



MATERIALI ISOLANTI

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Materiali isolanti

I materiali isolanti hanno il compito di isolare elettricamente elementi a tensione differente, come ad esempio nelle macchine elettriche:

- ✚ le parti “attive” in tensione (avvolgimenti) dalle parti della macchina a potenziale di terra (nucleo magnetico, carcassa);
- ✚ i singoli conduttori che costituiscono un avvolgimento;
- ✚ avvolgimenti appartenenti a fasi diverse.

Il funzionamento e la durata delle macchine elettriche dipendono essenzialmente dagli isolanti, che costituiscono la parte più sensibile alle sollecitazioni termiche, dielettriche e meccaniche.

Alcuni esempi di isolanti solidi usati nelle macchine elettriche sono la carta, la mica, le resine, gli smalti, le vernici, il vetro, le plastiche.

Esistono anche isolanti liquidi (oli) e gassosi (aria, esafluoruro di zolfo), che rivestono particolare importanza per l'isolamento dei trasformatori e degli impianti elettrici.

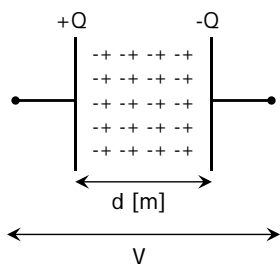
2

L. Frosini

Polarizzazione degli isolanti

I materiali isolanti, sottoposti all'azione di un campo elettrico, si **polarizzano** con un'intensità che risulta direttamente proporzionale al valore del campo elettrico stesso.

Per **polarizzazione** si intende la deformazione elettrica delle singole molecole del materiale, ossia lo spostamento delle cariche elettriche all'interno delle singole molecole nella direzione del campo.



Questi spostamenti di cariche elettriche sono paragonabili agli spostamenti delle particelle di un mezzo elastico sotto l'azione di forze deformanti.

3

L. Frosini

Permettività elettrica

A parità di campo elettrico a cui è sottoposto, ogni materiale isolante si polarizza con un certo grado e una certa modalità strettamente dipendenti dalla sua struttura molecolare.

Maggiore è il grado di polarizzazione del materiale, più alto risulta il valore della sua **permettività elettrica (o costante dielettrica) ϵ** , che può essere espressa come prodotto tra la permettività del vuoto ϵ_0 e la permettività relativa del materiale ϵ_r :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad [\text{F/m}] \quad \epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Se l'isolamento è omogeneo, la permettività è uno scalare di valore costante, indipendente dal valore del campo elettrico che sollecita il materiale, dalla temperatura e dalla frequenza.

La permettività relativa indica la predisposizione di un materiale a trasmettere (o permettere) un campo elettrico: un buon dielettrico, usato come isolante, deve avere bassa permettività.

4

Polarizzazione degli isolanti

Le forze elettriche di polarizzazione sono equilibrate dalle forze di reazione interna molecolare che collegano le cariche elettriche delle singole molecole, allo stesso modo in cui le forze di deformazione di un mezzo elastico sono equilibrate dalle forze di reazione elastica del mezzo.

Se le forze elettriche di polarizzazione raggiungono valori tali da non essere più equilibrate dalle forze di reazione interna molecolare, si ha il fenomeno della **scarica disruptiva** con perforazione dell'isolante, analogo al fenomeno di rottura di un mezzo elastico sollecitato da forze deformanti superiori a quelle di reazione elastica del mezzo.

Quindi, arrivati ad un certo valore del campo elettrico, il materiale dielettrico perde le sue caratteristiche isolanti, così come un corpo elastico si rompe se sottoposto a una sollecitazione meccanica eccessiva.

5

Polarizzazione degli isolanti

Infatti, ad un aumento dell'intensità del campo elettrico corrisponde un aumento delle forze elettriche di polarizzazione che sollecitano gli elettroni periferici dell'atomo.

Quando le forze di reazione interna molecolare, che tengono legati gli elettroni periferici al loro nucleo, non riescono più ad equilibrare quelle dovute al campo elettrico esterno, gli elettroni sfuggono all'azione del loro nucleo diventando liberi e determinando quindi nella massa del materiale una corrente elettrica.

Questa corrente, producendosi pressoché istantaneamente, viene denominata **scarica elettrica**. Essa è tale da creare effetti termici e luminosi notevoli e da portare alla temporanea o permanente perdita delle caratteristiche isolanti del materiale, a seconda del tipo di materiale e della vastità e durata di questo fenomeno.

6

Rigidità dielettrica

Il valore dell'intensità del campo elettrico corrispondente alla tensione di scarica è denominato **rigidità dielettrica** e si esprime in V/m o, in unità pratiche, in kV/mm.

La rigidità dielettrica di un materiale è funzione di diversi fattori tra cui:

- l'omogeneità e la purezza del materiale,
- l'umidità e la temperatura,
- il tipo di sollecitazione (andamento e durata del campo elettrico).

Quindi la rigidità dielettrica non è una vera e propria costante del materiale, ma un parametro indicativo circa le possibilità che il materiale ha di resistere ai campi elettrici.

In particolare, la rigidità dielettrica diminuisce notevolmente col crescere della temperatura e della durata della tensione applicata.

La rigidità dielettrica degli oli minerali diminuisce notevolmente anche con piccole tracce di umidità.

7

Materiali isolanti

I parametri che caratterizzano gli isolanti sono quindi:

- Permittività relativa ϵ_r ,
- Rigidità dielettrica E_r ,

Sostanza	Permittività relativa (ϵ_r)	Rigidità dielettrica (E_r) (kV/mm)
Aria (pressione 1 bar)	1,0006	3
Metano (pressione 1 bar)	1,0009	—
Vapor d'acqua (117°C)	1,006	—
Olio minerale	2,2	20
Paraffina	2,2	30
Polietilene	2,3	40
Polistirolo	2,3	40
Carta	2,3	8
Cloruro di polivinile	4	50
Bachelite	5	10
Vetro	6	20
Porcellana	6	30
Mica (muscovite)	7	100
Alcool etilico	25	—
Alcool metilico	31	—
Acqua (purissima)	80	10
Ossido di titanio	90 ÷ 170	5
Titanati di Ba-Sr	1000 ÷ 10 000	5

8

Rigidità dielettrica e scariche parziali

Alcuni valori indicativi della rigidità dielettrica dei materiali usati più frequentemente come isolanti sono i seguenti:

■ Aria	3 kV/mm
■ Olio minerale	20 kV/mm
■ Porcellana	30 kV/mm
■ Polietilene	40 kV/mm
■ Mica	100 kV/mm

Essendo la rigidità dielettrica dell'aria inferiore a quella di qualunque isolante non gassoso, è chiaro che in presenza di vuoti d'aria all'interno dell'isolante solido o liquido possono verificarsi **scariche parziali**, che interessano cioè solo una parte dello spessore dell'isolamento e non provocano la scarica totale, ma possono accelerare il deterioramento del materiale isolante. I valori di rigidità dielettrica dei gas più comuni sono simili a quello dell'aria e crescono proporzionalmente ai valori di densità.

