

Lezione 14

Principali materiali isolanti elettrici

5.1 Isolamenti gassosi

Gli isolanti gassosi di maggior interesse pratico sono due: l'aria e l'esafioruro di zolfo (SF_6).

L'aria è il dielettrico gassoso più impiegato nei sistemi in cui vi sono conduttori nudi e non si è costretti in ambienti chiusi, come ad esempio, nel caso delle linee di trasmissione dell'energia elettrica ad alta tensione. La rigidità dielettrica è piuttosto modesta e dipende sensibilmente dalle condizioni ambientali e dalla presenza di elementi inquinanti, nonché dall'umidità.

Aria	
Rigidità dielettrica (E_c)	3 kV/mm
Costante dielettrica relativa (ϵ_r)	1.00058
Conducibilità termica a 26°C e 1 bar(λ) [cal cm/ s °C]	$60 \cdot 10^{-6}$

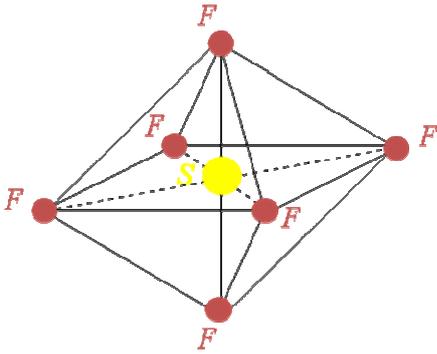


L'esafioruro di zolfo è impiegato diffusamente nei componenti per : un gas altamente elettronegativo, ha la particolarità che un gran numero di elettroni, subendo un processo di attaccamento, non è coinvolto nei fenomeni di ionizzazione. Infatti, gli ioni negativi che si formano, essendo molto pesanti, sono troppo lenti per contribuire allo sviluppo della valanga elettronica. Ne consegue che la rigidità dielettrica del gas è sicuramente maggiore di quella dell'aria e le sue prestazioni sono ottime come mezzo di spegnimento dell'arco elettrico negli interruttori in AT.

Le caratteristiche di tenuta alla tensione aumentano sensibilmente con la pressione del gas e alla pressione di circa 5 atm la rigidità dielettrica può essere circa 12 volte maggiore di quella dell'aria a pressione atmosferica.

Gli inconvenienti principali derivanti dall'uso dell' SF_6 risiedono negli effetti generati da scariche parziali che rilasciano particelle libere che diminuiscono sensibilmente le proprietà isolanti del gas. Per tale motivo è necessario evitare rigorosamente di spigoli vivi per scongiurare la presenza di scariche corona e, inoltre, è necessario prevedere unità di recupero, depurazione e filtraggio dell' SF_6 . Particolare cura deve essere dedicata alla pulizia degli elettrodi e delle superfici isolanti

SF_6	
Rigidità dielettrica (E_c) a 1 bar e 20 °C	6.4 kV/mm
Rigidità dielettrica (E_c) a 8 bar e 20 °C	50 kV/mm
Costante dielettrica relativa (ϵ_r)	1.002
Conducibilità termica a 26°C e 1 bar(λ) [cal cm/ s °C]	$33 \cdot 10^{-6}$



L'esafluoruro di zolfo ha una buona conducibilità termica ed una eccellente stabilità termica; è inodore, incolore e non tossico e non provoca effetti fisiologici specifici; i sottoprodotti della sua decomposizione (in particolare l'acido fluoridrico) possono essere dannosi per le apparecchiature, per cui necessita di opportune precauzioni per il suo impiego

Anche il vuoto è utilizzato come isolamento elettrico nelle camere di interruzione a media tensione o per cavi speciali quali i cavi a superconduttore dove esso funge sia da isolamento termico che da isolamento elettrico. Come abbiamo già osservato, la rigidità dielettrica del vuoto, che può arrivare anche a 15 kV/mm, dipende da numerosi fattori quali lo stato di finitura delle superfici degli elettrodi, la loro dimensione, la presenza di contaminanti, il condizionamento degli elettrodi, la pressione raggiunta, ecc.

