

## Chương 7

# TỔN HAO ĐIỆN MÔI

### I Khái niệm chung

#### 1.1 Một số định nghĩa:

**1.1.1 Công suất tổn hao điện môi** là phần năng lượng toả ra bên trong điện môi trong 1 đơn vị thời gian làm cho điện môi nóng lên khi có điện áp đặt vào điện môi.

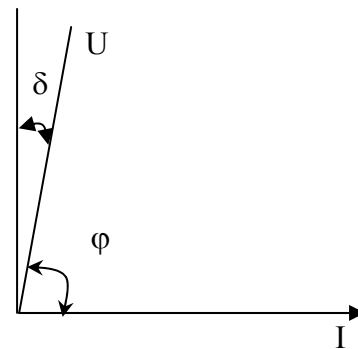
Kí hiệu  $P[W]$

**1.1.2 Suất tổn hao điện môi:** là phần công suất điện môi tính cho 1 đơn vị thể tích điện môi. Tức là năng lượng toả ra bên trong điện môi trong 1 đơn vị thời gian trên một đơn vị thể tích khi có điện áp tác dụng vào.

$$\text{Kí hiệu } p = \frac{P}{V} \left( \frac{W}{m^3} \right)$$

**1.1.3 Góc tổn hao điện môi:** là góc phụ của góc lệch pha giữa dòng điện chạy trong điện môi và điện áp tác dụng lên điện môi

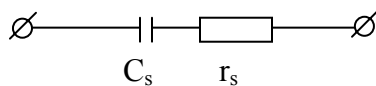
Kí hiệu:  $\delta$  với  $\delta = 90^\circ - \varphi$  (độ)



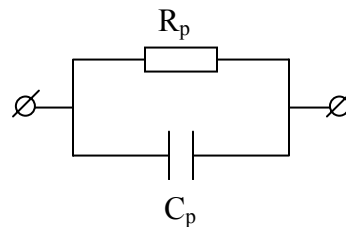
#### 1.2 Sơ đồ thay thế tính tổn thất điện môi:

Đối với một khối điện môi bất kì, dưới tác dụng của điện trường đều được đặc trưng bởi 2 đại lượng cơ bản :  $C$  (điện dung điện môi) và điện trở  $R$  của điện môi

Để đơn giản trong tính toán, 2 đại lượng đó có thể ghép nối tiếp hoặc song song nhau (giá trị 2 đại lượng trên có thể khác nhau). Ta có 2 dạng sơ đồ



Sơ đồ nối tiếp



Sơ đồ nối song song

Trong đó:  $C_s$  và  $C_p$  là các đại lượng đặc trưng cho hiện tượng phân cực trong điện môi  
 $r_s$  và  $R_p$  là đại lượng thể hiện tính dẫn điện của điện môi.

+ **Trong sơ đồ nối tiếp**  $r_s = 0$  thì không có tổn thất điện môi, khi  $r_s$  càng tăng lên thì tổn thất càng tăng

+ **Trong sơ đồ nối song song**  $R_p \rightarrow \infty$  thì không có tổn thất điện môi, khi  $R_p$  càng nhỏ thì tổn thất càng tăng lên

### 1.3 Cách tính tổn thất điện môi:

Cách tính:

-Dù sơ đồ thay thế ở dạng bất kì cũng có thể đưa về 2 dạng chính : sơ đồ nối tiếp và sơ đồ song song.

-Vẽ đồ thị vectơ

-Xác định góc lệch pha => góc tổn hao điện môi

-Xác định công suất tổn hao điện môi

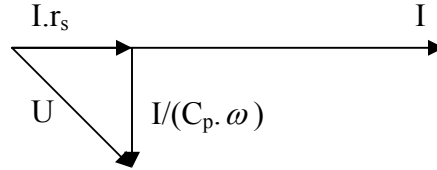
#### 1.3.1 Tính tổn hao điện môi sơ đồ nối tiếp:

Theo định luật kiffsof:

$$\vec{U} = \vec{I}r_s - j\vec{I}/(C_s.\omega)$$

Theo đồ thị vectơ ta có

$$\operatorname{tg} \delta = \cotg \varphi = \frac{I r_s}{I / (C_s \cdot \omega)} = r_s C_s \cdot \omega$$