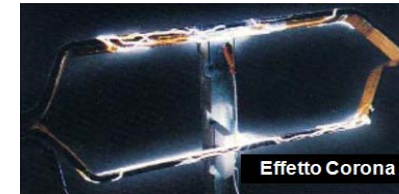
9

Effetto corona

Un caso particolare di scarica è dato dall'**effetto corona**: questo fenomeno si presenta quando l'aria che circonda un conduttore perde, in vicinanza della sua superficie, le caratteristiche isolanti.

Ciò avviene quando l'intensità del campo elettrico supera il valore della rigidità dielettrica dell'aria.

Il fenomeno prende il nome di corona perché attorno al conduttore è talvolta visibile una corona luminosa dovuta alla ionizzazione dell'aria.



10

Caratteristiche di un materiale isolante

Un materiale isolante è sottoposto alle seguenti sollecitazioni:

- *sollecitazioni dielettriche con gradienti di tensione relativamente elevati;*
- *sollecitazioni termiche;*
- *sollecitazioni meccaniche cicliche dovute:*
 - dilatazione del rame e del ferro,
 - vibrazioni dovute al moto delle parti in movimento (nelle macchine rotanti),
 - vibrazioni dovute alle forze di Lorentz in condizioni normali,
 - sforzi elettrodinamici di breve durata, ma molto intensi, dovuti alle forze di Lorentz in caso di sovracorrenti;
- *deterioramento chimico reso attivo dai valori relativamente elevati della temperatura.*

11

Qualità desiderate dai materiali isolanti

- *ottime qualità dielettriche:* elevata rigidità dielettrica.
- *buone qualità termiche:* buona conducibilità termica, buona resistenza al calore.
- *buone qualità meccaniche:* resistenza agli sforzi, sufficiente elasticità, resistenza all'abrasione, adesione al rame o all'alluminio.
- *buone qualità chimiche:* elevata stabilità chimica, inattaccabilità dai prodotti della ionizzazione.
- *tempo di vita elevato*
- *fabbricabilità:* i materiali impiegati debbono permettere la realizzazione dell'isolamento senza eccessive difficoltà o tempi di lavorazione, consentire la realizzazione dell'isolamento senza vuoti interni e aderire al conduttore anche nelle parti curve.
- *costo accettabile*

12

Sollecitazione dielettrica

La grandezza elettrica che sollecita un materiale isolante, definita come *sollecitazione dielettrica*, è il campo elettrico E [V/m].

Il campo elettrico E è proporzionale alla tensione applicata V e dipende dalla geometria del materiale isolante a cui è applicato.

Quando la sollecitazione dielettrica è troppo elevata, provoca un danneggiamento temporaneo o permanente (a seconda del tipo di materiale) dell'isolante, che compromette la funzionalità della macchina o dell'impianto in cui l'isolante è inserito.

La **rigidità dielettrica** E_r [V/m] è il massimo valore della sollecitazione dielettrica che può essere applicata a un materiale senza danneggiarlo.

13

Dimensionamento dielettrico

Dopo aver scelto il materiale isolante, il suo *dimensionamento dielettrico* consiste nel determinarne la geometria in modo che la sollecitazione dielettrica non provochi danneggiamenti; questo significa che le dimensioni e la forma del materiale debbono essere tali per cui la sollecitazione dielettrica a cui può essere sottoposto (non solo in condizioni normali, ma anche in condizioni anomale) sia inferiore alla sua rigidità dielettrica: $E < E_r$.

Poiché la sollecitazione dielettrica E dipende dalla tensione applicata V , è ovvio che il dimensionamento deve essere fatto in relazione ad un ben determinato valore della tensione applicata:

Trasformatore trifase in Resina Matricola n° **34342** Collaudo eseguito secondo le Norme CEI : 14-8

CARATTERISTICHE TECNICHE				
		Avvolgimento Primario	Avvolgimento Secondario	
Potenza (KVA)	2000	2000	2000	
Tipo	TTA-RES			
Anno di Costruzione	2005	15000	400	
Tipo Raffreddamento	AN	Variazione	+/-2x2.5%	no
Gruppo Vettoriale	Dyn11	Correnti (A)	76.98	2886.75
Classe d'isolamento	F	Collegamento	Triangolo	Stella + n
Sovra Temperatura	100.0 °C	Tensione d'isol (KV)	17.5	1.1
Frequenza	50 Hz			

14

Livello d'isolamento

Si definisce *livello d'isolamento* il valore della tensione applicata che determina il dimensionamento dielettrico di un materiale isolante.

Il livello d'isolamento di solito è *superiore* (spesso molto superiore) al valore della tensione nominale, e questo perché:

- il dimensionamento dell'isolante deve tener conto delle sovratensioni, di lunga durata o transitorie, che possono sollecitare la macchina in particolari condizioni d'esercizio o per effetto di anomalie;
- il dimensionamento dell'isolante è in relazione con l'affidabilità che si intende dare all'apparecchiatura: maggiore sicurezza → livello d'isolamento più alto.

Il corretto dimensionamento di un isolamento viene verificato con prove di collaudo in laboratorio applicando all'isolamento in prova le tensioni previste dal livello d'isolamento; per questo il *livello d'isolamento* indica di solito le tensioni di prova che la macchina o l'apparecchiatura deve reggere senza danneggiamenti.

