

Università degli Studi di Bologna  
Scuola di Ingegneria e Architettura  
“Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica”

## Metodologie di Progettazione delle Macchine Elettriche M

# Materiali Isolanti e Tecnologia del processo di avvolgimento

*Prof. Giovanni Serra*

Dipartimento di  
Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione “G. Marconi”  
Università degli Studi di Bologna  
Viale Risorgimento, 2  
40136 Bologna  
Tel. 051-2093582/ Fax 051-2093588  
e-mail: [giovanni.serra@mail.ing.unibo.it](mailto:giovanni.serra@mail.ing.unibo.it)

## Generalità

I materiali dielettrici, assieme ai materiali conduttori e magnetici, sono parte fondamentale di una macchina elettrica. Essi devono sopportare le seguenti sollecitazioni:

- dielettriche
- meccaniche
- termiche

*La tecnica dell'isolamento è soggetta ad una continua evoluzione per l'introduzione di nuovi materiali isolanti, nuove vernici, ecc.*

## Generalità

Proprietà fondamentali di un dielettrico

- Elevata rigidità dielettrica
- Stabilità dimensionale
- Conservazione nel tempo delle proprietà
- Resistività di massa
- Bassa igroscopicità
- Basse perdite dielettriche

## Rigidità dielettrica

*Si chiama RIGIDITA' DIELETTRICA il valore massimo del campo elettrico sopportabile da un dielettrico senza che avvenga la scarica*

La rigidità dielettrica è funzione delle seguenti caratteristiche

- Spessore
- Durata di applicazione
- Temperatura
- Sollecitazioni meccaniche
- **Vita precedente**

## Dielettrici in serie

*Si consideri un condensatore ad armature piane e parallele, con tanti strati di dielettrici diversi*

Siano

$A$	superficie del condensatore
$D$	induzione elettrica nel dielettrico
$k$	campo elettrico
$\varepsilon_x$	costante dielettrica dello strato x-mo

$$K_x = \frac{D}{\varepsilon_x} \qquad K_x = \frac{D}{\varepsilon_x} = \frac{V_x}{l_x}$$

## Dielettrici in serie

$$K_x = \frac{D}{\epsilon_x}$$

$$V = \sum_{j=1}^n K_j I_j = D \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{\epsilon_j}$$

$$D = \frac{V}{\sum_{j=1}^n \frac{I_j}{\epsilon_j}} = K_x \epsilon_x$$

$$K_x = \frac{V}{\epsilon_x \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{\epsilon_j}}$$

## Dielettrici in serie

La relazione ottenuta mostra che il materiale più sollecitato dal campo elettrico è quello caratterizzato dal valore più basso della costante dielettrica.

$$K_x = \frac{V}{\epsilon_x \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\epsilon_j}}$$

Inoltre, la sollecitazione risultante è superiore a quella che si sarebbe ottenuta riempiendo tutto lo spazio con lo stesso materiale, infatti si avrebbe

$$K_m = \frac{V}{\sum_{j=1}^n l_j}$$

e quindi. . . . .

## Dielettrici in serie

Risultando infatti

$$\sum_{j=1}^n I_j \geq \sum_{j=1}^n I_j \frac{\epsilon_m}{\epsilon_j} = \epsilon_m \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{\epsilon_j}$$

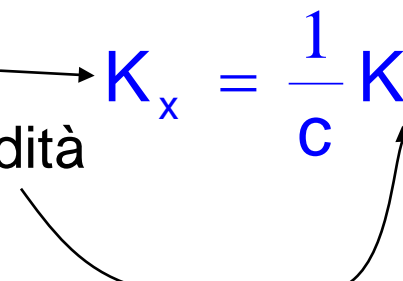
si ottiene

$$K_m = \frac{V}{\sum_{j=1}^n I_j} \leq \frac{V}{\epsilon_m \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{\epsilon_j}}$$



## Dielettrici in serie

La migliore utilizzazione dei dielettrici è quella che prevede gradienti proporzionali alle rispettive rigidità dielettriche.

$$K_x = \frac{1}{c} K_{dx} = \frac{V}{\epsilon_x \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\epsilon_j}}$$


Ovvero

$$K_{dx} \epsilon_x = \frac{cV}{\sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\epsilon_j}} = \text{cost}$$

*La migliore utilizzazione è quella che pone in serie materiali caratterizzati dallo stesso valore del prodotto  **$K_d \epsilon$***

# Proprietà dei materiali isolanti

## Degradazione delle proprietà

L' "invecchiamento" dei materiali dielettrici è riconducibile alle seguenti azioni

- chimiche
- umidità
- sovratensioni

ma soprattutto all'azione della

### •**TEMPERATURA**

*Un aumento di 10 °C della temperatura di esercizio produce all'incirca il dimezzamento della durata di vita del dielettrico*

# Proprietà dei materiali isolanti

## Classi di isolamento

In base alle proprietà di resistenza alla temperatura vengono definite le

### ***CLASSI DI ISOLAMENTO.***

La durata di vita prevista di 20 anni è riferita alle corrispondenti temperature massime ammissibili.