Công suất tổn hao điện môi:

$$P_s = r_s \cdot I^2 = r_s \cdot \frac{U^2}{(r_s^2 + C_s^2 \cdot \omega^2)} = r_s (C_s \omega)^2 \cdot \frac{U^2}{(r_s C_s \omega)^2 + 1} = C_s \omega U^2 \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

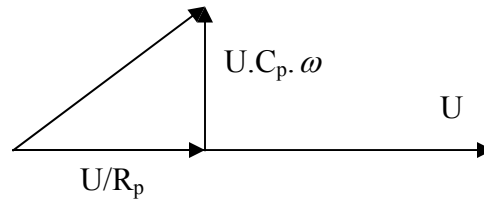
#### 1.3.2 Trong sơ đồ song song:

Theo định luật kiffsof:

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{R_p} + j\vec{U}C_p.\omega$$

Theo đồ thị vectơ ta có

$$\operatorname{tg} \delta = \cotg \varphi = \frac{\frac{U}{R_p}}{U C_p \cdot \omega} = \frac{1}{R_p C_p \cdot \omega}$$



$$P_p = R_p \cdot I^2 = R_p \cdot \frac{U^2}{R_p^2} = \frac{U^2}{R_p} = \frac{C_p \cdot \omega \cdot U^2}{R_p \cdot C_p \cdot \omega} = C_p \cdot \omega \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta$$

Vậy trong 2 sơ đồ tổn hao điện môi đều phụ thuộc vào  $\operatorname{tg} \delta$

#### 1.3.3 Mối quan hệ của 2 sơ đồ:

Do 2 sơ đồ đều thay thế cho cùng một khối điện môi cho nên tổn hao điện môi trong hai sơ đồ và góc tổn hao phải bằng nhau

$$+ \text{Tổn hao trong 2 sơ đồ bằng nhau: } P_s = P_p \Rightarrow C_p \cdot \omega \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = C_s \omega U^2 \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

$$\Rightarrow C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

+ Góc tổn hao điện môi bằng nhau:  $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{R_p C_p \omega} = r_s C_s \omega$

$$\text{Thế } C_p \text{ vào } \Rightarrow \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{R_p C_s \omega} = r_s C_s \omega \Rightarrow R_p = r_s \cdot \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}{(r_s C_s \omega)^2} = r_s \cdot \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}{(\operatorname{tg} \delta)^2}$$

Do đối với điện môi, mạch có tính dung lớn nên  $\operatorname{tg} \delta \ll 1$

$$\Rightarrow C_p \approx C_s \text{ và } R_p = r_s \cdot \left(1 + \frac{1}{(\operatorname{tg} \delta)^2}\right) \gg r_s$$

### 1.3.4 Suất tổn hao điện môi

$$P = C_p \omega U^2 \operatorname{tg} \delta = C \omega U^2 \operatorname{tg} \delta$$

Với:  $C = \epsilon C_0$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ (F/m);}$$

$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d}$  với  $d$ (m) là khoảng cách giữa 2 bản cực;  $S$ (m<sup>2</sup>) là diện tích bề mặt bản cực.

$U = E \cdot d$  với  $E$ (V/m) là cường độ điện trường trong khe hở

$\omega = 2\pi \cdot f$   $f$  là tần số điện áp đặt vào

$$\Rightarrow P = C \omega U^2 \operatorname{tg} \delta = \epsilon \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{S}{d} \cdot 2\pi \cdot f \cdot E^2 \cdot d^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = \epsilon \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^9} \cdot f \cdot E^2 \cdot S \cdot d \cdot \operatorname{tg} \delta$$

$$p = \frac{P}{V} = \epsilon \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^9} \cdot f \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = k E^2$$

$$\text{với: } k = \epsilon \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^9} \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ (W/V}^2\text{m)}$$

## 1.4 Các nguyên nhân gây tổn hao điện môi:

### 1.4.1 Tổn hao điện môi do phân cực:

- Tổn hao này do hiện tượng phân cực chậm gây ra, thường thấy ở các chất có cấu tạo lưỡng cực và cấu tạo ion ràng buộc không chắc chắn.
- Tổn thất này gây ra do sự phá huỷ chuyển động nhiệt của các ion hoặc phân tử lưỡng cực dưới tác dụng của điện trường, sự phá huỷ trạng thái này làm mất mát năng lượng và làm cho điện môi bị nóng lên
- Tổn hao do phân cực tăng theo tần số điện áp đặt vào điện môi
- Tổn hao do phân cực phụ thuộc vào nhiệt độ, tổn hao đạt cực đại tại 1 nhiệt độ nhất định đặc trưng cho mỗi chất điện môi.