15

Sovratensioni

Le tensioni in un sistema elettrico sono comprese, in condizioni di funzionamento normale, ossia in assenza di perturbazioni significative, entro un livello ristretto (generalmente $\pm 10\%$) intorno alla tensione nominale.

In condizioni di funzionamento anormale, la tensione tra due fasi o tra una fase e terra può superare in certi punti del sistema tali limiti.

Si parla in questi casi di *sovratensioni*, che possono arrivare a sollecitare una macchina o una apparecchiatura elettrica, in quanto trasmesse dalla linea elettrica cui la macchina è collegata.

Esse possono essere suddivise in due categorie:

- ⚡ sovratensioni di origine esterna, dovute essenzialmente a fenomeni atmosferici;
- ⚡ sovratensioni di origine interna o di manovra, che derivano da cause connesse con l'esercizio del sistema.

16

Sovratensioni di origine esterna

Le *sovratensioni di origine esterna* sono sostanzialmente di origine atmosferica:

- fulminazione diretta;
- fulminazione indiretta (sovratensioni indotte in linea).

Sono caratterizzate da onde impulsive unidirezionali di breve durata con:

- livelli energetici e di tensione non correlati alle caratteristiche nominali del sistema elettrico su cui incidono, ma correlati alla quantità di carica che il fulmine scarica sulla linea e, quindi, alla durata e alla intensità del fulmine stesso;
- durata dei fenomeni dell'ordine delle decine di μ s.

Questo tipo di sovratensione può raggiungere valori elevatissimi (tensioni di picco dell'ordine di 1000 kV) e costituisce un grave pericolo per gli impianti.

Fulminazione diretta in una linea ad alta tensione



Fulminazione indiretta in prossimità di una linea in alta tensione



Sovratensioni atmosferiche

fulminazione
indiretta

fulminazione
diretta



Sovratensioni di origine interna o di manovra

Le *sovratensioni di origine interna* o di manovra sono generalmente dovute all'apertura o chiusura degli interruttori del sistema elettrico e quindi hanno un'ampiezza che dipende dalla tensione nominale del sistema in cui si manifestano.

Possono essere prodotte dai fenomeni di interruzione o da altri fenomeni transitori, come ad esempio:

- distacchi di carico;
- messa in tensione di linee o trasformatori;
- guasti a terra;
- interruzione di carichi induttivi o capacitivi;
- variazioni di carico;
- interruttori non perfettamente funzionanti;
- apertura di sezionatori lenti.

Isolanti gassosi

Tra gli isolanti gassosi impiegati nell'industria elettrica i più importanti sono:

Gas	Applicazioni
Aria	Linee aeree, isolamenti esterni di isolatori passanti, interruttori, TV e TA (trasformatori di misura)
Esafluoruro di zolfo (SF ₆)	Isolamenti interni di isolatori passanti, interruttori, TV capacitivi, blindosbarre

Si può citare anche l'idrogeno, impiegato come fluido di raffreddamento in generatori sincroni di grande potenza.

Isolamenti autoripristinanti

In teoria gli isolamenti gassosi sono autoripristinanti, nel senso che riacquistano le loro proprietà dielettriche dopo che si è verificata una scarica elettrica.

Questa loro proprietà deriva dal fatto che le molecole deteriorate dal processo di scarica (particelle ionizzate, alterate chimicamente, ecc.) vengono, per effetto dei moti interni del gas, rapidamente sostituite dalle molecole circostanti non alterate.

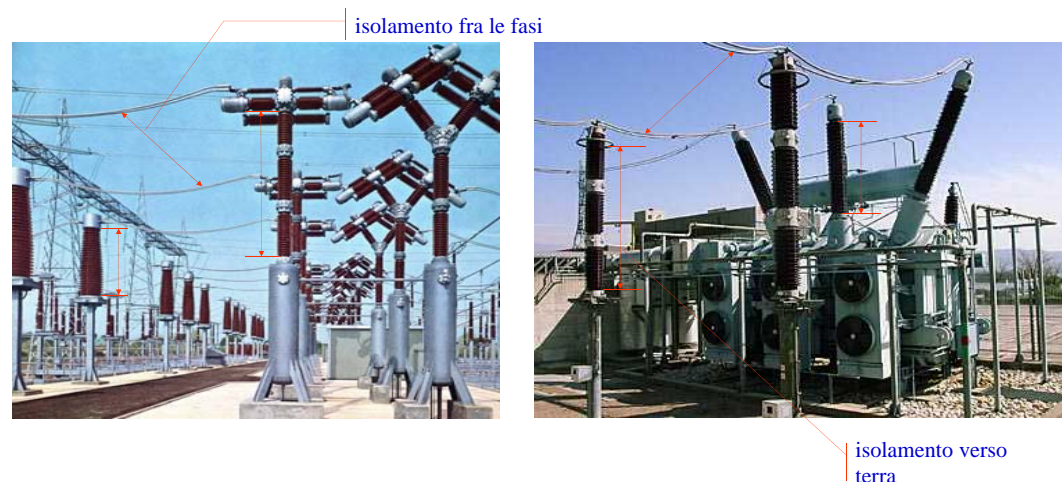
Questo processo di ripristino viene ostacolato quando il gas, in quantità limitata, è contenuto in un ambiente chiuso (cassoni di rivestimento di macchine elettriche, interruttori, blindosbarre, ecc.).

Quindi *l'unico isolante gassoso realmente autoripristinante è l'aria*, che costituisce l'isolamento verso terra e fra le fasi, sia di bassa che di altissima tensione, delle linee aeree e delle sbarre di centrali e sottostazioni elettriche, e di alcune parti delle macchine ed apparecchiature elettriche.

La permittività relativa dell'aria è circa uguale ad 1.

In quanto autoripristinante, l'aria non presenta problemi d'invecchiamento.

Esempi di isolamenti in aria



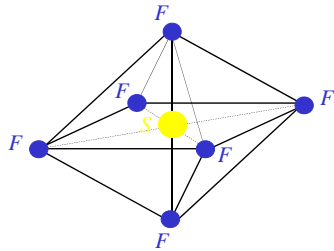
Esafluoruro di zolfo SF6

L'esafluoruro di zolfo ha eccellenti proprietà dielettriche: la sua **rigidità dielettrica**, a parità di altre condizioni, è **2,5÷3 volte quella dell'aria**.