Classe

A

E

B

F

H

C

Temperatura

105 °C

120 °C

130 °C

155 °C

180 °C

oltre 180 °C

# Proprietà dei materiali isolanti

## Classi di isolamento

### **Classe E, *fino a 120 °C***

#### Materiali isolanti

Smalto per fili e piattine a base di resine di acetato di polivinile o poliuretaniche, o epossidiche, o poliamidiche. Resine poliesteri a catene trasversali. Pellicole di triacetato di cellulosa.

#### Sostanze di agglomerazione

Nessuna

#### Trattamento avvolgimenti

Vernici a base di resine sintetiche oleomodificate, resine poliesteri, resine epossidiche

# Proprietà dei materiali isolanti

## Classi di isolamento

### **Classe B, *fino a 130 °C***

#### Materiali isolanti

Smalto per fili e piattine  
a base di politereftalato,

Pellicole a base di  
policarbonato  
cristallizzato

Tessuti a base di  
tereftalato di polietilene

#### Sostanze di agglomerazione

Nessuna

#### Trattamento avvolgimenti

Resine poliesteri a  
catene trasversali,  
resine epossidiche

# Proprietà dei materiali isolanti

## Classi di isolamento

### **Classe F, *fino a 155 °C***

#### Materiali isolanti

Smalto per fili e piattine  
a base di poliesteri  
imidici, politereftalati di  
elevate proprietà  
termiche

#### Sostanze di agglomerazione

Nessuna

#### Trattamento avvolgimenti

Resine alchidiche,  
epossidiche,  
poliesteri,  
poliuretaniche,  
silicono-alchidiche

# Proprietà dei materiali isolanti

## Classi di isolamento

### **Classe H, *fino a 180 °C***

Materiali isolanti	Sostanze di agglomerazione	Trattamento avvolgimenti
Fibre di vetro	Nessuna	Resine siliconiche
Tessuti di vetro impregnati	Resine siliconiche	Resine siliconiche
Smalto per fili e piattine a base esclusivamente polimidica	nessuna	Resine siliconiche

# Proprietà dei materiali isolanti

## Classi di isolamento

### **Classe C, oltre 180 °C**

Materiali isolanti	Sostanze di agglomerazione	Trattamento avvolgimenti
Mica, porcellana, mat. Ceramici. Vetro, quarzo.	Nessuna	Nessuna
Tessuti di vetro trattati	Resine siliconiche ad elevata stabilità termica	Resine siliconiche ad elevata stabilità termica
Politetrafluoroetilene	nessuna	Non necessario



# Dielettrici fluidi

---

- Gas
- Oli minerali
- Oli siliconici
- Vernici

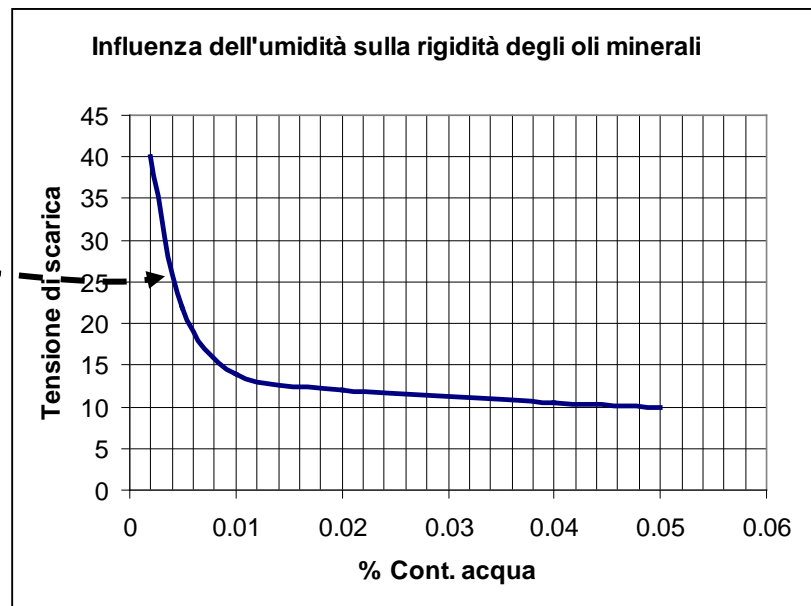
## Impieghi

- Riempimento di spazi ed interstizi
- Smaltimento del calore
- Spegnimento di archi elettrici

