

*Appunti dalle lezioni del corso di*

# MODELLISTICA ELETTROMAGNETICA DEI MATERIALI

*(prof G. Lupò)*

## CAPITOLO VII

### CONDUZIONE E SCARICA NEI DIELETTRICI LIQUIDI

(bozza)

#### §VII.1 Proprietà dei dielettrici liquidi

I dielettrici liquidi, in particolare gli oli derivati dagli idrocarburi, sono largamente usati ed apparentemente hanno enormi vantaggi sia sui dielettrici gassosi che sui dielettrici solidi:

- a) hanno densità molto più elevata dei gas e migliori di condizioni di tenuta, non prospettandosi processi di ionizzazione a valanga;
- b) sono autoripristinanti, ossia è abbastanza agevole ripristinare le condizioni di tenuta a seguito di una scarica; tale recupero è invece assente in quasi tutti i solidi;
- c) non hanno forma propria e pertanto possono riempire completamente gli spazi interelettrodici, senza lasciare inevitabili spazi d'aria come i solidi;
- d) è possibile monitorare continuamente lo stato di degrado del dielettrico dovuto a inquinamento, ossidazione, etc, ed eventualmente sottoporlo a processi di purificazione;
- e) possono servire anche per raffreddare in maniera molto efficienti parti interne di macchine elettriche, eventualmente ricorrendo a pompe per la circolazione forzata;
- e) possono essere usati come impregnanti in isolanti solidi quando questi sono insostituibili ad esempio per ragioni meccaniche.

Nonostante questi evidenti vantaggi, i dielettrici liquidi sono essenzialmente usati come impregnanti e non da soli per le seguenti ragioni:

- A) i liquidi tendono ad inquinarsi molto facilmente anche per ragioni dovute al moto da fluido circolante; le particelle d'impurità possono essere solide, liquide o gassose; le particelle disciolte o rimosse si possono caricare o comunque deformano localmente il campo elettrico; l'accumulo di particelle può alla lunga portare ad una concreta diminuzione delle distanze di isolamento;
- B) i contenitori debbono essere sempre a tenuta per evitare la fuoriuscita di liquido infiammabile o comunque pericoloso;
- C) temperature elevate possono portare alla formazione di bolle gassose o di vapori incontrollabili; le impurità portano ad un incremento della conducibilità del liquido e quindi ad possibile sovrariscaldamento.

I dielettrici liquidi devono essere usati quindi tenendo sempre presente che per mantenere accettabili condizione di tenuta, le impurità di tutti i tipi devono essere controllate e mantenute in concentrazioni il più basse possibile. Occorre quindi che, non potendosi commercialmente pretendere purezze assolute, i liquidi isolanti siano forniti con un elevato grado di purezza (96-98%); essi devono essere degassificati mediante autoclavi in fase di primo impiego, quindi purificati per rimuovere i residui derivanti dal contenitore; periodicamente dovrà essere monitorato il loro grado di purezza.

La caratteristica-tipo di conduzione nei liquidi puri ricorda quella nei gas (fig.VII.1).

I fenomeni di conduzione *a basso campo* (inferiore a 1 kV/cm) sono caratterizzati dalla presenza di impurità residue in modestissima quantità, e quindi da una elevata resistività ( $10^{13}$ - $10^{18}$   $\Omega$ m). L'intensità di corrente aumenta quasi linearmente all'aumentare della tensione ed i fenomeni di conduzione sono ascrivibili alla modesta densità e velocità delle specie ioniche. L'intensità di corrente raggiunge un valore di saturazione quando la formazione degli ioni viene compensata dall'assorbimento agli elettrodi.

A campo elevato (superiore a 100 kV/cm) i fenomeni di conduzione possono arricchirsi per la presenza di elettroni generati per effetto di campo agli elettrodi che e di ioni derivanti da dissociazioni all'interno del liquido. Si registrano tuttavia instabilità e comportamenti non riproducibili.

I meccanismi di produzione di cariche sono quindi:

- a) emissione termoionica (legge di Richardson) La corrente emessa per unità di superficie riscaldata alla temperatura T è data dalla legge di Richardson:

$$J = k T^2 \exp (-\Phi/kT);$$

- 2) emissione fotoelettrica, per illuminamento sufficiente dell'elettrodo;  
3) emissione termica rinforzata dal campo, per riscaldamento dell'elettrodo in presenza di sollecitazione elettrica (*effetto Schottky*)

$$J' = k' T^2 \exp (-\Phi'/kT);$$

dove  $k' = 4\pi m q^2 / h^2 = 1.2 \cdot 10^6$  [A/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>].

