5.4.1 CONDENSADORES REALES

Un condensador real no corresponde nunca a una capacidad pura o ideal, que tan sólo almacenaría energía reactiva sino que, a causa de las pérdidas en su dieléctrico y en los soportes conductores o aislantes necesarios para su ejecución mecánica y a su eventual protección contra los agentes exteriores, presenta siempre unas pérdidas que se traducen en una disipación de energía activa, entre sus bornes efectivos, por efecto Joule.

Podemos, por tanto, definir, para cada condensador, un ***factor de pérdidas*** "P", por la relación:

$$P = \frac{\textit{Energia disipada durante un periodo}}{\textit{Energia reactiva almacenada}} = \frac{W_A}{W_R}$$

La energía reactiva almacenada sabemos que es: $W_R = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{max}^2$

siendo $V_{máx}$ la amplitud de la tensión alterna aplicada en bornes del condensador.

En cuanto a las pérdidas por efecto Joule podemos caracterizarlas por una resistencia que puede considerarse conectada en serie o en paralelo con la capacidad pura. Se obtienen así dos esquemas equivalentes del condensador real, que vamos a estudiarlo por separado.

En el esquema serie (*fig. 2.39*), la energía disipada por efecto Joule en un periodo, es $W_A = r \cdot \frac{I_{max}^2}{2} \cdot T$

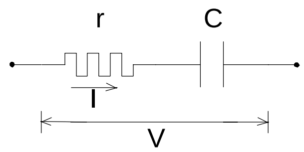

Fig. 2.39

siendo $T = \frac{2\pi}{\omega}$

luego: $$P = \frac{r \cdot \frac{I_{max}^2}{2} \cdot T}{\frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{max}^2} = \frac{r \cdot I^2 \cdot T}{C \cdot V^2} = \frac{r}{C} \cdot \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{I^2}{V^2}$$

y teniendo en cuenta que el valor de la resistencia debe ser muy pequeña, comparada con la reactancia de la capacidad, podemos expresar:

$$I = \frac{V}{\frac{1}{\omega C}} = C \cdot \omega \cdot V$$

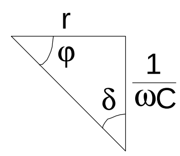

Fig. 2.40

que, sustituyendo en el factor de perdidas:

$$P = \frac{r}{C} \cdot \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{(C \cdot \omega \cdot V)^2}{V^2} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot C \cdot \omega \qquad P = 2\pi r C \omega$$

Suele ser una práctica extendida caracterizar las pérdidas de un condensador por un ángulo "δ" que se denomina ***ángulo de pérdidas*** y que corresponde al complemento del desfase "φ" de la corriente que lo atraviesa, con respecto a la tensión en sus bornes. De acuerdo con esta definición y dibujando el triángulo de impedancias (*fig. 2.40*) que corresponde al esquema serie de este condensador, es fácil verificar que el valor de la tgδ es:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{r}{\frac{1}{\omega C}} = r \cdot C \cdot \omega \qquad \operatorname{tg}\delta = rC\omega$$

con lo que el factor de pérdidas, definido anteriormente vale 2π veces la tangente del ángulo de pérdidas del condensador.

Si adoptamos, ahora, el esquema paralelo (*fig. 2.41*) y llamamos I a la corriente que circula por la resistencia R:

$$W_A = R \cdot \frac{I_{max}^2}{2} \cdot T$$

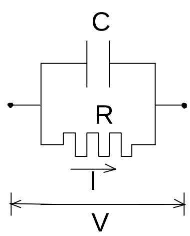

Fig. 2.41

con lo que: $$P = \frac{R}{C} \cdot \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{\frac{I_{max}^2}{2}}{\frac{V_{max}^2}{2}}$$

o en valores eficaces: $$P = \frac{R}{C} \cdot \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{I^2}{V^2}$$

y, como $V = R \cdot I$

obtenemos: $$P = \frac{2\pi}{RC\omega}$$

Si aplicamos a este esquema paralelo el triángulo de admitancias (*fig. 2.42*) y calculamos la tg δ:

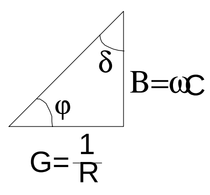

Fig. 2.42

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{G}{B} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{1/\omega C}} = \frac{1}{R\omega C} \qquad \operatorname{tg}\delta = \frac{1}{R\omega C}$$

con lo que comprobamos que, en este caso, también el factor de pérdidas es 2π veces la tangente del ángulo de pérdidas.

Evidentemente, tanto en un esquema como en otro, el condensador se comporta como una determinada impedancia y, a una frecuencia dada, esta impedancia deberá tener el mismo valor, cualquiera que sea el esquema que se utilice.

Llamando Z_s, r y C_s a la impedancia, resistencia y capacidad del circuito serie y Z_p, R y C_P a las del esquema paralelo, calculamos las impedancias para igualarlas entre sí:

$$\overline{Z}_S = r + \frac{1}{j\omega C_S} \qquad \frac{1}{\overline{Z}_P} = \frac{1}{R} + j\omega C_P$$

$$\overline{Z}_P = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C_P} = \frac{R}{1 + j\omega C_P R} = \frac{R(1 - j\omega C_P R)}{1 + (\omega C_P R)^2} = \frac{R}{1 + (\omega C_P R)^2} - j\frac{\omega C_P R^2}{1 + (\omega C_P R)^2}$$

igualando las partes reales de ambas impedancias:

$$r = \frac{R}{1 + (\omega C_P R)^2}$$

y, teniendo en cuenta el valor de tgδ en el circuito paralelo:

$$r = \frac{R}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}} = R\frac{\operatorname{tg}^2\delta}{1 + \operatorname{tg}^2\delta} = R \cdot \operatorname{sen}^2\delta$$

y haciendo lo mismo con las partes imaginarias:

$$\frac{1}{j\omega C_S} = -j\frac{\omega C_P R^2}{1 + (\omega C_P R)^2} \qquad \omega C_S = \frac{1 + (\omega C_P R)^2}{\omega C_P R^2} \qquad C_S = \frac{1 + (\omega C_P R)^2}{\omega^2 C_P R^2} = \frac{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}}{\frac{1}{C_P \operatorname{tg}^2\delta}} = \frac{C_P(1 + \operatorname{tg}^2\delta)\operatorname{tg}^2\delta}{\operatorname{tg}^2\delta} = C_P(1 + \operatorname{tg}^2\delta)$$

De todo esto, podemos sacar las siguientes conclusiones:

1º La capacidad serie C_s y paralelo C_p no son iguales.

2º Que difieren tanto más cuanto las pérdidas sean mayores.

Y, en consecuencia, podemos deducir que, lo que sucede es que, la impedancia serie y paralelo representadas no responden a la realidad física de los fenómenos sino solamente a una forma cómoda de esquematizar, para una frecuencia dada, la impedancia del condensador.

Afortunadamente, en la mayoría de los casos, las pérdidas son muy pequeñas y la tgδ suele ser muy inferior a 0.01. Teniendo esto en cuenta las fórmulas se convierten en:

$$r = R \cdot \operatorname{tg}^2\delta \qquad \text{y} \qquad C_S = C_P$$

y sustituyendo tgδ por su valor en cualquiera de los esquemas:

$$rR = \frac{1}{\omega^2 C^2}$$

que nos expresa que el producto de las resistencias serie y paralelo es igual al cuadrado del módulo de la capacitancia del condensador.

Se puede decir, por último, que en una gama relativamente extensa de frecuencias, tgδ varía poco y puede tomarse como constante, por lo que un condensador real queda caracterizado por su capacidad y por la tangente de su ángulo de pérdidas, y emplear indistintamente el esquema serie o paralelo para plantear el circuito en el que intervenga.