5.2 Isolamenti solidi.

Esiste in commercio una grande varietà di materiali isolanti. Nella pratica i materiali isolanti solidi più significativi, che vengono impiegati in circa il 95% delle applicazioni, sono di seguito indicati:

- 1) Porcellana;
- 2) Vetro;
- 3) Mica;
- 4) Carta.
- 5) Materiali polimerici: polietilene; resina epossidica
- 6) Gomme sintetiche;

Porcellana

La porcellana è un materiale inorganico ceramico ed è prevalentemente utilizzata per isolatori in Alta e Media Tensione oppure nei passanti per uso esterno.



Porcellana	
Rigidità dielettrica (E_c)	20 ÷ 30 kV/mm
Costante dielettrica relativa (ϵ_r)	6
Fattore di dissipazione ($\text{tg}\delta$)	0.005

La porcellana può essere modellata a temperatura ambiente e lavorata in forme estremamente complesse. Ha ottime proprietà per uso esterno in quanto resistente alla maggior parte degli acidi ed inerte agli alcali e può essere esposta continuamente agli agenti atmosferici. Talvolta la superficie dei componenti in porcellana può essere trattata con siliconi per evitare il depositarsi di umidità e di incrostazioni dovute alla polvere.

Vetro

Il vetro è un materiale inorganico che ha come componente base il quarzo fuso (SiO_2) ed è generalmente utilizzato negli isolatori per linee aeree in Alta e Media Tensione (vetro temprato) oppure in Media e Bassa tensione (vetro verde e pyrex).

Il vetro temprato si ottiene tramite un brusco raffreddamento del materiale che inizialmente è stato portato ad alta temperatura (640 °C). Il vetro solidifica così più rapidamente all'esterno, cosicché la parte interna, durante la più lenta solidificazione, comprime la parte esterna. Questo processo di pre-compressione aumenta notevolmente la resistenza a trazione della parte esterna, che diviene anche 6 volta maggiore che nel vetro non trattato, rendendo possibile l'uso del vetro temprato come isolatore a sospensione nelle linee aeree ad alta tensione. Quando un isolatore di vetro temprato è sottoposto ad uno sforzo di trazione superiore a quello che può sopportare, si

Max temperatura di servizio (T_{max})	540	980
---	-----	-----



Carta

La carta è un prodotto a base di cellulosa la cui rigidità dielettrica dipende sensibilmente dalla sua densità. A causa della sua porosità, la rigidità dielettrica della carta può essere molto bassa corrispondere a quella dell'aria, per cui, generalmente, essa non è mai impiegata da sola come isolante, ma in combinazione con olio (nei trasformatori, nei cavi AT e MT, nei condensatori), con mica (nelle macchine rotanti) con resine sintetiche (nei passanti). Ad esempio, la combinazione dei due isolanti carta e olio migliora le prestazioni del sistema in quanto l'olio riempie le porosità e le cavità gassose della carta impedendo l'innescò della scarica nei gas, mentre la carta agisce da barriera, impedendo i movimenti dell'olio che agevolano il processo di scarica.

La tecnologia del sistema carta-olio è molto complessa in quanto occorre una perfetta impregnazione, con assenza totale di bolle d'aria o di impurità, che sarebbero sede di scariche parziali. Ambedue i componenti vengono preventivamente trattati e poi l'impregnazione è effettuata in autoclave sotto vuoto spinto per eliminare ogni traccia di aria e umidità.

