

Appunti dalle lezioni del corso di

MODELLISTICA ELETTROMAGNETICA DEI MATERIALI

(prof G. Lupò)

CAPITOLO VIII

CONDUZIONE E SCARICA NEI DIELETTRICI SOLIDI

§VIII.1 Introduzione

Il comportamento di un materiale solido isolante, con riferimento alle sollecitazioni di tipo elettromagnetico, dipende da fattori ben più numerosi di quelli di cui bisogna tener conto in presenza di un isolamento gassoso o liquido. I principali fattori che portano al cedimento dell'isolamento sono:

- l'intensità ed il tipo di sollecitazione elettrica applicata: nel caso di sollecitazione stazionaria si possono avere processi elettrochimici dannosi, nel caso di sollecitazione periodica possono aver luogo riscaldamenti eccessivi, nel caso di sollecitazione impulsiva si può avere instabilità elettronica;
- la presenza di micro e macrodisomogeneità; esse determinano condizioni di lavoro molto diversificate all'interno del materiale;
- la presenza di sollecitazioni meccaniche e di cedimenti strutturali dovuti a sollecitazione meccanica;
- influenza della temperatura;
- influenza dell'umidità
- inclusioni gassose;
- presenza di superfici di discontinuità solido/solido, solido/liquido, solido/gas e difetti localizzati alle superfici;
- agenti contaminanti sulle superfici del materiale

§VIII.2 Classificazione dei meccanismi di scarica nei solidi

Per quanto detto in precedenza, la presenza di disomogeneità e difetti di vario tipo nei materiali solidi isolanti non consente di individuare meccanismi validi in un vasto campo applicativo.

Tuttavia, si può tentare una classificazione dei meccanismi di scarica considerando inizialmente materiali ragionevolmente omogenei e con limitati difetti.

In tal caso, infatti, potremmo prendere in considerazione la durata della sollecitazione elettrica applicata, considerando di non dover considerare sollecitazioni di altro tipo applicate dall'esterno.

La sollecitazione applicata potrebbe variare, come già sappiamo dai microsecondi (onde di sovratensioni "brevi") agli anni. E' ben verosimile che per tempi lunghi interviene l'"invecchiamento" del materiale a causa di fattori esterni o strutturali.

Fissato un materiale, potremo individuare una sollecitazione "di soglia" (in termini di tensione o di campo elettrico) al disotto della quale i processi di degrado del materiale si possono ragionevolmente non ascrivere alla sollecitazione elettrica stessa. Tale sollecitazione cioè rappresenta la "tenuta" elettrica per *tempi di applicazione indefinitamente lunghi*. Essa pertanto, con un opportuno coefficiente di sicurezza, può essere associata alle condizioni di funzionamento di esercizio ad esempio degli impianti di distribuzione dell'energia elettrica.

Per tempi di applicazione della sollecitazione estremamente ridotti, tipici delle sollecitazioni impulsive a fronte *ripido* (1-100ns) o *breve* (1-100µs) si può ritenere che fenomeni di degrado fisico chimico non abbiano modo di svilupparsi, né si può pensare ad un riscaldamento consistente del materiale [le considerazioni di tipo termico saranno invece considerate in seguito come decisive per lo studio di processo di collasso nei solidi (*scarica termica*)]. In tali casi il processo di collasso avviene per azione diretta degli elettroni (*scarica intrinseca*) ovvero per improvvisa compressione di materiali deformabili (*collasso elettromeccanico*).

§VIII.2.1 Scarica intrinseca

Si definisce *scarica intrinseca* un processo di breakdown nel solido non dipendente da fenomeni termici, meccanici, di degrado fisico-chimico. Esso rappresenta un processo limite, identificabile in via teorica solo con applicazione

della sollecitazione elettrica per tempi estremamente brevi. La tensione di scarica intrinseca può assumere evidentemente valori molto elevati (il campo critico intrinseco può essere valutato dell'ordine di 10 MV/cm ed oltre).

La scarica intrinseca è legata a fenomeni di instabilità elettronica per i seguenti possibili motivi:

- formazione locali di valanghe a partire da elettroni liberi notevolmente accelerati dal campo elettrico, libero cammino medio ridotto rispetto al caso dei gas, ma collisioni ad alta energia con gli atomi del reticolo, aumento dell'energia interna ed estrazione di altri elettroni dagli atomi del reticolo, fusione del reticolo. Il campo critico può essere ritenuto corrispondente alla condizione limite di trasferimento al reticolo dell'energia acquisita dal singolo elettrone sotto l'azione del campo (*modello di Von Hippel*);
- interazioni tra elettroni: il *modello di Frohlich e Seitz* fa riferimento sempre all'energia ceduta al reticolo ma non dal singolo elettrone, ma dal complesso degli elettroni che in qualche modo interagiscono fra loro

Le diverse teorie sulla scarica intrinseca convergono allo stato sulle due ipotesi suddette, ossia sulla ipotesi della "valanga collettiva" (Von Hippel) e sulla ipotesi della "valanga singola" (Frohlich) ossia sulla formazione di una valanga di dimensioni critiche. Indagini sperimentali hanno supportato ora l'una, ora l'altra ipotesi, per cui è ragionevole pensare ad un "compromesso" tra le due.

Il modello della scarica intrinseca resta comunque poco assestato, essendo tra l'altro di scarso interesse ingegneristico. Infatti il meccanismo di scarica prevalente nei dielettrici solidi reali sembra essere quello termico. Comunque i tempi tipici della scarica intrinseca sono al di sotto del microsecondo.

Un esempio è dato dal diagramma della tensione di scarica al variare della durata della sollecitazione e della temperatura per il vetro pirex (fig.VIII-1).

