Per raggiungere le pressioni desiderate si può procedere o applicando forze meccaniche esterne attraverso elementi di compressione, per esempio molle, oppure sfruttando l'elasticità del materiale.
 - **giunti di transizione:** i giunti di transizione sono utili per connettere due cavi con isolamento diverso, generalmente uno isolato in carta e olio con uno a isolante estruso, necessità da soddisfare se si vuole gradualmente sostituire l'isolamento di una linea; attualmente infatti sono numerosi i casi in cui gli isolamenti in carta e olio, a causa di un cospicuo numero di anni in servizio, non garantiscono più i livelli di affidabilità richiesti e implicano onerosi costi di manutenzione. I giunti di transizione possono ricalcare la configurazione dei giunti back-to-back a due isolatori oppure implementare una barriera in resina epossidica capace di sostenere la pressione del dielettrico fluido di uno dei cavi e comprendente un connettore metallico, come rappresentato in Figura 2.14.

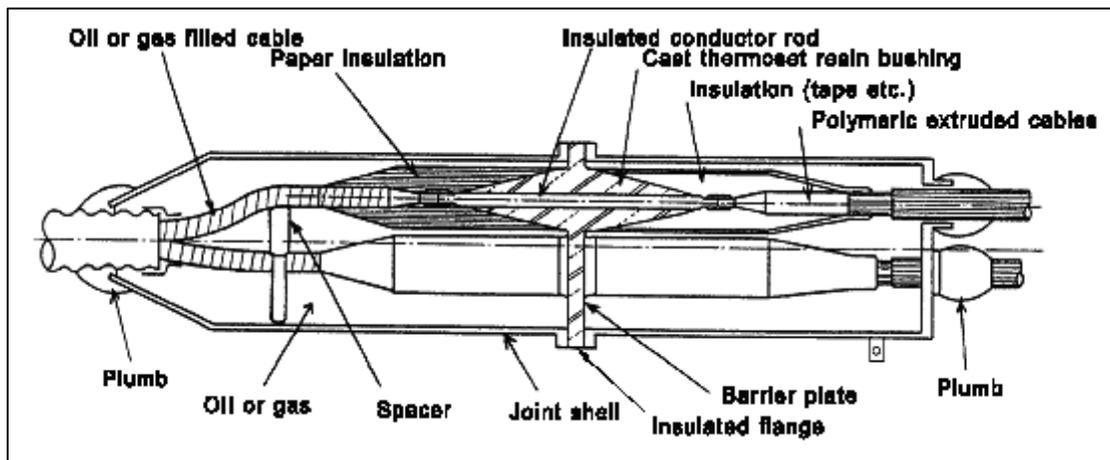


Figura 2.14 - Giunto di transizione a Y con barriera in resina epossidica [10]

2.3.3 Dalla corrente alternata alla corrente continua

Come precedentemente evidenziato, la distribuzione del campo elettrico nell'isolante del cavo varia sensibilmente, a seconda del regime di trasmissione adottato, AC o DC. Naturalmente lo stesso fenomeno si verifica negli accessori con conseguenze assai gravose; infatti, essi sia presentano una struttura più complessa rispetto ai cavi, sia impiegano un maggior numero di materiali differenti, i quali non mostrano lo stesso tipo di comportamento se sottoposti a una tensione continua. Inizialmente, dunque, le sole informazioni reperibili sui sistemi in cavo per applicazioni HVDC erano ricavate da cavi isolati in carta e olio o con massa impregnata, i quali hanno mostrato un buon comportamento fino a 500 kV. Per quanto riguarda i sistemi a isolante estruso, gli accessori sviluppati per le applicazioni HVAC hanno costituito la base di partenza per i criteri di progettazione per i sistemi HVDC fino a 250 kV. Più di 15 anni fa, le prime prove a 250 kV DC sono dunque state effettuate su cavi in XLPE con accessori per cavi a 170 kV AC, tenuto conto del fatto che la tensione di impulso richiesta per i sistemi a 200-250 kV DC equivaleva sostanzialmente al livello base di isolamento (BIL - Basic Insulation Level) tipico della classe 170 kV AC. Gli accessori sottoposti alle prove comprendevano terminazioni per uso esterno polimeriche e in porcellana riempite con olio di silicone a pressione atmosferica (Figura 2.15) mentre i giunti erano formati da gomma polimerica prestampata (EPR) ed espansa prima dell'installazione sul cavo (Figura 2.16).

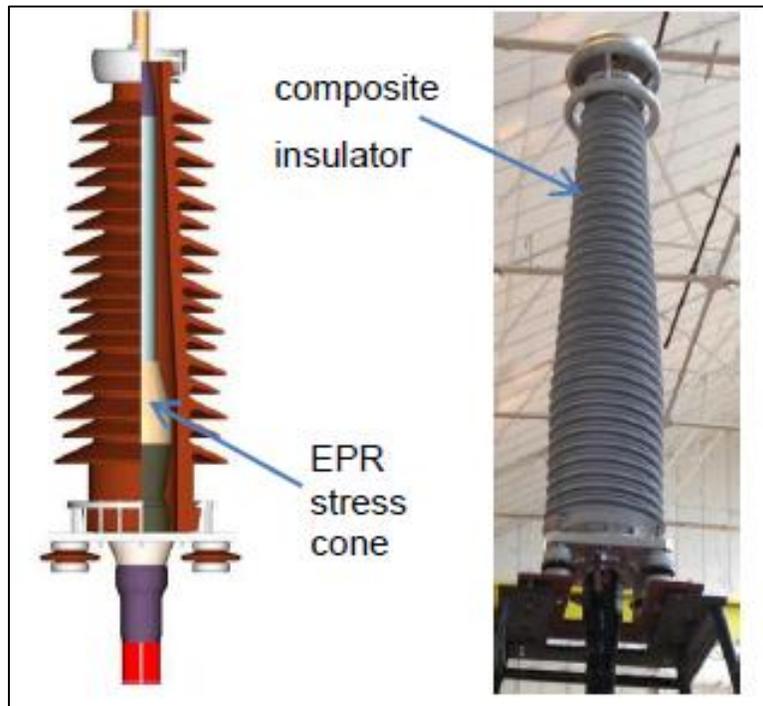


Figura 2.15 - Terminazioni esterne per 170 kV AC [12]

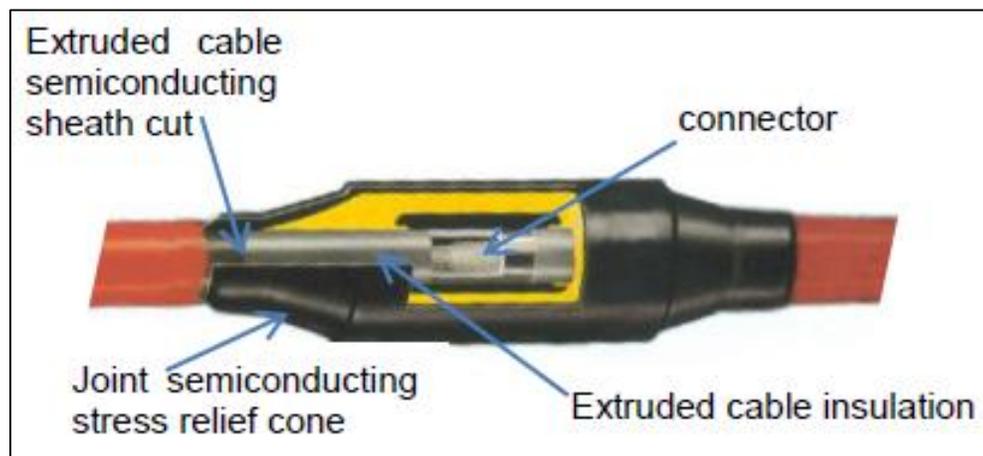


Figura 2.16 - Giunto installato su cavo per 170 kV AC [12]

La preparazione del cavo per 250 kV DC si è mostrata immediatamente la fase più problematica: infatti, dopo aver impiegato le tecniche tradizionalmente usate per la rimozione dello strato semiconduttivo e per l'interruzione dell'isolante su cavi AC, si sono verificate in fase di prova alcune

perforazioni in corrispondenza del giunto. Per questi motivi sono state messe a punto nuove tecniche di lavorazione specifiche per i sistemi in DC e in seguito a tali miglioramenti il sistema ha superato la prova di prequalifica per la classe 250 kV DC secondo la norma CIGRE TB 219 allora in vigore. Inoltre, sono state eseguite prove di rigidità dielettrica sui giunti in EPR dalle quali sono emersi altri caratteri di distinzione tra le condizioni di servizio in AC e quelle in DC: al netto delle perforazioni verificatesi a causa di errori nel montaggio, è stato constatato che:

- **in regime AC** il punto più debole del giunto generalmente si trova nella zona più stressata elettricamente, quindi in prossimità del becco dell'elettrodo, indicato in Figura 2.17; qui ha inizio il percorso di scarica verso il componente più vicino posto al potenziale di terra, cioè lo schermo.

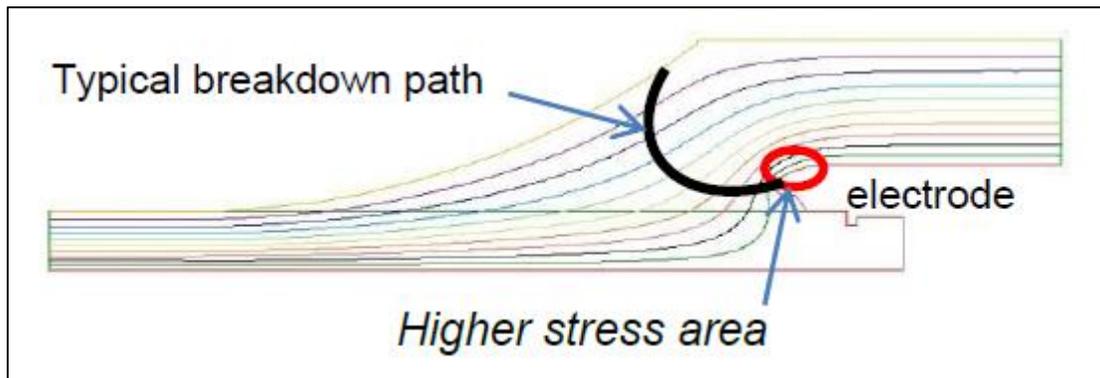


Figure 2.17 – Tipico percorso di scarica in AC [12]

- **in regime DC** il punto più debole non corrisponde solamente alla zona in cui si localizza il gradiente più alto, ma consiste anche nell'interfaccia tra l'isolante del cavo e la zona sottostante al cono semiconduttivo posto all'estremità dell'accessorio, quindi all'interfaccia tra il cavo e il giunto (Figura 2.18).

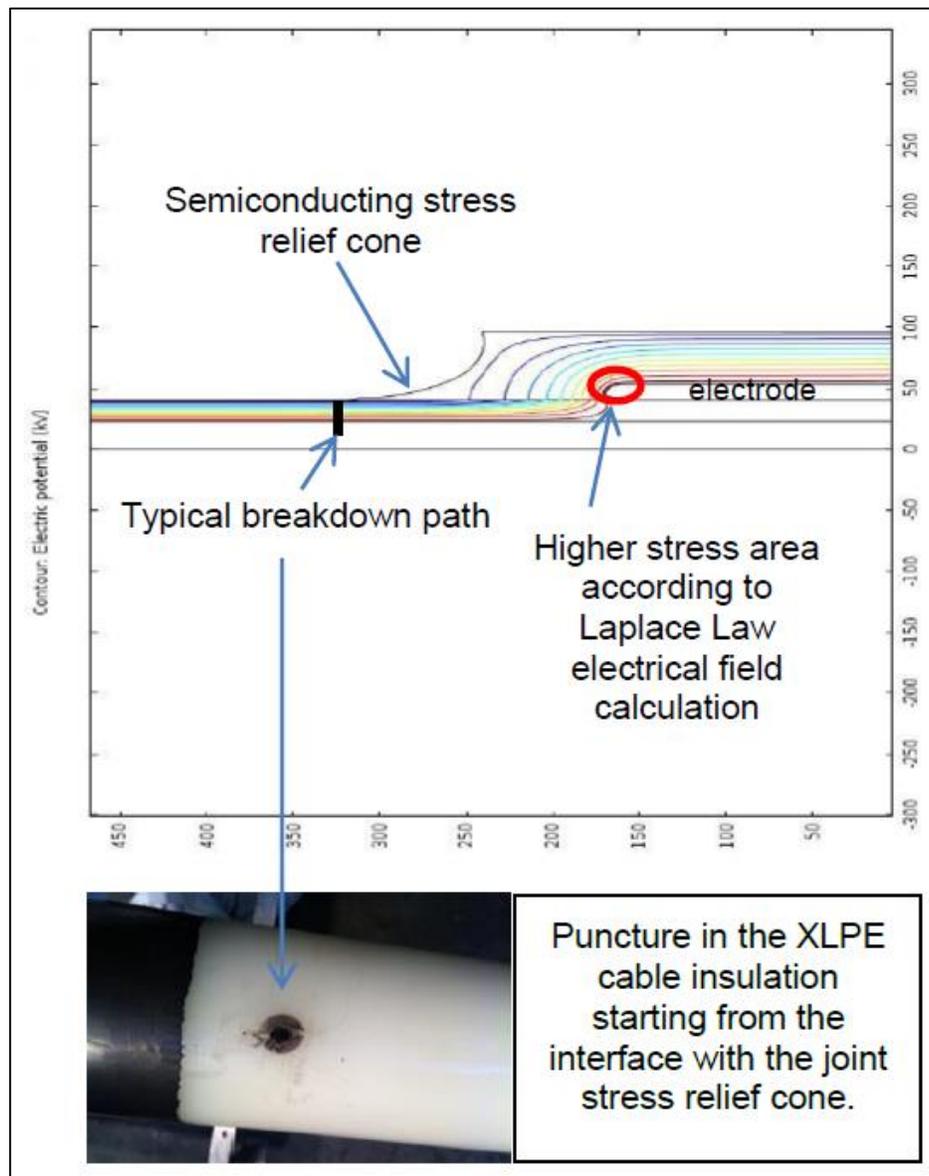


Figura 2.18 – Tipico percorso di scarica in DC [12]

Da queste esperienze sperimentali si può concludere che lo studio della distribuzione del campo elettrico all'interno degli accessori con l'aiuto di simulazioni numeriche è senz'altro utile per avere indicazioni sulla minimizzazione dei gradienti e risulta sufficiente per le applicazioni in AC, mentre per il regime DC è necessario tenere conto anche di un altro fattore di grande influenza sulle prestazioni degli accessori: l'accumulo di **carica di spazio**.

L'accumulo di carica di spazio dipende da molteplici proprietà e condizioni sia esterne sia del ma-

teriale dielettrico come la temperatura, il livello di umidità, la composizione chimica, la geometrie delle interfacce, la tensione applicata. Nel caso in esame il fenomeno è favorito principalmente dai gas polari prodotti durante l'estrusione e derivanti dalla vulcanizzazione. Pertanto, è necessario sottoporre i cavi in XLPE a processi di degasaggio della durata di alcune settimane.

Tuttavia, l'accumulo stesso di carica di spazio può essere sfruttato per risolvere i problemi precedentemente elencati, attraverso l'impiego di materiali varioresistivi posizionati tra gli elettrodi, l'isolante del cavo e l'isolante dell'accessorio. Questa tipologia di materiali sarà descritta in maniera approfondita nel capitolo 4.

2.4 Prove di qualifica su cavi e accessori HVDC

Infine, si vuole fornire una breve descrizione delle modalità di prova e qualifica per cavi e accessori, in particolare per applicazioni HVDC a isolante estruso, oggetto specifico dell'elaborato. La norma di riferimento è in questo caso la CIGRE TB 496 [9], pubblicata nell'Aprile 2012, che si riferisce a sistemi con tensione nominale non superiore a 500 kV. Come già sottolineato, in precedenza si ricorreva alla CIGRE TB 219 del Marzo 2003, valida per sistemi con tensione nominale non superiore a 250 kV. La CIGRE TB 496 [9] definisce le seguenti prove:

- Prove di sviluppo;
- Prove di prequalifica;
- Prove di tipo;
- Prove di routine;
- Prove a campione;
- Prove successive all'installazione.

2.4.1 Prove di sviluppo

Questi test vengono effettuati a discrezione del produttore durante la fase di sviluppo del cavo e dei relativi accessori. In particolare si esaminano le caratteristiche dei materiali coinvolti e si ana-

lizza la distribuzione del campo elettrico all'interno dei componenti per valutarne l'affidabilità e la stabilità a lungo termine.

2.4.2 Prove di prequalifica

Le prove di prequalifica si eseguono in laboratorio su uno spezzone di cavo lungo 100 m comprendente alcuni accessori per qualificare il produttore come idoneo a fornire un sistema HVDC completo. In Figura 2.19 si può osservare un esempio di circuito per una prova di prequalifica tratto dalla CIGRE TB 496, in cui sono indicate le distanze da rispettare e quali accessori è necessario installare prima di eseguire la prova.

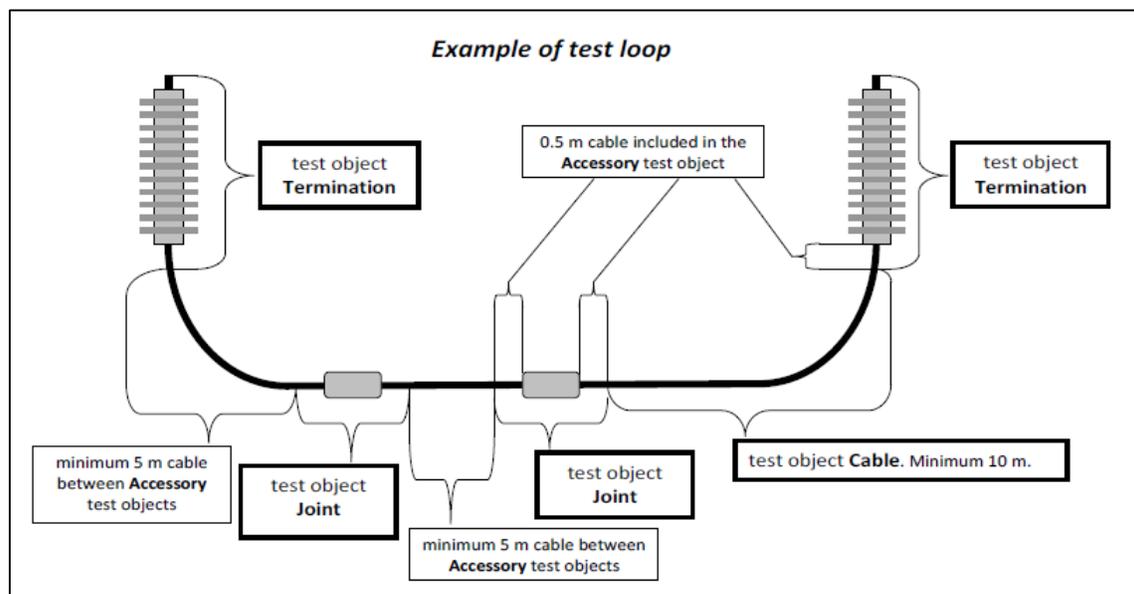


Figura 2.19 - Sequenza per prova di prequalifica con convertitore LCC [9]

Le prove di prequalifica durano un anno e combinano diverse tipologie di stress elettrici a seconda della tecnologia di conversione adottata, solitamente LCC o VSC. Nelle Figure 2.20 e 2.21 sono indicate le sequenze da seguire per un test di prequalifica con convertitore LCC e VSC, in cui le tensioni di prova in DC U_{TP1} e U_{TP2} indicano $1,45U_0$ e $1,25U_0$, essendo U_0 la tensione nominale; Come si nota, vengono applicate diverse tipologie di cicli:

- **ZERO LOAD (ZL):** cicli effettuati a vuoto, cioè in mancanza di corrente sul conduttore;
- **HIGH LOAD (HL):** in questo caso il conduttore è percorso da una corrente tale da raggiungere la temperatura nominale;
- **LOAD CYCLE (LC):** cicli di carico che prevedono 8 ore di riscaldamento e 16 ore di raffreddamento, in modo tale che il conduttore superi la temperatura nominale nelle ultime 2 ore di riscaldamento;
- **SUPERIMPOSED IMPULSE TEST (S/IMP):** prove a impulso sovrapposto a una tensione continua per saggiare l'integrità del sistema;
- **POLARITY REVERSAL (PR):** cicli caratteristici dei sistemi LCC in cui la polarità della tensione viene invertita; solitamente tra l'applicazione di una polarità e di quella opposta si attendono 24 ore a tensione nulla in presenza di riscaldamento.

	LC	LC	LC+PR	HL	HL	ZL	LC	LC	LC+PR	S/IMP
Number of cycles or days	30 cycles	30 cycles	20 cycles	40 days	40 days	120 days	30 cycles	30 cycles	20 cycles	Not applicable
Test Voltage	+	-		+	-	-	+	-		$U_{P2,0} = 1.2 \times U_0$ $U_{P1} = 2.1 \times U_0^*$
	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP2}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP1}	U_{TP2}	

Figura 2.20 - Sequenza per prova di prequalifica con convertitore LCC [8]

	LC	LC	HL	HL	ZL	LC	LC	S/IMP
Number of cycles or days	40 cycles	40 cycles	40 days	40 days	120 days	40 cycles	40 cycles	Not applicable
Test Voltage	+	-	+	-	-	+	-	$U_{P2,0} = 1.2 \times U_0$ $U_{P1} = 2.1 \times U_0^*$
	U_{TP1}							

Figura 2.21 - Sequenza per prova di prequalifica con convertitore VSC [8]

2.4.3 Prove di tipo

Anche la prova di tipo viene eseguita su porzioni di cavo provviste di accessori e si effettua per verificare che il sistema sia conforme alle specifiche fornite dal produttore. Come per la prova di prequalifica, anche in questo caso le sequenze adottate dipendono dal convertitore in uso. Gli impulsi di manovra sono indicati con la sigla SI (Switching Impulse).

Sistemi in cavo con convertitori LCC:

- 8 cicli termici giornalieri con una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità negativa;
- 8 cicli termici giornalieri con una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità positiva;
- 8 cicli termici giornalieri con una tensione pari a $1,45U_0$ con inversione di polarità ogni 8 ore;
- 3 cicli della durata di 2 giorni ciascuno con una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità positiva;
- 10 SI in polarità negativa sovrapposti alla tensione nominale in polarità positiva;
- 10 SI in polarità positiva sovrapposti alla tensione nominale in polarità negativa;
- 2 ore di prova a una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità negativa.

Sistemi in cavo con convertitori VSC:

- 12 cicli termici giornalieri con una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità negativa;
- 12 cicli termici giornalieri con una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità positiva;
- 3 cicli della durata di 2 giorni ciascuno con una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità positiva;
- 10 SI in polarità negativa sovrapposti alla tensione nominale in polarità positiva;
- 10 SI in polarità positiva sovrapposti alla tensione nominale in polarità positiva;
- 10 SI in polarità negativa sovrapposti alla tensione nominale in polarità negativa;
- 10 SI in polarità positiva sovrapposti alla tensione nominale in polarità negativa;
- 2 ore di prova a una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità negativa.

La metodologia seguita per le prove a impulso risulta diversa tra un caso e l'altro in quanto nei sistemi con convertitori LCC le sovratensioni possono essere limitate solamente dagli scaricatori mentre nei sistemi VSC l'impulso con polarità opposta può essere limitato dal convertitore. Inoltre, nel caso in cui il sistema debba operare in condizioni di esposizione alle sovratensioni atmosferiche, è necessario effettuare prove a impulso atmosferico (Lightning Impulse) in seguito a quel-

le elencate.