Ad esempio, con campo elettrico uniforme a pressione atmosferica si ha:

per l'aria: $E_r = 3 \text{ kV/mm}$; per l'SF6: $E_r = 9 \text{ kV/mm}$.

È un ottimo agente di estinzione dell'arco elettrico e la sua efficacia può essere valutata in 10 volte quella dell'aria.



25

Caratteristiche dell'SF6 e campi d'impiego

caratteristiche

- ha una buona conducibilità termica ed una eccellente stabilità termica;
- è inodore, incolore e non tossico e non provoca effetti fisiologici specifici (però in ambienti saturi di SF6 può verificarsi una carenza di ossigeno);
- i sottoprodotti della sua decomposizione (in particolare l'acido fluoridrico) possono essere dannosi per le apparecchiature, per cui necessita di opportune precauzioni;
- poiché è utilizzato in contenitori chiusi, la scarica elettrica porta ad un deterioramento delle sue qualità dielettriche che può essere limitato con opportuni trattamenti.

applicazioni

- interruttori
- isolatori passanti
- blindosbarre
- TV capacitivi
- apparecchiature elettroniche
- trasformatori (tecnologia recente)

Nota: se disperso, è estremamente dannoso per l'ambiente (effetto serra).

Esistono normative specifiche di sicurezza per il personale che lo utilizza.

26

Apparecchiature in SF6



Interruttore trifase per alta tensione



blindosbarre

TV capacitivo per alta tensione



27

Apparecchiature in SF6



Stazione blindata a 145 kV con isolamento in SF6

Trasformatore 22 kV/390 V, 1500 kVA, isolato in SF6



28

Isolanti liquidi

Gli isolanti liquidi utilizzati nelle macchine ed apparecchiature elettriche sono essenzialmente degli oli, di diversa origine e composizione:

- Oli minerali, derivati del petrolio;
 - Oli siliconici;
 - Esteri sintetici;
 - Esteri organici (o naturali).
- } più costosi, generalmente utilizzati per potenze non elevate (qualche MVA) e applicazioni speciali

Nota: l'olio isolante, in unione con la carta (cellulosa pura), costituisce ancora il sistema isolante (carta-olio) principale per apparecchiature di grande potenza in media e alta tensione, quali trasformatori, isolatori passanti, cavi, condensatori.

Qualità desiderate per un liquido isolante

- Rigidità dielettrica e resistività elevate.
- Conducibilità termica e calore specifico elevati.
- Stabilità chimica e buon assorbimento dei gas.
- Bassa viscosità a bassa temperatura.
- Bassa volatilità ed elevato punto di accensione.
- Bassa densità.
- Buone capacità di estinzione dell'arco.
- Bassa attitudine a formare gas.
- Non infiammabile (ma l'olio minerale lo è), non tossico.
- Basso impatto ambientale.
- Economico e facilmente reperibile.

Oli minerali

La norma CEI 10-1 definisce diverse caratteristiche degli oli minerali, tra cui:

Tab 1 – Viscosità massima e punto di scorrimento dell'olio per trasformatori alla minima temperatura di energizzazione a freddo (LCSET)

LCSET °C	Viscosità massima mm ² /s	Punto di scorrimento massimo °C
0	1 800	-10*
-20	1 800	-30*
-30	1 800	-40
-40	2 500	-50*

* Facoltativo.

Si definisce una viscosità massima alle basse temperature perché la viscosità influenza il processo di trasferimento del calore: più la viscosità è alta, più è difficile che l'olio circoli, peggiorando il processo di trasferimento del calore. Alle basse temperature, una maggiore viscosità costituisce un fattore critico per l'energizzazione a freddo dei trasformatori con raffreddamento a circolazione naturale (Oil Natural). Il valore più comune di LCSET è -30°C. Il punto di scorrimento è la temperatura minima a cui l'olio inizia a scorrere: si raccomanda che sia almeno 10°C inferiore a LCSET.

Presenza di umidità e gas nell'olio minerale

Un basso contenuto d'acqua nell'olio minerale isolante è necessario per ottenere una rigidità dielettrica adeguata.

Nell'olio minerale si possono formare i seguenti **gas**: idrogeno, idrocarburi leggeri (etano, metano, etilene, acetilene), monossido e biossido di carbonio.

Motivi per cui si formano i gas:

- guasti elettrici (cedimento degli isolamenti e conseguente scarica): in questo caso si possono avere quantitativi importanti di gas ed intervento del relé Bucholz;
- degradazione della cellulosa (isolamenti in carta-olio) o dell'olio per effetto dell'invecchiamento;
- ridotta compatibilità fra olio ed altri materiali (vernici isolanti e metalli possono esaltare il fenomeno).

È importante verificare che l'olio nelle condizioni di esercizio abbia una ridotta capacità di formazione di gas.

Infiammabilità dell'olio minerale

L'olio isolante è un materiale ad alto rischio d'incendio (temperatura di infiammabilità circa 150°C), per cui è necessario adottare opportune precauzioni, soprattutto quando è presente in elevata quantità, come ad es. nei trasformatori di elevata potenza.



vasca di contenimento dell'olio

33

Infiammabilità dell'olio minerale



Per ulteriori esempi, cercare in rete il video dell'incendio della centrale di Brugherio (2009) e altri.

34

Altri fluidi isolanti

A partire dagli anni '70, sono stati valutati altri fluidi isolanti per sostituire l'olio minerale, specialmente allo scopo di evitare i rischi legati alla sua infiammabilità.

Inizialmente sono stati impiegati i liquidi siliconici (anni '80), successivamente gli esteri sintetici (anni '90), per arrivare agli anni 2000 con gli esteri naturali.

Le applicazioni tipiche sono ferroviarie, navali, piattaforme off-shore e tutte quelle in cui sia necessario evitare il rischio di incendio, quindi ad es. cabine MT/BT situate all'interno o in prossimità di edifici pubblici e/o frequentati da un elevato numero di persone.