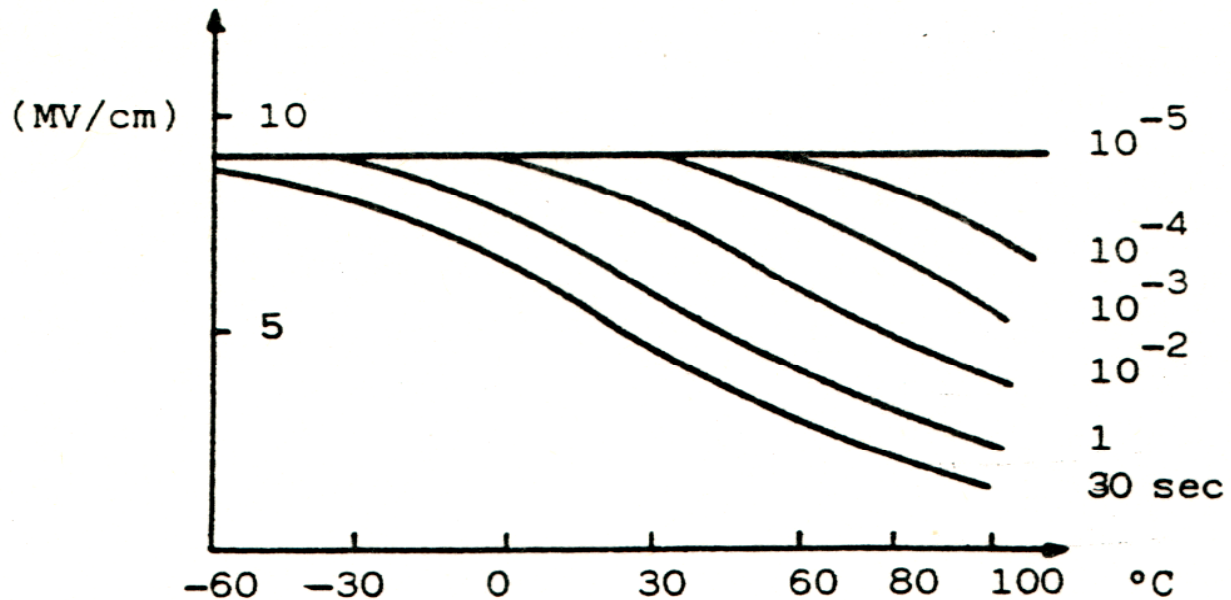


fig.VI-1 – Campo critico per vetro pirex al variare della temperatura e della durata della sollecitazione

Si nota che la tensione di scarica diminuisce comunque all'aumento di durata della sollecitazioni. E' ancora da approfondire la diminuzione della tensione di scarica con la temperatura ambiente; in apparente contraddizione con i due modelli proposti, in cui la temperatura fa aumentare l'energia ceduta al reticolo a scapito della formazione della valanga critica.

§VIII.2.2 *Collasso elettromeccanico*

Nel caso di dielettrici deformabili (es. gomme siliconiche) di permittività ϵ_r l'applicazione di una tensione V tra due elettrodi comporta una compressione del dielettrico per l'attrazione coulombiana tra gli elettrodi stessi. Nel caso di armature piane di area A poste a distanza d , la forza di compressione vale

$$F_c = \epsilon_0 \epsilon_r A \frac{V^2}{2d^2}$$

che farà diminuire lo spessore del dielettrico interposto dal valore iniziale d_0 fino al valore imposto dal bilancio della forza di compressione suddetta con la reazione elastica (legge di Young, Y modulo di Young)

$$F_Y = Y \cdot A \ln \frac{d_0}{d}$$

In condizioni di equilibrio, il legame tra la tensione applicata e lo spessore ridotto risulta

$$V = d \sqrt{\frac{2Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \ln \frac{d_0}{d}}$$

Questa funzione ha un massimo per $d \cong 0.65 d_0$. Il campo elettrico corrispondente, pari a

$$E_{mb} = \frac{V}{d} = 0.65 \sqrt{\frac{2Y}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$$

rappresenta la sollecitazione massima applicabile prima del collasso elettromeccanico e può essere assunto come corrispondente al collasso ("mechanical breakdown").

I tempi critici del collasso elettromeccanico sono estremamente brevi (microsecondo o decimo di microsecondo).

§VIII.2.3 Collasso termico

Il riscaldamento eccessivo del dielettrico può portare a modifiche strutturali permanenti del materiale. Il campo critico di perforazione E_0 collegabile a cause termiche può essere definito come quello corrispondente ad una condizione di stabilità limite, per cui per $E > E_0$ si dà il cedimento strutturale del materiale.

Una semplice analisi può ricondurci alla condizione di instabilità termica per un dielettrico facente parte di un dispositivo sotto tensione.

L'aumento di energia interna per unità di volume di un dielettrico (e quindi la sua temperatura) sottoposto ad una sollecitazione elettrica E , a parità di condizioni al contorno, dipende dalla potenza dissipata al suo interno per fenomeni di conduzione legati in modo decisivo alle impurità presenti (*perdite Joule* p_j) e dalla potenza legata alle interazioni nei meccanismi di polarizzazione (*perdite* p_r per *isteresi dielettrica* in polarizzazione sinusoidale a pulsazione ω o *rilassamento*)

$$p_E = p_j + p_r = \sigma E^2 + \omega \varepsilon E^2 \operatorname{tg} \delta$$

dove sia la conducibilità che il fattore di perdita $\operatorname{tg} \delta$ sono crescenti con la temperatura. L'equazione del bilancio termico - tra la sorgente interna p_E , la potenza termica interna e la potenza trasmessa - si scrive

$$p_E = C_v \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot \left(k \frac{A}{\tau} \nabla T \right)$$

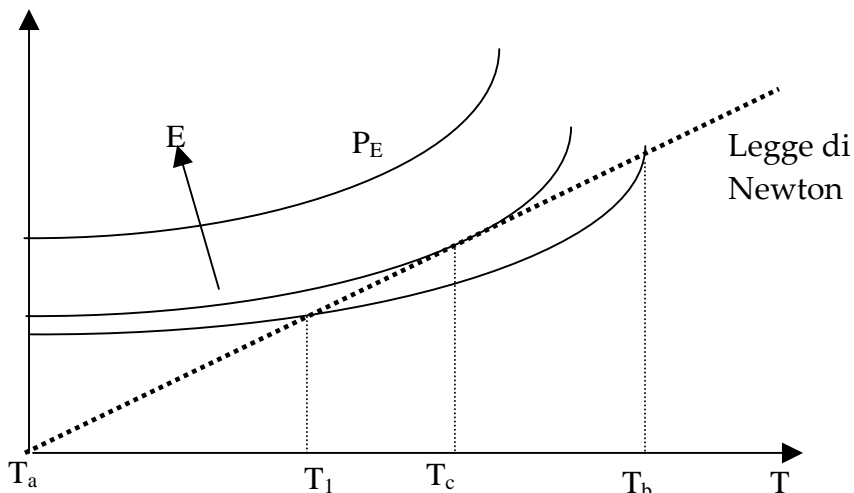
dove k è la conducibilità termica del dielettrico di volume τ , superficie A e temperatura (media) T .