2.4.4 Prove di routine

La prova di routine viene effettuata su porzioni di cavo da consegnare al cliente per individuare eventuali cavità o tagli accidentali. Questo test consiste nel sottoporre il cavo a una tensione pari a $1,85U_0$ in polarità negativa per un'ora. Inoltre, sugli accessori è possibile eseguire ulteriori test come una prova in AC se compatibile con l'isolamento, un test di scariche parziali, un'ispezione attraverso raggi X oppure una test a bassissima frequenza, solitamente inferiore a 0,1 Hz, il quale comporta un accumulo di carica di spazio trascurabile.

2.4.5 Prove a campione

Le prove a campione sono eseguite dal produttore su componenti di cavi completi o su accessori con una certa frequenza, con l'obiettivo di verificare che il prodotto finito sia conforme alle prescrizioni.

2.4.6 Prove successive all'installazione

Questa prova si esegua una volta terminata la posa e l'installazione degli accessori; viene applicata una tensione pari a $1,45U_0$ in polarità negativa per un'ora per verificare l'integrità del sistema.

Capitolo 3

Metodologie di caratterizzazione

Da quanto esposto precedentemente si deduce che, dal punto di vista elettrico, è fondamentale reperire informazioni in merito alla conducibilità e alla permittività dei materiali costituenti un accessorio, in modo tale da poter prevedere con sicurezza quale reazione il prodotto offra se sottoposto a diverse tipologie di stress elettrico, a diverse tensioni e frequenze. In particolare, è necessario capire la risposta del componente sia a vari livelli di tensione e a diverse temperature, sia ad impulsi atmosferici e di manovra, cioè nelle condizioni più gravose che possono verificarsi in servizio. Lo studio intrapreso ha lo scopo di caratterizzare dal punto di vista elettrico i materiali coinvolti nella realizzazione di accessori per applicazioni HVDC, in particolare mescole isolanti, semiconduttive e varioresistive. In particolare, l'obiettivo della trattazione consiste nello studio di analogie e differenze tra le proprietà elettriche fornite da prove su diverse configurazioni di provini. Le geometrie prese in esame fanno riferimento a provini piani e a provini cilindrici cavi. In primo luogo si studiano i provini di tipo piano, con l'obiettivo di ricavare informazioni basilari sul materiale e sulla mescola che lo costituisce e di prendere decisioni relative al proseguimento dei test. Questo tipo di campione è infatti riproducibile su larga scala, in tempi brevi e sostenendo costi con-

tenuti. Si può quindi studiare il comportamento di diversi reagenti in varie percentuali in peso e scegliere, sulla base dei risultati ottenuti, la miscela che presenta le caratteristiche che più si avvicinano a quelle desiderate. Dopo aver effettuato un sufficiente numero di test su varie tipologie di provini piani e aver riconosciuto le mescole più performanti dal punto di vista elettrico, meccanico e termico, si procede alla realizzazione di provini cilindrici stampati, quindi si inserisce all'interno di questi un supporto in acciaio che ne causa una lieve espansione e si intraprendono le medesime misure effettuate per la configurazione piana. Questa seconda fase di caratterizzazione del materiale è fondamentale, in quanto consente di verificare che le proprietà già studiate su piastra si conservino in una configurazione geometrica molto più simile a quella assunta dal prodotto finale senza la necessità di sostenere costi onerosi per la produzione di un accessorio full-size. In questo capitolo vengono dunque descritte sia le tecniche di prova e misurazione adottate in laboratorio sia gli impianti e la strumentazione necessari per portarle a compimento.

3.1 Prove di rigidità dielettrica

Come anticipato, una delle proprietà elettriche prese in considerazione in questo processo di caratterizzazione riguarda la conducibilità elettrica. Tuttavia, dato che la strumentazione adibita a tale tipologia di misura risulta progettata specificamente per esaminare la tendenza del materiale a lasciarsi attraversare da una corrente senza raggiungere la perforazione, è necessario sottoporre il campione a una prova preliminare di rigidità dielettrica per ottenere informazioni sulle prestazioni limite del materiale ed evitare la perforazione durante la misura, fenomeno che può causare danni sia agli elettrodi delle celle impiegate, sia al multimetro digitale, in seguito alla propagazione di sovratensioni nell'impianto. Con il termine rigidità dielettrica si intende il valore di campo elettrico in corrispondenza del quale il materiale viene attraversato da una scarica elettrica che ne provoca la perforazione, dopo essere stato sottoposto a un incremento rapido di tensione. Si registra quindi un valore numerico dato dal rapporto tra la tensione applicata al campione e il suo spessore, espresso solitamente in kV/mm. La prova di rigidità dielettrica è stata effettuata solamente su provini piani di spessore variabile tra 0.4 e 0.8 mm in modo tale da poter raggiungere gradienti elevati compatibilmente con il livello di tensione massima applicabile dal generatore DC disponibile. Per

i provini cilindrici, invece, è stata effettuata la misura di conducibilità senza la prova preliminare di rigidità, poiché essi sono caratterizzati da spessori minimi di 3 mm, ed essendo a base isolante, sono difficilmente perforabili per mezzo delle tensioni disponibili per le prove; dunque sono stati presi come riferimento, a scopo precauzionale, i valori limiti di gradiente derivanti dalla misura su provini piani. I fattori che influenzano la buona riuscita della prova, che si raggiunge nel momento in cui il valore registrato rispecchia fedelmente il limite di sopportazione della tensione da parte del materiale, sono numerosi e devono essere vagliati attentamente prima di dare inizio all'esperimento. In primo luogo, una prova in AC o in DC non produce i medesimi risultati: in regime AC il provino è caratterizzato da perdite maggiori, infatti all'effetto Joule si somma il contributo delle perdite per isteresi causate dalle inversioni del campo:

$$p = \gamma E^2 + \omega \varepsilon'' E^2 \quad (3.1.1)$$

Le perdite per isteresi sono solitamente assai superiori a quelle per conduzione, cioè per effetto Joule, dunque i valori di rigidità registrati in AC risultano 2.5-3 volte superiori a quelli osservati in DC. In aggiunta, lo spessore del provino influenza significativamente la prova: se esso aumenta, la rigidità diminuisce, poiché aumenta anche il volume e di conseguenza le perdite, le quali però non possono essere smaltite con efficacia in quanto la superficie non subisce incrementi rilevanti. Anche la velocità di incremento della tensione è un parametro fondamentale per la prova: maggiore è la velocità di variazione della tensione applicata, maggiore sarà il valore di rigidità registrato; questo accade poiché con variazioni molto rapide, ciascun livello di tensione viene applicato al materiale per un intervallo di tempo ridotto, quindi sarà minore anche il danno che esso può apportare al provino. Generalmente, la variazione della tensione si concretizza per mezzo di una rampa o una successione di gradini; nel caso specifico è stata adottata una rampa di 2 kV/s. Per evitare effetti dovuti a punte sui bordi o a una eccessiva rugosità superficiale, fattori che spesso conducono a risultati non attendibili, è necessario servirsi di elettrodi caratterizzati da una buona lucidatura e da bordi provvisti di raggi di curvatura opportunamente scelti per minimizzare gli addensamenti di campo. Inoltre la superficie del provino deve essere sufficientemente estesa per evitare scariche in olio che cortocircuitino il provino stesso, ma al contempo non deve avere dimensioni eccessive; infatti, all'aumentare dell'estensione superficiale, diminuisce la rigidità, poiché è più probabile la

presenza di impurezze e disomogeneità. Per annullare il contributo dell'effetto di questa ulteriore variabile, sono stati analizzati provini aventi le medesime dimensioni [13].

Le celle utilizzate per la prova di rigidità dielettrica su provini piani presentano due elettrodi, dei quali uno è connesso al morsetto di alta tensione del generatore, mentre l'altro si trova al potenziale di terra. Gli elettrodi esercitano una pressione in direzione ortogonale alla superficie del provino e regolabile attraverso una vite dinamometrica. Il mezzo isolante è costituito da olio silconico a pressione atmosferica, essendo presente un'apposita apertura per l'inserimento di quest'ultimo, il quale rimane a pelo libero, come si può notare in Figura 3.1.

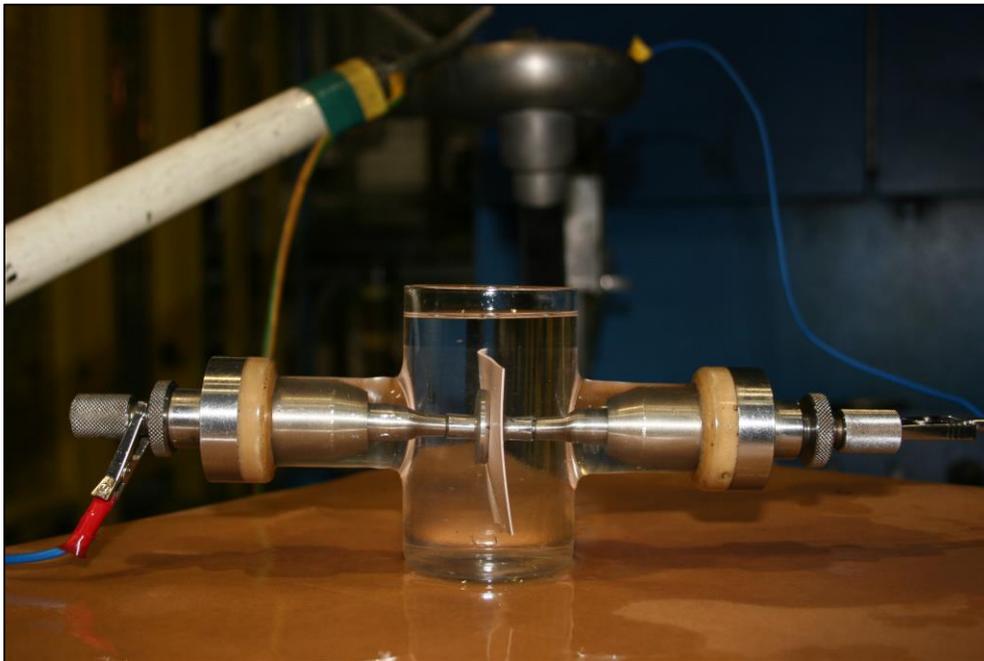


Figura 3.1 - Cella per la misura di rigidità dielettrica su provini piani
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

Infine, anche le condizioni ambientali assumono un ruolo di primaria importanza nella prova: la presenza di umidità o di elevate temperature può concorrere a una diminuzione della rigidità dielettrica, favorendo il processo di conduzione.

3.1.1 Analisi statistica

Una volta terminata la prova di rigidità su una popolazione sufficientemente numerosa si procede ad una analisi statistica dei dati registrati per poter individuare i valori di gradiente in corrispondenza del quale il materiale ha più probabilità di subire perforazione. Questa operazione si effettua in quanto la tensione di scarica, o rigidità dielettrica, è da considerarsi una variabile aleatoria. Esaminando la natura stocastica dell'evento di scarica, è necessario distinguere il caso di composti gassosi e liquidi da quello relativo ai composti solidi. Per le prime due tipologie di stato di aggregazione, si può definire una variabilità caratteristica di ciascun campione; infatti, un gas o un liquido non presenterà mai lo stesso valore di tensione di scarica, poiché essa dipende dalla presenza o meno di elettroni disponibili a dare inizio alla valanga nello spazio interelettrodico o di umidità e impurità. Diverso è il caso dei materiali solidi, i quali, essendo rigidi, dovrebbero presentare un valore di rigidità intrinseco, che varia in maniera apprezzabile solo passando da un campione all'altro, a parità di condizioni di prova. Per questi ultimi esiste dunque una probabilità di scarica non individuale, bensì collettiva, cioè riferita a una popolazione. In questo caso è stato fatto riferimento alla distribuzione di probabilità di Weibull a due parametri, ottima per la descrizione statistica della scarica negli isolanti solidi sia per prove di rigidità su provini sottoposti a invecchiamento, sia per prove di rigidità su provini sottoposti a rampa di tensione, come nel caso in esame. Una volta calcolato il parametro di scala, corrispondente a una probabilità cumulata di scarica del 63.2%, esso è stato moltiplicato per un coefficiente $K < 1$ tale da scongiurare il più possibile il verificarsi di una perforazione sia in fase di prova di conducibilità, sia in servizio. Per le misure effettuate nel corso di questo studio, si è assunto come coefficiente $K = 0.9$.

3.2 Misure di conducibilità elettrica

La misura di conducibilità è fondamentalmente una misura di resistività, in quanto vige la seguente relazione:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.2.1)$$

dove σ indica la conducibilità e ρ rappresenta la resistività, la quale si misura in Ωm . Per questo parlare di una o dell'altra grandezza non fa alcuna differenza, una volta premessa la relazione non appena descritta. La conduzione elettrica consiste in un moto di cariche attraverso un materiale, causato dall'azione di un campo elettrico. Tale moto di cariche elettriche è associabile alla corrente elettrica, definita come la quantità di carica dQ che fluisce attraverso una certa superficie S nell'unità di tempo:

$$i = \frac{dQ}{dt} = nqvS \quad (3.2.2)$$

in cui n è il numero di portatori di carica per unità di volume, q è la carica trasportata da ogni portatore e v è la velocità media dei portatori. Quest'ultimo parametro è proporzionale al campo elettrico attraverso un coefficiente definito mobilità media μ [m^2/Vs]:

$$v = \mu E \quad (3.2.3)$$

e poiché la densità di corrente elettrica J corrisponde alla corrente divisa per la sezione S , sostituendo la (3.2.3) nella (3.2.2) si ottiene:

$$J = nq\mu E \quad (3.2.4)$$

Dunque, la legge di Ohm in forma locale può essere espressa come:

$$\sigma = \frac{J}{E} = qn\mu \quad (3.2.5)$$

In particolare, se è presente più di un portatore di carica, la stessa legge assumerà la forma seguente:

$$\sigma = \sum_i q_i n_i \mu_i \quad (3.2.6)$$

La conducibilità è la principale proprietà utilizzata per la classificazione dei materiali per uso elettrico: essi infatti si suddividono in tre grandi categorie: conduttori, semiconduttori ed isolanti. Questa distinzione emerge facendo riferimento al **modello a bande**: il moto di un portatore di carica può essere descritto come una funzione d'onda, la quale ha soluzioni reali per alcuni intervalli energetici, detti bande "permesse", mentre non ha soluzioni per altri intervalli, detti bande "proibite". In Figura 3.2 si può osservare una rappresentazione del modello a bande.

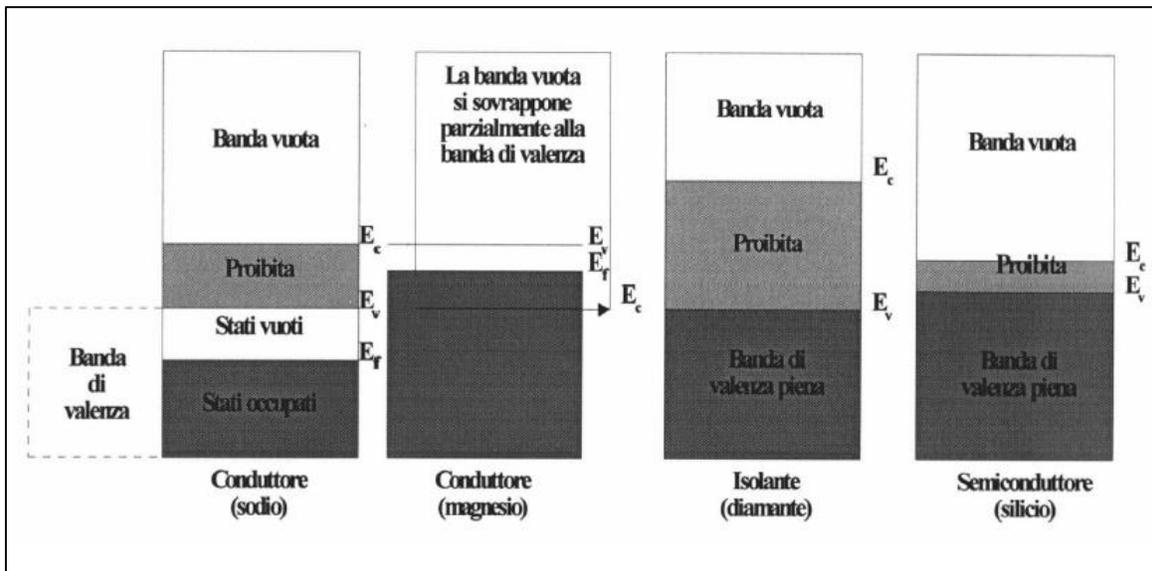


Figura 3.2 - Schema semplificato del modello a bande

Come indicato, si considerano tre bande principali: la banda di valenza, cioè la più alta banda energetica occupata totalmente o parzialmente dagli elettroni, la banda vuota, cioè la più bassa banda libera, e la banda proibita, data dalla differenza tra il più basso livello energetico della banda vuota,

E_c , e il più alto livello energetico della banda di valenza, E_v . Il più alto livello energetico occupato alla temperatura di 0 K è detto livello di Fermi, al di sotto del quale non esistono stati vuoti; la banda più alta contenente elettroni, se contiene il livello di Fermi ed è riempita solo parzialmente, è detta banda di conduzione poiché solo gli elettroni vicini al livello di Fermi hanno energia sufficiente per passare negli stati liberi della banda e generare una corrente elettrica. Questo accade nella maggior parte dei conduttori, come per esempio nel magnesio, in cui appunto la banda di valenza coincide con la banda di conduzione. In altri conduttori invece la banda di valenza è completamente piena ma si sovrappone in parte con una banda vuota, la quale però fornisce stati liberi necessari per il trasferimento degli elettroni vicini al livello di Fermi, come accade nel sodio. Nel caso dei semiconduttori e degli isolanti la banda di valenza è completamente piena e non si sovrappone con la banda vuota: per i primi la banda proibita è piuttosto ristretta, quindi sono sufficienti bassi contributi energetici esterni per trasferire gli elettroni nella banda vuota, mentre per i secondi, in cui invece la differenza di energia è di qualche eV, sono necessari campi elettrici elevati per favorire il trasferimento. La conducibilità è dunque una proprietà dipendente dall'ampiezza dell'intervallo energetico proibito, dalla disposizione delle bande permesse e dal loro riempimento elettronico, oltre che dalla tensione applicata, dalla temperatura e da altri fattori ambientali.

Volendo esaminare nel dettaglio il moto di un elettrone, si può considerare la Figura 3.3:

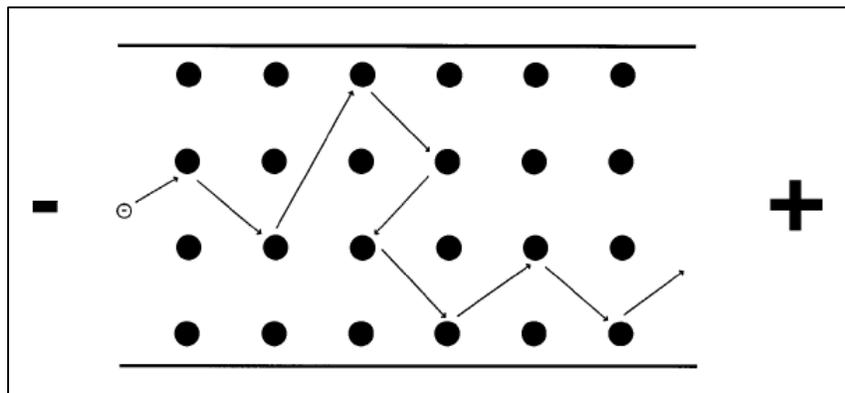


Figura 3.3 - Modello semplificato del moto di un elettrone all'interno di un materiale [15]

Come si può notare, un elettrone si sposta all'interno di un materiale da una regione a potenziale minore a una regione a potenziale maggiore. Tale differenza di potenziale è generata da una sorgente esterna, per esempio un generatore di tensione. Durante il proprio moto, l'elettrone entra in col-

lisione con gli atomi del reticolo, rappresentati in figura da cerchi scuri. Maggiore è il numero di urti nell'unità di tempo, tanto più sarà significativo il rallentamento dell'elettrone e tanto maggiore sarà la resistività del materiale. Come sottolineato in precedenza, la conducibilità è fortemente dipendente, oltre che dal gradiente, anche dalla temperatura; infatti, all'aumentare della temperatura, la conducibilità dei metalli diminuisce, mentre quella dei semiconduttori e degli isolanti aumenta. Allo stesso modo, l'omogeneità e l'isotropia del materiale sono aspetti fondamentali per quanto riguarda questo tipo di misura. Se infatti tali caratteristiche sono presenti, significa che il materiale presenta le stesse proprietà in ogni suo punto e che esse sono le medesime in ogni direzione [15]. Riprendendo in esame l'equazione (3.2.5), il campo elettrico e la densità di corrente sono rappresentati da vettori mentre la conducibilità è un tensore: questo significa che la corrente non fluisce necessariamente nella stessa direzione di applicazione del gradiente. Nel caso specifico di studio, tuttavia, non si seguirà questo formalismo, approssimando σ , quindi ρ a semplici scalari.

L'impianto utilizzato per misure di conducibilità è composto da un generatore di tensione in corrente continua, da una stufa in cui si possono inserire 4 celle in parallelo contenenti i provini per effettuare misure in temperatura, da resistenze shunt variabili protette da scaricatori, e da un multimetro digitale. In dettaglio sono riportate le specifiche dei vari strumenti:

- **Generatore DC FUG HCN 350-65000:** $V_{max} = 65 \text{ kV}$, $I_{max} = 5 \text{ mA}$
- **Resistenze shunt:** 10^3 - 10^2 - 10^1 - 10^0 - 10^{-1} - 10^{-2} - $10^{-3} \text{ M}\Omega$
- **Scaricatori:** tensione di innesco = 70 V
- **Multimetro Digitale KEITHLEY 6517B:** resistenza interna = 200 T Ω

Ogni cella è provvista di appositi canali per il collegamento delle connessioni agli elettrodi; elettricamente in serie alla cella è presente a una resistenza variabile ai capi della quale si misura una caduta di tensione grazie al multimetro. La possibilità di cambiare il valore della resistenza in serie permette di misurare agevolmente cadute di tensione dello stesso ordine di grandezza sia nel caso in cui siano provocate da correnti ridotte (10^{-9} A), come accade per gli isolanti con un elevato grado di purezza, sia se originate da correnti più intense (10^0 - 10^{-1} A), tipiche di polimeri additivati con nerofumo o altri composti conduttivi. Tutti i componenti del circuito sono caratterizzati da potenziali riferiti alla stessa terra. Più in dettaglio, ogni cella ospita due elettrodi, mostrati nelle Figure 3.4 e 3.5.

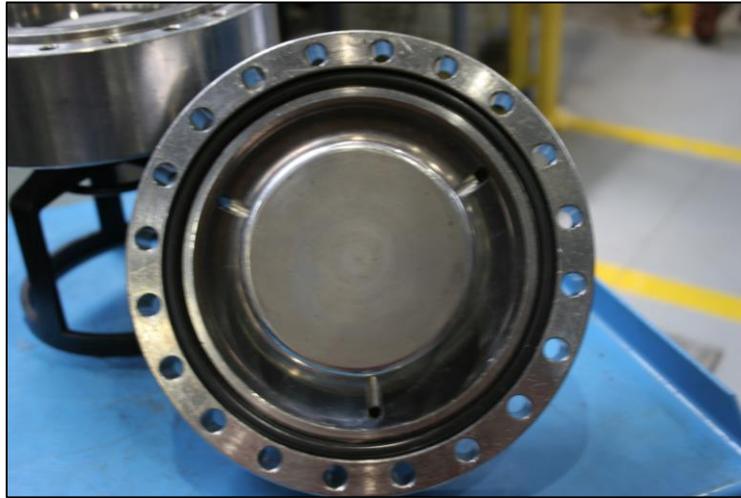


Figura 3.4 - Elettrodo di alta tensione della cella per la misura di conducibilità su provini piani
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

Dunque la parte superiore della cella comprende sia la connessione di alta tensione, opportunamente isolata dall'involucro grazie a un rivestimento plastico e terminante con un elettrodo circolare dal profilo stondato per evitare addensamenti di campo, sia una vite dinamometrica adibita alla regolazione della pressione dell'elettrodo stesso sul provino.