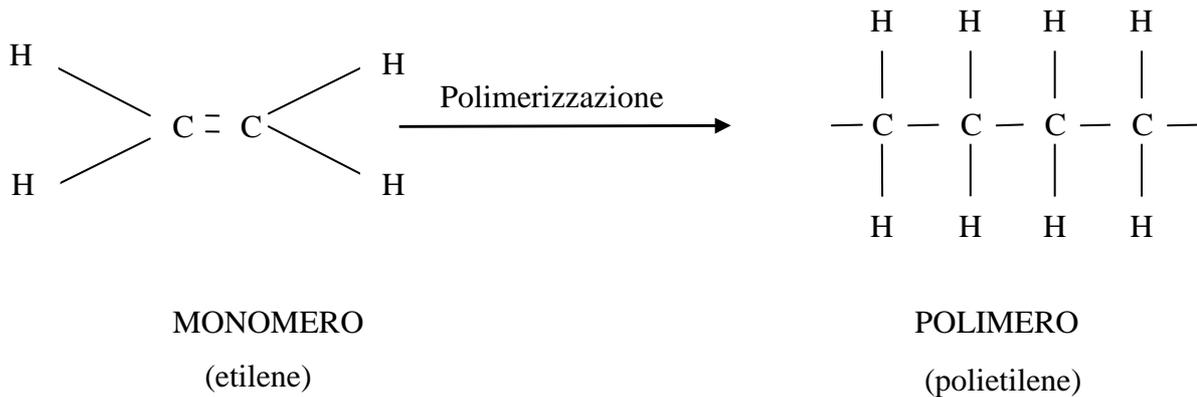
La carta secca ha elevata permittività, per cui estremamente importante è il problema della ripartizione del campo elettrico fra carta e impregnante. In passato, soprattutto nei condensatori di potenza, venivano utilizzati come impregnanti i difenili clorurati (PCB), oli sintetici, ora messi al bando perché inquinanti e non biodegradabili. L'industria si è allora rivolta verso oli sintetici di minore permittività, ma contemporaneamente si sono diffusi alla carta film plastici a bassa ϵ , cosicché l'uso della carta si è notevolmente ridotto. Una importante applicazione riguarda i trasformatori di grande potenza, che vengono immersi completamente in olio per migliorarne le condizioni di raffreddamento. L'olio impregna la carta usata per l'isolamento fra le bobine e fra gli avvolgimenti verso massa.

Carta	
Rigidità dielettrica (E_c)	3 kV/mm
Costante dielettrica relativa (ϵ_r)	3.5

I Polimeri

Un polimero (dal greco poly, molti, e meros, parte) è un composto organico costituito da macromolecole formate da catene di semplici unità molecolari (monomeri); queste ultime rappresentano l'elemento fondamentale che caratterizza il polimero. Queste macromolecole sono ottenute mediante reazioni, dette di polimerizzazione, nelle quali l'azione di opportuni catalizzatori innesca la formazione dei legami covalenti fra i vari monomeri.

In figura è riportata, come esempio, la polimerizzazione del monomero CH₂ (etilene) che genera il polietilene (PE), il più semplice polimero idrocarburico.



Nei materiali polimerici le catene molecolari sono tenute assieme da deboli legami di Wan der Waals. Quando un materiale polimerico viene sottoposto ad uno stress di tipo meccanico accade che alcuni di questi legami si rompono e le catene scorrono una rispetto all'altra; il polimero si deforma. Temperature più elevate riducono la resistenza di questi legami permettendo così deformazioni viscosi più facili.

A seconda del loro comportamento nei confronti della temperatura i polimeri vengono classificati in termoplastici e termoindurenti (resine). I polimeri termoplastici sono caratterizzati da legami deboli fra le varie catene e, pertanto, rammolliscono all'aumentare della temperatura, fino ad una vera e propria fusione. Essi e si deformano facilmente; col raffreddamento essi riacquistano le loro proprietà originarie mantenendo la forma che è stata loro impartita. All'aumentare della temperatura è possibile rimodellarli un numero teoricamente infinito di volte.

I materiali termoindurenti, invece, all'aumentare della temperatura subiscono una trasformazione irreversibile nella quale i legami liberi vengono saturati, dando luogo ad una catena molecolare tridimensionale che porta ad una struttura rigida, non più fusibile. la temperatura non produce una deformazione plastica.

