

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
Y ENERGÉTICA**

**SOBRETENSIONES EN LOS**  
**TRANSFORMADORES**

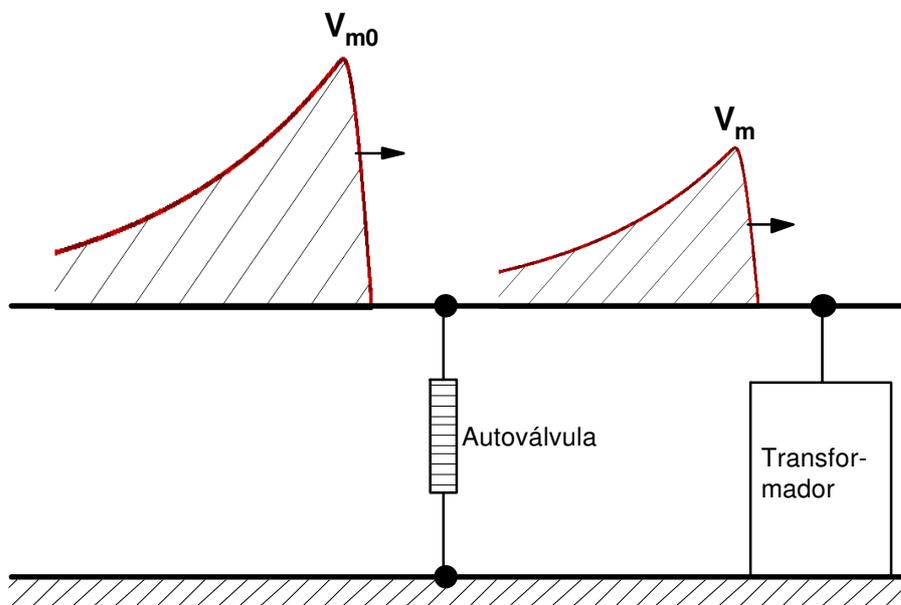
**Miguel Ángel Rodríguez Pozueta**

## 1.- Ondas de sobretensión

En este capítulo se van a estudiar los efectos que tienen las sobretensiones sobre los transformadores.

Aunque cualquier aumento de la tensión sobre la máxima de servicio se puede denominar sobretensión, aquí se va a tratar de las sobretensiones que aparecen en forma de impulsos cortos y aislados. Las sobretensiones de este tipo se pueden producir por diversas causas: conexión y desconexión de interruptores, variaciones bruscas de carga, cortocircuitos, ...; pero las más peligrosas suelen ser las producidas por descargas atmosféricas, bien por caída directa de un rayo sobre una línea, o bien, por las tensiones inducidas por los rayos sobre las líneas.