Figura 3.5 - Elettrodo di bassa tensione della cella per la misura di conducibilità su provini piani
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

Il provino piano è posto tra l'elettrodo di alta tensione e quello di bassa tensione, connesso alla

resistenza di misura e alloggiato nella parte inferiore della cella; esso è isolato dalla carcassa tramite una struttura in vetro ed è circondato da un anello di guardia posto al potenziale di terra, il quale ha la funzione di raccogliere le correnti superficiali, cioè quelle correnti che fluiscono sulla superficie esterna del provino senza attraversarlo e che dunque inficerebbero la validità della misurazione. Per dimostrare questo fenomeno, sono state effettuate simulazioni numeriche in ambiente Comsol Multiphysics, considerando un materiale avente una conducibilità elettrica circa 7 volte superiore a quella del mezzo isolante in cui è immerso.

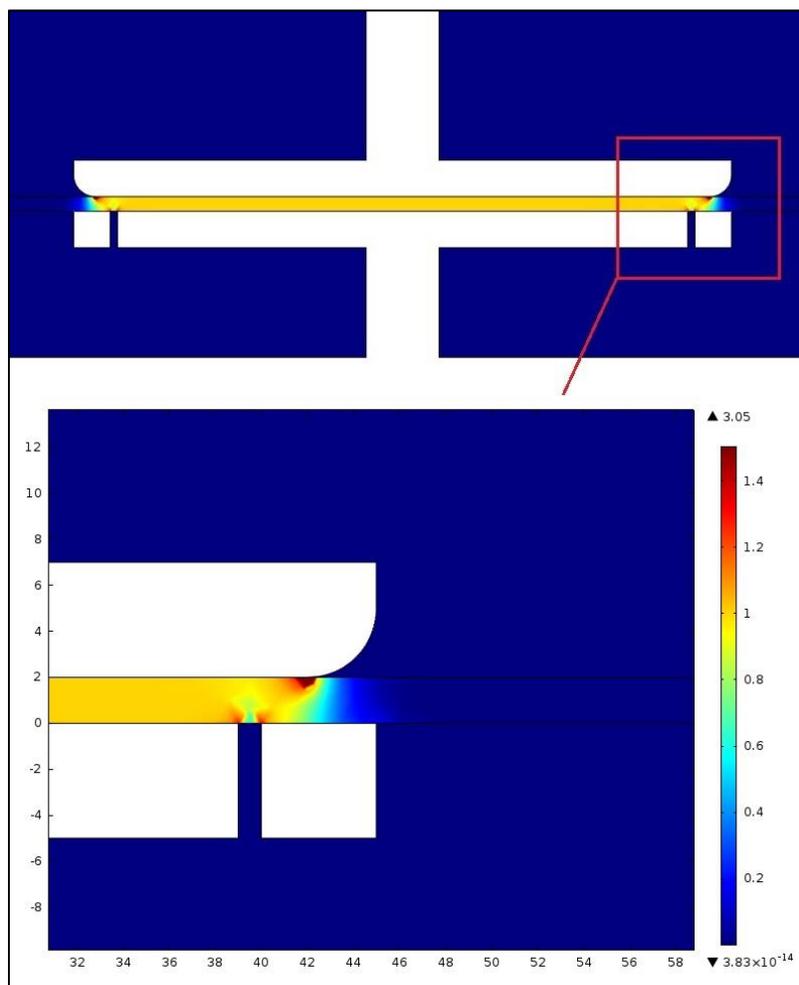


Figura 3.6 - Distribuzione della densità di corrente in per unità ai bordi degli elettrodi con anello di guardia in un provino piano

Come si può osservare confrontando le Figure 3.6 e 3.7, la densità di corrente all'interno del provino in corrispondenza dei bordi degli elettrodi è oltre il 40% maggiore rispetto alla zona centrale, quindi la caduta di tensione registrata sulla resistenza di misura sarebbe originata quasi esclusivamente dagli effetti di bordo, se non fosse presente l'anello di guardia.

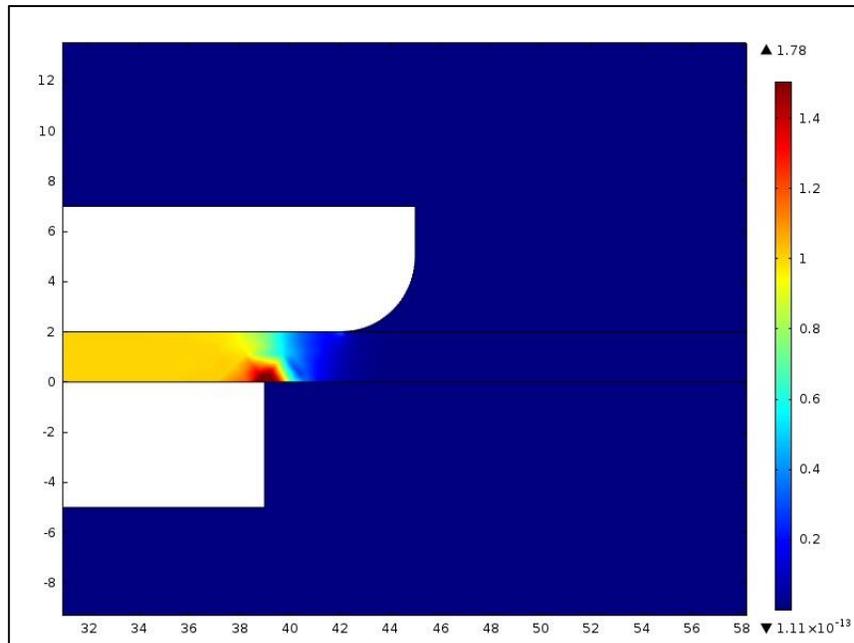


Figura 3.7 - Distribuzione della densità di corrente in per unità ai bordi degli elettrodi senza anello di guardia in un provino piano

Prima di cominciare la prova, la cella viene inserita all'interno di una stufa per poter effettuare misure in temperatura, se necessario, ed essere riempita con azoto in pressione, dotato di una rigidità dielettrica sufficientemente elevata da scongiurare scariche esterne in corrispondenza dei livelli di tensione raggiunti. La configurazione delle connessioni è indicata in Figura 3.8.



Figura 3.8 - Cella per la misura di conducibilità su provini piani
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

Per i provini cilindrici, invece, la configurazione di prova adottata è piuttosto differente; come anticipato, all'interno del campione viene inserito un supporto cilindrico metallico, il quale viene utilizzato come elettrodo di alta tensione. Per realizzare l'elettrodo di misura si avvolge del nastro argentato sulla superficie del campione e allo stesso modo si realizzano due anelli di guardia connessi a terra alle estremità dell'elettrodo stesso. Il materiale isolante in cui è immerso il provino è in questo caso olio silconico. La configurazione di prova è apprezzabile in Figura 3.9.

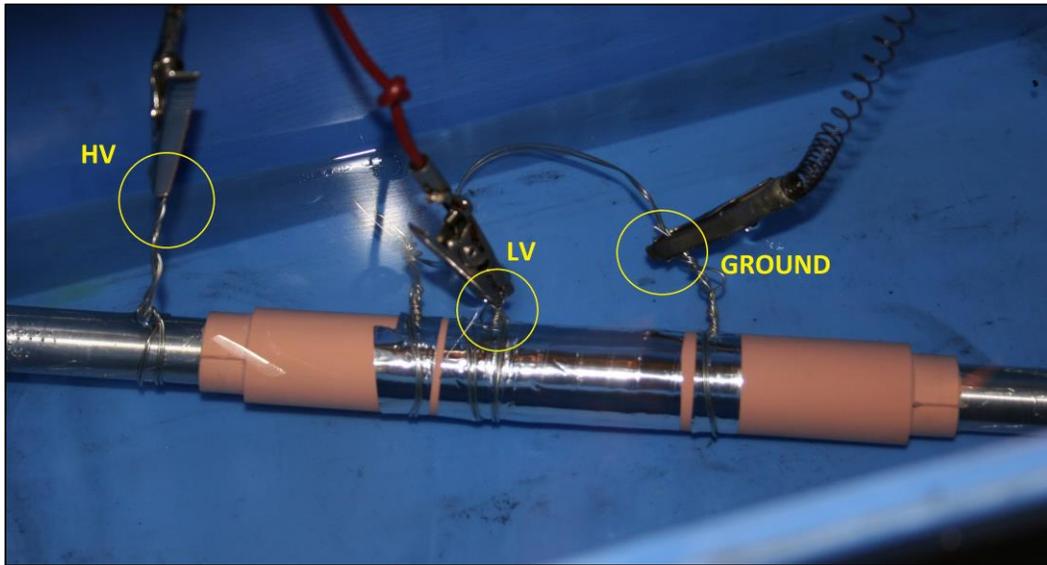


Figura 3.9 - Misura di conducibilità su provino cilindrico
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

Anche in questo caso sono state effettuate simulazioni numeriche per dimostrare la necessità dell'anello di guardia per ottenere valori di conducibilità attendibili e non inficiati dagli effetti di bordo (Figure 3.10 e 3.11). Le proprietà del materiale in prova sono le medesime utilizzate nella simulazione con il provino piano.

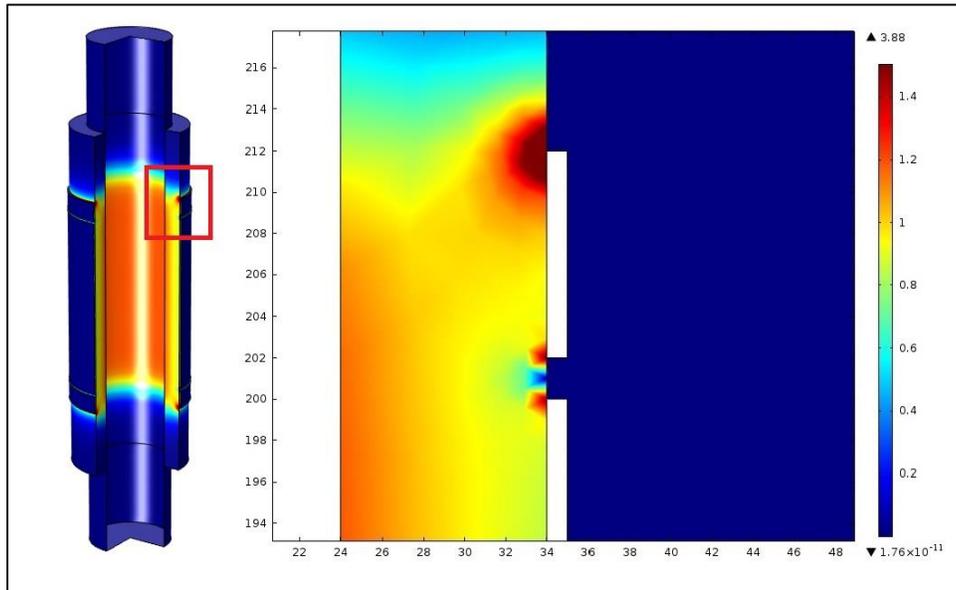


Figura 3.10 - Distribuzione della densità di corrente in per unità ai bordi degli elettrodi con anello di guardia in un provino cilindrico

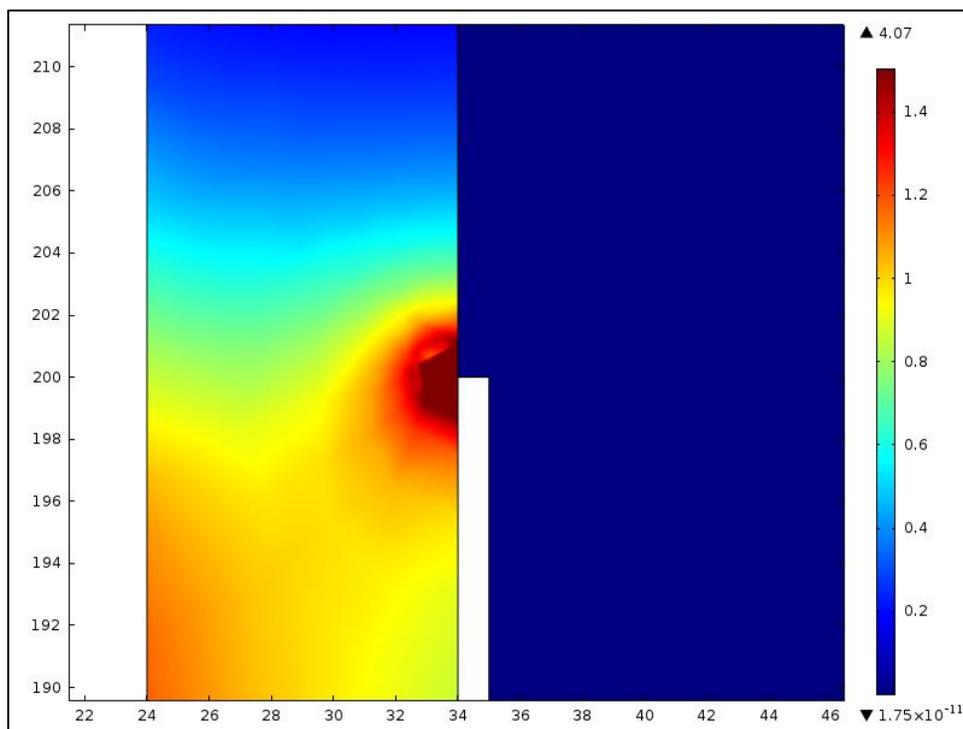


Figura 3.11 - Distribuzione della densità di corrente in per unità ai bordi degli elettrodi senza anello di guardia in un provino cilindrico

3.2.1 Analisi del transitorio

Il comportamento dei provini piano e cilindrico durante la misura della conducibilità elettrica può essere descritto come il transitorio di carica di un circuito RC con un termine forzante in DC, come schematizzato in Figura 3.12; ogni campione, infatti, è assimilabile approssimativamente a un parallelo tra una resistenza e una capacità .

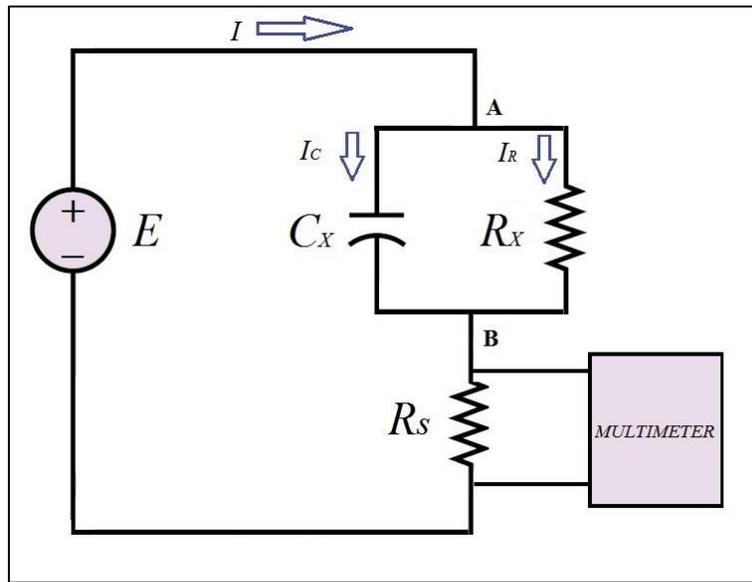


Figura 3.12 - Schema circuitale semplificato della misura di conducibilità

Nel circuito rappresentato, E è la tensione applicata dal generatore DC, C_X ed R_X sono rispettivamente la capacità e la resistenza equivalente del campione in prova, R_S la resistenza di misura. Trascurando la caduta di tensione su R_S , approssimazione accettabile in quanto quest'ultima risulta molto minore rispetto alla caduta di tensione sul provino V_{AB} , dalla legge di Kirchhoff delle correnti per il nodo A si ottiene:

$$I = I_C + I_R = C_x \frac{dV_{AB}(t)}{dt} + \frac{V_{AB}(t)}{R_x} \quad (3.2.1.1)$$

quindi, dividendo per C_X :

$$\frac{dV_{AB}(t)}{dt} = \frac{V_{AB}(t)}{R_x C_x} + \frac{I}{C_x} \quad (3.2.1.2)$$

La soluzione di questa equazione differenziale del primo ordine è data dalla somma della risposta naturale del circuito, cioè la soluzione dell'equazione omogenea associata, e della risposta alla forzante in DC, quindi sarà espressa nella forma:

$$V_{AB}(t) = Ke^{-t/\tau} + F \quad (3.2.1.3)$$

dove τ è la costante di tempo del circuito, pari a $R_X C_X$. Per ottenere i valori delle costanti K ed F si sostituiscono nella soluzione le condizioni al contorno, che in questo caso derivano dalla tensione presente ai capi del provino all'istante iniziale, in cui si ipotizza per semplicità l'applicazione da parte del generatore di un gradino di tensione di valore pari a E, e dal regime instauratosi una volta estinta la componente capacitiva della corrente presente durante il processo di carica, cioè dopo un intervallo di tempo infinito:

$$\begin{cases} V_{AB}(0) = 0 \\ V_{AB}(\infty) = E = R_X I \end{cases} \quad (3.2.1.4)$$

dunque si ottiene:

$$\begin{cases} V_{AB}(0) = 0 = K + F \\ V_{AB}(\infty) = E = -F \end{cases} \quad (3.2.1.5)$$

Sostituendo i valori trovati per K ed F si ha che:

$$V_{AB}(t) = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.2.1.6)$$

Come si osserva in Figura 3.13, l'andamento della tensione applicata ai capi del provino risulta esponenziale, così come quello della corrente che lo attraversa, la quale si annullerà solamente dopo un intervallo di tempo infinito.

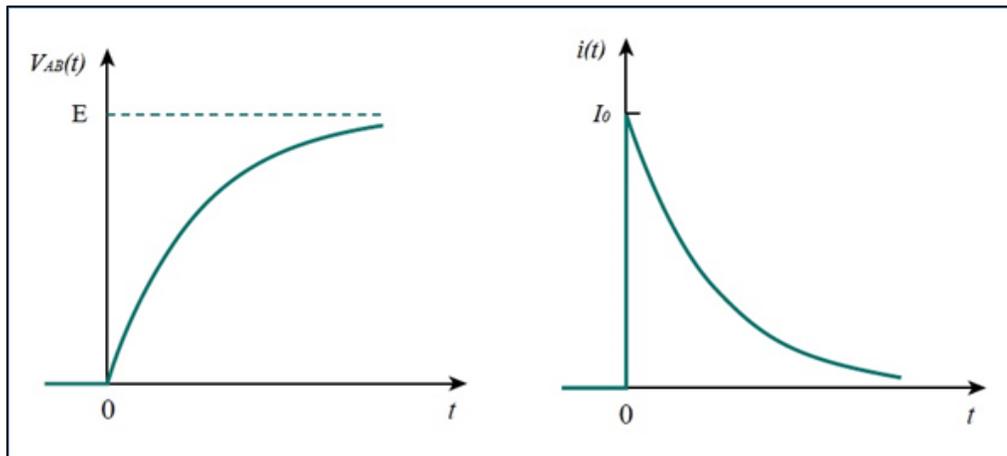


Figura 3.13 - Andamenti nel tempo della tensione V_{AB} e della corrente i

Per questo la caduta di tensione sulla resistenza di misura R_s viene registrata dopo un intervallo di tempo circa uguale a 5τ , quando la derivata della corrente si è ormai significativamente ridotta e il valore rivelato dal multimetro si considera stabile.

Dopo aver effettuato la misura per un certo numero di livelli di tensione, si procede al calcolo del valore della conducibilità sfruttando la relazione seguente:

$$\frac{E}{R_x} = \frac{V_{AB}}{R_s} \quad (3.2.1.7)$$

in quanto la corrente che attraversa il provino è la stessa che scorre sulla resistenza di misura. Si procede quindi al calcolo della conducibilità partendo dalla resistenza del provino:

$$R_x = R_s \frac{E}{V_{AB}} \quad (3.2.1.8)$$

poichè valgono rispettivamente per provini piani e cilindrici le seguenti relazioni:

$$R_{plate} = \rho_{plate} \frac{l}{S} \quad (3.2.1.9)$$

$$R_{cyl} = \int_{r_2}^{r_1} \frac{\rho_{cyl} dr}{2\pi L r} = \frac{\rho_{cyl}}{2\pi L} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (3.2.1.10)$$

in cui R_{plate} e ρ_{plate} indicano rispettivamente la resistenza e la resistività del provino piano, l ne rappresenta lo spessore ed S la superficie dell'elettrodo inferiore. Per quanto riguarda il provino cilindrico, R_{cyl} e ρ_{cyl} ne rappresentano la resistenza e la resistività, r_2 il raggio interno, r_1 il raggio esterno, L la lunghezza. Attraverso alcuni passaggi si può risalire alla conducibilità delle due tipologie di campioni:

$$\sigma_{plate} = \frac{1}{\rho_{plate}} = \frac{1}{R_{plate} S} \quad (3.2.1.11)$$

$$\sigma_{cyl} = \frac{1}{2\pi L R_{cyl}} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (3.2.1.12)$$

3.3 Misure di permittività

Infine si procede alla misura della costante dielettrica del materiale; in regime AC, essa è in sostanza l'unica proprietà che influenza la distribuzione del campo elettrico all'interno dei componenti dell'accessorio; in realtà la permittività è funzione della temperatura ma questa dipendenza non è rilevante a tal punto da influire sulla distribuzione del gradiente. Al contrario, in regime DC quest'ultima dipende sia dalla permittività sia dalla conducibilità e quest'ultima a sua volta dipende fortemente dalla temperatura.

Per misurare la costante dielettrica è necessario effettuare precedentemente una misura di capacità, attraverso uno dei metodi a ponte. Tramite le configurazioni a ponte è possibile risalire con precisione al valore della capacità incognita e al fattore di dissipazione, anche denominato tangente di

δ , cioè dell'angolo di perdita. Tale parametro indica il rapporto tra le perdite di potenza attiva, dovute alle correnti di conduzione attraverso il provino, e la potenza reattiva impegnata:

$$\tan\delta = \frac{R_x I^2}{X_x I^2} = \omega C_x R_x \quad (3.3.1)$$

Come si nota, l'impedenza del provino è generalmente assunta come ohmico-capacitiva.

La configurazione della prova è simile a quella adottata per la misura di conducibilità; per quanto riguarda i provini piani, si fa uso di una cella in acciaio aperta in cui viene inserito il campione. Le due superfici del provino piano vengono ricoperte prima della prova da una pasta conduttiva in argento nella zona che sarà in contatto con gli elettrodi di misura, come mostrato in Figura 3.14.



Figura 3.14 - Provino piano per misura di permittività
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

Questa operazione si effettua per migliorare la bontà del contatto tra gli elettrodi e la superficie del provino, quindi diminuire le resistenze di contatto, le quali si sommerebbero alla resistenza del campione, invalidando la prova. Come noto, l'argento è il materiale che presenta la più alta conducibilità elettrica in natura, cioè $6 \cdot 10^7$ S/m, seguito dal rame ($5.8 \cdot 10^7$ S/m) e dall'oro ($4.4 \cdot 10^7$

S/m), quindi risulta la soluzione migliore per ridurre la resistenza di contatto. Naturalmente, nel caso delle prove di conducibilità, tale rivestimento non viene impiegato, in quanto l'elevata conducibilità dell'argento sarebbe preponderante su quella del materiale sotto esame e renderebbe inattendibile il valore registrato. Per i provini cilindrici, invece la configurazione di prova è la medesima adottata per la prova di conducibilità, quindi non si applica il rivestimento in pasta conduttiva in quanto è già presente il nastro di alluminio, che funge al contempo da elettrodo.