Nel caso semplice di un dielettrico omogeneo considerato a temperatura T , immerso in un ambiente a temperatura T_a , la condizione di regime sarà facilmente ricavabile dal confronto della curva $p_E(T)$ con la curva di raffreddamento $k(T-T_a)$ (legge di raffreddamento di Newton).

Come si vede in fig.VIII.2.2.I, in relazioni a diversi valori del campo elettrico si possono avere, per la stessa legge di raffreddamento, diverse condizioni:

- a) due punti di intersezione: il materiale, se si trova a lavorare a temperatura inferiore a T_b , trova il suo equilibrio termico alla temperatura T_1 , se inferiore al punto di fusione;

- b) un punto di intersezione: l'unico punto di lavoro possibile è T_c , ma un aumento infinitesimo del campo o della temperatura porta ad una situazione di instabilità;
- c) nessun punto di intersezione: l'equilibrio termico è impossibile ed il dielettrico fonde o comunque si distrugge.



Da questa semplice analisi deriva che:

- a) il campo critico in condizioni stazionarie è più elevato del campo critico (valore efficace) in regime sinusoidale;
- b) il campo critico dipende dallo spessore; infatti la retta di raffreddamento dipende dal rapporto tra area della superficie e volume e quindi da $1/d$; in particolare all'aumentare dello spessore il campo critico decresce; in condizioni critiche si avrà $p_E = \sigma E_c^2 + \omega \varepsilon E_c^2 \text{tg } \delta \cong \frac{k}{d}(T_c - T_a)$ e quindi

$$E_c \cong \frac{k^*}{\sqrt{d}}; V_c = E_c d \cong k^* \sqrt{d}$$

- c) all'aumentare della temperatura ambiente la retta di raffreddamento, in prima approssimazione, si sposta parallelamente a se stessa e quindi abbassa il valore del campo critico.

In Tab.VIII.2.I sono riportati i valori di campo critico per collasso termico per alcuni dielettrici (provini sottili a 20°C).

Tab.VIII.2.I

<i>Materiale</i>	<i>Campo critico stazionario [MV/cm]</i>	<i>Campo critico sinusoidale [MV/cm]</i>
Mica muscovite	24	7-18
Sale di roccia	38	1.4
Quarzo	66	-
Quarzo impuro	-	2.2
Steatite H.V.	-	9.8
Porcellana (high-grade)	-	2.8
Carta per condensatori	-	3.5
Polietilene	-	3.5
Polistirene	-	5
Polistirene ad 1 MHz	-	0.05
Resine acriliche	-	0.3-1.0

§VIII.2.4 Scarica in campo non uniforme – Scarica interna per arborescenza (Treeing)

In presenza di un elettrodo a punta ben immerso in un dielettrico solido, il campo elettrico è particolarmente intenso in corrispondenza della punta. Risulta evidente, anche in assenza di difetti e impurità macroscopiche, l'eventuale fenomeno di scarica ha inizio dalla punta con la creazione di un percorso interno di scarica che costituisce, nella maggior parte dei casi, una lesione irreversibile del materiale stesso (carbonizzazione, ossidazione e reazioni fisico chimiche ad alta temperatura) dall'aspetto tortuoso e spesso ramificato simile a quello già visto per i gas (fig.VIII.2.3.I). Tale processo, che può avvenire in intervalli temporali largamente variabili ma comunque ben maggiori dei tempi di formazione nel gas (da qualche secondo ad anni) prende il nome di arborescenza o treeing. Per analogia topologica con la scarica nel gas, tale processo viene anche indicato come "streamer".