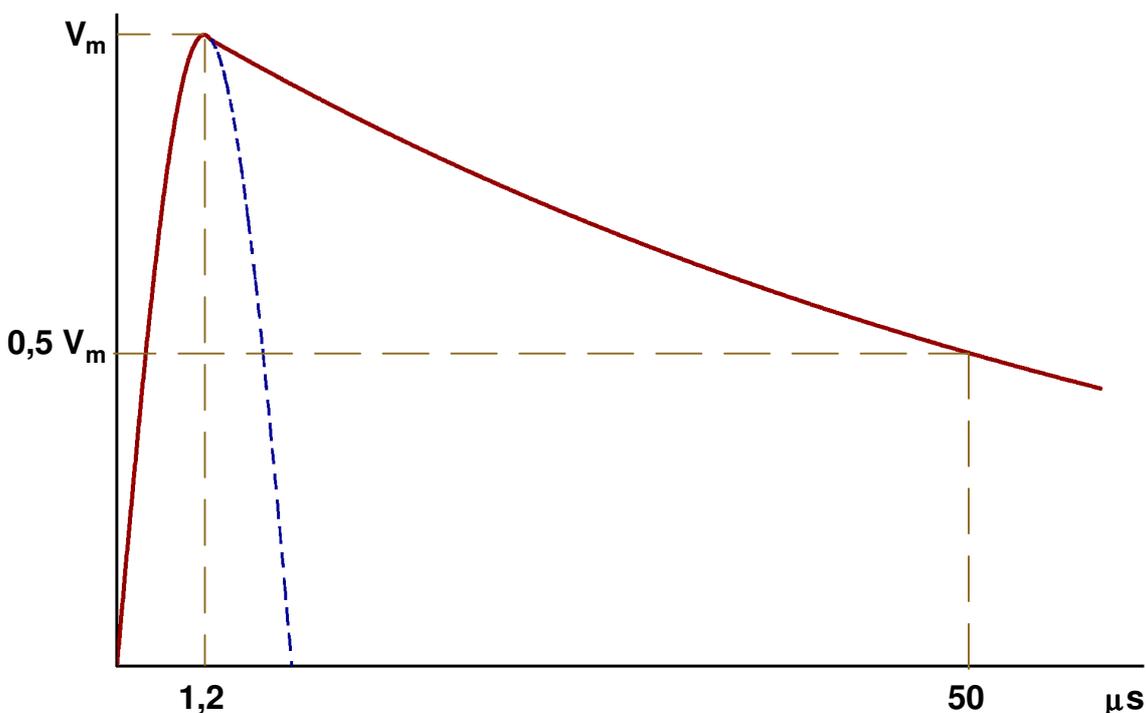
Cuando un rayo cae sobre una línea aparecen dos ondas de sobretensión que circulan hacia ambos lados del punto de caída con una velocidad cercana a la de la luz. La forma de estas ondas viajeras presenta un frente escarpado, con una rápida subida hasta el valor máximo  $V_{m0}$  de la sobretensión, seguida de una bajada mucho más lenta de la tensión hasta los valores normales de servicio (véase la onda dibujada a la izquierda en la Fig. 1).



*Fig. 1: Efecto de una autoválvula sobre una onda de sobretensión*

Para proteger a las instalaciones del efecto de estas sobretensiones se utilizan descargadores y autoválvulas. En la Fig. 1 se muestra cómo una autoválvula limita el efecto de una onda de sobretensión sobre un transformador. Se coloca una autoválvula entre cada una de las fases de la línea y tierra. A la tensión normal de servicio la autoválvula se comporta como un circuito abierto y no pasa corriente por ella. Cuando la tensión supera un valor prefijado la autoválvula se vuelve conductora con lo que se descarga a tierra la mayor parte de la energía de la onda de sobretensión. Dicho de otra manera, al volverse conductora la autoválvula tiende a reducir la tensión de la línea con respecto a tierra. Cuando se acaba la sobretensión la autoválvula se desceba y se vuelve a convertir en aislante. De esta manera la onda de tensión que llega al transformador tiene un valor máximo  $V_m$  limitado por la autoválvula y que es menor que el de la onda original  $V_{m0}$ . Debido a fenómenos de reflexión de las ondas de sobretensión, las autoválvulas se deben situar cerca del elemento a proteger para que sean eficaces.

Por lo tanto, una vez que la onda de sobretensión ha quedado limitada por la autoválvula, el movimiento de esta onda hacia el transformador hace que el devanado que está conectado a la línea vea variar su tensión de la forma representada en la Fig. 2. La tensión del devanado aumenta rápidamente, en unos  $1,2 \mu\text{s}$ , hasta el valor máximo  $V_m$  y luego disminuye lentamente, de forma que a los  $50 \mu\text{s}$  se reduce hasta un valor igual a la mitad del máximo.



*Fig. 2: Forma típica de la sobretensión producida por un rayo*

Evidentemente habrá que diseñar el transformador para que sea capaz de resistir esta tensión sin que se deteriore.