In questo caso lo strumento di riferimento è un ponte di Schering. Esso comprende quattro impedenze e un galvanometro, come si può osservare in Figura 3.15:

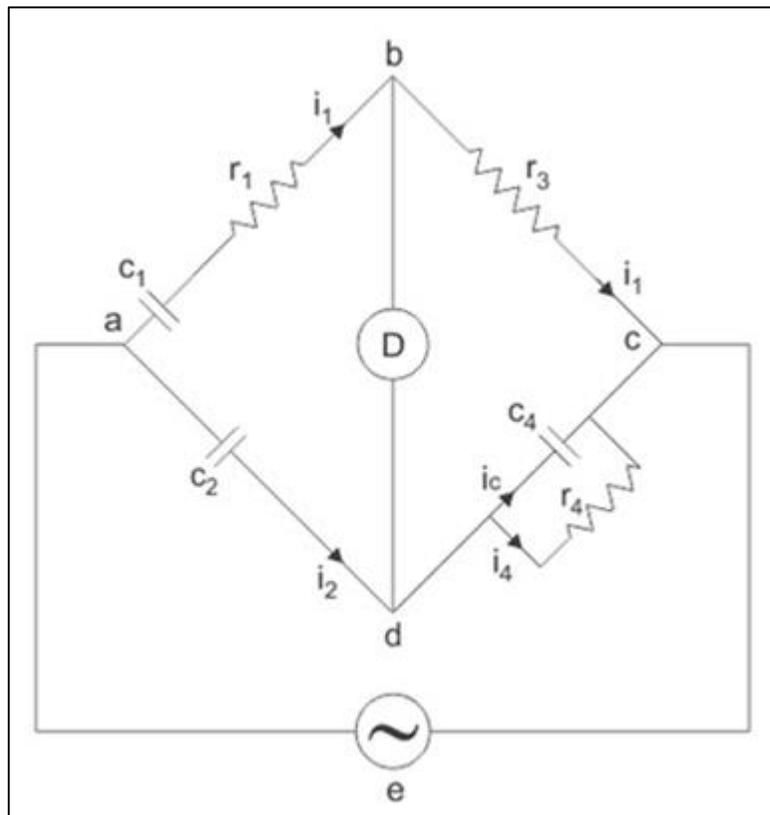


Figura 3.15 - Ponte di Schering

Osservando la configurazione circuitale del ponte, r_1 e c_1 sono rappresentati rispettivamente la resistenza e la capacità equivalenti del provino, c_2 è una capacità campione, r_3 è un resistore ideale, cioè senza effetti induttivi, c_4 ed r_4 sono una capacità e una resistenza variabili. La tensione alternata

a 50 Hz viene applicata tra i punti a e c mentre il galvanometro è posto tra b e d. Secondo la teoria dei metodi a ponte in AC, la differenza di potenziale ai capi del galvanometro sarà nulla nel momento in cui si raggiunge l'equilibrio del ponte, cioè quando:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 \dot{Z}_4 &= \dot{Z}_2 \dot{Z}_3 \\ \left(r_1 + \frac{1}{j\omega c_1} \right) \left(\frac{r_4}{1 + j\omega c_4 r_4} \right) &= \left(\frac{r_3}{j\omega c_2} \right) \\ \left(r_1 + \frac{1}{j\omega c_1} \right) r_4 &= \frac{r_3}{j\omega c_2} (1 + j\omega c_4 r_4) \\ r_1 r_4 + \frac{r_4}{j\omega c_1} &= \frac{r_3}{j\omega c_2} + \frac{r_3 r_4 c_4}{c_2} \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

quindi, uguagliando separatamente parte reale e parte immaginaria, si ottiene:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{r_3 c_4}{c_2} \\ c_1 &= \frac{c_2 r_4}{r_3} \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

Risulta quindi evidente come sia possibile risalire alle incognite r_1 e c_1 , regolando opportunamente i valori di c_4 ed r_4 ; inoltre, con tale metodologia, il fattore di dissipazione viene ricavato automaticamente, infatti:

$$\tan \delta = \omega c_1 r_1 = \omega r_3 \frac{r_4}{r_3} c_2 \frac{c_4}{c_2} = \omega c_4 r_4 \quad (3.3.4)$$

Una volta nota la capacità del provino c_1 , si risale facilmente alla costante dielettrica relativa del materiale; infatti, poiché vale la relazione:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (3.3.5)$$

dove $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m, dalla capacità campione c_2 , avente $\varepsilon_r = 1$, si risale alla costante dielettrica del provino:

$$\varepsilon_{rPLATE} = \frac{c_1}{c_2} \quad (3.3.6)$$

Per i provini cilindrici, invece, il valore di ε_r si ricava direttamente dal valore della capacità incognita misurata dal ponte:

$$\varepsilon_{rCYL} = \frac{C_x \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{\varepsilon_0 2\pi L} \quad (3.3.7)$$

dove D e d indicano rispettivamente il diametro esterno ed interno del cilindro ed L la lunghezza dell'elettrodo di misura avvolto sulla superficie esterna del campione.

Capitolo 4

Materiali e risultati delle prove

Dopo aver illustrato le modalità di caratterizzazione dei provini piani e cilindrici e analizzato le problematiche di rilievo tipiche delle misure elettriche prese in esame in questa trattazione, si procede in questo capitolo alla descrizione dei materiali studiati e all'analisi dei risultati forniti dalle prove di laboratorio. In particolare, l'attenzione sarà concentrata in parte sulle analogie e differenze emerse tra le due differenti configurazioni geometriche dei provini per ogni materiale e tra i diversi materiali considerati.

4.1 Materiali isolanti

Secondo quanto ribadito precedentemente, lo strato isolante risulta essere quello più critico, in quanto deve sostenere la tensione, garantire un corretto isolamento tra il conduttore e lo schermo a terra, dissipare energia termica nel miglior modo possibile e presentare ottime proprietà meccaniche. I polimeri organici costituiscono allora un'ottima soluzione, poiché mostrano le migliori ca-

ratteristiche in relazione alle necessità non appena elencate. Inizialmente, i materiali a base polimerica impiegati come isolanti non soddisfacevano il requisito minimo per la vita in servizio, cioè almeno 40 anni; ciò era dovuto principalmente a una inadeguata resistenza idrolitica, alla radiazione ultravioletta e alla lacerazione. In seguito, grazie allo sviluppo delle scienze dei materiali, la diffusione dei materiali polimerici nei sistemi in cavo ha subito un notevole incremento, in qualità di isolamento sia del cavo sia degli accessori. I vantaggi offerti da questo tipo di materiale sono numerosi: dal punto di vista elettrico, i polimeri sono caratterizzati da elevati valori di rigidità (fino a 10^9 V/m), elevate resistività (fino a 10^{17} Ω m) e basse perdite dielettriche, infatti si ha che:

$$\tan \delta = \frac{Rl^2}{X_c i^2} = \omega CR < 10^{-3} \quad (4.1.1)$$

In aggiunta, l'elevata resistenza a corrosione, la semplicità del processo di produzione e il costo relativamente contenuto rendono i polimeri i materiali più diffusi e adottati a livello industriale per molteplici applicazioni.

I polimeri sono costituiti da macromolecole a lunga catena formate da singole unità, dette monomeri; il grado di polimerizzazione indica quante volte il monomero si ripete all'interno della catena. Alle estremità della catena si uniscono poi gruppi funzionali diversi dai singoli monomeri, che però non ne alterano le proprietà. La catena centrale è detta spina dorsale e da essa si dipartono i rami secondari. Più numerosi sono i rami secondari, più difficilmente le molecole costituenti la catena riusciranno a compattarsi. Siano di esempio l'elevato numero di ramificazioni del polietilene a bassa densità (LDPE - Low-Density Polyethylene), e la totale assenza di queste nel polietilene ad alta densità (HDPE - High-Density Polyethylene). Inoltre alcuni polimeri possono essere sottoposti al processo di reticolazione: in questo caso alle catene polimeriche si aggiungono molecole lunghe o corte; si formano così altre ramificazioni. Un polimero reticolato è un polimero che al di sopra del punto di fusione (se è semicristallino) o della temperatura di transizione vetrosa (se è amorfo) non diviene liquido ma più simile a una gomma.

I polimeri possono essere costituiti da più di una tipologia di unità monomerica: per esempio, con due unità monomeriche si formano i *copolimeri*, mentre con tre unità si formano i *tripolimeri*. I co-

polimeri sono classificati in quattro gruppi in funzione dell'ordine in cui si posizionano i due monomeri all'interno della catena polimerica:

- Copolimeri alternati: i due monomeri si dispongono in catena alternandosi l'un l'altro;
- Copolimeri random: i due monomeri si dispongono in maniera casuale;
- Copolimeri a blocchi: la catena è composta da una lunga sequenza di un monomero di un tipo seguita da una sequenza dell'altro monomero;
- Copolimeri innestati: sequenze di un monomero sono intrecciate con sequenze dell'altro monomero.

Ritornando al processo di reticolazione, esso può essere effettuato in tre modalità:

- I. Si incorpora all'interno del polimero un catalizzatore, in modo tale che, in seguito allo stampo o comunque alla modellazione del polimero nella geometria richiesta, esso possa essere riscaldato per dare inizio alla reazione di reticolazione. Polimeri di questo genere sono chiamati *termoindurenti* (v. paragrafo 4.1.1), poiché la loro forma è definita e non più modificabile. Il processo di reticolazione viene anche detto *solidificazione*. In alcuni casi i catalizzatori sono sufficientemente reattivi e la reticolazione può avere inizio già a temperatura ambiente. Le gomme sono un sottoinsieme dei polimeri reticolati e si distinguono dagli altri polimeri perché a temperatura ambiente si trovano al di sopra della propria temperatura di fusione o di transizione vetrosa. La gomma naturale è reticolata solo in parte ma presenta catene polimeriche estremamente lunghe e di conseguenza così intrecciate tra loro da offrire caratteristiche fisiche simili a quelle dei polimeri reticolati. Al contrario, i polimeri non reticolati e che dunque possono essere rimodellati in altre forme, sono conosciuti come *termoplastici* (v. paragrafo 4.1.1); alcuni esempi sono il polietilene e il polipropilene. I cavi in polietilene sono solitamente sottoposti a reticolazione attraverso l'aggiunta dell'1-2% in massa di perossido, che non reagisce quando il polimero viene estruso bensì successivamente, quando il cavo viene trattato con vapore surriscaldato o azoto ad alta pressione e temperatura in un lungo tubo. In una modalità alternativa, ovvero la reticolazione per mezzo di silani, il processo di reticolazione consuma acqua e fino a quando essa questa non è fornita, la reazione non può avvenire.
- II. Per dare inizio alla reticolazione si possono sfruttare le radiazioni. Tuttavia questo espediente può essere utilizzato solamente su spessori ridotti e può causare effetti collaterali

come per esempio riduzioni di lunghezza della catena polimerica. Inoltre, poiché la strumentazione necessaria è solitamente costosa, tale espediente trova raramente applicazione.

- III. Una terza possibilità consiste nell'aggiungere un agente solidificante chimico che spezza la catena e si inserisce al suo interno. Un esempio sono le resine epossidiche, famiglia di polimeri termoindurenti nei quali si uniscono due componenti per formare un prodotto vetroso a temperatura ambiente, recante buone proprietà di isolamento elettrico insieme con una eccellente impermeabilità all'acqua e sfruttate soprattutto negli interruttori di alta tensione e nell'isolamento delle macchine elettriche.

Il metodo maggiormente adottato per la reticolazione è il primo elencato, cioè l'attivazione di un catalizzatore somministrando energia termica, quindi aumentando la temperatura. Dato che questa temperatura deve essere sufficientemente al di sopra della temperatura di fusione nel caso in cui la reticolazione debba avvenire in un tempo piuttosto breve, il processo di reticolazione avviene sempre quando il materiale si trova in stato liquido, cioè in fase amorfa. Se si aumenta la temperatura molto velocemente, può accadere che la reticolazione cominci prima che la struttura lamellare sia totalmente dispersa e quindi tale struttura potrebbe rimanere presente, in parte. In queste condizioni nel polietilene, i microdomini o fasci sferulitici o strutture di lamelle estese possono essere l'unica forma di configurazione cristallina possibile. In casi come questi, la temperatura del materiale può essere aumentata velocemente dalla temperatura di fusione a quella richiesta per dare inizio alla reticolazione e la riconfigurazione macrostrutturale può essere ostacolata dalle forze instauratesi tra il polimero e la superficie stampata. Tuttavia, non sempre è necessario superare la temperatura di fusione per dare inizio alla reticolazione; per esempio, nella reticolazione a base di silani, sviluppata per cavi isolati in polietilene, il polimero viene fatto solidificare approssimativamente a 100°C, temperatura inferiore a quella di fusione delle lamelle più diffuse e spesse, le quali passano in stato liquido a circa 105°C. Anche la radiazione può essere usata per reticolare i polimeri al di sotto della temperatura di fusione; se applicata con basse dosi, il grado di cristallinità del polimero viene preservato.

Per la realizzazione di materiali isolanti, anche di elevata qualità, raramente si ricorre a polimeri puri. Vengono inclusi nel composto alcuni additivi, classificabili in tre categorie:

- I. *Ausiliari*: sono necessari per il processo di produzione, dopo il quale rimangono

solo in forma residuale. Sono inclusi in questa categoria anche i catalizzatori adibiti all'attivazione della reticolazione oppure aventi la funzione di agenti emulsionanti;

- II. *Additivi*: sono inseriti in basse concentrazioni, solitamente inferiori al 10%, in modo tale da modificare il comportamento del polimero in diverse situazioni senza alterarne la struttura. Tra gli additivi si ricordano: i lubrificanti, i quali ne migliorano la fluidità e facilitano il rilascio del polimero da parte dello stampo; gli stabilizzanti, che garantiscono protezione da calore e da radiazione ultravioletta; antiossidanti, che inibiscono l'ossidazione; flessibilizzanti per incrementare la durezza e ritardanti di fiamma, i quali o impediscono l'apporto di ossigeno durante il riscaldamento, oppure spengono il fuoco dissociandosi in acqua, per esempio:



- III. *Ingredienti compositi*: sono usati in alte concentrazioni, anche fino al 70% per modificare le proprietà del polimero sia durante il processo di produzione sia durante il suo utilizzo. È possibile distinguere due categorie, aventi funzioni complementari: riempitivi e plastificanti. I primi possono assumere forma particellare, fibrosa o microsferica e si usano per ridurre i costi sia irrobustendo il polimero, cioè migliorandone le caratteristiche meccaniche come il modulo di Young, la stabilità dimensionale e la durezza, sia le proprietà elettriche, come per esempio la resistenza alla formazione di arborescenze. I plastificanti invece sono utilizzati per ridurre la fragilità ed agevolare la modellazione in fase di produzione; in questo caso è probabile rilevare una riduzione di durezza e un'alterazione della struttura dal momento che essi agiscono riducendo le forze di legame interne alla catena polimerica [13].

4.1.1 Classificazione generale

Si vuole ora offrire una classificazione più completa dei polimeri organici, in modo da fornire uno sguardo d'insieme sulle proprietà principali di quelli più diffusi nell'industria elettrica. In questo caso, la classificazione convenzionalmente più adottata si riferisce alla risposta del polimero in seguito a un riscaldamento:

- Polimeri **TERMOPLASTICI**: rammolliscono e divengono elastici con il calore, poi si induriscono in seguito a raffreddamento. Il ciclo di riscaldamento e raffreddamento entro certi limiti di temperatura può essere applicato varie volte senza alterare le proprietà di questi polimeri. A temperature elevate (superiori a 100-150°C circa) le proprietà meccaniche si deteriorano rapidamente. Generalmente, ricadono nella categoria dei termoplastici i polimeri aventi struttura lineare e sono caratterizzati da una resistenza termica piuttosto bassa; i più utilizzati nelle applicazioni elettriche sono il polietilene (PE), il polivinilcloruro (PVC), il polipropilene (PP) e le poliammidi (PA).
- Polimeri **TERMOINDURENTI**: sono così definiti i polimeri sottoposti al processo di reticolazione. Se il riscaldamento avviene prima della reticolazione, essi rammolliscono; se invece il riscaldamento è successivo, i legami covalenti ottenuti con la reticolazione vengono distrutti e si osserva un comportamento fragile. I più diffusi nel settore degli isolanti elettrici sono l'EPR (Ethylene-Propylene Rubber) (v. paragrafo 4.1.2), le resine epossidiche, il polietilene reticolato (XLPE – Cross-Linked Polyethylene) e la gomma silicica (SiR – Silicon Rubber).
- **ELASTOMERI** o **GOMME**: sono polimeri caratterizzati da un comportamento elastico e da valori del modulo elastico, a temperatura ambiente, dell'ordine dei MPa. Dopo la rimozione del carico applicato il recupero della deformazione è totale e istantaneo. Una proprietà tipica delle gomme è data da una temperatura di transizione vetrosa inferiore alla temperatura ambiente, perciò esse non possono essere impiegate al di sotto di tale limite. Se così fosse, infatti, il materiale diverrebbe sempre più rigido riducendo la sua deformazione a rottura. Il limite termico superiore è invece imposto dalla degradazione stessa dell'elastomero. Solitamente, per ottenere una gomma si sottopongono a reticolazione dei polimeri amorfi tramite il processo di vulcanizzazione: il polimero viene riscaldato in presenza di zolfo con la conseguente rottura dei doppi legami e la formazione di

ponti zolfo tra due distinte catene.

4.1.2 EPR

Le gomme EPR (Ethylene-Propylene Rubber) comprendono una gamma di polimeri che si possono suddividere in due classi: la prima è costituita da copolimeri saturi dell'etilene e del propilene (EPM) i quali necessitano di perossidi organici per avviare la reticolazione, mentre la seconda prevede l'inserimento di un terzo monomero, un diene non coniugato, che evita la saturazione dovuta alla reticolazione per mezzo dei solfuri o dei perossidi stessi. L'uso dei perossidi per la reticolazione sia favorisce la resistenza all'invecchiamento, sia migliora le proprietà elettriche; essi, se sottoposti a una fonte di calore, si decompongono e generano radicali che reagiscono con il polimero formando legami carbonio-carbonio stabili. Questo genere di gomme esibisce un'ottima resistenza sia alle condizioni atmosferiche come la luce, l'ossigeno, l'ozono, sia alla radiazione nucleare, per questo è largamente impiegato per applicazioni in alta tensione in condizioni ambientali critiche come per esempio nelle miniere, su mezzi di trasporto per via marina e nelle centrali elettronucleari. Per quanto riguarda i sistemi HVDC, le gomme di tipo EPR costituiscono la soluzione più diffusa per gli isolamenti dei giunti e delle terminazioni; quelle presenti in commercio contengono tipicamente una frazione in peso di etilene compresa tra il 40% e il 60% e ciò le rende dei materiali amorfi con una temperatura di transizione vetrosa intorno ai -54°C . Sono presenti anche altri additivi in alta concentrazione, fino al 50%; uno tra questi è il caolino, costituito principalmente dalla caolinite minerale, ottimo per aumentare la resistenza della gomma rispetto a tagli e abrasioni e ridurre l'assorbimento d'acqua.

4.1.3 Risultati della prova di rigidità dielettrica

I provini piani in EPR considerati per la caratterizzazione hanno mostrato valori di rigidità in corrente continua assai elevati, evidenziando l'efficacia dell'azione di isolamento tra il connettore in alta tensione e lo schermo a terra. Non sono quindi sorti problemi nella valutazione dei gradienti

massimi applicabili durante le prove di conducibilità, essendo questi ampiamente sostenibili dai campioni considerati, senza rischio di perforazioni e di danneggiamento della strumentazione. I risultati acquisiti dalla prova di rigidità in DC sono stati comunque analizzati tramite la distribuzione di Weibull, con l'obiettivo di determinare un range di gradienti limite sostenibili in condizioni di esercizio dall'accessorio. Nella tabella 4.1 si riportano i valori di rigidità registrati su provini piani, insieme agli spessori e alle tensioni di perforazione.

provino	s [mm]	V [kV]	G [kV/mm]
1	0,73	60,0	82,2
2	0,74	75,0	101,4
3	0,69	66,0	95,7
4	0,63	60,0	95,2
5	0,73	48,0	65,8
6	0,71	58,0	81,7
7	0,75	56,0	74,7
8	0,63	58,0	92,1

Tabella 4.1 - Risultati della prova di rigidità dielettrica su provini piani in EPR

La distribuzione di Weibull a due parametri relativa ai risultati indicati nella Tabella 4.1 è mostrata in Figura 4.1, nella quale è rappresentata la linearizzazione della funzione probabilità cumulata in un sistema logaritmico.

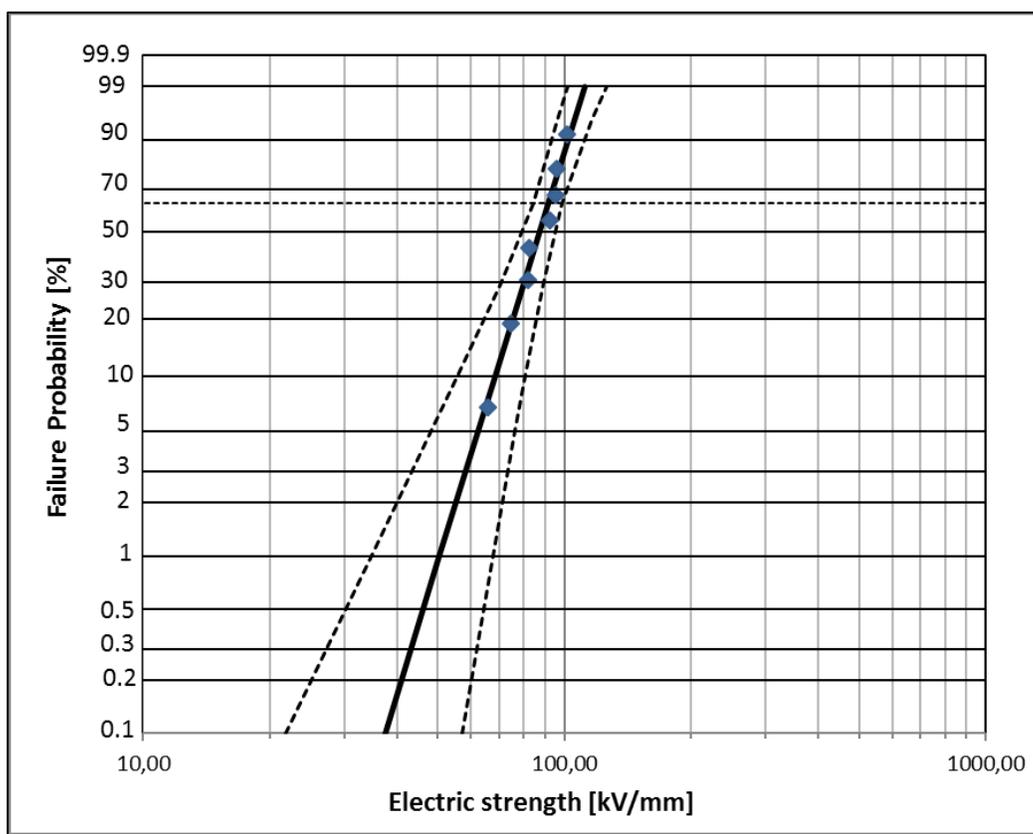


Figura 4.1 - Carta di Weibull relativa ai dati della Tabella 4.1

Nel caso in esame, i parametri della distribuzione sono pari a 91,6 kV/mm per quanto riguarda il fattore di scala α , cioè il valore di rigidità dielettrica corrispondente alla probabilità di scarica del 63,2%, e a 7,71 per quanto riguarda il fattore di forma β . Moltiplicando il fattore di scarica per il coefficiente K menzionato nel capitolo 3, si ottiene un valore limite pari a 82,4 kV/mm. Tuttavia, per le misure di conducibilità si è scelto un gradiente massimo più di 10 volte inferiore, non essendo necessario ai fini della trattazione sottoporre il materiale a stress così elevati. Osservando i risultati, si comprende come il fattore di forma β sia pari a 7,71, infatti si nota una gamma di valori relativamente ampia che parte da un valore minimo di 65,8 kV/mm del provino n. 5 fino a raggiungere 101,4 kV/mm del provino n. 2. Questa disparità si può giustificare notando che, essendo necessario sottoporre il materiale a gradienti di elevata intensità, le condizioni di prova potrebbero rivestire un ruolo preminente rispetto al caso di materiali con rigidità inferiori. In particolare, tensioni dell'ordine di 60 kV innescano fenomeni di moto di fluido nel bagno di olio silicico che potrebbero portare sia a infiltrazioni di olio tra la superficie dell'elettrodo e quella del campione in prova,

sia a considerevoli variazioni locali della temperatura e della percentuale di umidità presente in prossimità degli elettrodi.