### 1.4.2 Tổn hao do điện dẫn rò:

Trong bất kì chất điện môi nào luôn tồn tại các điện tử tự do, dưới tác dụng của điện trường các điện tử tự do này sẽ dịch chuyển theo chiều tác dụng của điện trường, tạo nên dòng điện rò. Dòng rò này, kết hợp với điện trở điện môi gây nên tổn thất nhiệt.

$$\text{Tổn hao do dòng rò được xác định } \operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{12}}{\epsilon \cdot f \cdot \rho}$$

Trong đó :  $\epsilon$  là hằng số điện môi

$f$  là tần số điện áp

$\rho$  là điện trở suất của khối điện môi ( $\Omega.cm$ )

Khi nhiệt độ tăng thì tổn hao điện môi càng tăng

$$P = P_0 \cdot e^{\alpha \cdot T}$$

Trong đó:  $P_0$  là tổn hao ở nhiệt độ  $20^\circ C$

$\alpha$  là hệ số nhiệt.

$T$  là độ chênh nhiệt so với  $20^\circ C$

### 1.4.3 Tổn hao do ion hoá:

Tổn thất này thường gặp trong chất khí, khi trong môi trường khí có xảy ra ion hoá. Tổn thất này được tính theo công thức

$$P_i = A_i \cdot f \cdot (U - U_0)^3$$

Trong đó:  $A_i$  là hằng số đối với từng chất khí

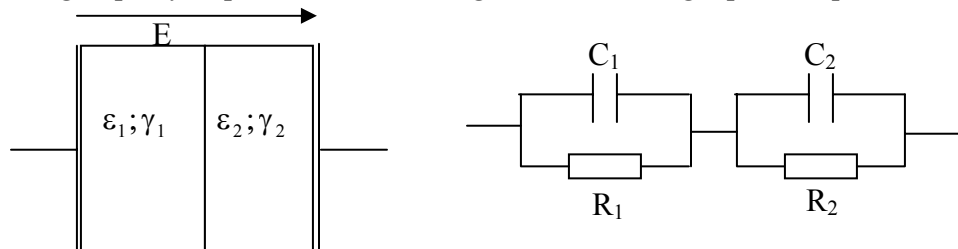
$f$  là tần số điện áp đặt vào

$U_0$  là điện áp bắt đầu gây ion hoá chất khí

Trị số  $U_0$  phụ thuộc vào từng loại chất khí, nhiệt độ và áp suất làm việc của chất khí. Tuy nhiên, còn tùy thuộc vào mức độ đồng nhất của điện trường. Cùng 1 giá trị điện áp đặt vào nhưng điện trường đều sẽ khó gây ion hoá hơn so với điện trường đều.

### 1.4.4 Tổn hao do cấu tạo không đồng nhất:

Tổn thất này xảy ra trong các vật liệu có cấu tạo không đồng nhất. Để xác định tổn hao điện môi trong trường hợp này ta phải xem điện môi gồm 2 điện môi ghép nối tiếp nhau



Góc tổn hao điện môi được xác định

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega^2 \cdot n + m}{\omega \cdot M + \omega^3 \cdot N}$$

Với  $m = R_1 + R_2$

$n = C_2^2 \cdot R_2^2 \cdot R_1 + C_2^2 \cdot R_2^2 \cdot R_1$ ;  $M = C_1 R_1^2 + C_2 R_2^2$ ;  $N = C_2^2 \cdot R_2^2 \cdot C_1 \cdot R_1^2 + C_2^2 \cdot R_2^2 \cdot C_1 \cdot R_1^2$ ;