# Dielettrici fluidi

## Dipendenza rigidità dielettrica

- Impurità in sospensione
- Impurità in soluzione
- Umidità



# GAS

---

- Aria
- Idrogeno
- Azoto
- Anidride carbonica
- Esafluoruro di zolfo

## Caratteristiche

- Rigidità dielettrica crescente con la pressione
- Rapido ripristino della rigidità dopo una scarica

# GAS

	Densità	Rigidità dielettrica (0°C, 1 atm) kV/cm
<b>Aria</b>	1	32
<b>Idrogeno</b>	0.06952	19
<b>Azoto</b>	1.103	29
<b>Anidride carbonica</b>	1.529	29
<b>Esafluoruro di zolfo</b>	5.106	80

# Oli Minerali

---

Ottenuti dalla distillazione frazionata del petrolio

$$\varepsilon_r = 2.3 \div 2.4$$

$$K_r (50 \text{ Hz}) = 120 \div 180 \text{ kV/cm}$$

Peso specifico: 0.87 – 0.88

Aumento di volume: 8% per 100 °C

Temperatura di infiammabilità: max 140 °C  
(emissione di vapori che si incendiano in presenza di fiamma)

# Oli Minerali

---

## Accorgimenti di impiego

Riduzione della superficie a contatto con l'aria

Sostituzione dell'aria con Azoto

Chiusura stagna dei cassoni (dilatazioni...)

Additivazione di inibitori di ossidazione

# Oli Siliconici

---

## Principali Proprietà

Chimicamente molto inerti

Ottime caratteristiche incombustibili

Resistenti all'ossidazione

Elevata conducibilità termica

Elevata rigidità dielettrica (160 kV/cm)

Adatti per basse e per alte temperature (fino a 200 °C)

# Tecnologia del processo di isolamento

## Vernici

Molti isolanti solidi (carta, tessuti di fibre di vetro, ecc) hanno una rigidità dielettrica modesta, praticamente uguale a quella dell'aria trattenuta tra gli interstizi.

Diverso è il comportamento dei materiali organici compatti (film, mica ecc) che hanno una elevata rigidità dielettrica.

*Per migliorare le qualità dielettriche si impiegano **VERNICI ISOLANTI** costituite da SOLUZIONI di RESINE NATURALI o SINTETICHE*



# Tecnologia del processo di isolamento

## Vernici

### ***Scopi dell'impiego delle vernici***

- Sostituire l'aria che riempie gli interstizi
- Aumentare la rigidità dielettrica
- Diminuire l'igroscopicità
- Migliorare le qualità meccaniche e la resistenza all'azione di agenti esterni
- aumentare la resistenza alla temperatura e la conducibilità termica
- Prolungare la durata di vita degli isolamenti

# Tecnologia del processo di isolamento

## NOMEX

Il NOMEX è un materiale isolante in forma di fogli, costituito da fibre corte e particelle fibrose leganti di ARAMIDE (poliamide aromatico resistente alle alte temperature)

I componenti vengono uniti con le tradizionali tecniche di fabbricazione della carta con calandratura ad alta temperatura

Occorre utilizzare il materiale in modo meccanicamente corretto

### *Caratteristiche*

- Carta sintetica, densa, flessibile e resistente
- Resistenza termica fino a 220 °C
- Eccellenti proprietà dielettriche
- Ottima resistenza ai prodotti chimici
- Alta resistenza a strappo e rottura (se ben utilizzato)

# Tecnologia del processo di isolamento

## FILM e fogli sintetici

Sono moderni prodotti, in materia plastica, omogenea, disponibili in spessori sottili (anche inferiori a 0.01 mm), ottenuti per evaporazione di solvente, laminazione, estrusione in filiere piatte.

### *Proprietà dei film*

- Elevatissima rigidità dielettrica
- Utilizzabile negli avvolgimenti trattati per eliminare l'aria fra strati contigui.
- L'effetto "corona" decompone i film

# Tecnologia del processo di isolamento

## FILM e fogli sintetici: MYLAR

Poliestere ottenuto dal tereftalato di polietilene

Utilizzabile in classe B

Largamente impiegato nei motori come isolante di cava, accoppiato con altri materiali (metallizzato ed incollato)

### *Proprietà del MYLAR*

- $K_d = 2000-2800 \text{ kV/cm}$   
 $\epsilon_r = 3.25 - 3.7$
- elevatissima resistenza meccanica in senso longitudinale
- resistente all'umidità
- disponibile in spessori da  $6 \mu$  a  $350 \mu$

# Tecnologia del processo di isolamento

## FILM e fogli sintetici: KAPTON

Film poliimidico, color giallo ambra.