## **2.- Efectos de las sobretensiones sobre un transformador**

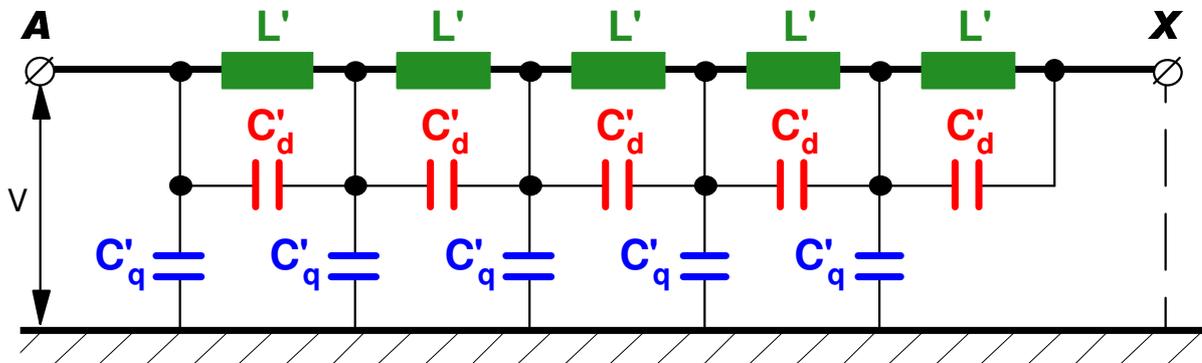
En este apartado se va a estudiar el caso de sobretensiones en un transformador con un solo devanado de alta tensión, cuyo borne A está conectado a la línea por donde le llega la sobretensión y el otro borne X (el neutro) está conectado a tierra o aislado. El estudio del comportamiento del transformador frente a estas sobretensiones es bastante complejo por lo que aquí sólo se dará una visión aproximada del mismo, suficiente para comprender los aspectos más esenciales de lo que sucede.

Durante los primeros momentos de la tensión de la Fig. 2, en los que ésta aumenta rápidamente de 0 a  $V_m$ , se puede considerar que sigue aproximadamente una ley sinusoidal (la cual continuaría según la línea de trazos dibujada en la Fig. 2), cuyo cuarto de período ( $T/4$ ) se corresponde con el tiempo de  $1,2 \mu\text{s}$  en que tarda en alcanzar el valor máximo. Es decir, durante los primeros  $1,2 \mu\text{s}$  la sobretensión (Fig. 2) a la que se ve sometido el devanado de alta tensión del transformador es sinusoidal con una frecuencia:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4(T/4)} = \frac{1}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6}} = 2,08 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

A frecuencias tan elevadas no se puede utilizar el circuito equivalente clásico del transformador. En efecto, existen una serie de capacidades entre las bobinas del devanado y entre éstas y las piezas del transformador conectadas a tierra (carcasa, núcleo, ...) que a la frecuencia industrial (50 Hz) son totalmente despreciables, pero que a frecuencias altas dan lugar a unas reactancias lo suficientemente pequeñas como para que circulen por ellas corrientes apreciables y se deban tener en cuenta.

En la Fig. 3 se muestra el circuito equivalente del devanado de A.T. del transformador si se tienen en cuenta estas capacidades y se desprecia la resistencia del devanado. En este circuito equivalente  $L'$  son las inductancias de las bobinas del devanado,  $C'_d$  son las capacidades entre bobinas y  $C'_q$  son las capacidades entre las bobinas y tierra.



*Fig. 3: Circuito equivalente de un devanado del transformador incluyendo sus capacidades y despreciando la resistencia*

Si el número de bobinas del devanado es  $n$ , su capacidad longitudinal total  $C_d$  vale

$$C_d = \frac{1}{\sum \frac{1}{C'_d}} = \frac{C'_d}{n}$$

y la capacidad transversal total  $C_q$  vale

$$C_q = \sum C'_q = n C'_q$$

Se denominará  $\alpha$  a este parámetro:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}} = n \sqrt{\frac{C'_q}{C'_d}}$$

Supóngase que el neutro X está unido a tierra y que no existieran las capacidades de las bobinas respecto a tierra ( $C'_q = 0$ ), lo cual significa que el parámetro  $\alpha$  es nulo ( $\alpha = 0$ ). Dado que para frecuencias altas las reactancias inductivas son muy elevadas y se pueden despreciar,