- 4) applicando sollecitazioni intense ( $>10^5$  V/cm) si può avere la cosiddetta *emissione per effetto di campo*:

$$J'' = k'' E^2 \exp (-\Phi''/kT);$$

in tale teoria si prevede che gli elettroni possano superare la barriera di potenziale anche per effetto tunnel (fig.V.3).

L'emissione per effetto di campo può essere estremamente localizzata e favorita anche dalla presenza di ioni positivi nelle immediate vicinanze del catodo, che rinforzano localmente il campo; possono aver luogo veri e propri "getti" di elettroni dal catodo, di posizione e intensità non controllabili.

La presenza di elettroni in “equilibrio” energetico all’interno del liquido, la formazioni di ioni negativi e fenomeni di dissociazione portano a definire una *mobilità* delle singole specie e quindi, come nel caso dei gas ad un coefficiente di *conducibilità*. Occorre tuttavia sempre considerare i processi agli elettrodi; l’anodo, ad esempio, “cattura” e neutralizza facilmente gli elettroni, molto meno facilmente gli ioni negativi, che quindi possono permanere nelle vicinanze dell’anodo formando una barriera al movimenti degli elettroni e delle altre particelle negative.

## §VII.2 Fenomeni di scarica nei dielettrici liquidi puri

Consideriamo liquidi con tasso di impurità molto ridotto (<1%). I fenomeni di collasso che avvengono a campi elevati non sono stati ricondotti finora a teorie generali, ma possiamo individuare alcune processi fondamentali, eventualmente cooperanti:

- a) formazione di valanghe elettroniche, legato al guadagno di energia degli elettroni nel loro libero cammino, che sarà necessariamente ridotto rispetto al caso dei gas; condizione necessaria per la formazione della valanga è che tale guadagno (pari a  $\Delta W = eE\lambda$ ) sia comparabile con l’energia di ionizzazione  $W_i$ . Tale condizione è difficile da realizzare. Peraltro i tempi di formazione della scarica nei liquidi sono sempre stati molto maggiori di quelli prevedibili in caso di attivazione di tale processo a valanga;
- b) la formazione di getti localizzati di elettroni al catodo provoca un riscaldamento intenso localizzato, una vaporizzazione del liquido e quindi l’innescò di una scarica parziale nella fase vapore (a minore tenuta dielettrica); il calore della scarica può ingrandire la bolla di vapore sino ad interessare l’intero spazio elettrodo e dar luogo facilmente al processo a valanga (fig.VII.2).

In tabella VII-I sono riportati i valori dei campi critici per alcuni dielettrici liquidi puri utilizzati nelle apparecchiature elettriche

TAB. VII-I

DIELETTRICO	CAMPO CRITICO (MV/cm)
Esano	1.1-1.3
Benzene	1.1
Oli minerali	1.0-4.0
Siliconi	1.0-1.2
Ossigeno liquido	2.4
Azoto liquido	1.6-1.9

In tale tabella sono riportati sia idrocarburi (l'esano o il poliesano (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>)<sub>n</sub> è tra i più studiati ed impiegati per la sua stabilità e la scarsa viscosità) che liquidi criogenici impiegati in dispositivi speciali.

### §VII.3 Fenomeni di scarica nei dielettrici liquidi commerciali

La presenza di impurità, presenti originariamente nel liquido isolante o formatesi successivamente, può condizionare fortemente i processi di collasso.

Possiamo infatti avere:

- a) inclusioni gassose, dovuti a gas o vapori disciolti provenienti dall'ambiente o dal liquido stesso; nel gas o vapore il campo critico è più basso ed inoltre il campo è mediamente più elevato per essere la minore permittività rispetto alla fase liquida;
- b) inclusioni liquide a permittività molto elevata (es. gocce d'acqua<sup>1</sup> in olio); la bolla liquida è soggetta ad allungamento anche notevole lungo la direzione del campo; poiché la permittività è molto elevata, il campo nella goccia è molto piccolo rispetto al campo nel liquido circostante, per cui la goccia stessa si può considerare un "cortocircuito" dielettrico; la tensione tra gli elettrodi si ritrova così applicata su un tratto sempre più piccolo di liquido e quindi si possono determinare fenomeni di collasso di cui al §VII.1;<sup>2</sup> in fig. VII.3 è riportata la sequenza di deformazione di una bolla d'acqua in un olio silconico.
- c) inclusioni solide metalliche; sotto l'azione del campo (non uniforme) le particelle sono soggette a forze determinando dei "ponti" conduttori con maggiore sollecitazione del restante tratto di liquido; inoltre le "punte" delle particelle metalliche possono dar luogo a getti elettronici e vaporizzazione del liquido. In