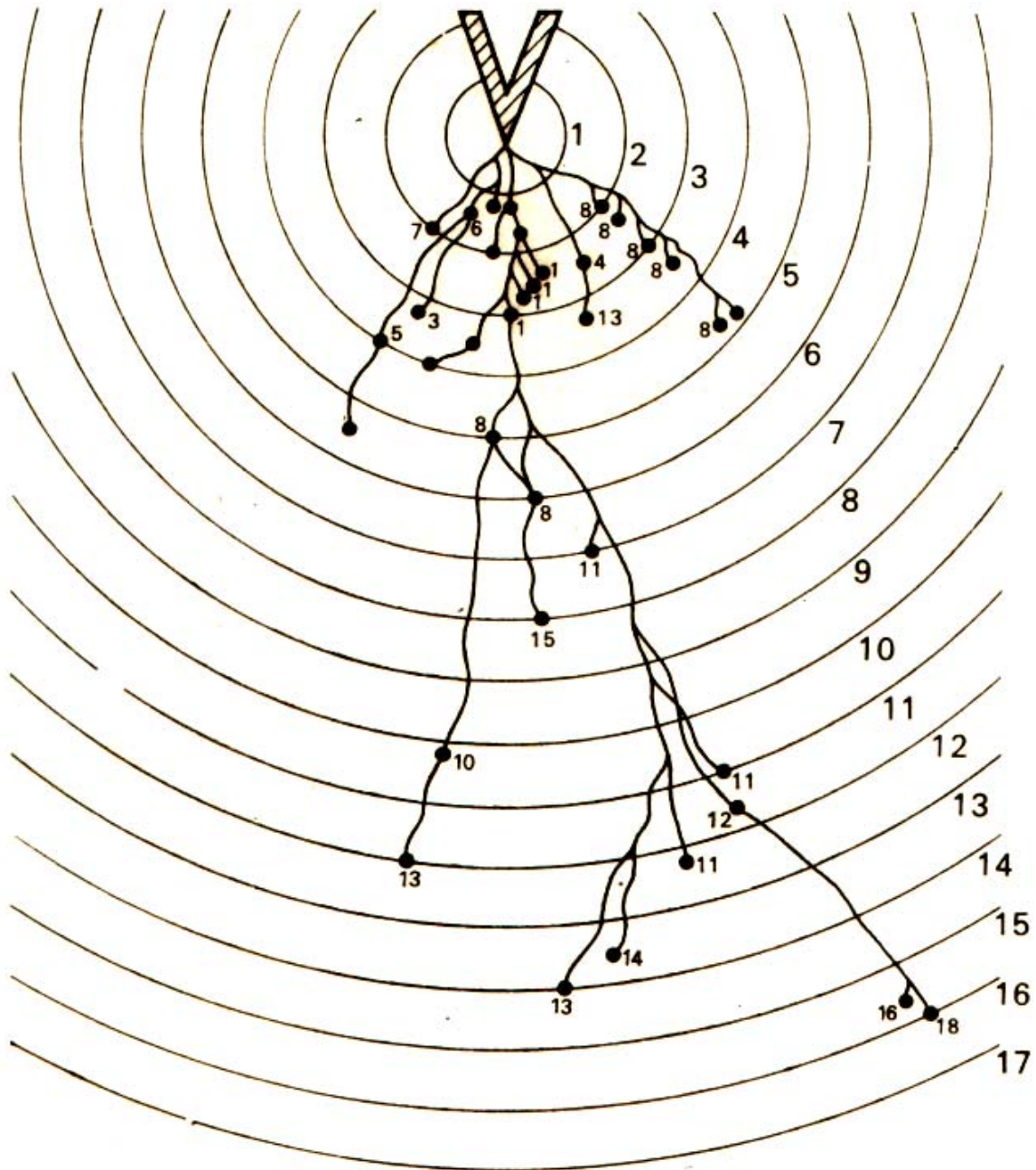


fig.VIII.2.3.I

Treeing (arborescenza) in perspex a partire dall'elettrodo superiore a punta (controlettrodo piano in basso non disegnato; coordinata radiale unitaria 0,25 mm). Tensione applicata: 190 impulsi ripetuti. I pallini sono marcati da un numero che indica la sequenza dei canali nella formazione dell'albero.[E. Kuffel M. Abdullah: High Voltage Engineering, Pergamon Press 1970, p.83]

§VIII.2.5 Scarica in campo non uniforme – Scarica per tracciamento superficiale

In corrispondenza della superficie di separazione di due mezzi (solido/gas (o vapore), solido/liquido, solido/solido, occorre valutare, caso per caso, l'entità della sollecitazione elettrica nei due mezzi materiali (ovvero dello stesso mezzo materiale con fase diversa). Si ricorda infatti che la variazione della componente normale del campo elettrico dipende dalla distribuzione di carica all'interfaccia, dalla diversa conducibilità e dalla diversa permittività (e ciò porta a differenti valutazioni nel caso stazionario o nel caso di sollecitazione variabile nel tempo); la componente tangenziale, invece, si mantiene continua (salvo casi singolari che qui non interessano).

Con riferimento a quest'ultima componente, tuttavia, possono verificarsi condizioni completamente diverse in relazione al materiale in esame; se ad esempio facciamo riferimento all'interfaccia aria/dielettrico solido, un valore della componente tangenziale sufficientemente elevato potrebbe essere innocuo per il dielettrico solido, ma potrebbe determinare nell'aria una situazione di collasso anche parziale, dando luogo a ripetute "scariche in aria in prossimità della superficie di separazione; il calore della scarica ripetuta può, soprattutto nei dielettrici su base organica, portare ad una alterazione ed a un degrado dello strato superficiale del solido lasciando una traccia permanente che può via via estendersi, a partire dalla zona a campo più intenso, fino a determinare un percorso agevolato per il collasso finale. Questo tracciamento ("tracking") può essere ben evidente sulle interfacce a vista, ma può svilupparsi in modo nascosto anche negli interstizi interni e negli inevitabili spazi d'aria che si possono formare tra diversi strati di dielettrico ed in corrispondenza degli elettrodi.

A contribuire al tracciamento superficiale intervengono anche le condizioni superficiali stesse (es. di lavorazione e montaggio) ed in particolare la presenza di agenti contaminanti dovuti a diverse cause, ad esempio i fattori ambientali (nebbia salina, fumi industriali e quant'altro).

Il dimensionamento degli isolamenti per esterno si presenta critico per i progettisti dei sistemi in media ed alta tensione, tenuto conto del numero e variabilità dei parametri in gioco che determinano la possibilità di scariche superficiali in aria (flashover).

E' spesso consigliabile l'uso di materiali non "tracciabili" (es vetro o porcellana), abbinati a profili di isolamento "autopulenti" (come si è visto in laboratorio, esempio in fig VIII.3.2.II) abbinate, nei casi più severi, a tecniche di manutenzione e lavaggio anche sotto tensione. Nelle linee aeree di trasmissione in alta tensione, raramente vengono adoperati, ancor oggi, isolanti organici.

Tale argomento merita chiaramente un notevole approfondimento, supportato da numerosi modelli interpretativi e soluzioni interessanti dal punto di vista applicativo, che per motivi di spazio non viene qui sviluppato.

Preme tuttavia rimarcare che la presenza di interfacce favorisce fenomeni di collasso parziale o totale in misura marcata e variabile da caso a caso, anche in presenza di dielettrici senza difetti e impurità. La forma e le caratteristiche dello strato superficiale (es. vernici isolanti o semiconduttrici oppure trattamenti tecnologici) possono influire in positivo o in negativo sui fenomeni di collasso.