I polimeri termoindurenti sono generalmente più rigidi e meccanicamente e termicamente più resistenti; essi vengono spesso utilizzati come matrice di base dei materiali compositi. I polimeri termoplastici sono invece molto flessibili con buone proprietà elettriche, il che ha portato alla loro diffusione come isolamento per cavi.

A temperature molto elevate i legami covalenti tra gli atomi di una stessa catena possono essere distrutti; il polimero brucia e si distrugge. La temperatura T_d, **temperatura di degradazione**, limita l'utilizzo del polimero e rappresenta la temperatura più elevata a cui il polimero può essere utilizzato.

Ad elevate temperature, raggiunta la **temperatura di fusione** T_m, melting temperature, le catene molecolari possono scorrere le une rispetto alle altre anche in presenza di debolissime sollecitazioni esterne. La resistenza ed il modulo di elasticità sono praticamente nulli e virtualmente non si hanno deformazioni elastiche.

Facendo diminuire ulteriormente la temperatura si verifica che le catene molecolari diventino pressoché immobili, con la possibilità di movimenti limitati solo per piccoli gruppi molecolari all'interno del polimero. Al di sotto della **temperatura di transizione vetrosa** (T_g) il polimero diventa duro e fragile e si comporta come un vetro ceramico e diviene inadatto a sopportare gli sforzi meccanici che derivano, ad esempio, da brusche variazioni di carico. Normalmente le proprietà meccaniche ed elettriche del polimero variano con una pendenza differente quando la temperatura scende al di sotto di T_g . Il polimero in tali condizioni può possedere delle proprietà indesiderate; ecco perché devono essere scelti per le applicazioni polimeri caratterizzati da temperature di transizione vetrosa inferiori a quelle di esercizio.

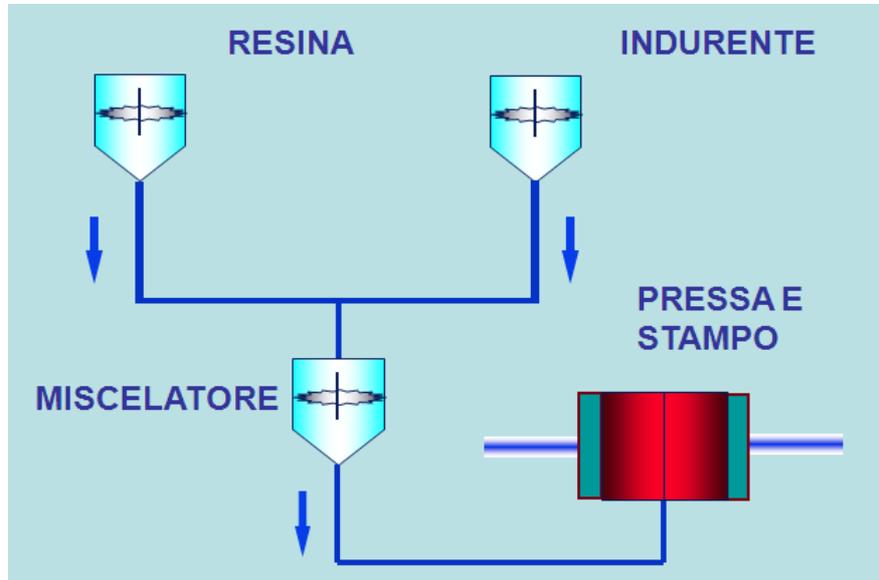
In tabella sono riportate le temperature di fusione e di transizione vetrosa per alcuni polimeri tipici

Polimero	T_m (C°)	T_g(C°)
Low-density polyethylene	115	-120
High-density polyethylene	137	-120
Polyvinyl chloride	175-212	87
Polypropylene	168-176	-16
Polystyrene	240	85-125
Teflon	327	
Polymethyl methacrylate		90-105
Polycarbonate	230	145
Polyester	255	75
Polyisoprene	30	-73

I maggiori vantaggi che hanno contribuito a determinare il successo dei polimeri riguardano essenzialmente la loro leggerezza, la capacità di isolamento, l'inerzia chimica ed ambientale, la facile processabilità. Per contro, essi hanno scarse proprietà meccaniche in confronto ad altri materiali quali, ad esempio, la porcellana.