<sup>1</sup> La permittività dell'acqua è pari a 80.

<sup>2</sup> Si consideri un globulo inizialmente sferico di raggio R e permittività  $\epsilon_1$  in un liquido a permittività  $\epsilon_2$ . In presenza di campo elettrico il globulo si polarizza e si deforma; il raggio di curvatura C di equilibrio sarà collegabile alla pressione interna del globulo P\*, alla pressione del liquido esterno P, alla pressione elettrostatica P<sub>e</sub> ed alla tensione superficiale  $\Sigma$

$$C = \frac{P^* - P - P_e}{\Sigma};$$

esplicitando la pressione elettrostatica, si ricava che la forma assunta dal globulo è quella di un

ellissoide di rotazione con asse maggiore lungo la direzione del campo; se  $\gamma$  è la deformazione valutata come il rapporto di

aspetto dell'ellissoide, il campo all'interno del globulo vale  $E^* = \sqrt{\frac{8\pi\Sigma\epsilon_1\gamma^3}{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 R} \left(2\gamma - 1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)}$ , mentre all'esterno vale

$$E = 600 \sqrt{\frac{\pi\Sigma}{\epsilon_1 R}} \cdot G\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}, \gamma\right) \cdot H$$

dove la funzione G ed H sono rappresentate in Tab.VI-II. Si vede che per se il rapporto delle

permittività supera 20, esiste un valore limite del campo per cui la deformazione non si arresta determinando il collasso del liquido. Tale limite, per una goccia d'acqua in olio di raggio iniziale 1 $\mu$ m è pari a E=0,226 MV/cm. In fig.VI.4 è riportata il fattore di deformazione  $\gamma$  in funzione del campo elettrico (in opportuna scala).

generale le particelle sono spinte verso le zone a campo più intenso dalla

$$\text{forza}^3 \bar{F} = \frac{1}{2} R^3 \left( \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right) \nabla |\bar{E}|^2.$$

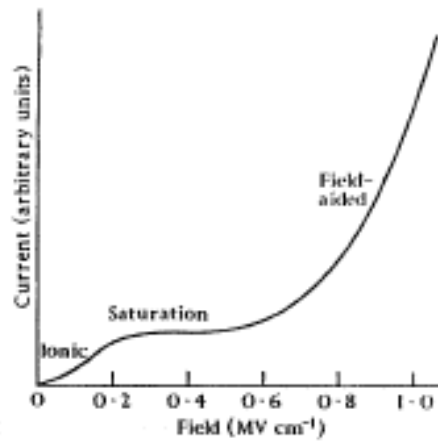


Fig.VII.1



fig. VII.2

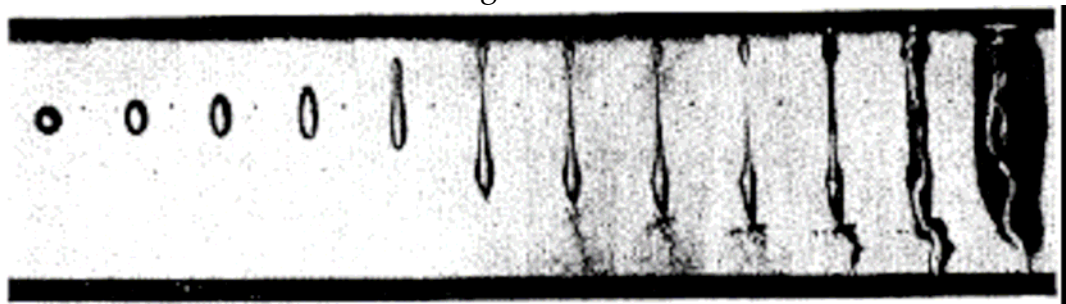


fig.VII.3

<sup>3</sup> Nel caso di particelle metalliche  $\bar{F} = \frac{1}{2} R^3 \nabla |\bar{E}|^2$