4.1.4 Risultati della misura di conducibilità

I valori di conducibilità elettrica misurati sui provini piani in EPR sono stati valutati all'interno di una gamma di gradienti di livello contenuto, in modo tale da poter riprodurre gli stessi anche su provini cilindrici al fine di evitare problemi relativi alle tensioni da raggiungere con la strumentazione disponibile e di poter effettuare un paragone sensato tra le due configurazioni di provino prese in esame. In Tabella 4.2 sono riportati i valori registrati durante la misura.

S [cm ²]	s [mm]	dV [V]	R _s [MΩ]	R _x [Ω]	σ [1/Ωm]	G [kV/mm]	V [kV]
60	0,8	0,0154	10	1,299·10 ¹²	1,03·10 ⁻¹³	2,5	2,0
60	0,8	0,0328	10	9,146·10 ¹¹	1,46·10 ⁻¹³	3,8	3,0
60	0,8	0,0609	10	6,568·10 ¹¹	2,03·10 ⁻¹³	5,0	4,0
60	0,8	0,0924	10	5,411·10 ¹¹	2,46·10 ⁻¹³	6,3	5,0

Tabella 4.2 - Risultati della misura di conducibilità su provino piano in EPR

In particolare, S indica la superficie dell'elettrodo di bassa tensione, cioè quello connesso al segnale di misura, s rappresenta lo spessore, dV la caduta di tensione misurata dal multimetro, R_s la resistenza posta in serie alla cella di misura, R_x la resistenza del campione, σ la conducibilità, G il gradiente e V la tensione applicata. In Tabella 4.3 si mostrano invece i valori relativi alla configurazione cilindrica.

L [m]	D [mm]	d [mm]	dV [V]	R _s [MΩ]	R _x [Ω]	σ [1/Ωm]	G [kV/mm]	V [kV]
0,05	23	16	0,02	100	5,00·10 ¹³	2,31·10 ⁻¹⁴	2,9	10,0
0,05	23	16	0,032	100	4,69·10 ¹³	2,46·10 ⁻¹⁴	4,3	15,0
0,05	23	16	0,048	100	4,17·10 ¹³	2,77·10 ⁻¹⁴	5,7	20,0
0,05	23	16	0,062	100	4,03·10 ¹³	2,86·10 ⁻¹⁴	7,1	25,0

Tabella 4.3 - Risultati della misura di conducibilità su provino cilindrico in EPR

In questo secondo caso, L indica la lunghezza dell'elettrodo di misura costituito da alluminio avvolto sulla superficie esterna del provino, D il diametro esterno, d il diametro interno. In Figura 4.2 è mostrato il grafico della conducibilità in funzione del gradiente per le due tipologie di provino.

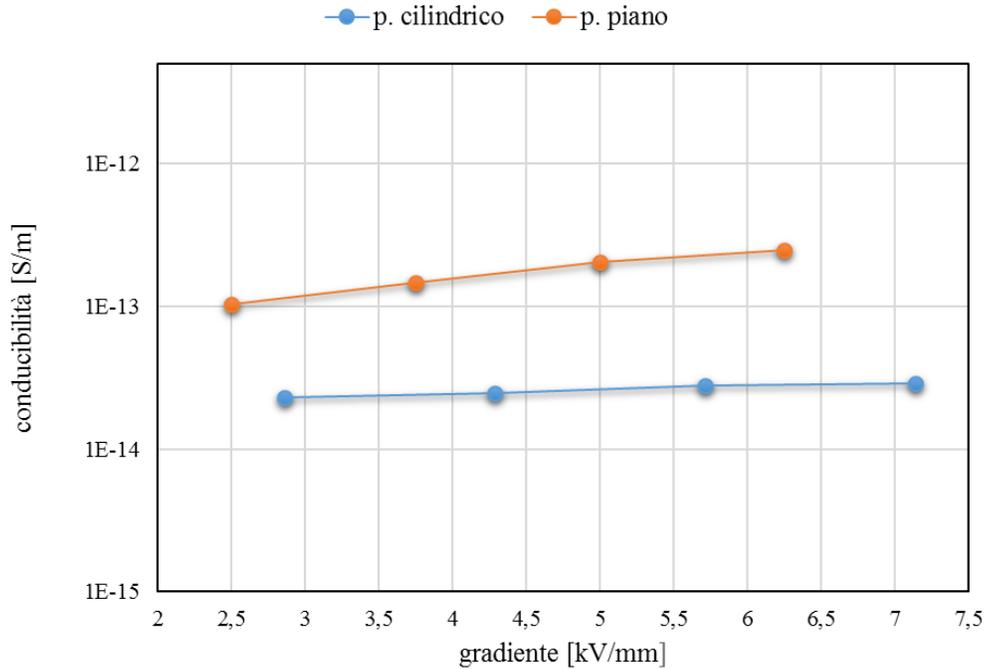


Figura 4.2 - Confronto tra i valori di conducibilità per le due tipologie di provino in funzione del gradiente

Analizzando i risultati ottenuti nei due casi non appena citati, si possono proporre due considerazioni principali:

1. Se si considerano i gradienti applicati, la conducibilità rimane in entrambi i casi sostanzialmente costante, infatti per il provino piano passa da $1,03 \cdot 10^{-13}$ S/m a $2,46 \cdot 10^{-13}$ S/m e per il provino cilindrico si parte da $2,31 \cdot 10^{-14}$ S/m per giungere a $2,86 \cdot 10^{-14}$ S/m. Questo comportamento risulta coerente con la teoria di conduzione all'interno dei polimeri, per cui vale la legge:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{W - aE}{kT}\right) \quad (4.1.4.1)$$

in cui σ_0 è una costante tipica del materiale, W è l'energia di attivazione, k è la costante

di Boltzmann e T è la temperatura assoluta. In particolare, tenendo presente che la temperatura è stata mantenuta costante durante la prova e che la dipendenza della conducibilità dal campo elettrico è significativa solo per gradienti elevati, i risultati ottenuti possono essere ritenuti validi, in quanto lo stress elettrico applicato è stato limitato a valori contenuti per poter effettuare un raffronto attendibile tra le due configurazioni geometriche.

2. La differenza emersa tra le due tipologie di provini esaminate consiste nell'ordine di grandezza dei valori registrati: il provino piano si attesta su valori intorno a 10^{-13} S/m, mentre quello cilindrico esibisce una conducibilità 10 volte inferiore, cioè 10^{-14} S/m. Nel caso dell'EPR, il grado di disordine molecolare è assai elevato, quindi non è possibile parlare di bande, ma di stati energetici localizzati su singole molecole. Questa configurazione rende allora molto difficoltoso il trasporto di portatori da uno stato energetico all'altro, quindi da una molecola all'altra. La disparità di risultati potrebbe dunque essere causata da un aggravarsi di questa condizione: le condizioni di stampaggio del provino piano sono diverse da quelle adottate per la realizzazione del provino cilindrico; nel primo caso, infatti, si sottopone la miscela in polvere a una pressione ad alta temperatura senza conferire un particolare orientamento alle particelle di materiale, mentre nel secondo il composto viene iniettato in uno stampo di forma cilindrica e successivamente espanso su un tondino in acciaio per poter effettuare le prove elettriche. Tali operazioni possono influenzare la disposizione delle catene polimeriche e il relativo stato energetico a scapito del trasporto dei portatori di carica.

4.1.5 Risultati della misura di permittività

Le misure di permittività sono state condotte variando il gradiente a temperatura costante, sul medesimo campione. I risultati delle misure su provino piano sono elencati nella Tabella 4.4.

S [cm ²]	s [mm]	C _x [pF]	C ₀ [pF]	tanδ	ε _r	G [kV/mm]	V [kV]
56	0,7	207,1	71	5,23·10 ⁻³	2,9	0,7	0,5
56	0,7	207,8	71	4,73·10 ⁻³	2,9	1,4	1,0
56	0,7	208,6	71	9,00·10 ⁻³	2,9	2,1	1,5

Tabella 4.4 - Risultati della misura di permittività su provino piano in EPR

In questo caso la superficie S dell'elettrodo di misura è minore rispetto a quello impiegato nella misura di conducibilità, mentre s indica sempre lo spessore del provino, C_x la capacità da misurare e C₀ la capacità campione. I risultati delle misure su provino cilindrico sono indicati invece nella Tabella 4.5.

L [m]	D [mm]	d [mm]	C _x [pF]	tanδ	ε _r	G [kV/mm]	V [kV]
0,05	23	16	24,9	1,54·10 ⁻³	3,2	0,7	2,0
0,05	23	16	24,9	2,00·10 ⁻³	3,2	1,4	4,1
0,05	23	16	24,9	2,20·10 ⁻³	3,2	2,1	6,1

Tabella 4.5 - Risultati della misura di permittività su provino cilindrico in EPR

La nomenclatura dei parametri adottata per il provino cilindrico è coerente con quella mostrata nel capitolo 3. Per questa geometria sono stati applicati gradienti analoghi a quelli ai quali è stato sottoposto il provino piano, per poter eseguire un paragone attendibile in termini di stress elettrico. Dai risultati si evince che anche la misura di permittività rimane sostanzialmente indipendente dal gradiente, tenendo presente l'ordine di grandezza degli stress elettrici applicati; inoltre, si può concludere che:

1. Il provino cilindrico, a parità di gradiente e temperatura, mostra una costante dielettrica relativa del 10% superiore rispetto a quella misurata sul provino piano. Questo comportamento risulta in disaccordo con quanto ci si aspetterebbe: infatti, passando dalla geometria piana a quella cilindrica, le diverse condizioni di stampaggio e la successiva espansione dovrebbero portare a un allontanamento delle specie polari presenti nel materiale, quindi a una risposta in polarizzazione meno evidente. Probabilmente, in fase di stampaggio, il materiale ha subito contaminazione da parte di residui conduttivi presenti nel macchinario di produzione, i quali hanno incrementato la risposta in termini di polarizzazione.

2. Dalla configurazione piana a quella cilindrica la capacità diminuisce notevolmente, fenomeno prevedibile in quanto lo spessore del cilindro, quindi la distanza interelettrodica, è circa 5 volte superiore a quella corrispondente al provino piano.
3. Per quanto riguarda il fattore di dissipazione, esso risulta inferiore nel provino cilindrico, pur rimanendo dello stesso ordine di grandezza, in accordo con la considerazione precedente. Per esempio, analizzando le due misure effettuate con un gradiente pari a 0,7 kV/mm, si riscontrano nel provino cilindrico una capacità circa 10 volte inferiore e una resistenza più che raddoppiata causata da un aumento dello spessore e quindi da una maggiore difficoltà per i portatori di carica di raggiungere l'elettrodo di bassa tensione. Tali differenze giustificano una diminuzione intorno all'80% nel fattore di dissipazione:

provino	C_x [pF]	R_x [k Ω]	$\tan\delta$	G [kV/mm]
piano	207,1	80	$5,2 \cdot 10^{-3}$	0,7
cilindrico	24,9	196	$1,54 \cdot 10^{-3}$	0,7

Tabella 4.6 - Confronto delle misure di capacità e $\tan\delta$ per provino piano e cilindrico a 0,7 kV/mm

4.1.6 Simulazioni numeriche

Infine sono state effettuate alcune simulazioni numeriche per valutare la distribuzione della densità di corrente all'interno del provino piano e cilindrico tramite il programma Comsol Multiphysics. Per la gomma EPR, visto che la conducibilità rimane costante al variare del gradiente nella gamma di valori considerati, è sufficiente mostrare la distribuzione di densità di corrente normalizzata rispetto al valore assunto dalla stessa al centro del provino, quindi in corrispondenza dell'asse di simmetria degli elettrodi. Nella Tabella 4.7 sono elencati i dati utilizzati nella simulazione per il provino piano, mentre la Figura 4.3 mostra la distribuzione della densità di corrente relativa.

Gradiente [kV/mm]	2,5
Conducibilità EPR a 25°C [S/m]	$1,03 \cdot 10^{-13}$
Conducibilità N₂ a 25°C [S/m]	$0,5 \cdot 10^{-16}$
Permittività rel. EPR a 25°C	2,9
Permittività rel. N₂ a 25°C	1
Tensione misurata [V]	0,0154

Tabella 4.7 - Dati usati per la simulazione per provino piano in EPR

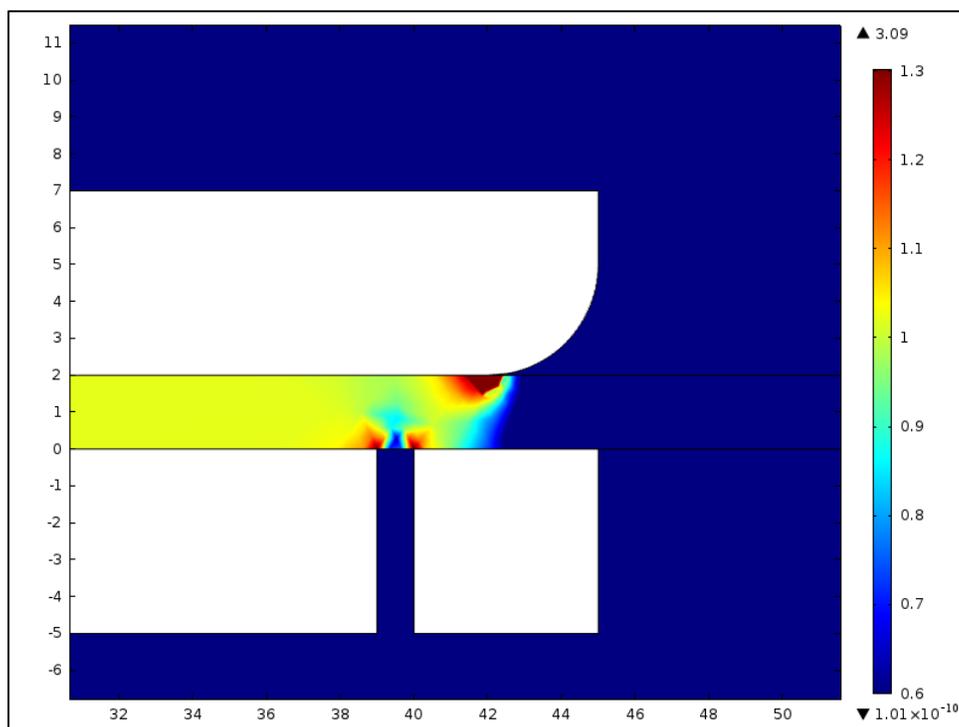


Figura 4.3 - Distribuzione relativa della densità di corrente nel provino piano in EPR

Per quanto riguarda il provino cilindrico, il gradiente in regime DC è stato calcolato con la formula seguente:

$$E = \frac{2V}{(D-d)} \quad (4.1.6.1)$$

Questo e gli altri parametri introdotti nel software di simulazione sono riportati nella Tabella 4.8, mentre il grafico della distribuzione percentuale di corrente è indicato in Figura 4.4, in cui è possibile apprezzare l'azione benefica dell'anello di guardia, che si fa carico di un'intensità di corrente di oltre il 20% superiore a quella che confluisce nell'elettrodo di misura. In particolare, mentre nel provino piano la densità di corrente calcolata tra gli elettrodi assume un valore medio di $0,98 \cdot 10^{-13}$ A/mm², nel provino cilindrico, in presenza di un'intensità di campo elettrico analoga, tale valore decresce fino a $6,8 \cdot 10^{-14}$ A/mm², in accordo con i risultati sperimentali.

Gradiente [kV/mm]	2,9
Conducibilità EPR a 25°C [S/m]	$2,31 \cdot 10^{-14}$
Conducibilità olio silconico a 25°C [S/m]	$1 \cdot 10^{-13}$
Permittività rel. EPR a 25°C	3,2
Permittività rel. olio silconico a 25°C	4
Tensione misurata [V]	0,02

Tabella 4.8 - Dati usati per la simulazione per provino cilindrico in EPR

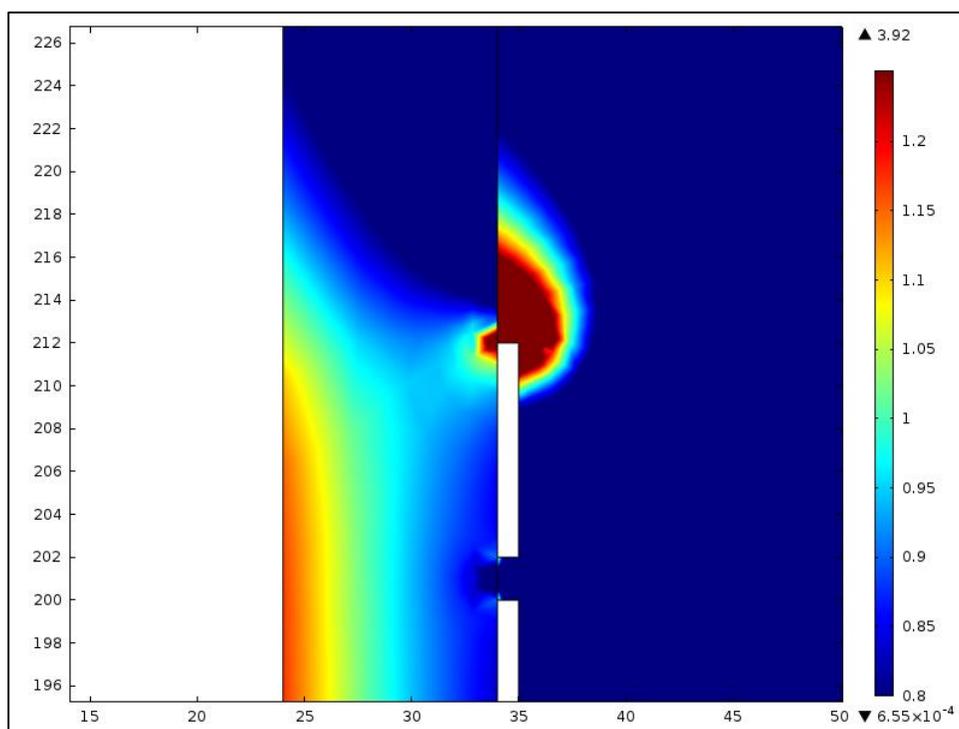


Figura 4.4 - Distribuzione relativa della densità di corrente nel provino cilindrico in EPR

4.2 Materiali semiconduttivi

Come già anticipato nel capitolo 2, negli accessori e nei cavi per applicazioni in alta tensione sono presenti zone costituite da materiali semiconduttivi; essi vengono posizionati tra l'isolante ed elementi in alta tensione oppure tra l'isolante ed elementi posti al potenziale di terra al fine sia di uniformare il campo elettrico e ridurre gli addensamenti, sia di evitare la formazione di cavità e disomogeneità tra l'isolante e le parti in contatto con quest'ultimo.

Per quanto riguarda le modalità di caratterizzazione dei materiali semiconduttivi, le procedure adottate sono differenti rispetto a indicate per materiali isolanti e varioresistivi. Il problema nasce infatti dalla composizione del materiale stesso: come precedentemente esposto, i materiali semiconduttivi sono caratterizzati da una banda proibita relativamente stretta, cioè sono necessari campi elettrici non elevati per attivare la conduzione; per ottenere queste proprietà si utilizza una base

polimerica, solitamente EPR, additivata con elevate percentuali di nerofumo, materiale a base di carbonio altamente conduttivo. Questo costituisce un problema per la strumentazione adibita alla caratterizzazione elettrica, poiché adottando i livelli di tensione stabiliti per la misura di conducibilità e permittività, i materiali semiconduttivi si comportano come conduttori veri e propri. Per questo motivo si effettuano solamente misure di resistività longitudinale su provino piano e radiale e/o longitudinale su provino cilindrico, che si possono considerare corrispondenti alle misure di conducibilità effettuate sulle altre due tipologie di materiale esaminate in questa trattazione, tenendo presente la validità dell'equazione (3.2.1).

4.2.1 Risultati della misura di conducibilità

Prima di analizzare i risultati ottenuti è bene esporre le caratteristiche principali della misura di conducibilità su materiali semiconduttivi, denominata ufficialmente misura di **resistività**, in quanto consiste nell'applicazione di una corrente continua, nella lettura della caduta di tensione generata dal passaggio della corrente stessa e nel calcolo della resistività di volume del materiale.

Come per le altre tipologie di materiali analizzate, anche in questo caso si fa riferimento alla geometria piana e a quella cilindrica, con l'obiettivo di evidenziare le eventuali differenze emergenti dalle misure e proporre quale sia la configurazione più utile nello sviluppo di un accessorio per applicazioni in alta tensione continua.

Per quanto riguarda i provini piani, essi sono costituiti da strisce della larghezza di 10 mm ricavate piastre stampate di spessore pari a 1 mm circa. La modalità di misura prevede il metodo a 4 morsetti al fine di evitare risultati inattendibili causati dalla resistenza degli elettrodi; dunque a ciascun campione vengono applicati 4 elettrodi, due esterni di corrente e due interni per la misura della tensione; la distanza interna reciproca degli elettrodi di tensione è di 100 mm e la loro distanza dagli elettrodi di corrente è di circa 10 mm, come si può notare in Figura 4.5. Ogni elettrodo, della larghezza di circa 10 mm, viene preparato applicando intorno al campione uno strato di vernice conduttiva a base di argento colloidale; prima di procedere con le misure è necessario attendere il completo essiccamento degli elettrodi, che richiede circa un'ora.

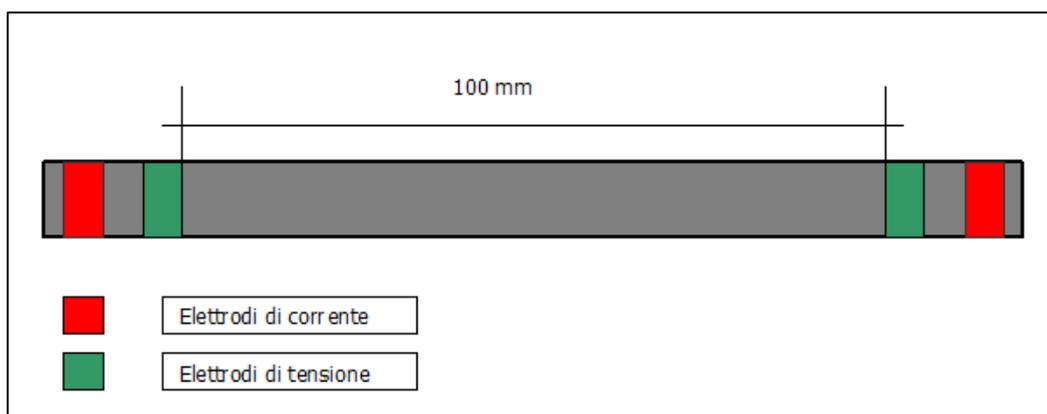


Figura 4.5 - Campione in striscia per la misura di resistività su materiali semiconduttivi

La misura a 4 morsetti si avvale dell'impiego di un generatore in corrente continua con tensione massima di 32 V, un amperometro ed un voltmetro, come riportato nello schema di Figura 4.6. La corrente viene impostata in funzione della caduta di tensione registrata nei primi istanti della misura, per evitare il riscaldamento del materiale semiconduttivo; generalmente non è necessario superare il valore di 1 mA.