Table 2.1: Use of insulating liquids

	Mineral oil	Silicone fluid	Synthetic ester	Vegetable oils (natural ester)
Power transformers	A	X	B	B
Traction transformers	A	A	A	X
Distribution transformers	A	A	A	A
Instrument transformers	A	X	X	X

→ AT/MT
→ MT/BT
→ MT/BT

(Key: A = Largely used, B = Used but less common, X = Currently not used)

"Experiences in Service with New Insulating Liquids", October 2010, CIGRE

35

Liquidi siliconici ed esteri organici (o naturali)

Caratteristiche dei liquidi siliconici:

- derivati dalla chimica del silicio;
- elevata stabilità termica e temperatura di infiammabilità > 340°C;
- permittività relativa ϵ_r pari a 2,7÷3;
- caratteristiche dielettriche paragonabili a quelle degli oli minerali.

Alcune caratteristiche degli esteri organici (o naturali):

- composti naturali, in genere derivati da oli di semi (soia, girasole, colza);
- ottima stabilità termica e temperatura di infiammabilità > 350°C;
- permittività relativa ϵ_r più elevata (2,9÷4,3);
- altissima tolleranza all'umidità;
- biodegradabilità superiore al 90%.

36

Esteri organici (o naturali)

Negli ultimi anni si sta puntando all'uso degli esteri naturali, anche per una questione di immagine di sostenibilità e rispetto dell'ambiente, per cui sono stati approfonditi studi e applicazioni al riguardo, dai quali sono emerse le seguenti ulteriori caratteristiche:

- scarsa resistenza all'ossidazione: proprio perché sono biodegradabili, non sono stabili all'ossidazione, quindi non devono "respirare" ossigeno! Per questo devono essere usati in trasformatori a riempimento integrale oppure con conservatore con membrana.
- È molto più viscoso alle basse temperature rispetto all'olio minerale (ma alle alte temperature lo è di meno), quindi occorre tenere conto di questa caratteristica.
- Ha il grande vantaggio di assorbire acqua, quindi rimuove acqua dalla cellulosa della carta che ricopre gli avvolgimenti e forma uno strato protettivo sulla cellulosa: per questo motivo, in base alle prime analisi, sembra che sia in grado di estendere la vita dell'isolamento di un trasformatore.

37

Esteri sintetici

Caratteristiche degli esteri sintetici (composti chimici, ma biodegradabili):

- temperatura di infiammabilità > 250°C e alto calore specifico, quindi elevata resistenza all'accensione e lenta velocità di riscaldamento.
- grande resistenza all'ossidazione e basso punto di scorrimento. Mantengono un'alta tensione di guasto (tensione di scarica) anche con elevati livelli di umidità. Al contrario, piccole quantità di acqua nell'olio minerale causano un rapido abbassamento della tensione di guasto.

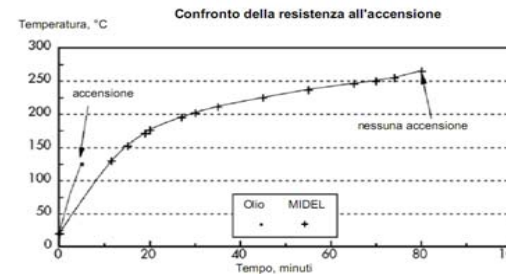
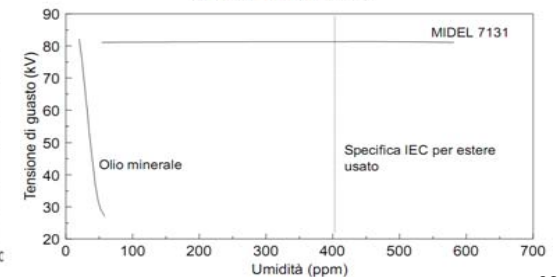


Diagramma 1: Effetto dell'umidità sulla tensione di guasto di MIDEL 7131 e dell'olio minerale



38

Fluidi non infiammabili

Il costo dei fluidi alternativi all'olio minerale è decisamente superiore a quest'ultimo: è variabile a seconda del fluido ma, indicativamente, possiamo considerarlo pari a 3 volte quello dell'olio minerale.

In alcuni paesi, come ad es. in Brasile, già da alcuni anni si sta spingendo verso l'uso degli esteri naturali, in quanto sono considerati non infiammabili e quindi si riducono sensibilmente i costi impiantistici per i sistemi antincendio e si riducono anche le distanze tra trasformatori all'interno di una stazione elettrica AT/MT o di una cabina MT/BT: quindi i vantaggi sono sia economici, sia di contenimento degli spazi.

Al contrario, in Italia le leggi non prevedono semplificazioni dei sistemi antincendio per trasformatori isolati con esteri naturali, pertanto non si sta spingendo verso tale tecnologia.

Pertanto, attualmente (almeno in Italia) quasi tutti i trasformatori raffreddati tramite liquido isolante impiegano olio minerale, in quanto i vantaggi che possono derivare dall'utilizzo degli altri tipi di liquido non sono tali da giustificare gli aumenti di costo, tranne che in applicazioni specifiche, come già detto.

39

Isolanti solidi

Gli isolanti solidi hanno una vastissima applicazione nell'industria elettrica ed elettronica, dalla bassa alla alta tensione:

Materiale	Applicazioni
Carta e cartoni di cellulosa (*)	Trasformatori, condensatori, TV, TA, isolatori passanti
Gomme naturali e sintetiche	Cavi, macchine elettriche
Materiali polimerici (film sottili, pressofusioni, materiali estrusi, vernici, smalti)	Macchine rotanti, trasformatori, cavi, apparecchiature elettroniche, accessori
Materiali impregnati	Macchine elettriche, condensatori
Materiali inorganici (mica)	Macchine rotanti
Porcellane	Isolatori portanti, isolamento esterno di passanti, TV, TA, interruttori, ecc.
Vetro	Isolatori per linee aeree

(*) La carta di cellulosa viene di solito utilizzata impregnata con l'olio isolante.

40

Caratteristiche dielettriche degli isolanti solidi

- rigidità elettrica molto elevata, fino a oltre 100 kV/mm, che permette di ridurre le dimensioni del sistema isolante;
- permittività relativa che va da 1,5÷2,5 a 6.