Resina epossidica

La resina epossidica (epoxy resin) è la resina sintetica più diffusamente utilizzata come isolamento elettrico. La resina epossidica è un polimero termoindurente ottenuto dalla reazione di una resina di base con un indurente, miscelati sotto vuoto, che solidificano dopo trattamento termico. La polimerizzazione avviene senza produzione di gas o di altre sostanze secondarie e consente, così, di ottenere un prodotto privo di vacuoli al suo interno.



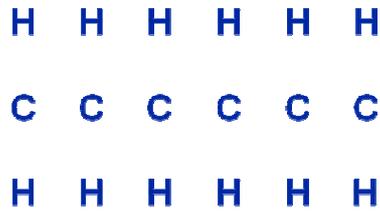
Resina epossidica	
Rigidità dielettrica (E_c)	18 kV/mm
Costante dielettrica relativa (ϵ_r)	4 ÷ 5
Fattore di dissipazione ($\text{tg}\delta$)	0.05 ±0.01
Temperatura di transizione vetrosa (T_g)	30 ÷ 140 °C



La resina epossidica è generalmente utilizzata nei trasformatori, negli interruttori con isolamento in gas (GIS), negli accessori per cavo.

Polietilene

Il polietilene è un polimero costituito da lunghe catene di monomero CH_2 (etilene).



Esso è una resina sintetica termoplastica caratterizzato dal fatto che la sua consistenza solida diminuisce progressivamente al crescere della temperatura, fino alla fusione del materiale. Il ritorno alla temperatura iniziale lascia comunque il materiale deformato permanentemente.

Il polietilene ha proprietà elettriche estremamente interessanti: elevatissima rigidità dielettrica, alta resistenza di isolamento, bassa costante dielettrica, bassissimo fattore di dissipazione, praticamente invariabile con la frequenza. Alle ottime proprietà elettriche si contrappongono, però, scarse proprietà termiche. Inoltre, il PE non sembra avere adeguata resistenza alle scariche parziali in quanto difficilmente si riesce ad evitare la formazione di cavità durante il raffreddamento dell'isolante estruso: per tale motivo è scarsamente impiegato per le alte tensioni.

A seconda del peso molecolare, possiamo avere il polietilene a bassa densità (LDPE) ed il polietilene alta densità (HDPE).

Polietilene		
	LDPE	HDPE
Rigidità dielettrica (d=.05mm) (E_c)	200 kV/mm	200 kV/mm
Rigidità dielettrica (d=1 mm) (E_c)	40 kV/mm	40 kV/mm
Costante dielettrica relativa (ϵ_r)	2,3	2,3
Fattore di dissipazione ($\text{tg}\delta$)	0.0001	0.0001
Temperatura di rammollimento	90 ÷ 110 °C	110 ÷ 135 °C

Il polietilene è molto usato nell'isolamento dei cavi in bassa tensione e, in particolare per le guaine in quanto ha un'elevata resistenza all'umidità. Essendo idrorepellente e resistente ai microorganismi marini, è anche usato come guaina per i cavi sottomarini E' inoltre adoperato per la produzione di film isolanti e nei cavi per telecomunicazioni grazie al basso fattore di perdita in tutto il campo delle frequenze elettriche.



Il trattamento di reticolazione consente di creare vincoli trasversali alle catene del polietilene in modo tale da renderlo assimilabile ad'unica grande molecola. Si ottiene il polietilene reticolato (XLPE) che perde, rispetto al polietilene, le proprietà termoplastiche e può essere adoperato a temperature di servizio di circa 90 °C (rispetto ai circa 70 °C del polietilene).