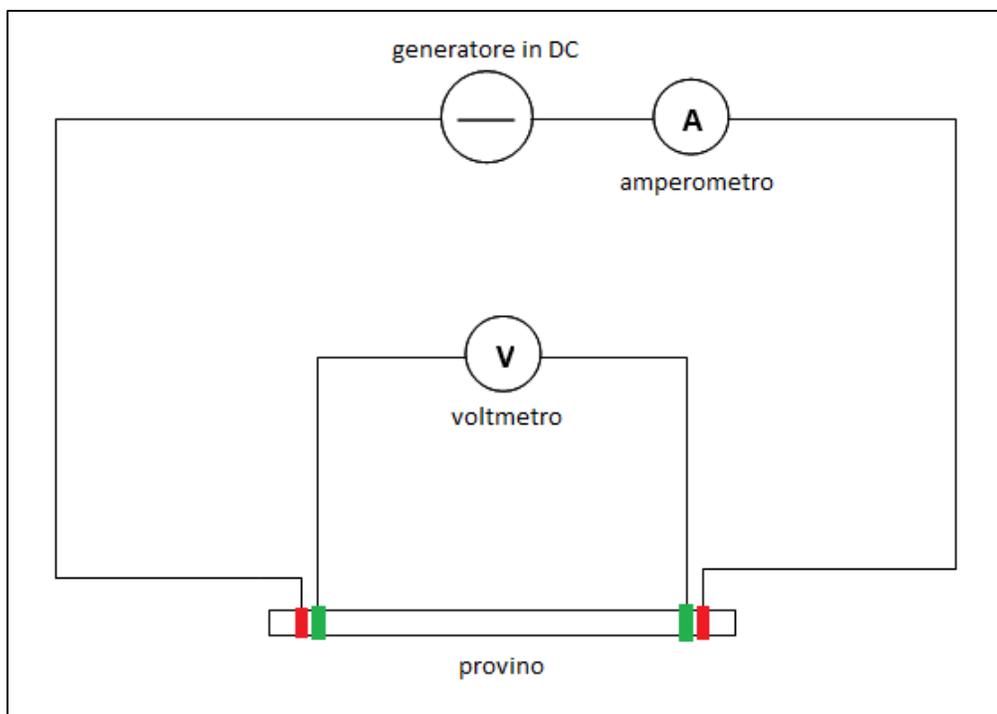


Figura 4.6 - Schema elettrico per la misura a 4 morsetti

In Tabella 4.9 sono riportati i risultati delle misure effettuate su 4 strisce di materiale semiconduttivo a temperatura ambiente.

p	s [mm]	I [mA]	V [V]	R [Ω]	ρ [Ωm]
1	0,81	0,4	17,9	$4,28 \cdot 10^4$	3,6248
2	0,79	0,3	12,8	$4,27 \cdot 10^4$	3,3707
3	0,77	0,4	18,2	$4,55 \cdot 10^4$	3,5035
4	0,80	0,4	11,4	$2,85 \cdot 10^4$	2,2800

Tabella 4.9 - Risultati della misura di resistività su strisce di materiale semiconduttivo

In questo caso, s indica lo spessore del provino, I l'intensità di corrente misurata dall'amperometro, V la caduta di tensione misurata ai morsetti voltmetrici, R e ρ la resistenza e la resistività rispettivamente. Quest'ultimo parametro è stato calcolato moltiplicando il valore di resistenza per il rapporto tra la sezione trasversale della striscia S e la sua lunghezza l , cioè attraverso le seguenti relazioni:

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{S} \rightarrow \rho = R \frac{S}{l} \quad (4.2.1)$$

Osservando i risultati, la cui media è pari a $3,1948 \Omega\text{m}$, o $0,313 \text{ S/m}$ in termini di conducibilità, si può subito affermare che il materiale in esame presenta una resistività conforme ai valori tipici dei semiconduttori utilizzati in applicazioni per alta tensione. Infatti, il requisito fondamentale per la resistività su striscia consiste nel non superare $10 \Omega\text{m}$.

Per quanto riguarda la misura di resistività su provini cilindrici, la modalità di prova varia leggermente, poiché, volendo testare le proprietà conduttive all'interno del materiale, è necessario misurare la resistività radiale, dunque la configurazione risulta analoga a quella mostrata per la misura di conducibilità su provini cilindrici di materiali isolanti. Lo schema elettrico prevede l'uso dello stesso circuito indicati in Figura 4.6, cioè l'utilizzo di morsetti amperometrici e voltmetrici connessi a un amperometro in serie a un generatore in DC, e a un voltmetro rispettivamente. Come si può notare in Figura 4.7, si utilizzano solamente 2 elettrodi, con 4 morsetti: la corrente viene iniettata sul supporto in acciaio che viene precedentemente inserito all'interno del provino cilindrico,

causandone una lieve espansione; l'elettrodo di misura consiste nel nastro argentato avvolto sulla superficie esterna del campione. In Tabella 4.10 sono riportati i risultati delle misure effettuate su 4 provini cilindrici di materiale semiconduttivo a temperatura ambiente.

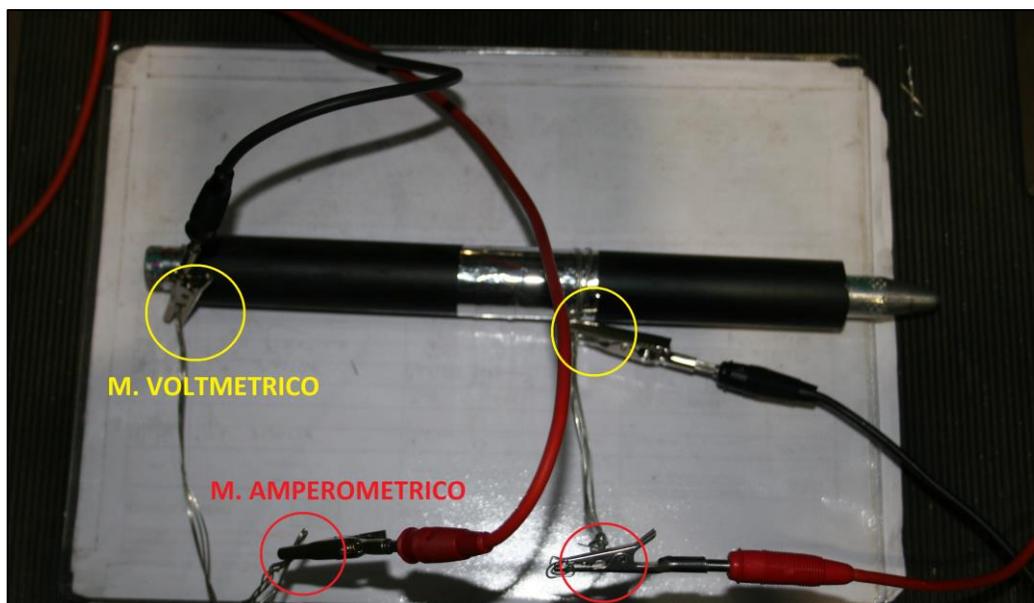


Figura 4.7 - Misura a 4 morsetti della resistività di volume su provino cilindrico (per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

p	L [mm]	D [mm]	d [mm]	I [mA]	V [V]	R [Ω]	ρ [Ωm]
1	50	26,3	16	1	5,90	$5,90 \cdot 10^3$	3729,6
2	50	26,1	16	1	5,88	$5,88 \cdot 10^3$	3774,9
3	50	26,1	16	1	5,97	$5,97 \cdot 10^3$	3832,7
4	50	26,2	16	1	5,92	$5,92 \cdot 10^3$	3771,2

Tabella 4.10 - Risultati della misura di resistività su provini cilindrici di materiale semiconduttivo

In questo caso L indica la lunghezza dell'elettrodo costituito dal nastro argentato, D il diametro esterno e d il diametro interno. Il valore di resistività è stato calcolato secondo la relazione (3.2.1.10), già indicata nel paragrafo 3.2.1 e qui riproposta:

$$R_{cyl} = \int_{r_2}^{r_1} \frac{\rho_{cyl} dr}{2\pi L r} = \frac{\rho_{cyl}}{2\pi L} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (3.2.1.10)$$

Confrontando i valori misurati su striscia e provino cilindrico, emerge una sostanziale differenza: con una media di 3777,1 Ωm , o $2,647 \cdot 10^{-4}$ S/m in termini di conducibilità, il provino cilindrico risulta più di 10^3 volte più resistivo della striscia: le operazioni di stampaggio ed espansione influenzano profondamente la disposizione molecolare delle particelle di nerofumo, le quali modificano radicalmente la conducibilità del materiale assumendo una configurazione spaziale non in grado di fornire un numero di vie di percolazione paragonabile a quello presente nel caso della striscia. Questo risultato appare sensato anche alla luce delle prove eseguite su materiale isolante: in tal caso, le due geometrie mostrano un comportamento diverso ma non in modo considerevole, in quanto non essendo presente un additivo conduttivo, la disposizione delle catene polimeriche e il numero di legami covalenti non hanno la possibilità di modificarsi in maniera tale da alterare significativamente la proprietà di condurre specie cariche.

4.3 Materiali varioresistivi

Solitamente, il campo elettrico negli accessori è distribuito in maniera non uniforme, soprattutto in corrispondenza dell'interruzione dello strato semiconduttivo esterno. Per risolvere questo problema sono disponibili diverse soluzioni. Un approccio piuttosto diffuso consiste nel ricorrere al controllo di campo di tipo geometrico o capacitivo, come già indicato nel capitolo 2. Questa metodologia è stata la prima ad essere adottata e si basa sulla possibilità di controllare e modificare la distribuzione del campo elettrico introducendo superfici equipotenziali, ovvero di strati concentrici di materiale conduttivo opportunamente inseriti in strutture di forma conica (“*capacitor cones*”). Tale soluzione strutturale costituisce un sistema elettrico isolato, in quanto la distribuzione del campo elettrico è indipendente dall'ambiente circostante l'accessorio. Perciò il controllo di campo capacitivo può essere sfruttato per molteplici usi, per esempio terminazioni, giunti, interruttori e

passanti di trasformatori, soprattutto in sistemi HV e EHV; esso comporta tuttavia due effetti collaterali: in primis, si richiede più spazio e una maggiore quantità di materiale per fenomeni piuttosto localizzati; inoltre, si può dire che in questo modo si aggira il problema in maniera statica o comunque poco flessibile, in quanto i suddetti componenti devono essere dimensionati per il caso peggiore, quindi per il livello di gradiente massimo raggiungibile. Per questi motivi, un approccio del genere conduce a un sovradimensionamento degli elementi necessari per la realizzazione dell'accessorio, il che può comportare un incremento di costi significativo, soprattutto per applicazioni in alta tensione. Esiste una soluzione alternativa caratterizzata sia da un controllo di campo adattabile al gradiente sia da un minimo aumento in spessori e peso per il prodotto: i materiali **varioresistivi**. Essi sono così definiti poiché modificano reversibilmente le proprie caratteristiche elettriche legate alla conducibilità tra stato isolante e conduttivo se sottoposti a un campo elettrico superiore a un certo valore di soglia. In applicazioni in HVDC, si inserisce uno strato di materiale varioresistivo tra l'elettrodo di alta tensione e l'elettrodo al potenziale di terra, il quale agisce come un partitore non lineare controllando la caduta di tensione. Dal punto di vista prettamente fisico, il materiale, divenendo conduttivo, permette un accumulo locale di carica di spazio e di conseguenza la formazione di un campo elettrico interno che, sommandosi a quello esterno, si annulla, quindi la densità di linee di forza diminuisce. Il fenomeno è dominato da una corrente di conduzione, cioè di tipo resistivo, la quale causa perdite per effetto Joule proporzionali al quadrato della corrente stessa, come noto; per questo motivo i materiali varioresistivi sono stati ritenuti finora poco adatti alle applicazioni in alta tensione e il loro impiego ha interessato fondamentalmente solo le applicazioni in media tensione. In realtà, l'accessorio deve sostenere gli stress elettrici più gravosi solamente per brevi intervalli di tempo, per esempio in occasione di sovratensioni a impulso, quindi le perdite Joule si verificano, ma rimangono caratterizzate da un'intensità trascurabile. In tali situazioni, un controllo di campo di tipo geometrico-capacitivo comporterebbe un sovradimensionamento dell'accessorio con conseguente aumento dei costi e delle difficoltà di installazione. Il funzionamento ideale prevede quindi l'attivazione delle proprietà conduttive dei materiali varioresistivi solo in casi come quello non appena citato, mentre durante il normale funzionamento in servizio l'evidenziazione di caratteristiche analoghe ai materiali isolanti con perdite per effetto Joule assai ridotte.

Per introdurre in maniera più chiara le peculiarità dei materiali varioresistivi, è utile osservare

le seguenti equazioni di Maxwell [16]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial(\varepsilon \vec{E})}{\partial t} \quad (4.3.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\varepsilon \vec{E}) = \rho \quad (4.3.2)$$

dove ε è la permittività del materiale, j è la densità di corrente di conduzione e ρ è la densità di carica di spazio. In questo caso è possibile trascurare gli effetti induttivi, quindi:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (4.3.3)$$

I due casi limite di distribuzione del campo, capacitiva e resistiva, sono associati rispettivamente alle seguenti condizioni:

$$\vec{\nabla} \cdot (\varepsilon \vec{E}) = 0 \quad (4.3.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (4.3.5)$$

Infatti, la distribuzione di tipo capacitivo prevede assenza di carica di spazio, al contrario di quanto accade per la distribuzione di tipo resistivo. Infatti, le seguenti equazioni:

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\vec{j} + \frac{\partial(\varepsilon \vec{E})}{\partial t} \right) = 0 \quad (4.3.6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\varepsilon \vec{E}) = 0 \quad (4.3.7)$$

solitamente non possono essere soddisfatte contemporaneamente. Inoltre, per comprendere il comportamento dinamico del campo elettrico, è utile combinare le equazioni (4.3.1) e (4.3.2), ottenendo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{\rho}{\tau_M} + \vec{j} \cdot \vec{\nabla} \ln(\tau_M) \quad (4.3.8)$$

dove $\tau_M = \epsilon/\sigma$. Nei materiali lineari, dove σ è indipendente dal campo elettrico, τ_M rappresenta il tempo di rilassamento della carica di spazio fino a un valore stabile; il valore $1/\tau_M$ può essere interpretato come la frequenza caratteristica di transizione da comportamento resistivo e capacitivo in AC. In termini pratici, τ_M rappresenta il tempo caratteristico di rilassamento del gradiente dopo un impulso di tensione.

Riassumendo, distribuzioni di campo capacitive sono presenti quando la corrente di spostamento è dominante e la carica di spazio non ha tempo sufficiente per accumularsi, cioè per $t \ll \tau_M$ e $\rho \approx 0$. Invece, il campo assume caratteristiche resistive quando domina la corrente di conduzione e la carica di spazio riesce ad acquisire una distribuzione stabile, cioè per $t \gg \tau_M$ e $\rho \approx \epsilon \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \ln(\tau_M)$.

Dato che si desidera controllare il campo elettrico con l'obiettivo di evitare guasti, quindi flashover, perforazioni, instabilità termica e/o invecchiamento precoce dovuto a scariche parziali o infiltrazioni di acqua, è utile specificare che esistono due modalità di controllo del gradiente per mezzo di materiali varioresistivi:

- a) **CONTROLLO DI CAMPO LOCALE:** si ha in regime DC e consiste in una forte riduzione dello stress elettrico in zone localizzate, per esempio in prossimità dei bordi dello strato semiconduttivo o delle estremità degli elettrodi degli accessori. In tal caso l'azione del materiale varioresistivo può essere prolungata nel tempo, una volta garantita la ridotta entità delle perdite Joule.
- b) **CONTROLLO DI CAMPO GLOBALE:** si ha in occasione consiste nella riduzione dello stress elettrico tipicamente tra il 10% e il 20% in ampie regioni di spazio, per esempio sulla superficie dell'isolante del cavo o all'interno del passante di un trasformatore. In applicazioni AC, l'azione del materiale varioresistivo è limitata nel tempo a causa delle elevate perdite Joule; infatti, per poter resistere a stress impulsivi è richiesta un'elevata conducibilità. Più in generale, per tensioni applicate variabili nel tempo, come tensioni alternate e sovratensioni impulsive, sono coinvolte sia la componente di corrente resistiva sia quella capacitiva, cioè:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} \quad (4.3.9)$$

L'intera regione di spazio considerata è costituita sia da zone in cui il materiale varioresistivo è attivo, quindi sono presenti distribuzioni di campo resistive, sia da zone in cui il materiale varioresistivo non è attivo, quindi dominano distribuzioni di campo capacitive [16].

I materiali varioresistivi possono essere denominati anche con l'espressione "ad alta permittività", poiché agiscono attraverso un controllo del campo di tipo refrattario, come sarà evidenziato in riferimento ai campioni esaminati in questa trattazione: in sostanza, la capacità di accumulare carica di spazio e quindi di mostrare una polarizzazione, si riflette su un elevato valore della costante dielettrica relativa, infatti, considerando il campo spostamento elettrico si ha:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (4.3.10)$$

Di conseguenza, la ridistribuzione delle linee equipotenziali risulta fortemente influenzata dalla differenza tra l'alta permittività relativa del materiale varioresistivo e quella dei materiali ad esso adiacenti, generalmente minore. Per poter comprendere meglio l'effetto generato da tale differenza, si possono considerare le condizioni di raccordo per il campo spostamento all'interfaccia tra due diversi materiali:

$$\vec{D}_1 = \vec{D}_2 \rightarrow \epsilon_1 \vec{E}_1 = \epsilon_2 \vec{E}_2 \quad (4.3.11)$$

Risulta dunque evidente che se ϵ_2 è significativamente maggiore di ϵ_1 , allora E_2 sarà molto minore di E_1 . In altre parole il materiale 2 assumerà un comportamento refrattario rispetto alle linee equipotenziali, lasciando che il campo elettrico insista soprattutto sul materiale 1.

4.3.1 Caratteristiche principali

Come anticipato, la caratteristica che rende un materiale varioresistivo risiede nella variazione della sua conducibilità in funzione dell'intensità del campo elettrico al quale esso è sottoposto. Per

fare in modo che il un materiale presenti tale peculiarità, è necessario diffondere in una matrice a base polimerica un additivo conduttivo che costituisca vie di percolazione per gli elettroni. Dunque, oltre alla soglia di campo elettrico menzionata in precedenza, si parla di soglia di percolazione, cioè un particolare valore di concentrazione di additivo con cui caricare la matrice polimerica tale per cui sia osservabile una variazione di conducibilità elettrica, una volta superata la soglia di gradiente. Per esempio, in [17], *Martensson* analizza una matrice polimerica di tipo EPDM additivata con carburo di silicio (SiC) e ne calcola la conducibilità del materiale in funzione della percentuale in volume di additivo inserita.

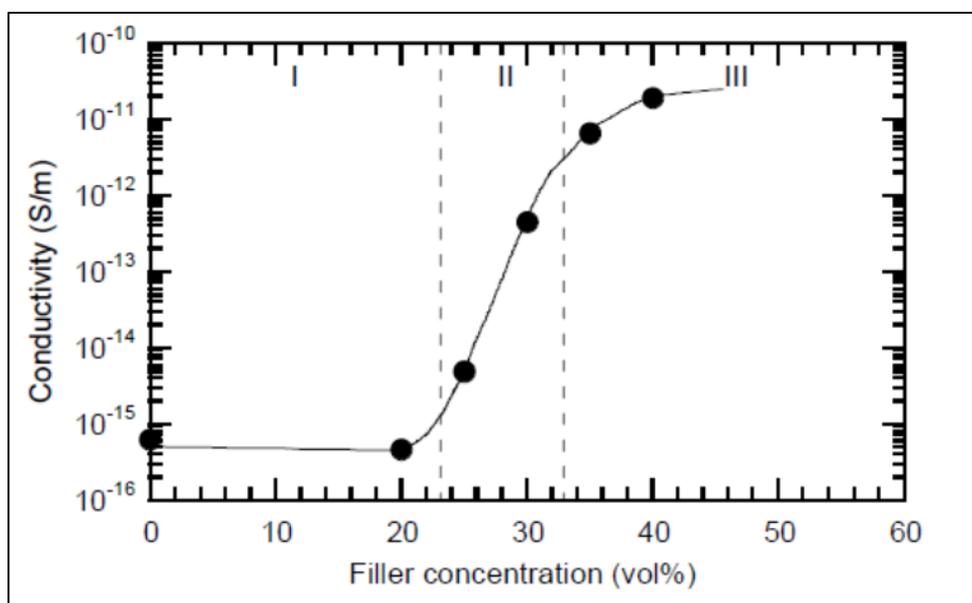


Figura 4.8 - Variazione della conducibilità elettrica in funzione della concentrazione in volume dell'additivo [17]

Analizzando il grafico riportato in Figura 4.8 si distinguono tre zone: la prima, in cui la conducibilità elettrica rimane sostanzialmente invariata all'aumentare dell'additivo e il comportamento è analogo a quello di un isolante, una seconda in cui si ha un notevole incremento in corrispondenza di una concentrazione in volume del 30% e una terza in cui tale aumento si rende meno evidente stabilizzando la conducibilità tra 10^{-11} e 10^{-10} S/m. Nell'esempio non appena mostrato è presente una sola soglia di percolazione, tuttavia esistono casi in cui si notano più soglie di percolazione e più modalità di contatto tra le particelle di additivo, per esempio contatti di bordo, di spigolo o di superficie; maggiore è il numero di additivi e di modalità di contatto, maggiore sarà il numero di

soglie di percolazione osservabili. Così come indicato in Figura 4.8, per concentrazioni di additivo inferiori al 30% in volume non si può apprezzare un incremento considerevole della conducibilità elettrica; in particolare, *Gao et al.* sostengono in [18] che sia addirittura necessario adottare concentrazioni superiori al 30% per poter creare vie di percolazione, come mostra la Figura 4.9. Naturalmente, all'aumentare della concentrazione in volume di microvaristori, il valore di soglia del campo elettrico diminuisce rapidamente.

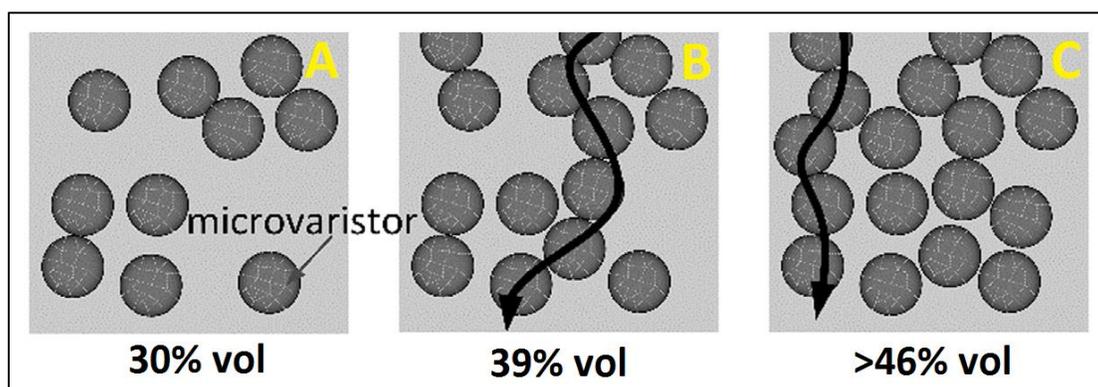


Figura 4.9 - Generazione delle vie di percolazione in funzione della concentrazione in volume di additivo conduttivo [18]

Sempre in relazione al valore di soglia di percolazione, *Christen et al.* osservano in [16] che esso dipende anche dalle dimensioni dei grani che, in gruppo, formano le particelle di additivo. Infatti, maggiori sono le dimensioni dei grani, minori sono i bordi attivi necessari per formare una percolazione e quindi minore risulta il valore di soglia. Le dimensioni dei grani possono essere determinate da due fattori: dalla temperatura raggiunta in sede di sinterizzazione (minore è la temperatura di sinterizzazione, maggiore sarà la soglia), oppure dalla presenza o meno di agenti chimici nella miscela che hanno la capacità di aumentare le dimensioni dei grani delle particelle di additivo. Ancora, in [16] (Christen) si evidenzia che per quanto riguarda le origini della non linearità, essa può essere originata o dal contatto tra le particelle dell'additivo, come nel caso del carburo di silicio, oppure dall'additivo stesso, presentante caratteristica non lineare già prima di essere inserito nella matrice polimerica, come accade per l'ossido di zinco (ZnO). I due composti ora citati costituiscono gli additivi più diffusi e studiati per ottenere materiali varioresistivi per applicazioni in HVDC; in particolare, le particelle di ossido di zinco definite in letteratura con “microvaristori”

mostrano alcune caratteristiche che le rendono questo materiale preferibile rispetto al carburo di silicio:

- a) presentano una maggiore resistività a parità di gradiente, quindi comportano minori perdite per effetto Joule, per valori di campo elettrico inferiori alla zona di transizione;
- b) mostrano una zona di transizione in funzione del gradiente più ristretta, quindi una variazione di conducibilità più brusca;
- c) sono caratterizzati da una permittività relativa più elevata, dunque l'azione refrattaria si rende più efficace, migliorando il controllo di campo;
- d) una volta superata la zona di transizione, presentano valori di conducibilità più elevati, grazie alla rugosità della superficie, che massimizza il numero di contatti tra particelle adiacenti, come si può notare in Figura 4.10.