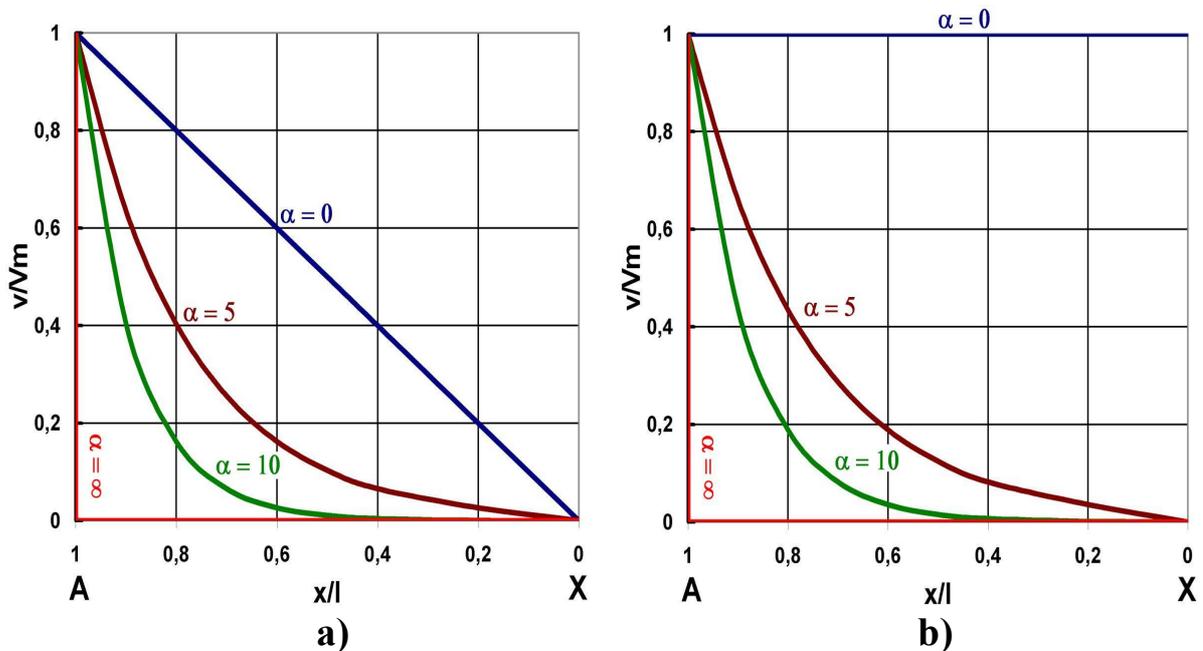
se tiene que en este caso el bobinado de A.T. del transformador se comporta como un conjunto de capacidades iguales conectadas en serie entre la línea y tierra. Por consiguiente, circulará la misma corriente por todas las bobinas y se tiene una distribución uniforme de la tensión. Esto está representado en la Fig. 4a donde en el eje vertical se indica la tensión y en el eje horizontal se indican los puntos del devanado de alta tensión desde el borne A (donde  $x/l = 1$ ) hasta el borne X (donde  $x/l = 0$ ).

Supóngase ahora que el neutro X sigue unido a tierra y que no existieran las capacidades entre bobinas ( $C'_d = 0$ ), lo cual significa que el parámetro  $\alpha$  es infinito ( $\alpha = \infty$ ). En este caso, la corriente circularía de la línea a tierra sólo a través de la primera bobina y toda la tensión que llega por la línea será soportada íntegramente por esta bobina. Esta situación se representa en la Fig. 4a mediante una línea que consta de dos trazos rectos, uno vertical y otro horizontal, que pasan por el punto A (por lo tanto, estos trazos coinciden con los ejes de coordenadas).

Para valores intermedios del parámetro  $\alpha$  (entre cero e infinito) se obtienen distribuciones de la tensión comprendidas entre estos dos extremos (ver la Fig. 4a).

En la Fig. 4b se muestran cómo son las distribuciones de la tensión durante estos primeros 1,2  $\mu$ s de la sobretensión para diferentes valores de  $\alpha$ , cuando el neutro X del devanado de A.T. está aislado de tierra.

