

## I MATERIALI ISOLANTI

I mezzi nei quali la conducibilità elettrica è inferiore a  $10^{-8}$  S/m, sono detti *isolanti*; al contrario, se  $\sigma$  è maggiore di  $10^6$  S/m, si parla di materiali conduttori. I materiali isolanti (o dielettrici) hanno lo scopo di isolare, fra di loro e da ogni oggetto conduttore posto nelle vicinanze, le parti dei circuiti elettrici sotto tensione. L'isolamento dei conduttori rende possibile la realizzazione pratica dei circuiti elettrici, consentendo alla corrente elettrica di percorrere i conduttori senza disperdersi all'esterno. Poiché la capacità di un materiale di condurre la corrente è misurata dalla conducibilità elettrica, sembrerebbe che l'unica condizione necessaria per un buon isolamento fosse l'impiego di materiali a resistività molto alta, ovvero con conducibilità trascurabile rispetto a quella dei conduttori. Di fatto, il rapporto fra la conducibilità di un conduttore e quella di un isolante è enorme, oltre  $10^{14}$ , e ciò garantisce che la corrente scorra esclusivamente all'interno dei conduttori.

Le cose non sono però così semplici. In ogni punto del conduttore vi è un potenziale elettrico diverso da quello della terra (o degli altri conduttori), cosicché all'isolamento è applicata una tensione e quindi un campo elettrico  $E$  la cui intensità dipende dal valore di questa tensione, e dalla forma e dimensioni dell'isolamento stesso. Questo campo trasversale (la cui direzione in prossimità del conduttore è perpendicolare alla superficie esterna) è sostenuto dalle cariche in moto che danno luogo alla corrente nel conduttore. Anche in corrente alternata, tali cariche danno luogo ad una configurazione che, pur spostandosi, si mantiene però, in condizioni di regime, sempre uguale a se stessa, cosicché si può considerare l'isolante come se fosse in condizioni statiche e soggetto ad un campo di ampiezza costante pari al valore efficace di  $E(t)$ . L'intensità del campo nell'isolante è sempre molto elevata, enormemente superiore al campo elettrico longitudinale che agisce nel conduttore e determina in esso la circolazione della corrente. A cadute di tensione dell'ordine di pochi volt per centinaia di metri, si contrappongono tensioni di migliaia di volt applicate a pochi cm o mm di isolante. Tuttavia, il campo elettrico nell'isolante non può superare, un valore limite caratteristico per ogni materiale (la **rigidità dielettrica**, misurata in V/m), pena la perdita delle proprietà isolanti, che si traduce nella *scarica disruptiva*, cioè nella rottura (perforazione) dell'isolante stesso e di conseguenza nel guasto dell'apparato. Nei gas e nei liquidi la scarica provoca la volatilizzazione di una parte delle molecole, però al cessare della scarica il dielettrico si ricostituisce e riacquista le sue proprietà isolanti. In un solido la scarica comporta la perforazione del materiale che perde completamente le sue proprietà isolanti (distruzione del dielettrico), cosicché l'intensissima corrente che lo attraversa porterebbe rapidamente a disastrose conseguenze se non intervenissero rapidamente i dispositivi di interruzione che tolgono tensione alla parte danneggiata del circuito o della rete.

Un materiale isolante di interesse tecnico sarà un materiale con rigidità dielettrica elevata, onde consentire piccoli spessori di isolamento e quindi maggiore economicità. Questo soprattutto nel caso di elevate tensioni o comunque quando le dimensioni dell'apparato sono essenzialmente legate al valore del campo elettrico applicato all'isolante, come per i condensatori di potenza. Poiché però la scarica inizia in punti particolari, dove si hanno concentrazioni di campo o difetti nella struttura del materiale, assumono importanza anche la forma e la tecnologia costruttiva dell'isolamento.

Perché crescendo il campo applicato ad un isolante questo cessa di comportarsi come tale si comprende facilmente considerando che il campo elettrico è la forza applicata alle cariche e che quindi crescendo questa forza l'energia che ricevono le cariche diventa tale da strapparle dai loro legami atomici e portarle in conduzione; inoltre, il campo impresso accelera gli elettroni già resisi disponibili in modo da renderli capaci di liberare, a causa degli urti, nuovi elettroni così da dar luogo ad un fenomeno a valanga, per sua natura esponenziale. Anche scariche parziali sono potenzialmente pericolose; infatti, a differenza di quanto accade nei conduttori la carica può essere presente negli isolanti. Dall'equazione di continuità, tenendo conto che  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$  (trascurando il campo impresso), che  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ , e che  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ , si ottiene:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{J} = \sigma \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon} \nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\sigma}{\epsilon} \rho$$

la cui soluzione è (posto  $\tau = \epsilon/\sigma$ ):  $\rho(\mathbf{x}, t) = \rho(\mathbf{x}, 0)e^{-t/\tau}$