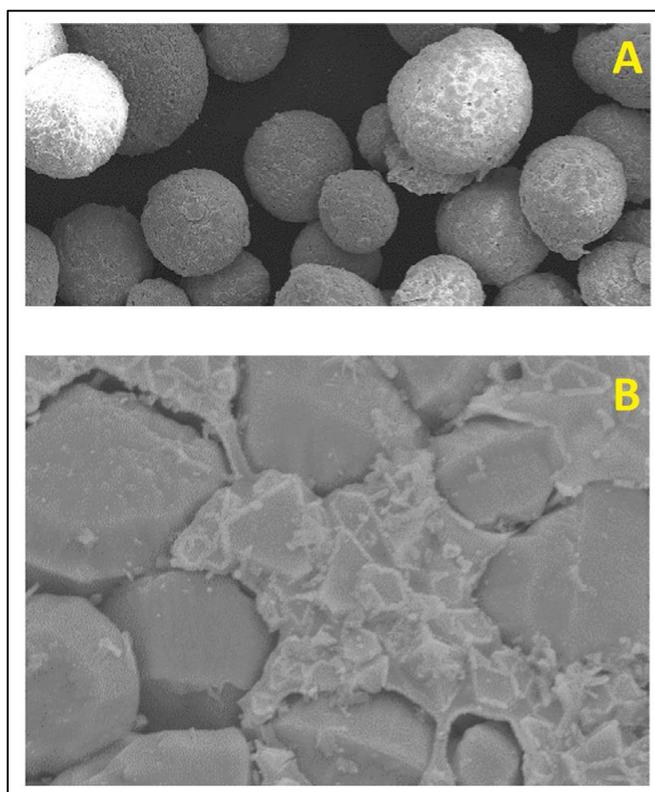


Figura 4.10 - A) microvaristori di ZnO; B) dettaglio della superficie di un microvaristore [18]

Produrre composti a base elastomerica additivati con microvaristori di ZnO è un'operazione complessa che richiede tecniche di processo e macchinari avanzati. Fondamentalmente, una mi-

scela acquosa comprendente ossido di zinco, bismuto, cobalto, antimonio e manganese viene dapprima fatta essiccare per produrre granelli di varistori; successivamente, questi sono ridotti a dimensioni micrometriche per mezzo di un processo di sinterizzazione a temperatura tra 900 e 1300°C seguito da un setacciamento atto a separare le particelle di dimensioni maggiori da quelle di diametro compreso tra 3 e 300 μm . La polvere ottenuta viene dunque inserita in una matrice polimerica attraverso un macchinario per la diffusione ad alta velocità prima dello stampaggio finale del materiale varioresistivo, le cui proprietà elettriche dipendono, come già anticipato, dalla temperatura di sinterizzazione, dalla natura degli additivi, dalle dimensioni e dalla forma dei microvaristori e dalla configurazione spaziale che essi assumono una volta diffusi all'interno del polimero.

4.3.2 Risultati della prova di rigidità dielettrica

Anche per quanto riguarda i materiali varioresistivi, le misure di conducibilità sono state precedute da una prova di rigidità su provini piani per valutarne i limiti prestazionali in termini di gradiente massimo sostenibile in corrente continua. In Tabella 4.11 sono riportati i valori registrati su 12 diversi campioni.

provino	s [mm]	V [kV]	G [kV/mm]
1	0,70	8,0	11,4
2	0,80	7,0	8,7
3	0,50	5,5	11,0
4	0,55	7,5	13,6
5	0,65	6,5	10,0
6	0,60	4,0	6,7
7	0,80	7,5	9,4
8	0,70	6,5	9,3
9	0,55	4,5	8,2
10	0,70	8,5	12,1
11	0,65	5,0	7,7
12	0,75	7,0	9,3

Tabella 4.11 - Risultati della prova di rigidità dielettrica su provini piani di materiale varioresistivo

A tale analisi è seguita una valutazione statistica per mezzo della distribuzione di probabilità cumulata di Weibull a 2 parametri, il cui grafico in scala logaritmica è rappresentato in Figura 4.11.

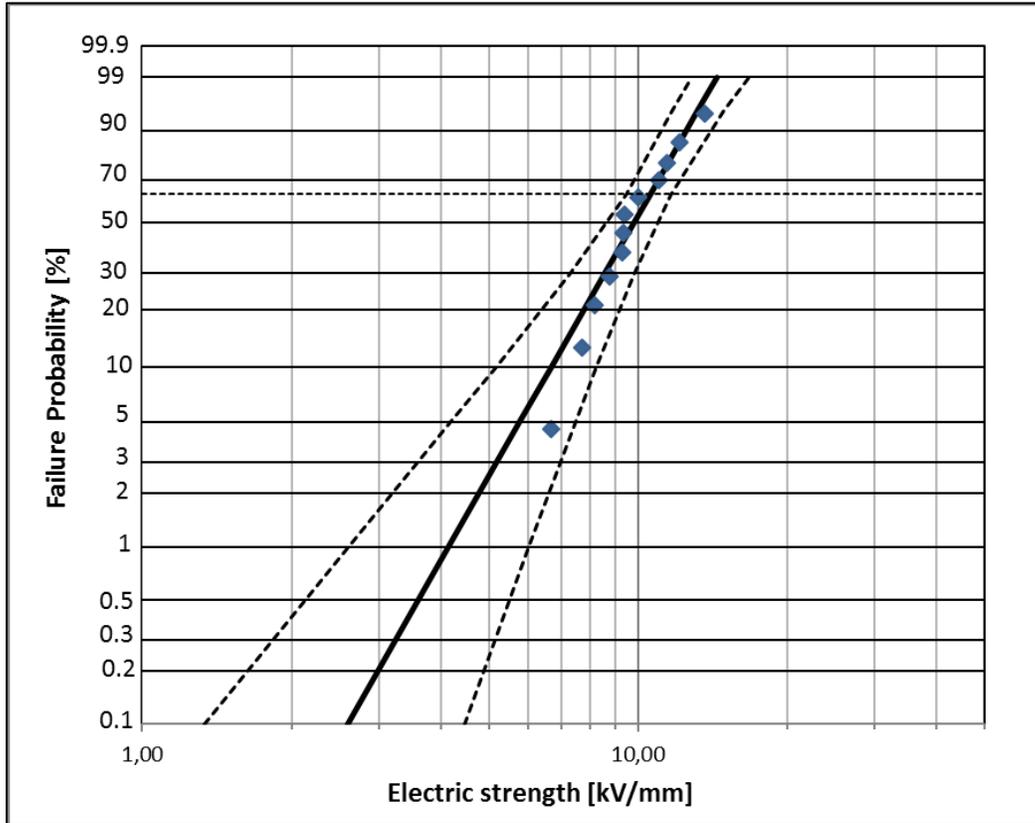


Figura 4.11 - Carta di Weibull relativa ai dati della Tabella 4.11

Dall'analisi statistica sono stati ricavati un fattore di scala α pari a 10,6 kV/mm e un fattore di forma β pari a 4,93. Come previsto, la rigidità dielettrica risulta notevolmente inferiore rispetto a quella registrata su provini in EPR, a causa della presenza di un additivo conduttivo, il quale naturalmente agevola il flusso di corrente. Per quanto riguarda il fattore di forma, esso risulta inferiore rispetto a quello relativo ai materiali isolanti: una maggiore dispersione dei risultati è senz'giustificabile, infatti il materiale varioresistivo è sicuramente meno omogeneo rispetto a un materiale isolante, in quanto viene prodotto diffondendo una polvere conduttiva all'interno di una matrice elastomerica; è altamente improbabile che il processo di diffusione conduca sempre allo stesso

livello di dispersione della polvere all'interno della matrice, quindi i campioni esaminati mostrano concentrazioni diverse di additivo conduttivo in corrispondenza della zona interessata dalla scarica. Allo stesso modo, il fattore di scala è stato moltiplicato per il coefficiente di sicurezza K citato in precedenza, ottenendo come valore limite per il gradiente applicabile in fase di misura della conducibilità 9,5 kV/mm. In questo caso, data la forte riduzione del gradiente massimo di scarica registrata rispetto ai materiali isolanti, la prova di rigidità dielettrica è stata affrontata anche per i provini cilindrici; i risultati sono riportati nella Tabella 4.12 e il grafico della distribuzione di probabilità cumulata in Figura 4.12.

provino	D [mm]	d [mm]	V [kV]	G [kV/mm]
1	22,1	16	43,0	14,1
2	22,5	16	50,0	15,4
3	22,3	16	41,5	13,2
4	22,0	16	37,0	12,3
5	22,1	16	54,5	17,8
6	22,7	16	57,0	17,0
7	22,5	16	43,0	13,2
8	22,4	16	49,0	15,3
9	22,0	16	50,5	16,8
10	22,3	16	38,0	12,1
11	22,1	16	58,0	19,2
12	22,5	16	45,0	13,8

Tabella 4.12 - Risultati della prova di rigidità dielettrica su provini cilindrici di materiale varioresistivo

In questo caso il fattore di scala α risulta pari a 16 kV/mm, circa il 60% superiore rispetto al fattore di scala calcolato per provini piani. Questo dato indica già una grande disparità di prestazioni tra la configurazione piana e quella cilindrica. Per quanto riguarda il fattore di forma β , in questo caso risulta pari a 6,18, lievemente superiore a quello registrato su provini piani.

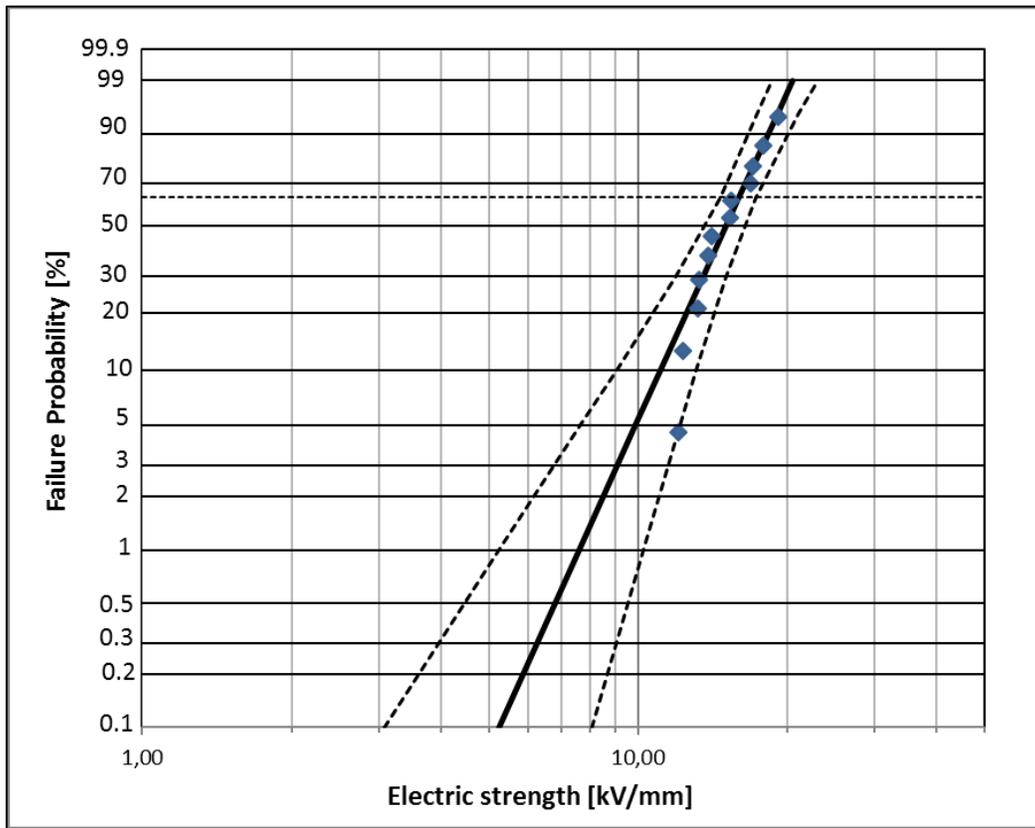


Figura 4.12 - Carta di Weibull relativa ai dati della Tabella 4.12

4.3.3 Risultati della misura di conducibilità

La misura di conducibilità riveste un ruolo di primaria importanza nella caratterizzazione elettrica dei materiali varioresistivi, in quanto consente di osservare entro quali valori di gradiente il materiale modifica le sue proprietà conduttive, quindi di comprendere se risulta idoneo all'applicazione su accessori full-size. Così come per i materiali isolanti, anche in questo caso sono stati adottati, per quanto possibile, i medesimi valori di gradiente sia per il provino piano, che per il provino cilindrico, in modo tale da poter paragonare in maniera efficace le prestazioni fornite dalle due configurazioni geometriche. I risultati della misura di conducibilità su provini piani sono riportati in Tabella 4.13 con gli stessi parametri indicati nelle prove precedenti.

S [cm ²]	s [mm]	dV [V]	R _s [MΩ]	R _x [Ω]	σ [1/Ωm]	G [kV/mm]	V [kV]
60	1,22	7,35·10 ⁻³	100	6,80·10 ¹²	2,99·10 ⁻¹⁴	0,4	0,5
60	1,22	5,0·10 ⁻²	100	1,98·10 ¹²	1,03·10 ⁻¹³	0,8	1,0
60	1,22	2,71	100	1,11·10 ¹¹	1,84·10 ⁻¹²	2,5	3,0
60	1,22	1,51	10	2,64·10 ¹⁰	7,68·10 ⁻¹²	3,3	4,0
60	1,22	11,40	10	5,26·10 ⁹	3,86·10 ⁻¹¹	4,9	6,0
60	1,22	2,52	1	3,57·10 ⁹	5,69·10 ⁻¹¹	7,4	9,0
60	1,22	15,80	1	6,96·10 ⁸	2,92·10 ⁻¹⁰	9,0	11,0

Tabella 4.13 - Risultati della misura di conducibilità su provino piano di materiale varioresistivo

Come previsto, all'aumentare del gradiente il materiale aumenta la sua conducibilità in maniera non lineare, dunque crescono la corrente che attraversa il materiale e di conseguenza la caduta di tensione che si instaura ai capi della resistenza in serie alla cella di misura R_s: per evitare che il multimetro rilevi differenze di potenziale di valore superiore al suo fondo scala, il valore di R_s è stato gradualmente diminuito nel corso della misura. Inoltre, in accordo con il limite di sicurezza calcolato grazie all'analisi statistica effettuata precedentemente sui risultati della prova di rigidità dielettrica, il gradiente massimo applicato è pari a 9 kV/mm. Per quanto concerne la configurazione cilindrica, i risultati sono elencati nella Tabella 4.14.

L [m]	D [mm]	d [mm]	dV [V]	R _s [MΩ]	R _x [Ω]	σ [1/Ωm]	G [kV/mm]	V [kV]
0,1	22,1	16	2,9·10 ⁻⁴	100	3,5·10 ¹⁴	1,49·10 ⁻¹⁵	0,3	1,0
0,1	22,1	16	5,9·10 ⁻⁴	100	3,4·10 ¹⁴	1,52·10 ⁻¹⁵	0,7	2,0
0,1	22,1	16	5,7·10 ⁻³	100	1,4·10 ¹⁴	3,66·10 ⁻¹⁵	2,6	8,0
0,1	22,1	16	2,1·10 ⁻²	100	7,1·10 ¹³	7,23·10 ⁻¹⁵	4,9	15,0
0,1	22,1	16	0,185	1	1,1·10 ¹¹	4,75·10 ⁻¹²	6,6	20,0
0,1	22,1	16	0,56	1	4,1·10 ¹⁰	1,25·10 ⁻¹¹	7,5	23,0
0,1	22,1	16	1,8	1	1,5·10 ¹⁰	3,43·10 ⁻¹¹	8,9	27,0

Tabella 4.14 - Risultati della misura di conducibilità su provino cilindrico di materiale varioresistivo

Osservando la Tabella 4.14, si nota che anche per il provino cilindrico è stato necessario modificare il valore di R_s durante la misura, per lo stesso motivo indicato nel caso del provino piano. Il grafico semilogaritmico mostrato in Figura 4.13 mostra i valori ottenuti dalle due configurazioni geometriche, a parità di gradiente.

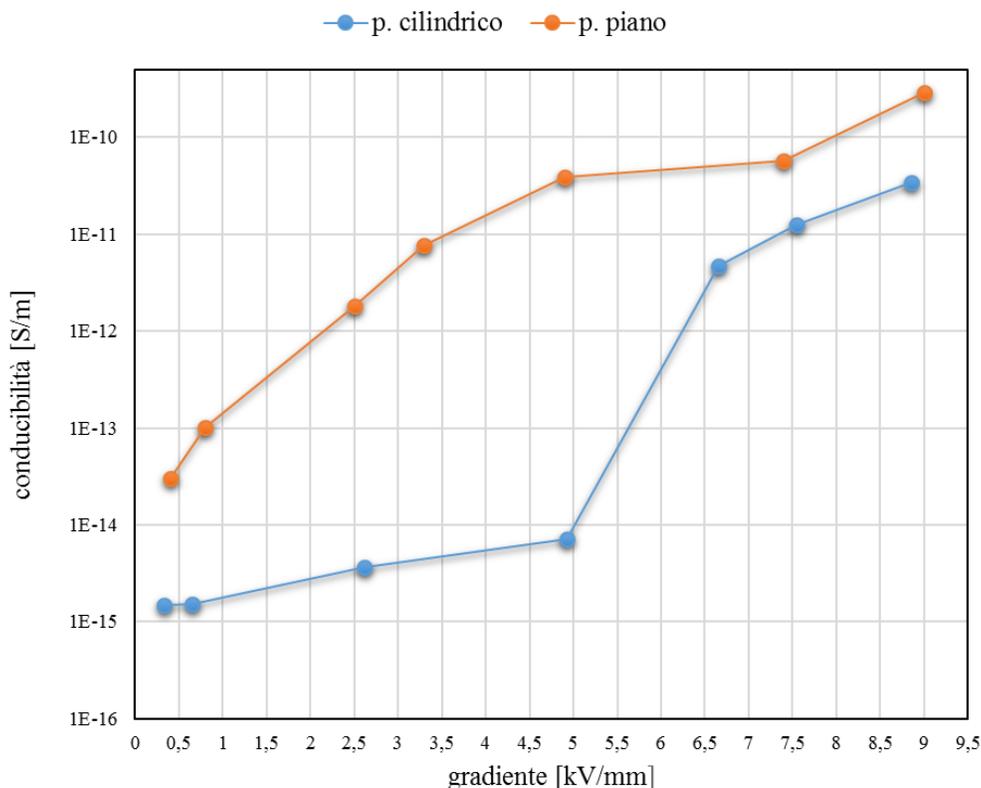


Figura 4.13 - Confronto tra i valori di conducibilità per le due tipologie di provino in funzione del gradiente

Come si può notare, la non linearità si manifesta sia nel provino piano, sia nel provino cilindrico, ma in modalità differenti: il primo mostra un rapido aumento di conducibilità da 0,4 kV/mm a 4,9 kV/mm che si smorza fino a 7,4 kV/mm per poi intensificarsi nuovamente: il secondo, invece, varia la propria conducibilità all'interno del medesimo ordine di grandezza fino a 4,9 kV/mm per poi evidenziare un salto di circa tre ordini di grandezza passando da $7,23 \cdot 10^{-15}$ S/m a $4,75 \cdot 10^{-12}$ S/m in corrispondenza di 6,6 kV/mm. Così come accade per i materiali isolanti e semiconduttivi, il provino cilindrico risulta sempre meno conduttivo, a causa del processo di produzione e della successiva espansione su supporto in acciaio; in questo caso la differenza risulta evidente non solo in termini di ordine di grandezza, ma anche di andamento in funzione del campo elettrico applicato.

4.3.4 Risultati della misura di permittività

In analogia con le misure effettuate su provini in materiale isolante, sono stati analizzati materiali varioresistivi di geometria piana e cilindrica a tre differenti gradienti a temperatura ambiente. La configurazione di prova e i parametri di misura sono i medesimi indicati in precedenza. I risultati inerenti al provino piano sono elencati in Tabella 4.15.

S [cm ²]	s [mm]	C _x [pF]	C ₀ [pF]	tanδ	ε _r	G [kV/mm]	V [kV]
56	0,75	969	66	0,14	14,6	0,7	0,5
56	0,75	1254	66	0,30	19,0	1,3	1,0
56	0,75	1492	66	0,49	22,6	2,0	1,5

Tabella 4.15 - Risultati della misura di permittività su provino piano di materiale varioresistivo

Paragonando i risultati non appena forniti a quelli del provino in EPR, si nota un peggioramento consistente del fattore di dissipazione, dovuto a un aumento importante della capacità, la quale è a sua volta incrementata dalla permittività relativa. Quest'ultima risulta elevata a causa della presenza dell'additivo conduttivo, che contribuisce in maniera rilevante ai fenomeni di polarizzazione, i quali si rendono più evidenti all'aumentare del gradiente, fenomeno non apprezzabile nei materiali isolanti. Nella Tabella 4.16 si riportano i valori ricavati dal provino cilindrico.

L [m]	D [mm]	d [mm]	C _x [pF]	tanδ	ε _r	G [kV/mm]	V [kV]
0,1	26,3	16,2	82,9	$3,70 \cdot 10^{-2}$	7,2	0,7	2,8
0,1	26,3	16,2	83,0	$3,81 \cdot 10^{-2}$	7,2	1,3	5,0
0,1	26,3	16,2	83,4	$4,16 \cdot 10^{-2}$	7,2	2,0	7,7

Tabella 4.16 - Risultati della misura di permittività su provino cilindrico di materiale varioresistivo

I dati forniti dal provino cilindrico, a parità di gradiente, possono essere giustificati secondo le seguenti considerazioni:

1. Rispetto a quanto osservato sul provino piano, la costante dielettrica risulta evidentemente diminuita e rimane costante all'aumentare del gradiente. Questo è dovuto a una maggiore

- dispersione dell'additivo all'interno della matrice polimerica, quindi a una minore concentrazione per unità di volume; di conseguenza le particelle conduttive formano molte meno vie di percolazione per la corrente, limitando la risposta in termini di polarizzazione.
2. Anche la capacità e il fattore di dissipazione raggiungono valori inferiori rispetto a quelli ricavati dalla geometria piana, in accordo con quanto affermato in precedenza, ma superiori se paragonati al provino cilindrico isolante, il quale, non essendo provvisto di additivo conduttivo, presenta perdite per effetto Joule più contenute.