Puro (tipo H) o con Teflon (Tipo F)

Mantiene le sue eccellenti proprietà fisiche, elettriche e meccaniche in un ampio campo di temperature (Classe C)

Impiegato per rivestimento fili, nastriature. Isolam. di cava

### *Proprietà del KAPTON*

- $K_d = 36-70 \text{ kV/cm}$ ,  $\epsilon_r = 3.5-3.7$  (H)
- $K_d = 31-45 \text{ kV/cm}$ ,  $\epsilon_r = 2.7-3.4$  (F)
- Sensibile all'umidità ed all'ossigeno
- Costo elevato
- materiale strategico
- capta le impurità
- lacerabile
- disponibile in spessori da 0.5 a 5 mm

# Tecnologia del processo di isolamento

## TEFLON

Materiale dall'eccezionale comportamento termico

Funzionamento continuo fino a 260 °C

Buone proprietà dielettriche

Impiegato nell'isolamento di cavi e conduttori, nelle applicazioni più gravose

### *Proprietà del TEFLON*

- $K_d = 400 - 800 \text{ kV/cm}$
- $\varepsilon_r = 2$
- Ininfiammabile
- Resistente umidità
- Non igroscopico

# La costruzione degli avvolgimenti

## Generalità

### Avvolgimento:

Il complesso di conduttori, spire, bobine, connessioni ma anche il complesso di isolamenti, vernici e quanto altro incorporato nel corso della costruzione della macchina.

### ISOLAMENTO INTERNO

I singoli conduttori devono essere reciprocamente isolati in base a

- tensione nominale
- sovratensioni transitorie

### ISOLAMENTO ESTERNO

#### o VERSO MASSA

Separazione dei conduttori isolati dalle parti magnetiche e strutturali

# La costruzione degli avvolgimenti

## Conduttori smaltati

La smaltatura dei conduttori di rame realizza **l'isolamento interno**

Da anni si preferiscono gli **smalti sintetici** in quanto più resistenti meccanicamente e termicamente

Il bispessore aumenta con l'aumentare del diametro nudo del filo

Acetale di polivinile	Classe E
Base poliuretanica	Classe B
Poliesterimide modif.	Classe F
Poliestere imidico	Classe H



# La costruzione degli avvolgimenti

## Conduttori smaltati: Classe E

### ACETALE DI POLIVINILE

#### Classe E

Smaltatura	Prova rigidità su twisted pairs*
Semplice (S)	2.4 kV
Doppia (D)	4.8 kV
Tripla (T)	6.8 kV

\*) Valori dimezzati se riferiti ad un solo conduttore

# La costruzione degli avvolgimenti

Conduttori smaltati: Classe B

## **BASE POLIURETANICA**

### **Classe B**

Diametri fino a 2 mm

Autosaldabili

Grado di smaltatura, tensione di  
perforazione e sovrassessori analoghi alla  
Classe E

# La costruzione degli avvolgimenti

Conduttori smaltati: Classe F

## **POLIESTERIMIDE-URETANICA**

### **Classe F**

- Diametri fino a 2 mm
- Smaltatura semplice (S) e doppia (D)
- Caratteristiche dimensionali e rigidità dielettrica analoghe agli smalti vinilici

# La costruzione degli avvolgimenti

Conduttori smaltati: Classe H

## POLY-THERMALEZE

### Classe H

- Ottime qualità meccaniche (avvolgitrici veloci)
- Smaltatura D fino a diametri di 5 mm
- Tensione di perforazione minore del 25 % rispetto al polivinile