Valori tipici di rigidità dielettrica di alcuni materiali isolanti solidi [kV/mm]

Bachelite	10
Carta non trattata	6
Carta paraffinata	40-50
Gomma naturale	20-40
Mica	50-120
Polietilene	50
Politetrafluoroetilene	65
Porcellana	12-30
Vetro	25-100

41

Sollecitazione termica degli isolanti solidi

- in un materiale isolante solido ogni danneggiamento, anche minimo, dovuto a qualsiasi causa, è un danneggiamento permanente; gli isolanti solidi subiscono dunque un progressivo deterioramento dovuto alla loro vita operativa, ma anche alle condizioni della loro preparazione o conservazione in magazzino;
- il deterioramento che si verifica durante la vita operativa è dovuto alle varie sollecitazioni cui l'isolante è sottoposto: termiche, meccaniche (vibrazione, sforzi), elettriche, chimiche, ambientali, radiazioni, polveri, ecc.;
- fra tutte queste sollecitazioni, quella che viene ritenuta la più importante è quella **termica** (temperatura di funzionamento), anche perché un'elevata temperatura accelera il processo di degrado dovuto alle altre sollecitazioni.

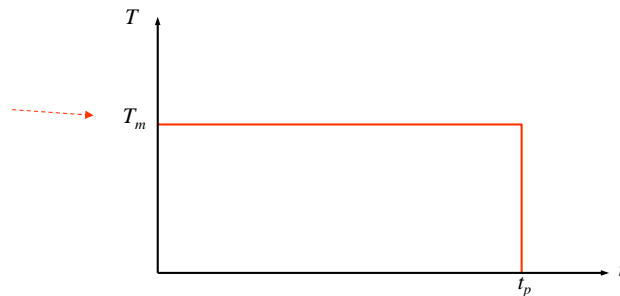
È quindi molto importante stabilire la massima temperatura cui un isolante può essere sottoposto e questo significa che il dimensionamento di un isolamento solido è in realtà un problema di dimensionamento termico.

42

Temperatura massima di servizio

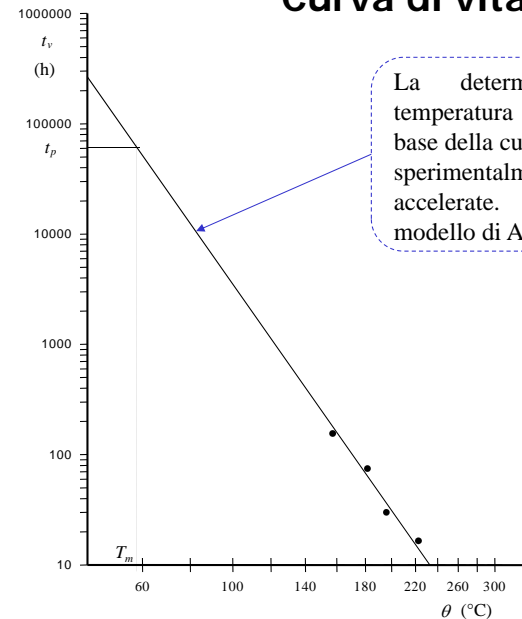
La massima temperatura di servizio T_m è quella che, applicata permanentemente al materiale per tutta la durata della vita operativa, determina un tempo di vita pari a quello di progetto t_p .

Questa definizione implica un ciclo termico in cui la temperatura è costante per tutta la durata della vita operativa:



43

Curva di vita termica



La determinazione della massima temperatura di servizio viene fatta sulla base della curva di vita termica determinata sperimentalmente con prove di vita accelerate. Viene di solito seguito il modello di Arrhenius.

L'effetto dell'invecchiamento termico è di rendere l'isolamento più vulnerabile ad altri stress che producono il guasto.

Per aumentare la vita termica dell'isolante si può ridurre la temperatura di funzionamento o impiegare materiale con classe di isolamento superiore.

44

Curva di vita termica

Regola generale: per ogni 10° C di aumento di temperatura, la vita dell'isolamento è dimezzata.

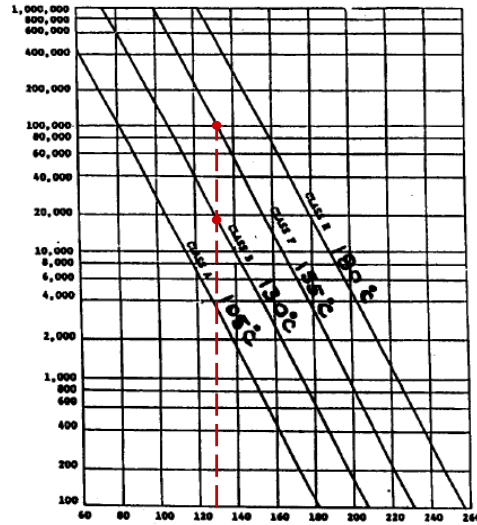
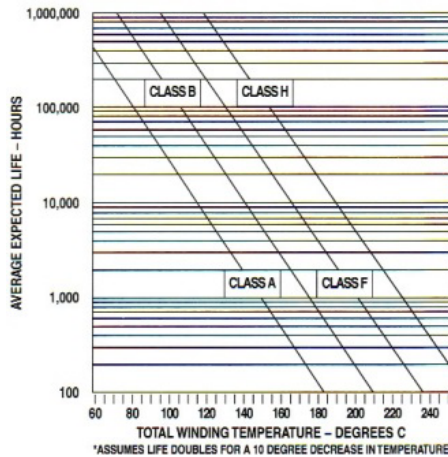


Fig. 1. Total winding temperature °C temperature versus life.

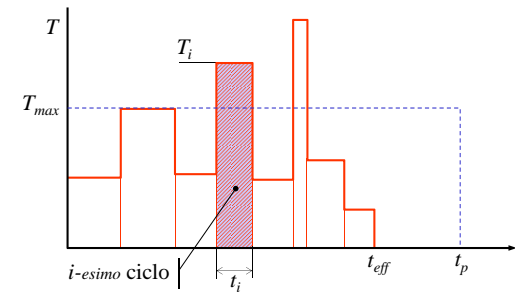
45

Cicli termici

Durante la sua vita operativa, un materiale isolante è in genere sottoposto a carichi variabili nel tempo in relazione a:

- passaggio da vuoto a carico,
- diverse condizioni operative,
- sovraccarichi di breve durata dovuti a guasti o anomalie.

La temperatura del materiale è quindi non costante nel tempo e in alcuni casi si ha $T > T_{max}$, che determina una durata di vita effettiva minore di quella di progetto: $t_{eff} < t_p$.