Basti pensare che in presenza di contaminazione superficiale il campo medio di scarica a pressione atmosferica (per l'applicazione del quale si può cioè determinare una scarica superficiale o "flashover") può ridursi dalla decina di kilovolt al centimetro a valori anche al disotto di 200 V/cm (!) ponendo, come si è già detto, proibitivi problemi progettuali.

Di questa circostanza si è dato conto in esperienze specifiche in Sala Alta Tensione, mostrando il flashover su distanze di circa 2 m di profilo di materiale plastico contaminato, piuttosto che in uno spazio elettrodico in parallelo di circa 40 cm in aria.

Esistono norme e procedure specifiche per le prove di tracciamento superficiale di materiali organici e per le prove di isolamenti soggetti a contaminazione superficiale.

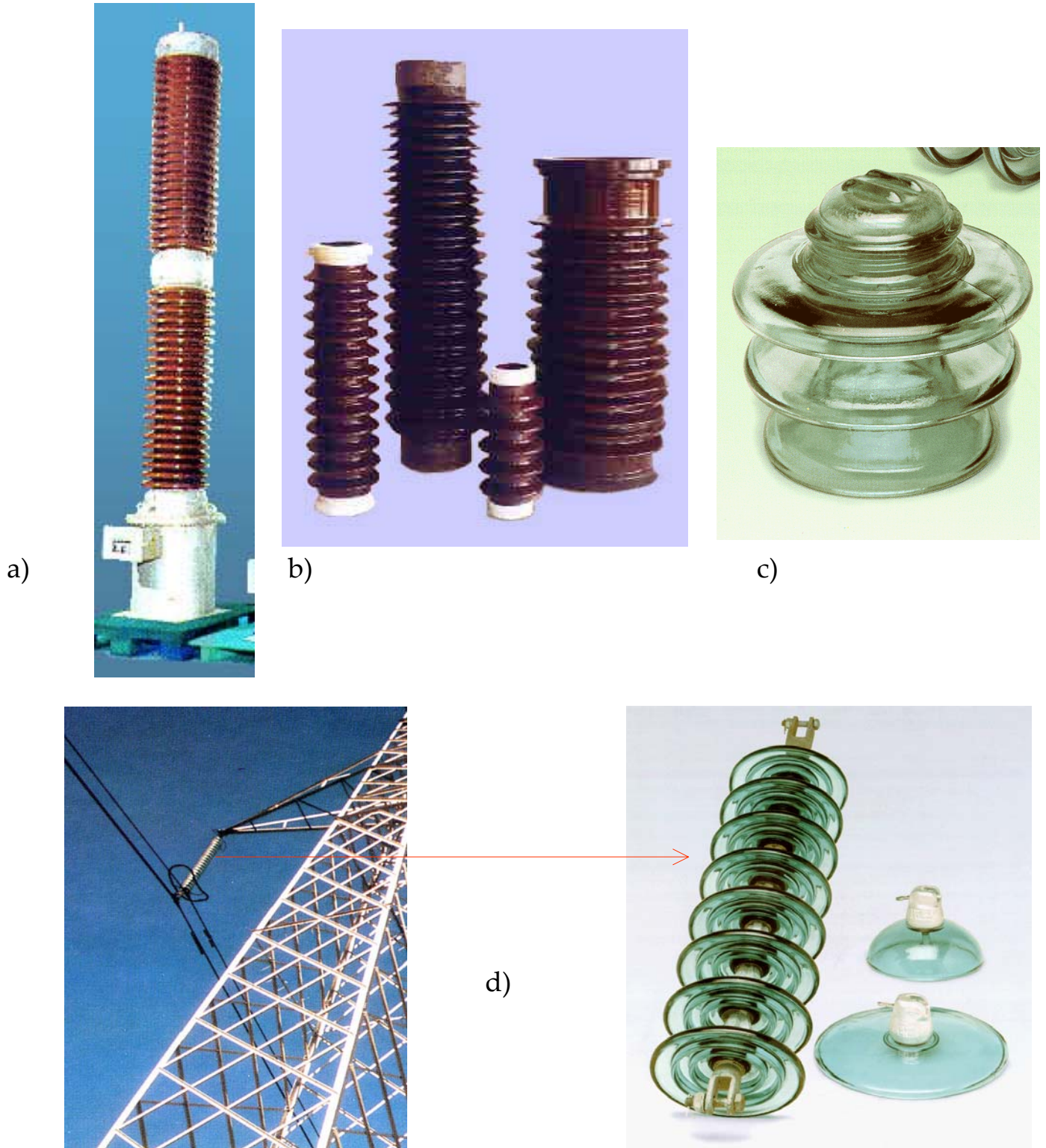


fig VIII.3.2.II – Tipi di isolatori per esterni: a) trasformatore capacitivo, b) isolatori di stazione in porcellana, c) isolatori portanti in vetro per linee aeree in media tensione, d) catene di isolatori per linee aeree AT in vetro “cappa e perno”.

§VIII.2.6 Determinazione del campo critico. Considerazioni statistiche.

Le prove per la determinazione del campo critico per i solidi (o della corrispondente tensione di scarica) possono essere condotte su campioni dello stesso lotto applicando tensioni costanti (o a valore efficace costante) sufficientemente elevate e registrando i tempi di scarica, che possono essere molto lunghi. Di contro si può applicare una tensione di valore efficace variabile a gradini di opportuno valore in modo da avere la scarica in poche decine di secondi. Per ragioni di tempo, spesso viene usata questa seconda via; i risultati tuttavia possono presentare una dispersione notevole, in relazione anche alle disomogeneità inevitabilmente presenti.

Un modello semplice probabilistico può essere costruito nel modo seguente.

Consideriamo l'isolamento, sottoposto a tensione V , costituito dal parallelo di N elementi ognuno dei quali ha probabilità di scarica $p(V)$ e quindi di tenuta $[1-p(V)]$. Se uno degli elementi cede, tutto l'isolamento cede; la probabilità di tenuta vale quindi $[1-p(V)]^N$, la probabilità (complessiva) di scarica vale

$$P_N(V) = 1 - [1-p(V)]^N$$

Conosco quindi p ed N si può risalire a P_N .