## II Tổn hao điện môi khí:

- Ở điều kiện bình thường và điện trường thấp, tổn hao điện môi khí chỉ do dòng rò gây ra còn tổn hao do phân cực trong điện môi khí hầu như không đáng kể (vì mật độ phân tử rất thấp nên dưới tác dụng của điện trường các phân tử lưỡng cực phân cực không gây nên tổn thất). Khi đó góc tổn hao điện môi xác định theo:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{12}}{\varepsilon \cdot \rho \cdot f}$$

Ví dụ: không khí có  $\rho = 10^{18} (\Omega \cdot \text{cm})$ ;  $\varepsilon \approx 1$ ;  $f = 50 \text{Hz} \Rightarrow \operatorname{tg} \delta \leq 4 \cdot 10^{-8}$

- Khi điện áp đặt vào điện môi lớn để quá trình ion hoá và chạm xảy ra, trong điện môi ngoài tổn hao do dòng rò còn có tổn hao do phân cực. Do đó tổn hao trong điện môi khí có trị số lớn. Tổn thất công suất được xác định như sau

$$P = U^2 \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ hoặc } P = A_1 \cdot f \cdot (U - U_0)^3$$

- Như vậy ta thấy lúc này  $\operatorname{tg} \delta$  sẽ là hàm phụ thuộc vào điện áp. Quan hệ  $\operatorname{tg} \delta = f(U)$  như sau

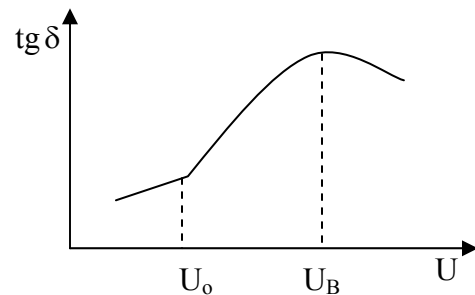
**Giải thích:** đường cong được chia làm thành 3 đoạn

+ Khi  $U < U_0$  Trong điện môi chỉ có tổn hao do dòng rò gây ra. Do số lượng điện tích tự do trái dấu ít xảy ra hiện tượng tái hợp khi điện áp tăng. Nên  $\operatorname{tg} \delta$  tăng lên theo điện áp

+ Khi  $U \geq U_0$  trong chất khí xảy ra quá trình ion hoá và chạm, tạo ra số lượng điện tích tự do lớn, nên  $\operatorname{tg} \delta$  tăng lên

+ Khi  $U > U_B$  hầu hết các phân tử đều bị ion hoá cho nên số phân tử tham gia ion hoá giảm hay  $\operatorname{tg} \delta$  giảm

- Ở tầng số cao hiện tượng ion hoá và tổn hao trong điện môi tăng đến mức có thể làm cho điện môi bị cháy và phá huỷ.



### III Tổn hao điện môi rắn

#### 3.1 Điện môi rắn có cấu tạo phân tử:

Với điện môi rắn có cấu tạo phân tử không phân cực không chứa tạp chất, tổn hao không đáng kể và chủ yếu là do điện dẫn gây nên. Các chất này thường được sử dụng trong thiết bị vô tuyến.

#### 3.2 Với chất rắn có cấu tạo phân cực:

Tổn thất điện môi trong các chất này bao gồm cả tổn hao do điện dẫn và tổn hao do hiện tượng phân cực gây nên. Trong đó tổn hao chiếm tỷ lệ lớn.

Tổn hao trong các điện môi này tăng lên khi tần số tăng và có trị số lớn ở tần số siêu cao. Vì vậy, các điện môi này không được dùng trong các thiết bị vô tuyến.

#### 3.3 Điện môi rắn có cấu tạo ion:

**3.3.1 Điện môi rắn có cấu tạo ion ràng buộc chặt chẽ** nếu không có tạp chất làm biến dạng mạng lưới tinh thể thì tổn thất có giá trị bé. Khi nhiệt độ tăng do điện dẫn tăng nên tổn thất tăng

#### 3.3.2 Điện môi có cấu tạo ion ràng buộc không chặt chẽ:

+ **Với chất có khả năng kết tinh:** đặc trưng bằng phân cực chậm làm tăng tổn thất điện môi.