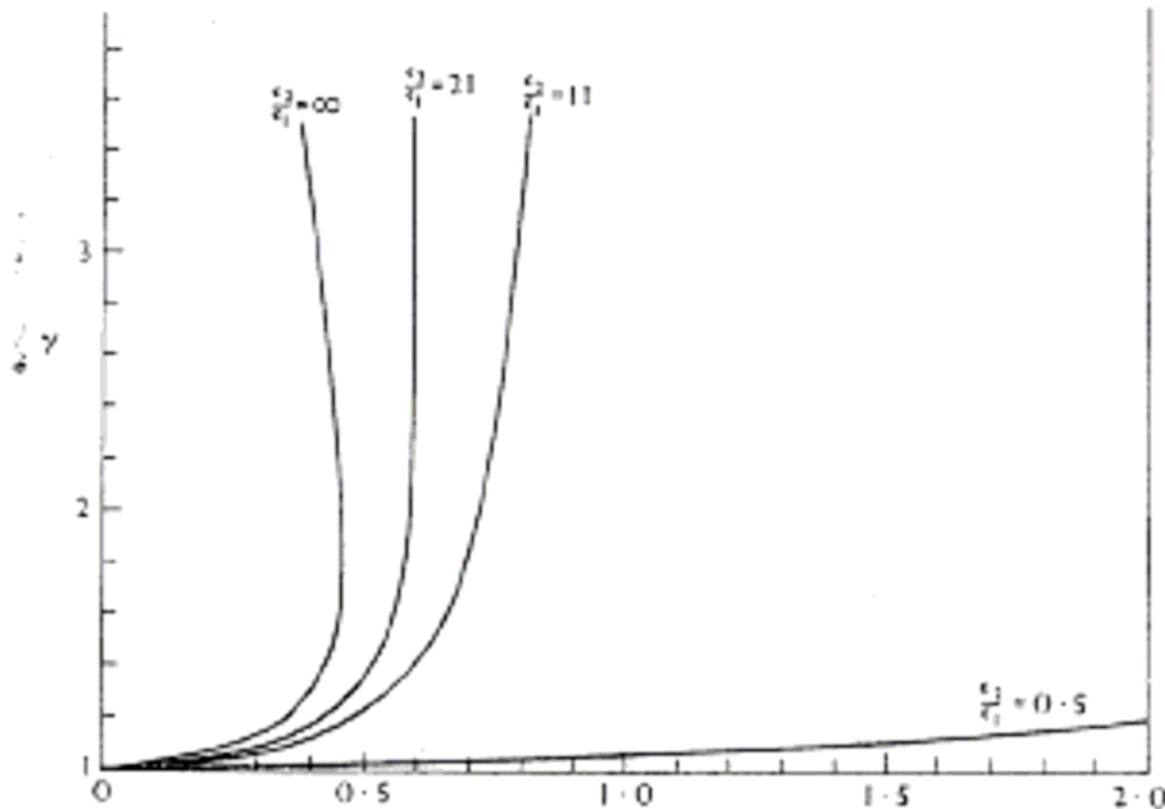


Fig.VII.4

Fattore di deformazione  $\gamma$  in funzione del campo applicato (sulle ascisse è riportata la quantità

$$\frac{E}{600 \sqrt{\frac{\pi \Sigma}{\epsilon_1 R}}} = G\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}, \gamma\right) \cdot H$$

$\gamma$	$G$	$H$	$GH$
1.1	0.30828	0.8782	0.27074
1.2	0.28613	1.2246	0.35039
1.4	0.24880	1.6988	0.42267
1.6	0.21871	2.0573	0.44996
1.8	0.19406	2.3610	0.45817
1.82	0.19184	2.3894	0.45838
1.85	0.18860	2.4314	0.45856
1.87	0.18644	2.4590	0.45846
1.9	0.18335	2.5000	0.45838
2.0	0.17356	2.6324	0.45689
2.2	0.15633	2.8822	0.45056
2.5	0.13515	3.2285	0.43632
3.0	0.10871	3.7553	0.40823
3.5	0.08965	4.2393	0.38006
4.0	0.07541	4.6930	0.35389
5.0	0.05582	5.5356	0.30900

Tab.VII-II