Una legge di probabilità consolidata in questo campo è quella di Weibull (distribuzione di valori estremi minimi, nulla al disotto di un valore di soglia V_0)

$$p(V) = 1 - e^{-c(V-V_0)^b}$$

dove c e b sono costanti di distribuzione; quindi

$$P_N(V) = 1 - e^{-cN(V-V_0)^b} = 1 - e^{-h(V-V_0)^b}$$

Per determinare le costanti della distribuzione b e c , si consideri che, per $V > V_0$,

$$e^{-c(V-V_o)^b} = 1 - p(V)$$

$$-c(V - V_o)^b = \ln(1 - p)$$

$$c(V - V_o)^b = \ln \frac{1}{1 - p}$$

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1 - p} \right) = b \ln(V - V_o) + \ln c$$

Riportando quindi i valori sperimentali in un opportuno diagramma bilogarithmico, si possono ritrovare b e c dalla pendenza ed intersezione con l'asse delle ascisse della retta interpolatrice dei dati sperimentali. La bontà della interpolazione darà conferma o meno della validità dell'applicazione di tale modello (fig.VIII.2.4.I).

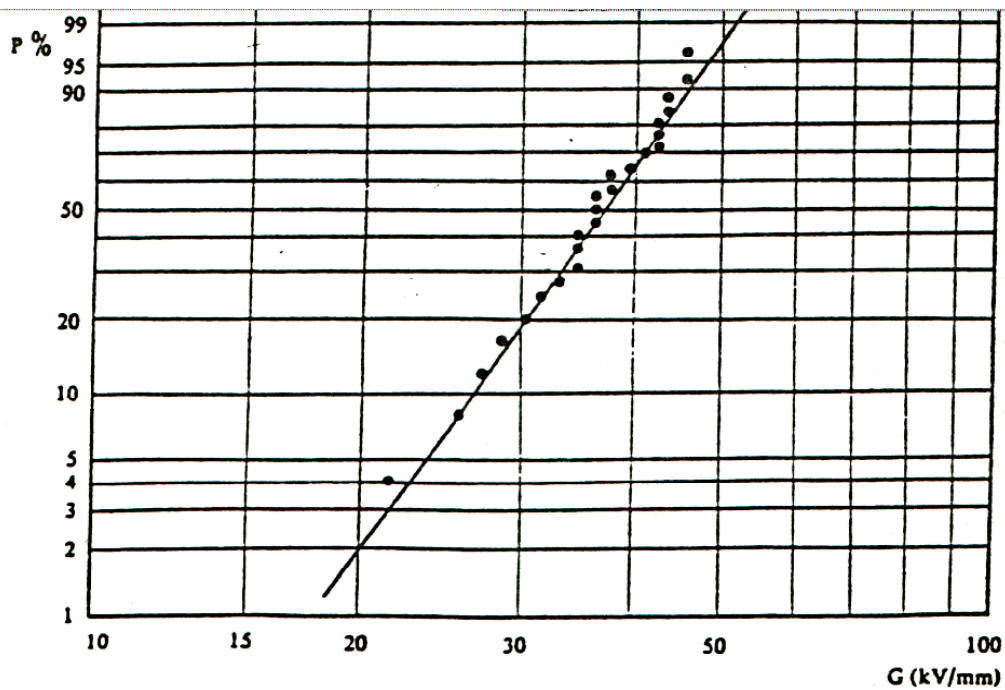


fig.VIII.2.4.I

§VIII.3 Le scariche parziali : Cenni storici – Aspetti generali

“La scarica parziale è una scarica elettrica che interessa solo una parte del dielettrico esistente fra due conduttori”¹. Essa può prodursi nei vuoti di un isolamento solido, in bolle gassose nei liquidi isolanti, ovvero fra strati dielettrici di caratteristiche diverse; può anche verificarsi su punte o spigoli acuti di superfici metalliche.

I primi studi sulle scariche parziali risalgono all’inizio del secolo [1], grazie, soprattutto, ai lavori di Petersen che, per primo, si pose il problema della nascita di eventuali scariche all’interno di cavità gassose in seguito all’innalzamento al loro interno del campo elettrico. Allo stesso tempo, però, non era data alcuna soluzione al problema del loro rilevamento né era data alcuna informazione sul possibile, conseguente, deterioramento del dielettrico.

Dopo l’introduzione nel 1920 del cosiddetto ponte di Schering [2] per la misura delle perdite dielettriche nei cavi, fu dimostrato da Gemant, Dawes et al. [3,4], che lo stesso ponte era in grado di misurare la potenza dissipata durante il fenomeno di scarica parziale e che, da queste misure, si poteva rilevare, seppur con una sensibilità piuttosto bassa, la tensione di innesco delle scariche.

Molti dubbi rimanevano, però, sulla natura ripetitiva del fenomeno, che poterono in parte essere fugati con le prime applicazioni dell’oscilloscopio per la visualizzazione degli impulsi di scarica [5].

E’ comunque solo intorno agli anni ‘50 che viene evidenziata la natura distruttiva delle scariche parziali e la loro influenza sulla “durata di vita” di un componente [6], ed è con la realizzazione dei primi rilevatori di scariche parziali e la pubblicazione del primo libro di F.H.Kreuger [7] che la ricerca riceve un decisivo impulso: viene proposto il concetto di circuito a ponte bilanciato e la raffigurazione degli impulsi di scarica sovrapposti ad una ellisse rappresentante un ciclo della tensione di prova; usando questo sistema si riescono ad ottenere informazioni sull’ampiezza della scarica parziale e sulla sua posizione di fase relativa al ciclo della tensione applicata.