Attualmente è il materiale isolante più utilizzato per le reti di Media e Alta Tensione. Tuttavia, esso è molto sensibile all'inquinamento, in particolare quello dovuto all'umidità, alla formazione di arborescenze (water trees e electrical trees), e all'invecchiamento a scariche parziali. Per questo motivo la tecnica si sta spingendo verso la realizzazione di XLPE con livelli di purezza sempre più elevati per far fronte al pericolo insito nella presenza di umidità.

Da ricordare, anche un'altra resina termoplastica, il cloruro di polivinile (PVC), ottenuto per polimerizzazione del monomero cloruro di vinile ($\text{CH}_2\text{Cl}=\text{CH}_2$). Il PVC è adoperato generalmente per l'isolamento di cavi in bassa e media tensione. È caratterizzato da elevata costante dielettrica variabile con la temperatura (4 a 20 °C e circa 8 a 70 °C) e valore elevato del fattore di dissipazione (0,06). Per tale motivo non viene adoperato per le alte tensioni e l'uso nella media tensione è piuttosto modesto. Inoltre la temperatura massima di funzionamento è di circa 75 °C.

Gomme sintetiche

Le gomme sintetiche hanno proprietà intermedie tra materiali termoplastici e termoindurenti. Infatti sono inizialmente termoplastici, ma con un trattamento termico, che in questo caso si chiama vulcanizzazione, subiscono una trasformazione irreversibile dando luogo ad un prodotto con spiccata elasticità. Rispetto al termo indurimento di una resina, la vulcanizzazione avviene nello stadio finale del ciclo lavorativo, sull'oggetto già formato, durante il quale è aggiunto alla miscela un agente vulcanizzante.

La gomma etilen propilenica (EPR) è una miscela a base dei polimeri dell'etilene e del propilene. Generalmente vengono aggiunti additivi quali cariche minerali per conferire alla miscela adeguate caratteristiche meccaniche. Altri additivi sono gli stabilizzanti e gli anti invecchiamenti per ritardare la degradazione del prodotto nel tempo. Rispetto al polietilene reticolato l'EPR possiede maggiore resistenza alle scariche parziali ed ai fenomeni di arborescenza. Il fattore di dissipazione, però, è 10 volte maggiore di quello dell'XLPE e la rigidità dielettrica è più bassa e, pertanto, il suo utilizzo è limitato a cavi con tensione di esercizio non superiore a 150 kV.

	EPR	XLPE
Temperatura di esercizio	90÷105 °C	90 °C
Rigidità dielettrica	35 kV/mm	30 kV/mm
Fattore di dissipazione ($\text{tg } \delta$)	10^{-2}	$<10^{-3}$
Costante dielettrica (ϵ_r)	2.3	2.3
Resistenza alle scariche parziali	ottima	mediocre
Comportamento alla fiamma	buono	pessimo
Resistenza all'umidità	buona	mediocre
Flessibilità	ottima	mediocre
Costo	maggiore	minore

5.3 Isolamenti liquidi.

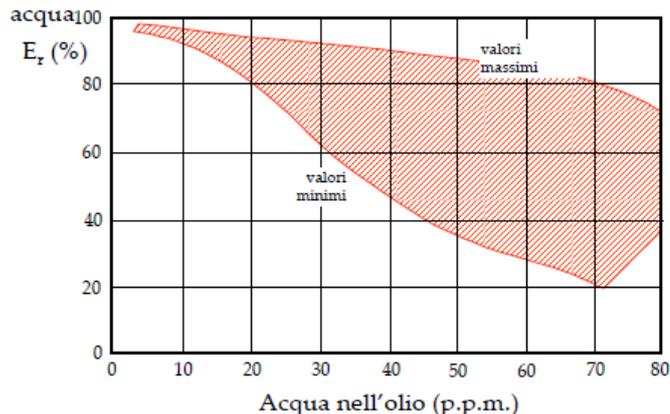
I dielettrici liquidi, in particolare gli oli derivati dagli idrocarburi, sono largamente usati e hanno molti vantaggi sia sui dielettrici gassosi che sui dielettrici solidi, in quanto:

- hanno densità molto più elevata dei gas e migliori condizioni di tenuta, presentando processi di ionizzazione a valanga molto più contenuti;
- 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;
- non hanno forma propria e pertanto possono riempire completamente gli spazi interelettrodici, senza lasciare inevitabili spazi d'aria come accade nei solidi;
- è possibile monitorare continuamente lo stato di degrado del dielettrico dovuto a inquinamento, ossidazione, ecc. ed eventualmente sottoporlo a processi di purificazione;
- dissipano calore per convezione; possono servire quindi per raffreddare in maniera efficiente parti interne di macchine elettriche, eventualmente ricorrendo a pompe;
- possono essere usati come impregnanti in isolanti solidi quando questi sono insostituibili, ad esempio per ragioni meccaniche
- hanno generalmente bassa permittività relativa (2-2.5) e basse perdite ($\text{tg}\delta=1*10^{-4}$).

Per contro, il loro uso è limitato in molte applicazioni per le seguenti ragioni:

- ✓ 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 sospese 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;
- ✓ i contenitori debbono essere sempre a tenuta per evitare la fuoriuscita di liquido, potenzialmente infiammabile o comunque pericoloso;
- ✓ 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 un possibile sovrariscaldamento.
- ✓ Si contaminano facilmente con acque di condensa. Il fattore più importante che influenza la tenuta di un olio isolante è la presenza di acqua sottoforma di piccole gocce sospese nell'olio. Si è visto che la presenza dello 0.01% di acqua nell'olio per trasformatore riduce la sua tenuta al 20% del valore che caratterizza l'olio secco.

Rigidità dielettrica di un olio minerale in funzione del contenuto di acqua



Gli isolanti liquidi sono generalmente utilizzati in:

- a) TRASFORMATORI DI POTENZA E DI MISURA.
- b) INTERRUTTORI
- c) PASSANTI PER ALTA TENSIONE
- d) CAVI
- e) CONDENSATORI
- f) APPARATI ELETTRONICI

Oli minerali

Derivano dalla distillazione frazionata del petrolio. Le Norme IEC li suddividono in tre classi, adatte per diverse temperature ambientali, che si differenziano per la viscosità ($16,5 \div 3,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ a $40 \text{ }^\circ\text{C}$), la densità ($888 \div 872 \text{ g/dm}^3$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) ed il punto di rammollimento ($-30 \div -60 \text{ }^\circ\text{C}$).

Oli minerali	
Tensione di scarica (d=2.5mm) (V_b)	70 kV
Tensione di scarica a impulso(d=25mm) (V_b)	1540 kV
Costante dielettrica relativa (ϵ_r)	2,5
Fattore di dissipazione ($\text{tg}\delta$)	0.001
Resistività a $90 \text{ }^\circ\text{C}$	$20 \div 2000 \text{ G}\Omega \text{ m}$

Oli siliconici

Sono oli derivati dalla chimica del silicio, hanno elevata stabilità termica e temperatura di infiammabilità $> 340 \text{ }^\circ\text{C}$. la costante dielettrica relativa varia tra 2.7 e 3. Le caratteristiche dielettriche sono paragonabili a quelle degli oli minerali

Idrocarburi di sintesi

Si possono avere idrocarburi olefinici e alchil-aromatici. Essi presentano una composizione chimica più semplice rispetto agli oli minerali ed hanno caratteristiche dielettriche migliori.

Idrocarburi di sintesi		
	Olefine	Alchil-benzeni
Tensione di scarica (d=2.5mm) (V_b)	$>80 \text{ kV}$	$>80 \text{ kV}$
Costante dielettrica relativa (ϵ_r)	2,2	2,1
Fattore di dissipazione ($\text{tg}\delta$)	0.003	0.0001
Resistività a $90 \text{ }^\circ\text{C}$		$1 \text{ T}\Omega \text{ m}$