L'andamento della temperatura durante la vita operativa del materiale può essere schematizzato in n cicli termici della durata t_i e temperatura T_i .

46

Classi termiche dei materiali isolanti

A livello normativo, si fa riferimento alla norma CEI 15-26 (CEI EN 60085) che definisce le **classi termiche** in base alla **massima temperatura che gli isolanti elettrici possono sopportare senza perdere le loro proprietà dielettriche**:

Thermal class T_m	Previous designation
70	
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	
220	
250	

I valori di temperatura indicati sono desunti dall'esperienza dei progettisti, in base alla quale si può ottenere una durata di vita operativa soddisfacente quando l'isolante sia sollecitato da una temperatura $T \leq T_m$.

Le classi di maggior interesse nella realizzazione delle macchine elettriche sono quelle con temperatura massima 130°C, 155°C e 180 °C (ex-classi B, F e H).

47

Classe termica

Si deve tener presente che:

✓ la temperatura massima ammissibile di un materiale, e quindi l'appartenenza ad una classe termica, non è sempre fissata per un determinato tipo di materiale, ma dipende da una combinazione di condizioni (trattamento con altri materiali, metodo di preparazione, ecc.):

- un dato materiale può appartenere a diverse classi termiche ed è il produttore del sistema di isolamento che deve stabilire se il materiale selezionato è adatto per il relativo sistema di isolamento, conducendo eventualmente appositi test.
- ✓ il deterioramento di un materiale isolante può essere determinato, oltre che dalla temperatura, da numerosi altri fattori, quali stress elettrici o meccanici, vibrazioni, danneggiamenti atmosferici o chimici, polveri, radiazioni:
 - questo fatto, in relazione a particolari esigenze di servizio, può consigliare il progettista di adottare temperature massime ammissibili inferiori a quelle indicate dalle norme.

48

Classe termica

✓ Il corretto dimensionamento del sistema isolante di una macchina deve tendere ad assicurare la stessa durata di vita operativa per ogni singolo componente del sistema stesso; questo significa che i vari componenti, in relazione alle diverse sollecitazioni cui è sottoposto, possono avere una diversa temperatura massima ammissibile.

✓ Quindi la massima temperatura ammissibile T_m deve intendersi come la temperatura del singolo materiale isolante e non quella dell'intera macchina.

Ad esempio per un trasformatore immerso in olio:

Parte della macchina	Sovratemperatura ammessa (a partire da un valore massimo di temperatura ambiente di 40°C)
Avvolgimenti (classe B)	80 °C
Olio	60 °C

49

Isolamenti in porcellana



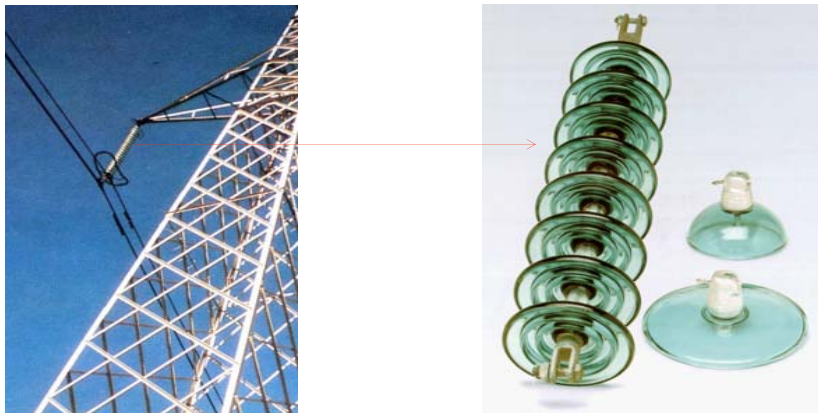
Porcellane per l'isolamento esterno di apparecchiature in alta tensione



Apparecchiature con isolamento esterno in porcellana (TA, TV, passanti, interruttori)

50

Linea aerea 220 kV con isolatori di sospensione in vetro



51

Isolatori in vetro temprato



Isolatore di sospensione tipo "cappa e perno"



Isolatore portante

52

Materiali polimerici

I materiali polimerici hanno un larghissimo impiego come isolanti nelle apparecchiature e nelle macchine sia in bassa che in alta tensione.

Il loro largo impiego è motivato da:

- ottime caratteristiche dielettriche e termiche: ad es. il PTFE (Poli tetrafluoroetilene) è un isolante in classe 250 e i poliammidi (nylon) in classe 180; questi ultimi vengono utilizzati anche come tessuti antifuoco.
- basso costo.
- ottime caratteristiche di lavorabilità:
 - i materiali **termoplastici** (es. polietilene) diventano plasmabili al crescere della temperatura; sono quindi lavorabili a caldo per stampaggio, estrusione, ecc.
 - i polimeri **termoindurenti** (es. poliestere, resina epossidica) devono essere modellati nella loro forma definitiva prima del processo di polimerizzazione; dopo non è possibile modificarne la forma agendo sulla sola temperatura.

53

Caratteristiche degli isolanti polimerici

Per un materiale isolante polimerico sono importanti alcune temperature:

- per l'esercizio:
 - **temperatura massima ammissibile (classe termica)**
 - **temperatura di transizione vetrosa T_g** :
per $T > T_g$ il polimero è *plastico*;
per $T < T_g$ il polimero diventa *duro e fragile*, inadatto a sopportare gli sforzi meccanici che derivano ad es. da brusche variazioni di carico.
- per la lavorabilità:
 - **temperatura di fusione T_f**

Nota: i materiali polimerici sono commercializzati con denominazioni create dai produttori; quindi si hanno diverse denominazioni commerciali per lo stesso prodotto.