+ **Với điện môi không kết tinh:** Thủy tinh hữu cơ bao gồm tổn thất do phân cực và do điện dẫn gây nên

### 3.4 Tổn thất điện môi rắn có cấu tạo không đồng nhất :

Điện môi không đồng nhất là điện môi có ít nhất 2 pha chất trộn lẫn về mặt cơ học với nhau và không được tác dụng hoá học với nhau. Ví dụ gốm sứ công nghệ cao (Pha chất tinh thể, pha chất thủy tinh, pha chất khí). Tổn thất điện môi khí phụ thuộc vào:

- + Đặc điểm và tỷ lệ khối lượng các pha chất trong gốm
- + Pha thể khí làm tăng tổn thất điện môi vì trong điện trường lớn sẽ gây nên ion hoá chất khí

Ngoài ra, nếu có các tạp chất bán dẫn dẫn điện bằng điện tử hoặc có các lỗ hổng thì tổn thất càng tăng lên

## IV. Tổn hao điện môi lỏng

### 4.1 Điện môi lỏng trung tính:

Tổn hao trong điện môi chỉ do điện dẫn gây nên nếu các chất không chứa phân tử lưỡng cực. Đối với chất lỏng tinh khiết thì điện dẫn rất bé do đó công suất tổn hao cũng rất bé. Trị số  $\text{tg } \delta$  có thể được xác định theo công thức

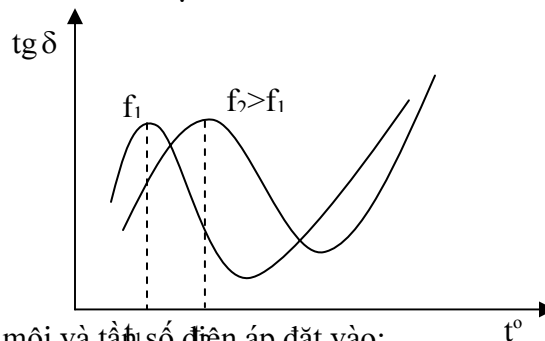
$$\text{tg } \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{12}}{\epsilon \cdot \rho \cdot f}$$

Ví dụ: Dầu máy biến áp  $\rho = 10^{15} (\Omega \cdot \text{cm})$ ;  $\epsilon \approx 2,2$ ;  $f = 50\text{Hz} \Rightarrow \text{tg } \delta \leq 1,8 \cdot 10^{-5}$

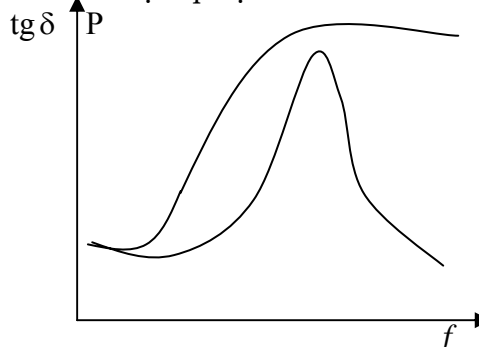
So với chất khí  $\text{tg } \delta$  có trị số bé hơn so với dầu máy biến áp

### 4.2 Đối với chất lỏng cực tính:

- Tùy theo điều kiện nhiệt độ, tần số ngoài tổn thất do điện dẫn gây nên còn có tổn thất do phân cực lưỡng cực chậm gây nên. Do đó, công suất tổn hao thường có trị số lớn
- Quan hệ giữa tổn hao điện môi và nhiệt độ: Mỗi điện môi đạt trị số cực đại tại một nhiệt độ nhất định tùy đặc trưng cho các chất điện môi.



- Quan hệ giữa tổn hao điện môi và tần số điện áp đặt vào:



## Bài Giảng Môn Học Vật Liệu Điện

---

---

Nhận xét: Khi tần số  $f$  tăng lên thì điểm cực đại của  $\text{tg } \delta$  dịch chuyển dần về phía nhiệt độ cao

Tên điện môi	$\varepsilon$	$\text{tg } \delta$ ở nhiệt độ $20^\circ\text{C}$ $f=10^6\text{Hz}$	Ghi chú
Dầu tụ điện	2,2	0,0002	Chất lỏng trung tính
Dầu thầu dầu	4,5	0,01	Chất lỏng cực tính