Nei conduttori  $\epsilon \cong \epsilon_0$  (la costante dielettrica del vuoto ha il valore  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m); negli isolanti ha valori variabili, ma non è generalmente molto diversa da quella del vuoto ( $\epsilon_r = 1 \div 10$ ). Ne segue

che, per i conduttori,  $\tau \cong 10^{-17}$  s e dunque la densità di carica si estingue immediatamente: le cariche vanno a disporsi sulla superficie di separazione tra conduttore ed isolante. Viceversa, per gli isolanti,  $\tau = 1 \div 10^4$  s e dunque occorre un tempo, che può andare da qualche secondo ad alcune ore, prima che la carica nell'interno dell'isolante scompaia.

	$\epsilon_r$	K [MV/m]	$\tan \delta$	$T_{\max}$ [°C]	$\kappa$ [W/mK]	$\rho_m$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Bachelite	5	15	0.03	130	0.27	1600
Ebanite	3	50	0.005	80	0.15	1400
Tessuto impregnato	5	17	0.1	95	0.24	-
Vetro (crown)	5	6	0.02	-	0.60	2200
Vetro (indurito)	6	10	0.03	-	-	-
Mica	6	40	0.02	750	0.60	2800
Carta secca	2.2	5	0.007	90	0.13	820
Carta impregnata	3.2	15	0.06	90	0.14	1100
Porcellana	5.7	15	0.008	1000	1.00	2400
Quarzo	4	13	0.002	1000	1.20	2200
Gomma pura	2.6	18	0.005	50	0.10	1500
Gomma vulcanizzata	4	10	0.01	70	0.25	1500
Paraffina	2.2	12	0.0003	35	0.27	860

Va inoltre sottolineata la struttura assai complessa di un solido dielettrico, normalmente un polimero, in generale in parte amorfo e in parte cristallino, completamente disomogeneo e sede di numerosissimi difetti strutturali e costruttivi. In tali condizioni si comprende come, da un lato, il campo presenti notevoli disuniformità con punte di innalzamento in siti particolari mentre a sua volta il materiale risponda a tale disuniformità con altrettante disuniformità nella resistenza. Proprio i difetti rappresentano i punti deboli dell'isolante, cioè i punti in cui inizia la scarica che può portare alla rottura.

La rigidità dielettrica è influenzata da molte grandezze (campo, temperatura, frequenza, deformazione, etc.) e anche dalle dimensioni dell'isolamento. Inoltre, il meccanismo di innesco della scarica elettrica è un fenomeno aleatorio, cosicché il campo elettrico effettivamente applicabile in realtà è ben inferiore alla rigidità dielettrica misurata su campioni. Infine, le proprietà degli isolanti degradano nel tempo a causa dell'invecchiamento.

Se è vero che un materiale isolante deve sempre resistere alla tensione applicata, esso in molti casi deve soddisfare anche ad altri requisiti. In particolare una grandezza fondamentale che contraddistingue i materiali isolanti è costituita dalla **permittività**  $\epsilon$  che è legata all'energia elettrostatica ( $\frac{1}{2} \epsilon E^2$ ) immagazzinata dai materiali isolanti sottoposti a una tensione. Il valore di  $\epsilon$  è determinante nel dimensionamento dei condensatori, ma grande importanza ha anche la sua costanza o meno con la temperatura e, nel caso dell'elettronica, con la frequenza. Un elevato valore di  $\epsilon$ , che contraddistingue i materiali polari, è spesso associato ad una sua notevole variabilità e ad un elevato valore di perdite di potenza. Queste perdite sono motivo di notevoli inconvenienti, limitando la portata dei cavi elettrici. La grandezza fisica che misura le perdite di potenza in un condensatore o in generale in un materiale isolante è il **fattore di dissipazione** ( $\tan \delta$ ), dato dal rapporto fra la potenza attiva e quella reattiva assorbita dal materiale, e che per buoni materiali ha valori dell'ordine del per mille o anche inferiori. Poiché le perdite specifiche dipendono dal quadrato dell'ampiezza del campo elettrico applicato, esse forniscono un ulteriore limite per il suo valore restringendo ulteriormente il campo dei materiali adatti all'impiego per le alte tensioni. Per ogni applicazione occorre perciò scegliere il materiale più idoneo, che sappia meglio rispondere all'insieme dei requisiti richiesti. È così che tutte le proprietà, elettriche, meccaniche, chimiche, tecnologiche, nonché ovviamente le considerazioni economiche, entrano in gioco nella scelta dell'isolamento.