# L'isolamento degli avvolgimenti statorici in cave semichiusse

## Generalità

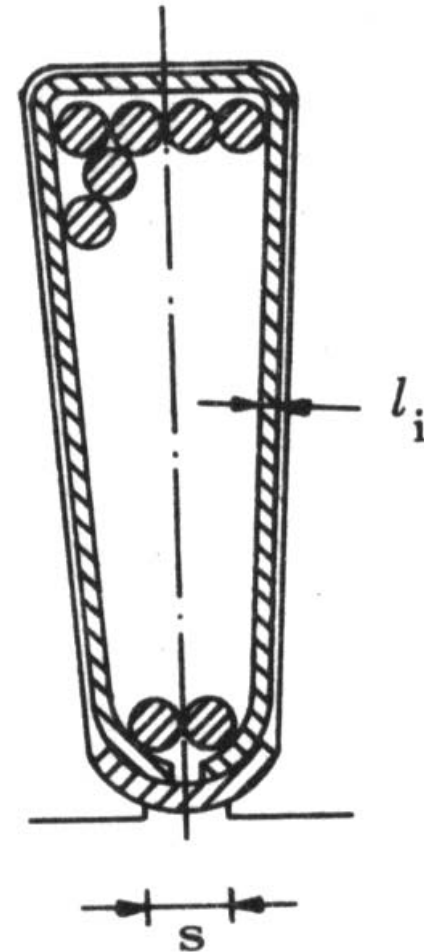
- Nei motori asincroni trifase, per potenze fino a 1000 kW e tensione inferiore a 3 kV, si impiegano **cave semichiusse**, di forma trapezia.
- I conduttori smaltati vengono inseriti nelle cave attraverso **l'istmo** di larghezza  $s$

$$s \approx \text{Diametro filo} + (1.4 \div 1.6 \text{ mm})$$

# L'isolamento degli avvolgimenti statorici in cave semichiusure

## Preparazione delle cave

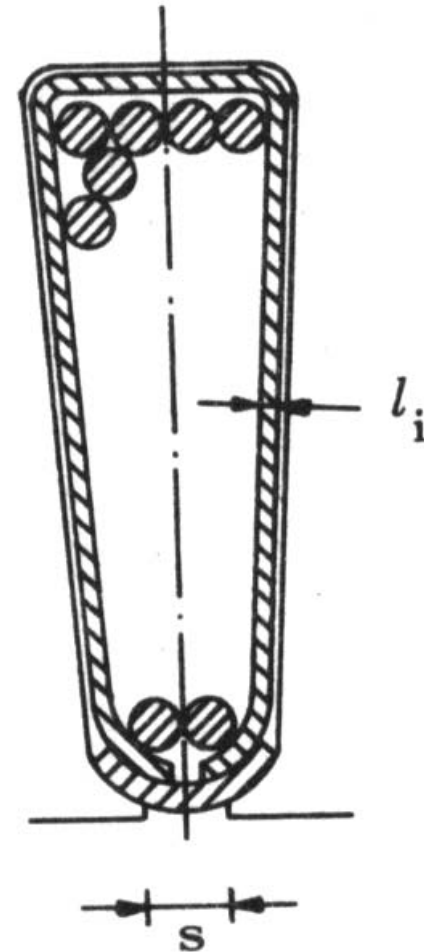
- Le cave sono internamente ricoperte da due o più fogli isolanti sovrapposti
- La natura dei fogli è quella corrispondente alla classe di isolamento
- Lo spessore  $l_i$  aumenta con la tensione e la potenza
- $l_i = 0.3 \div 0.6 \text{ mm}$



# L'isolamento degli avvolgimenti statorici in cave semichiusure

## Disposizione dei fili nelle cave

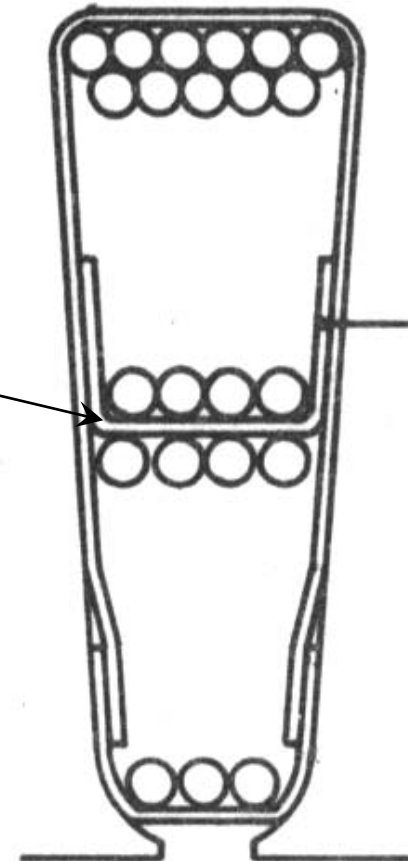
- I fili si dispongono all'interno delle cave in modo irregolare lasciando spazi vuoti che saranno occupati dalle vernici di impregnazione



# L'isolamento degli avvolgimenti statorici in cave semichiusse

## Avvolgimenti in doppio strato

I due lati di bobina entro cava, e lungo le testate, sono separati da una striscia o da un tegolo isolante di spessore  $0.1 \div 0.3$  mm





---

**F i n e**