En este caso de neutro aislado, si el parámetro  $\alpha$  es nulo ( $\alpha = 0$ ) el devanado está completamente aislado de tierra y no circulará corriente por él. No existe, entonces, ninguna caída de tensión y todos los puntos del devanado están a la misma tensión. Esto se representa en la gráfica de la Fig. 4b mediante una recta horizontal de ordenada  $v/V_m$  igual a 1. Si el parámetro  $\alpha$  tiene valor infinito ( $\alpha = \infty$ ) pasa lo mismo que cuando el neutro X está conectado a tierra y toda la tensión es soportada íntegramente por la primera bobina del devanado.



*Fig. 4: Distribución de la tensión en el instante inicial de la sobretensión:  
 a: con el neutro unido a tierra  
 b: con el neutro aislado de tierra*

Una vez pasados los primeros  $1,2 \mu\text{s}$  la tensión varía muy lentamente, con lo cual el reparto de tensión a lo largo del devanado ahora es prácticamente similar al que se obtendría si se aplicara una tensión continua. Así, si el neutro X está unido a tierra la distribución final de la tensión da lugar a un reparto uniforme de ésta entre todas las bobinas del devanado; es decir, se obtiene una distribución similar a la correspondiente al periodo inicial cuando el parámetro  $\alpha$  es nulo ( $\alpha = 0$ ). Si el neutro X está aislado, al final todas las bobinas del devanado tienen el mismo potencial, lo cual también se corresponde a la distribución inicial que se obtiene cuando el parámetro  $\alpha$  es nulo (véase la Fig. 4b).

Evidentemente, la transición entre la distribución de tensiones inicial (en los primeros  $1,2 \mu\text{s}$ ) y la distribución final se produce a través de un proceso transitorio. Puesto que el circuito equivalente del devanado (Fig. 3) incluye capacidades e inductancias que forman un circuito oscilante, este transitorio incluirá oscilaciones que serán tanto más importantes cuanto más diferentes sean las distribuciones de tensión inicial y final. Por lo tanto, para minimizar los efectos peligrosos de estas oscilaciones y reducirlas todo lo posible interesa que las distribuciones de tensión inicial y final sean lo más similares posible. Es decir, conviene construir el devanado de forma que el parámetro  $\alpha$  sea lo más pequeño posible.

Sin embargo, para reducir el valor del parámetro  $\alpha$ ; es decir, para minimizar las capacidades a tierra  $C'_q$ , sería preciso aumentar mucho las distancias entre el devanado y las piezas conectadas a tierra, lo cual no resulta práctico.

Lo que se hace en los transformadores de tensiones inferiores a 110 kV es reforzar el aislamiento de las bobinas extremas que son las que, como se ha visto, soportan la mayor parte de las sobretensiones cuando el parámetro  $\alpha$  no es pequeño. Para transformadores de tensiones iguales o superiores a 110 kV, además de reforzar el aislamiento de las bobinas extremas, se colocan unas pantallas electrostáticas que se conectan a la línea (borne A del devanado). Estas pantallas suelen tener la forma de anillos aislados abiertos (para que no se comporten como espiras en cortocircuito) que rodean el devanado. Mediante el empleo de estas pantallas se consigue que la distribución inicial de tensiones se aproxime a la correspondiente a un valor nulo del parámetro  $\alpha$  ( $\alpha = 0$ ).

### **Bibliografía**

- [1] IVANOV-SMOLENSKI. “Máquinas eléctricas. Tomo 2”. Editorial Mir. Moscú. 1984.
- [2] KOSTENKO y PIOTROVSKI. “Máquinas eléctricas. Tomo II”. Ed. Mir. Moscú. 1979.

© 2010, Miguel Angel Rodríguez Pozueta  
Universidad de Cantabria (España)  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

*Está permitida la reproducción total o parcial de este documento con la condición inexcusable de citar su procedencia y su carácter gratuito.*

*Este documento puede descargarse gratuitamente desde esta Web:*  
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>