Nel 1968 un gruppo di lavoro della CIGRE, presieduto dallo stesso prof. Kreuger, elabora un documento [8] in cui sono indicati i primi strumenti per il

¹Norme CEI 42-3, Fascicolo 763.

riconoscimento di differenti tipi di scariche parziali dall'analisi visiva della immagine impressa sull'oscilloscopio.

Intorno agli anni '70, con la riduzione dei costi dei mezzi di calcolo, nasce l'idea di misure assistite dal calcolatore [9], le quali garantiscono una migliore gestione e immagazzinamento dei dati e, nello stesso tempo, ampia flessibilità nella loro manipolazione: tra i primi a sfruttare le nuove risorse è sicuramente T.Tanaka che, nel 1978, sviluppa un sistema in grado di elaborare distribuzioni statistiche degli impulsi di scarica [10]. In questa direzione si inserisce nel 1991 il lavoro di E.Gulski [11] sull'uso dei computer nell'analisi statistica delle scariche parziali, in cui l'autore descrive le distribuzioni con un set di 15 parametri e introduce strumenti per il riconoscimento di scariche di origine sconosciuta.

Decisamente minore impulso ha avuto nel corso degli anni lo sviluppo di modelli per una migliore comprensione del processo fisico di scarica e della relazione tra grandezze misurate e stato dell'oggetto in prova. Il primo di questi modelli, elaborato nel 1932 da A.Gemant e W.v.Philippoff [12] è di tipo circuitale, il cosiddetto "circuito abc", basato sull'assunzione che una cavità all'interno di un solido isolante possa essere rappresentata da una capacità. Per la sua semplice comprensibilità esso si è rivelato molto utile nello sviluppo dei moderni sistemi di rilevamento delle scariche parziali; purtroppo ha mostrato i suoi limiti quando si è cercato di affrontare analisi quantitative del fenomeno quali, ad esempio, il rapporto tra carica misurata e dimensione, forma e posizione del difetto all'interno di un dielettrico solido.

Un approccio totalmente diverso è invece descritto in lavori più recenti, elaborati da A.Pedersen, il quale ha sviluppato un modello fisico più generale partendo dalle leggi dell'elettrostatica classica [13]. Ultimamente, possono essere segnalati approfondimenti degli studi di Pedersen [14, 15] e il modello di simulazione elaborato da Gutfleisch e Niemeyer per scariche in cavità sferiche o sferoidali in isolamenti in resina epossidica.[16].

Generalmente, la scarica parziale si sviluppa con un meccanismo tale da non pregiudicare la tenuta di un componente in una normale procedura di prova in alta tensione ma, benché metta in gioco solo piccole quantità di energia, risulta tale da causare un lento e progressivo deterioramento del dielettrico che può portare alla rottura definitiva dell'oggetto alla tensione nominale di esercizio.

I fenomeni di degradazione che si manifestano nei dielettrici in presenza di scariche parziali provocano, pertanto, la riduzione della durata di vita di un

componente, la quale dipende in misura più o meno notevole dalla natura dei dielettrici impiegati nell'isolamento, dai procedimenti di lavorazione, dal tipo di sollecitazione elettrica, dalle altre condizioni di esercizio.

Se all'inizio del '900 il problema non veniva neppure posto, dopo la metà del secolo l'introduzione di nuovi dielettrici, la corsa parallela alla riduzione degli ingombri e all'aumento delle tensioni di esercizio, e quindi dei campi applicati, ha reso il problema di sempre più viva attualità. E ciò, in particolare, in quanto i moderni concetti di sicurezza esigono, tra l'altro, a parte una auspicabile lunga durata di vita degli isolamenti, anche la possibilità di previsione della durata medesima.

Oggigiorno, le misure di scariche parziali sono pratica comune sia per prove di tipo che di accettazione e le misure in esercizio, su apparecchiature in media o alta tensione, sono ormai normalmente previste al fine di determinare i punti deboli dei componenti, prima che si possano verificare danni irreversibili.

Possiamo distinguere tre differenti meccanismi di scariche parziali (vedi Fig.1.1):

- scariche interne (incluso il fenomeno del treeing);
- scariche superficiali;
- scariche corona.

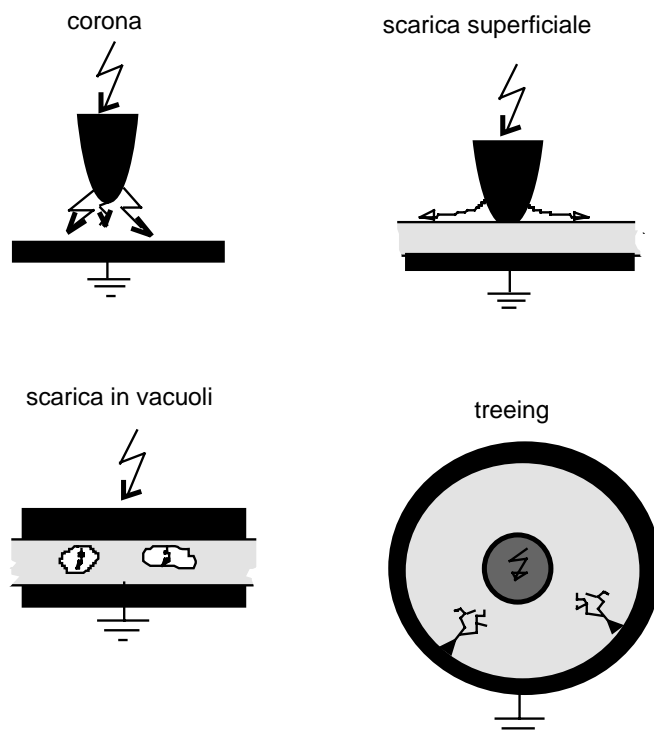


Fig. 1.1: Meccanismi di scariche parziali

Le **scariche interne** costituiscono nella maggior parte dei casi la causa principale di riduzione della durata di vita di un componente. La loro origine è da ricercare nella presenza all'interno del dielettrico di piccole cavità (vacuoli). Tali inclusioni gassose possono formarsi durante i processi di lavorazione del prodotto o svilupparsi in seguito a stress meccanici, elettrici o a particolari cicli termici cui esso viene sottoposto.