Alla polarizzazione per campi variabili (e quindi in corrente alternata) sono associate perdite di potenza, dovute al fenomeno dell'isteresi (*perdite per isteresi dielettrica*). Tali perdite si aggiungono alle pur piccole perdite per conduzione, dovute alla resistività non infinita del materiale isolante, costituendo nel complesso le *perdite dielettriche*, misurate dal fattore di dissipazione,  $\tan \delta$ . Queste perdite, di entità molto modesta, non hanno tanto interesse in sé, come costo della potenza dissipata, ma in quanto limitano la

potenza trasmessa dai cavi per energia. La temperatura nell'isolante è legata infatti a tutte le perdite nel cavo (nel conduttore, nel dielettrico, nella guaina o armatura metallica) e poiché essa non può superare certi limiti per non compromettere la durata del cavo (il limite è normalmente di 90 °C per tutti i tipi più importanti di materiali oggi usati), ne segue che un elevato valore di  $\tan \delta$  e quindi di perdite dielettriche riduce la potenza dissipabile nel conduttore e quindi la corrente (e perciò la potenza) trasmissibile.

Un materiale isolante è detto anche dielettrico perché sotto l'azione di un campo elettrico si polarizza, ha cioè una reazione di opposizione al campo applicato ( $\mathbf{P} = \epsilon \mathbf{E} - \epsilon_0 \mathbf{E}$ ). La grandezza che misura l'intensità della polarizzazione dei dielettrici è la permittività  $\epsilon$  il suo rapporto rispetto alla permittività  $\epsilon_0$  del vuoto è, per i solidi, dell'ordine di qualche unità (costituiscono una eccezione i materiali ferroelettrici). Poiché la capacità di un condensatore piano (e tali possono essere considerati i condensatori reali, il cui dielettrico è costituito da un film avvolto insieme con le armature oppure, per basse tensioni, metallizzato) è pari a  $\epsilon S/d$ , le dimensioni di un condensatore risulteranno, a parità di capacità, inferiori, se il dielettrico ha permittività elevata.

In un condensatore si accumula una energia elettrostatica; in corrente alternata la potenza reattiva corrispondente è data da  $\omega CV^2$ , ovvero, per unità di volume  $\omega \epsilon E^2$ . Poiché questa potenza reattiva capacitiva è di segno opposto a quella induttiva, particolarmente elevata per i circuiti avvolti su materiale ferromagnetico (ad alta induttanza  $L$ ) quali sono gli avvolgimenti delle macchine elettriche, i condensatori possono avere anche il compito del *rifasamento* degli impianti elettrici, consistente nella riduzione dell'energia reattiva complessivamente assorbita dall'impianto e il conseguente aumento del fattore di potenza. Trattandosi di condensatori di notevole potenza e quindi di grosse dimensioni, la scelta migliore è quella di minimizzare il volume di dielettrico a parità di potenza. L'aumento della potenza specifica si può ottenere da un aumento di  $\epsilon$  ma ancor di più da un aumento del campo elettrico  $E$  applicato. È dunque più economico l'uso di materiali ad alta rigidità e bassa  $\epsilon$  che non il viceversa. Ciò naturalmente vale solo per i condensatori di potenza. Per i condensatori per elettronica, a bassa tensione, lo spessore di isolamento è quello minimo consentito dalla tecnologia e dalla resistenza meccanica del film, e quindi le dimensioni risultano legate al valore di  $\epsilon$  del dielettrico, sempre piuttosto basso per i polimeri sintetici. Nel campo di capacità dell'ordine dei nF i condensatori avvolti lasciano il campo ai condensatori ceramici che usano come dielettrici i materiali ferroelettrici (ad esempio i titanati di bario, stronzio o piombo): dielettrici rigidi ad elevatissima  $\epsilon$  che permettono piccole dimensioni ma che non possono raggiungere elevate capacità dato il loro spessore piuttosto elevato. Essi inoltre presentano caratteristiche dielettriche più o meno variabili con la temperatura e con la frequenza.

A parte il caso dei condensatori, un elevato valore di  $\epsilon$  non è generalmente positivo. Nel trasporto di energia in cavo una corrente capacitiva, dipendente dalla tensione e dalla capacità trasversale del cavo, viene dispersa verso terra:  $I = \omega CV$ . Più è lungo il cavo e più alta la tensione, maggiore il valore della corrente dispersa, il che limita la lunghezza ammissibile del cavo, che risulta tanto minore quanto maggiore è la tensione. Da ciò l'uso della corrente continua nei casi di lunghe tratte in cui non sia possibile la trasmissione per via aerea (come per esempio nell'attraversamento di bracci di mare).