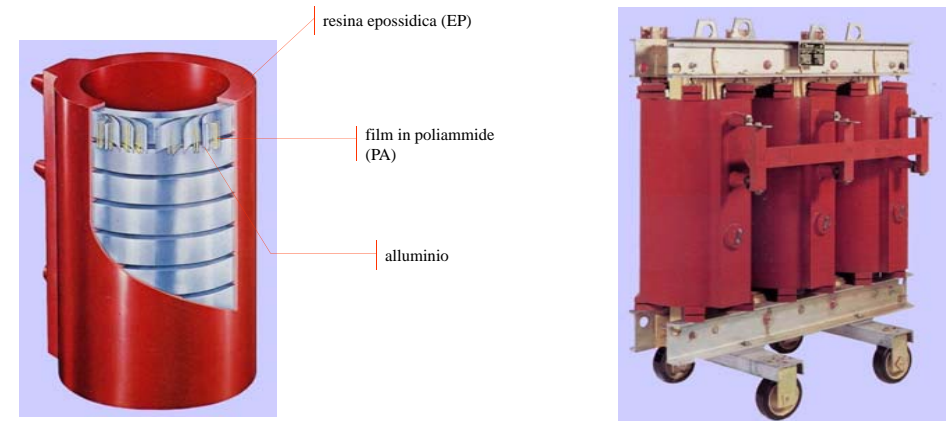
54

Sigle ISO e caratteristiche termiche per alcuni materiali isolanti polimerici

Polimero	sigla ISO	T_g (°C)	T_f (°C)	
Resina epossidica	EP			termoindurente
Poliammide	PA			termoplastico
Poliesametileneadipammide (nylon 66)	PA66	50	280	termoplastico
Policaprammide (nylon 6)	PA6	40	215	termoplastico
Polietilene	PE	- 130 ÷ - 80	137	termoplastico
Polietilene teraftalato	PET	74	265	termoplastico
Polietilene a bassa densità	XLPE	- 40		termoplastico
Polipropilene	PP	- 17	174	termoplastico
Poli tetrafluoroetilene	PTFE	- 73	335	termoplastico
Polimetilmetacrilato	PMMA	120	amorfo	termoplastico
Polivinilcloruro	PVC	≈ 84	90% amorfo	termoplastico
Policarbonato	PC	150	amorfo	termoindurente (reticolato)
Polistirene (polistirolo)	PS			termoplastico
Poliuretano	PUR			

55

Avvolgimenti di trasformatori isolati in resina epossidica - EP



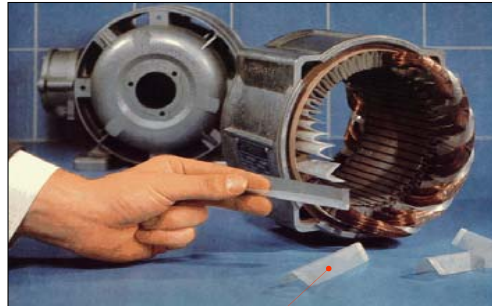
56

Smalti isolanti



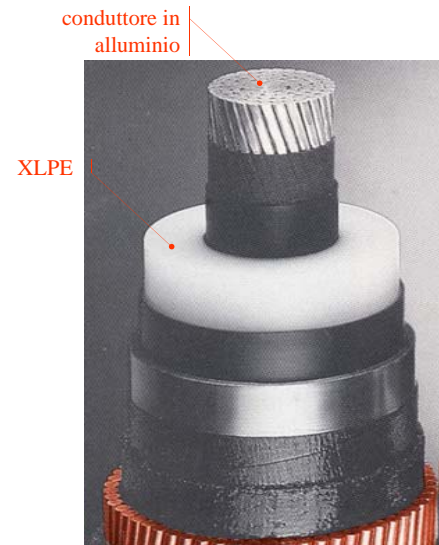
Avvolgimento di rotore in filo di rame smaltato di un motore asincrono di piccola potenza

Avvolgimenti isolati in poliammidi - PA



film di carta poliammidica

Cavi isolati in polietilene

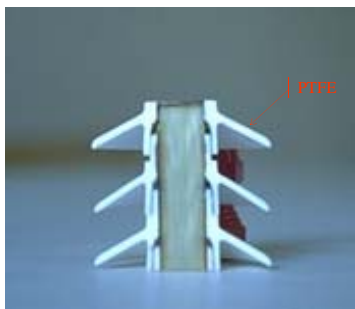
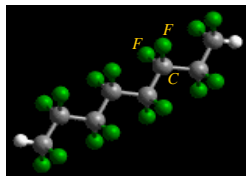


Cavo sottomarino per 400 kV isolato in XLPE



Cavo isolato in PE per 245 kV

Politetrafluoroetilene - PTFE



Isolatore portante per esterno con alette in PTFE

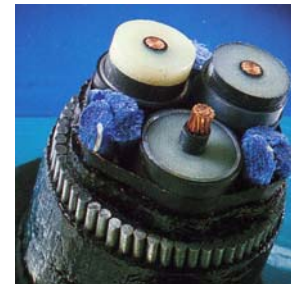


Supporti per circuiti stampati



Connettori BNC

Conduttori in rame in cavi tripolari per alta tensione

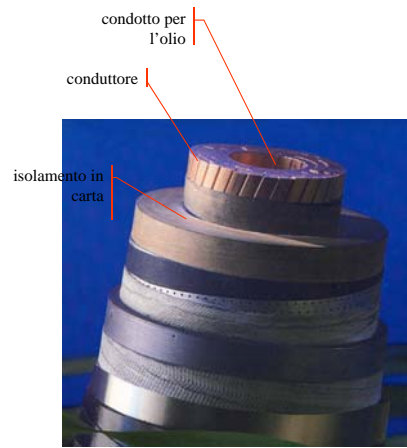


cavo in XLPE - 75 kV

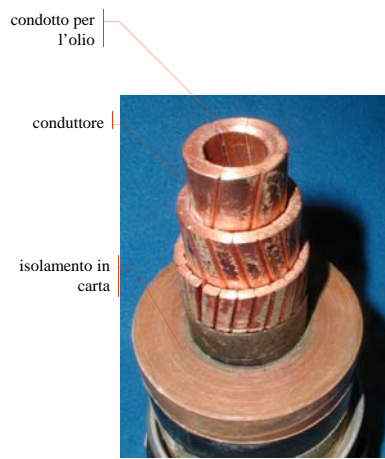


cavo in carta-olio - 185 kV

Suddivisione del conduttore in cavi per la trasmissione di grandi potenze



cavo sottomarino in carta-olio,
420 kV – $S = 800 \text{ mm}^2$



cavo in carta-olio (Pirelli)
400 kV

La suddivisione del conduttore viene anche fatta per garantire una adeguata flessibilità del cavo
(indispensabile per la posa del cavo stesso)