All'interno dei vacuoli vengono così a trovarsi aria o gas caratterizzati da costante dielettrica minore della costante dielettrica dell'isolante solido: il campo elettrico E_v nella cavità risulta pertanto maggiore del campo E_d nel dielettrico circostante; esso può superare la rigidità dielettrica del gas contenuto e dare luogo ad una scarica che neutralizza una parte delle cariche superficiali presenti sulle superfici opposte del vacuolo.

Una volta avvenuta la scarica, il campo nella cavità è la risultante del campo esterno applicato e del campo orientato in senso inverso dovuto alla carica superficiale, per cui la distorsione del campo dovuta alla presenza della carica superficiale rimasta può far sì che la scarica successiva avvenga in una posizione

diversa e per un valore differente della tensione di alimentazione: per esempio, quando la tensione di alimentazione si inverte, i campi assumono lo stesso verso e, sommandosi, possono dare luogo ad una scarica ad una tensione inferiore alla precedente.

Il fenomeno del **treeing**, o “arborescenza”, (molto importante soprattutto nella tecnologia dei cavi con isolamento estruso in polietilene) si sviluppa in seguito all'innalzamento locale del campo elettrico, in corrispondenza di protrusioni in genere metalliche.

Il meccanismo che dà origine alla propagazione del treeing non è del tutto noto. Si ritiene, comunque, che, localmente, abbia luogo una iniezione di carica per effetto del campo locale molto intenso e che, successivamente, la *destabilizzazione* (prodotta da varie cause) di questa carica intrappolata nella matrice polimerica, provochi le microscariche con cui il fenomeno del treeing avanza, ramificandosi all'interno del dielettrico. Nella maggior parte dei casi, il processo è distruttivo e porta alla scarica completa in un periodo di tempo molto più breve di quello trascorso prima della sua manifestazione.

Le **scariche superficiali** si possono manifestare lungo le interfacce tra dielettrici differenti, se esiste una elevata componente del campo parallela alla superficie. Una volta prodotta la scarica, la variazione della distribuzione di campo elettrico porta alla estensione della scarica in zone diverse da quella iniziale. Possono così provocare il deterioramento e il tracciamento della superficie del dielettrico e condurre alla scarica completa.

Le **scariche corona** si manifestano in corrispondenza di "punte" e generalmente in campi fortemente divergenti. Il corona in aria genera ozono che, interagendo con l'isolamento polimerico produce azoto, il quale, a sua volta, combinandosi con il vapore acqueo, può corrodere le superfici metalliche dei conduttori, formando così un deposito conduttivo che, per tracciamento, porta alla scarica completa.

Particolarmente sentito è il problema delle scariche corona in isolamenti in SF₆ in cui i prodotti della decomposizione dell' SF₆, dopo una scarica, possono corrodere le superfici dielettriche del sistema.

Le scariche corona sono, inoltre, la più importante fonte di disturbi durante prove di scariche parziali, pertanto è sempre consigliato di evitare nell'area di

misura la presenza di elementi appuntiti e si suggerisce sempre di arrotondare sempre ogni possibile spigolo o protrusione.

Per ulteriore approfondimento vedere la nota specifica sulle scariche parziali disponibile sul sito.

§VIII.4 Bibliografia sul cap. VIII

- [1] W.Petersen, "Beiträge zur Berechnung der Hochspannungsisolierung", Archif für Elektrotechnik, Vol.1, pp.28-33, 1912.
- [2] H.Schering, Editor, *Die Isoliestoffe der Elektrotechnik*, Verlag Julius Springer, Berlin, 1924
- [3] A.Gemant, "Die Verlustkurveluftungen Isoliestoffe", Zeitschrift für Technische Physik, Vol.13, pp.184-189, 1932.
- [4] C.L.Dawes and P.L.Hoover, "Ionization Studies in Paper-Insulated Cables-I", AIEE Trans., Vol.45, p.141, 1926.
- [5] W.L.Lloyd and E.C.Starr, "Methods Used in Investigating Corona Loss by Means of the Cathode Ray Oscilloscope", AIEE Trans., Vol.46, pp.997-1024, 1927.
- [6] J.H.Mason, "The Deterioration and Breakdown of Dielectrics Resulting from Internal Discharges", Proc. IEE, Vol.98, pp.44-59, 1951.
- [7] F.H.Kreuger, *Discharge Detection in High Voltage Equipment*, Temple Press, American Elsevier, 1964, Butterworths, 1989.
- [8] WG 21.03, "Recognition of Discharges", Electra, No.11, pp.61-98, 1969.
- [9] J.Austin and R.E.James, "On-line Digital Computer System for Measurement of Partial Discharges in Insulation Structures", IEEE Trans. EI, Vol.11, No.4, pp.129-139, 1976.
- [10] T.Tanaka and T.Okamoto, "A Minicomputer Based Partial Discharge Measurement System", 1978 IEEE Int. Symp. on Elec. Ins., Conf. Record 78CH1287-2-EI, Philadelphia, 1978, pp.86-89.
- [11] E.Gulski, *Computer-aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools*, PhD-thesis Delft University of Technology, Delft University Press, 1991.
- [12] A.Gemant and W.v.Philippoff, "Die Funkenstrecke Mit Vorkondensator", Zs. Techn. Phys. Vol.13, pp.425-430, 1932.
- [13] J.A.Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill New York, 1941.

- [14] A.Pedersen, "Partial Discharges in Voids in Solid Dielectrics. An Alternative Approach", 1987 Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Publication 87 CH2462-0, pp.58-64, 1987.
- [15] A.Pedersen, I.W.McAllister, G.C.Crichton and S.Vibholm, "Formulation of the Streamer Breakdown Criterion and its Application to Strongly Electronegative Gases and Mixture", Archiv für Elektrotechnik, Vol.67, pp.395-402, 1984.
- [16] F.Gutfleisch and L.Niemeyer, "Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Ins., Vol.2, No.5, pp.729-743, 1995.