4.3.5 Simulazioni numeriche

Nel caso dei materiali varioresistivi, sono state sviluppate simulazioni numeriche relative alla distribuzione delle linee equipotenziali al variare sia della conducibilità del materiale, sia del gradiente ad esso applicato, in una configurazione standard di un giunto full-size per applicazioni HVDC, per evidenziare l'azione di controllo di campo di tipo refrattario. In particolare, sono stati implementati nel software di simulazione i dati ricavati dal provino cilindrico, cioè dal campione presentante la geometria più simile a quella adottata per la realizzazione dell'accessorio. Per simulare i componenti isolanti del cavo e del giunto è stato fatto riferimento alle proprietà elettriche del polietilene reticolato (XLPE) e della gomma elastomerica EPR. La Figura 4.14 mostra la disposizione delle linee equipotenziali in assenza e in presenza del materiale varioresistivo all'interno dell'accessorio, evidenziando, in riferimento al secondo caso, l'azione di controllo di tipo refrattario all'aumentare della conducibilità elettrica con il gradiente.

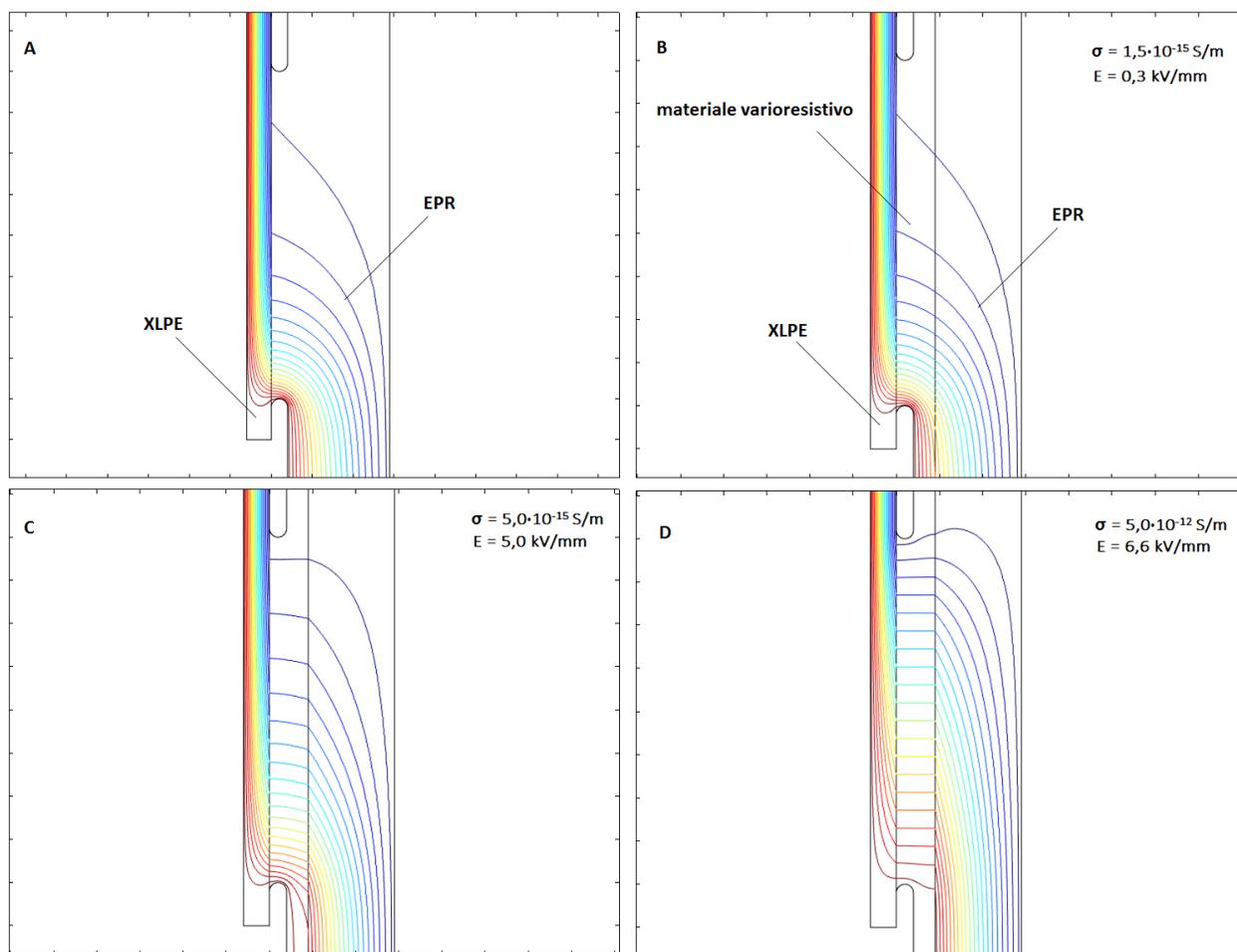


Figura 4.14 - Simulazione della distribuzione di linee equipotenziali in un giunto in assenza e in presenza di materiale varioresistivo

Confrontando in particolare i casi A e B, risulta evidente come la presenza del materiale varioresistivo non apporti alcuna miglioria nella distribuzione delle linee equipotenziali nel caso in cui esso sia caratterizzato da una conducibilità elettrica sostanzialmente equivalente a quella dell'isolante dell'accessorio; l'azione di controllo del gradiente si manifesta solo nel caso in cui si realizzi una differenza non trascurabile in riferimento a tale proprietà tra i due componenti presi in esame.

Capitolo 5

Validazione dei risultati sperimentali su sistema full-size

Al termine delle prove elettriche descritte nei capitoli precedenti, sono stati realizzati dei modelli in scala degli accessori, i quali hanno superato in maniera soddisfacente sia prove in temperatura consistenti in una serie di cicli termici a tre diversi gradienti, sia prove a impulso sovrapposto. Tali esperienze di laboratorio hanno completato la serie delle prove definite “di sviluppo” dalla norma CIGRE TB 496 [9]. Sulla base degli ottimi risultati forniti dalle prove di sviluppo, si è scelto di proseguire la qualifica con una prova di tipo su un sistema per convertitore di tipo VSC, costituito da un cavo con conduttore in alluminio avente una sezione pari a 2500 mm² isolato in XLPE per la classe di tensione 600 kV in corrente continua. In questo caso la prova di tipo ha preceduto la prova di prequalifica; ciò è apparso conveniente in quanto sottoporre dapprima il sistema a livelli di tensione più gravosi consente di valutare le prestazioni limite del prodotto finito ed effettuare una previsione attendibile sull’esito della prova di prequalifica, più onerosa in termini temporali e

soprattutto economici in caso di mancato superamento. Nei paragrafi seguenti si fa particolare riferimento alle prove termiche, alle prove di tenuta a impulso sovrapposto e alla successiva prova in corrente continua.

5.1 Configurazione circuitale della prova

Il circuito ha compreso, oltre a una lunghezza di cavo pari a 56 m, due giunti e due terminazioni per esterno in SF₆ da qualificare realizzati con i materiali esaminati nel capitolo 3 e contrassegnati in Figura 5.2 rispettivamente dalle lettere A e C, e un giunto di laboratorio, indicato con la lettera B. In Figura 5.3 è fornito un dettaglio della componente interna della terminazione per esterno: la foto è stata acquisita durante la fase finale di “visual examination” prevista dalle norme. In conformità al paragrafo 4.2 della CIGRE TB 496 [9], la suddivisione del circuito ha previsto le seguenti specifiche:

- 21,5 m di cavo tra le terminazioni e il primo giunto da qualificare;
- 7,5 m di cavo tra il primo giunto da qualificare e il giunto di laboratorio;
- 16 m di cavo tra il giunto di laboratorio e il secondo giunto da qualificare;
- 11 m di cavo tra il secondo giunto da qualificare e le terminazioni.

5.2 Cicli termici

Lo schema del circuito di prova riferito ai cicli termici è riportato in Figura 5.1. Come si può notare, sono stati utilizzati un generatore di tensione con sistema di messa a terra e un generatore di corrente, contrassegnati in Figura 5.3 rispettivamente dalle lettere D ed E; il primo ha il compito di applicare la tensione tra il conduttore e lo schermo esterno del cavo, mentre il secondo viene impiegato per il riscaldamento. Infatti, il generatore di corrente continua è costituito da un sistema oleodinamico comprendente una pompa, la quale movimentata l'olio per trasferire il moto a una dinamo.

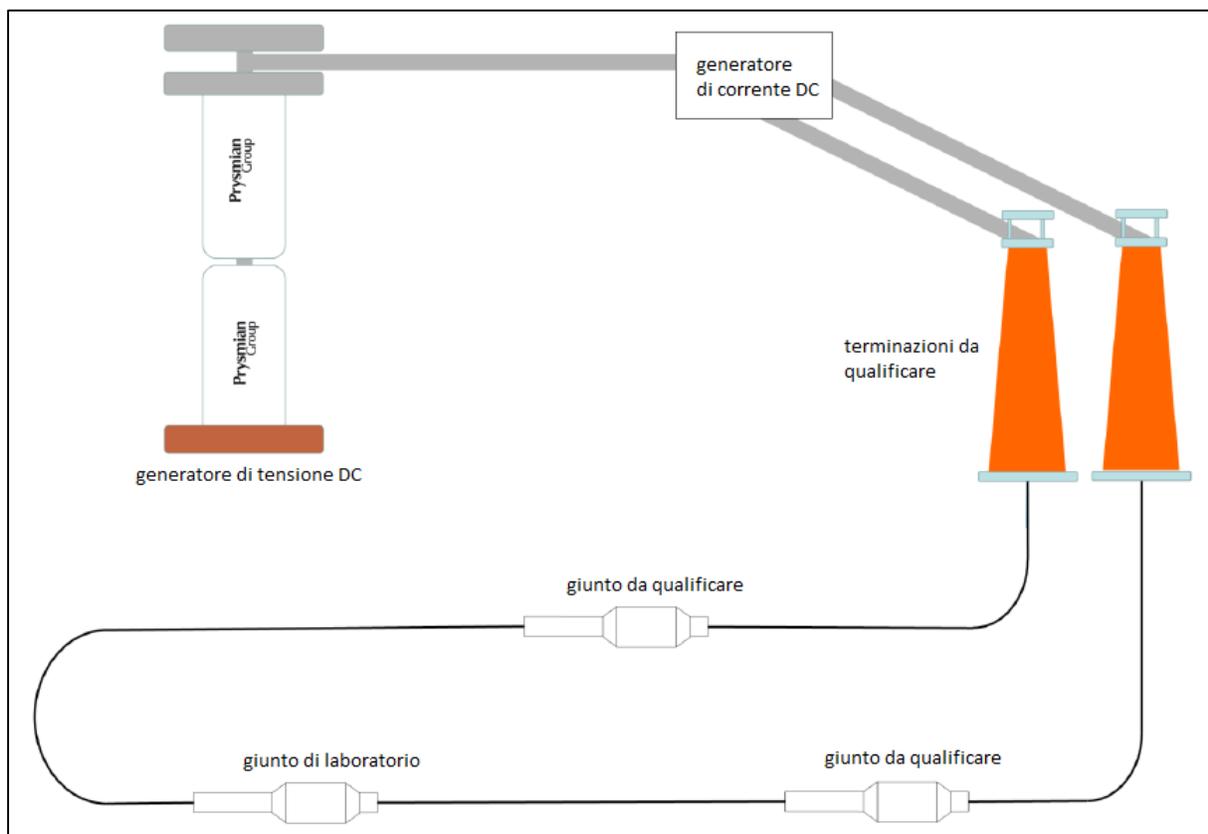


Figura 5.1 - Schema circuitale adottato per i cicli termici
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

La tensione DC generata dalla dinamo consente la circolazione di una corrente continua che causa un aumento di temperatura nel conduttore. I cicli termici sono stati applicati secondo le modalità specificate dalla norma CIGRE TB 496 [9] e riportate nel paragrafo 2.4.3 di questa trattazione. Ogni ciclo termico è costituito da 8 ore di riscaldamento seguite da 16 ore di raffreddamento a temperatura ambiente. Durante almeno le ultime 2 ore di ciascun periodo di riscaldamento è necessario mantenere sul conduttore una temperatura T_{cond} pari o superiore alla temperatura massima di progetto e una differenza di temperatura ΔT tra la superficie interna ed esterna dell'isolante pari o superiore alla differenza di temperatura massima ammissibile in condizioni stazionarie di servizio [9].



Figura 5.2 - Componenti del circuito di prova adottato per i cicli termici
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)



Fig. 5.3 - Componente interna di una delle terminazioni per esterno in qualifica
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

5.3 Prove di tenuta a impulso sovrapposto

Le prove di tenuta a impulso sovrapposto hanno previsto l'applicazione sia di impulsi di manovra, sia di impulsi di tipo atmosferico. Come già indicato nel paragrafo 2.4.3, la norma CIGRE TB 496 [9] prevede serie di 10 impulsi sovrapposti in polarità uguale od opposta alla tensione continua applicata. Per entrambe le tipologie di impulso è stata considerata la procedura seguente:

1. Determinazione dei parametri temporali dell'impulso (tempo di salita T_1 e tempo all'emivalue T_2) con generatore di tensione continua disconnesso o impostato su una tensione nulla e con la capacità di blocco o lo "spark gap" in cortocircuito, come indicato nella sezione 8.3 della norma IEC 60230 (Ed.2) [19];
2. Applicazione della tensione nominale in polarità positiva o negativa per almeno 10 ore a T_{cond} e con salto termico sull'isolante pari a ΔT ;
3. Calibrazione del generatore di impulsi tramite applicazione di sovratensioni impulsive al 50%, 65% e 85% del valore di tensione richiesto per la prova [19];
4. Applicazione di 10 impulsi consecutivi attendendo tra un impulso e il successivo un intervallo di tempo sufficiente ad assicurare la carica del generatore di impulsi alla tensione corretta.

In riferimento a quanto esposto al punto 1, se la tensione continua e l'impulso sono caratterizzati dalla medesima polarità, viene preferita la capacità di blocco al sistema "spark gap", poiché quest'ultimo richiede particolare attenzione nel distanziare le sfere per evitare flashover causato dalla tensione continua. Il circuito di prova con capacità di blocco è mostrato in Figura 5.4.

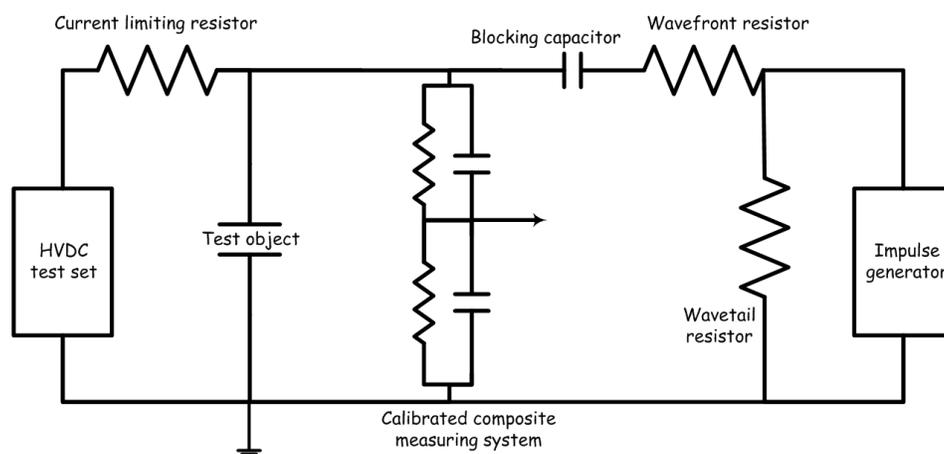


Figura 5.4 - Circuito elettrico per la prova di tenuta a impulso sovrapposto con capacità di blocco [19]

Nel caso in cui la tensione continua e l'impulso abbiano polarità opposte, si ricorre al sistema "spark gap", il quale necessita di una tensione applicata dal generatore a impulso minore rispetto a quella richiesta in presenza della capacità di blocco, a causa della caduta di tensione sulla capacità stessa. Il circuito di prova con il sistema "spark gap" è illustrato in Figura 5.5.

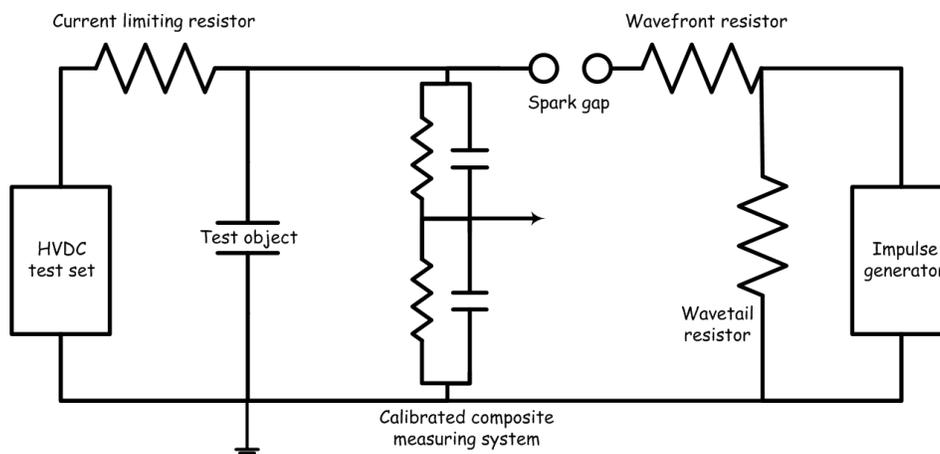


Figura 5.5 - Circuito elettrico per la prova di tenuta a impulso sovrapposto con sistema "spark gap" [19]

5.4 Prova in corrente continua e ispezioni visive

Dopo il completamento delle prove di tenuta a impulso sovrapposto, il sistema, dopo un raffreddamento a temperatura ambiente di almeno 24 ore, è stato sottoposto per 2 ore a una tensione pari a 1,85 volte la tensione nominale in polarità negativa. Successivamente, gli accessori sono stati rimossi dal cavo e sezionati per effettuare ispezioni visive sui vari componenti, dalle quali non sono emersi segni di deterioramento tali da poter inficiare le prestazioni del sistema in condizioni di servizio. Per quanto riguarda il cavo, una porzione di lunghezza pari a 300 mm è stata rimossa e suddivisa in tre parti; queste ultime, una volta estratto il conduttore, sono state introdotte in una stufa a convezione forzata e riscaldate fino a rendere l'isolamento trasparente, in modo tale da poter esaminare la superficie degli strati semiconduttivi interno ed esterno, come indicato in Figura 5.6.



Figura 5.6 - Porzioni di cavo sezionato per ispezione visiva
(per gentile concessione di Prysmian S.p.A.)

Anche in questo caso l'ispezione condotta non ha rilevato danneggiamenti né all'interno dell'isolante, né sulla superficie degli schermi semiconduttivi, dunque la prova ha avuto esito positivo.

Capitolo 6

Conclusioni

Lo studio parallelo delle proprietà elettriche relative ai modelli piano e cilindrico cavo in funzione dell'intensità del campo elettrico ha permesso di evidenziare una disparità di comportamento finora sconosciuta; ciò è stato possibile in quanto la necessità di provvedere al controllo e alla distribuzione del gradiente in regime DC attraverso metodologie alternative rispetto a quelle consolidate per i sistemi in AC ha condotto allo sviluppo di una nuova categoria di materiali, denominati varioresistivi. Come descritto nel capitolo 4, essi comprendono una matrice polimerica nella quale è inserito un additivo conduttivo in opportuna concentrazione: in tali condizioni è parso necessario valutare l'influenza del processo di produzione dei modelli e della conseguente configurazione geometrica sul grado di dispersione dell'additivo attraverso una caratterizzazione di tipo elettrico. I risultati del tutto inattesi hanno indotto l'estensione del processo di caratterizzazione ai materiali isolanti e semiconduttivi, che hanno confermato, seppur in termini differenti, le discrepanze emerse

tra le due configurazioni geometriche. Dunque, le evidenze sperimentali registrate in questa trattazione pongono considerevoli interrogativi sull'attendibilità dei valori estrapolati dai provini a geometria piana. Inoltre, lo studio effettuato suggerisce una serie di ulteriori approfondimenti nella valutazione delle proprietà elettriche, termiche e meccaniche relative a materiali che costituiranno gli accessori per i sistemi in cavo di nuova generazione operanti in regime DC.

Infine, a conferma della validità dei modelli fisici e di calcolo predisposti e delle modalità di prova definite in questa trattazione, l'esito positivo della prova di tipo descritta nel capitolo 5 ha permesso al gruppo Prysmian di qualificare un sistema in cavo completo di accessori per la classe di tensione 600 kV HVDC. Pertanto, le indicazioni fornite rispetto ai modelli, alle simulazioni numeriche e alle configurazioni di misura verranno integrate in un protocollo aziendale per la validazione di futuri sviluppi e ricerche nell'ambito dei sistemi HVDC.

Bibliografia

- [1] M. Guarnieri: *The Alternating Evolution of DC Power Transmission* - IEEE Industrial Electronic Magazine, September 2013
- [2] N. N.: *High Voltage Direct Current Transmission* - Siemens
- [3] G. Ceresini: *Guida ai sistemi di trasmissione ad alta tensione in corrente continua* - Voltimum Italia S.r.l.
- [4] R. Hamerly: *Direct Current Transmission Lines* - Stanford University, 2010
- [5] H. Wang, M. Redfern: *The advantages and disadvantages of using HVDC to interconnect AC networks* - University of Bath, 2010
- [6] P. Bresesti, W.L. King, R.L. Hendriks, R. Vailati: *HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System* - IEEE Transactions on Energy Conversion, April 2007
- [7] E. Peschke, R. von Olshausen: *Cable Systems for High and Extra-High Voltage: development, manufacture, testing, installation, and operation of cables and their accessories* - Publicis MCD Vlg., 1999
- [8] B. Parmigiani: *Accessories for underground and submarine cable systems* - Prysmian S.p.A, June 2013
- [9] CIGRE Technical Brochure 496: *Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV*, 2003
- [10] P. Argaut, E. Zaccone: *Cable System Accessories - EPRI Undergorund Transmission Systems Reference Book, Chapter 8* - Electric Power Research Institute, March 2007
- [11] J.C. Fothergill, R.N. Hampton: *Polymer insulated power cable - Advances in high voltage engineering*, Chapter 10 - IET, London, 2004
- [12] D. Quaggia, P. Boffi: *Development of Joints and Terminations for HVDC extruded cables* - INMR World Congress, 2015
- [13] L.A. Dissado, J.C. Fothergill: *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers* - IET, 1992
- [14] L. Simoni: *Ingegneria dei materiali elettrici vol.1. Proprietà dielettriche e scarica dei materiali isolanti elettrici* - CLUEB, 1996

- [15] J.G. Webster, H. Eren: *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook* - CRC Press, 2014
- [16] T. Christen, L. Donzel, F. Greuter: *Nonlinear Resistive Electric Field Grading Part 1: Theory and Simulation* - IEEE Electrical Insulation Magazine, November/December 2010
- [17] E. Martensson: *Modelling electrical properties of composite materials* - Doctoral Thesis - Elektrotekniska system, 2003
- [18] L. Gao, X. Yang, J. Hu, J. He: *ZnO microvaristors doped polymer composites with electrical field dependent nonlinear conductive and dielectric characteristics* - Tsinghua University, Beijing, 2016
- [19] IEC 60230 Ed. 2 - *Impulse tests on cables and their accessories*, 2016
- [20] M. Marzinotto, M. Albertini, L. Bernard, F. Charles, P. Honda, M. Mammeri, M. Pazienza, K. Tardy - *Cable system qualification process for the Italy-France HVDC intertie*, CIGRE, 2016
- [21] IEC 60287-1-1 Ed.2 - *Electric cables - Calculation of the current rating Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses - General*, 2006