Sobretensiones en Transformadores

Parte 2

1. Distribución de la tensión en los bobinados

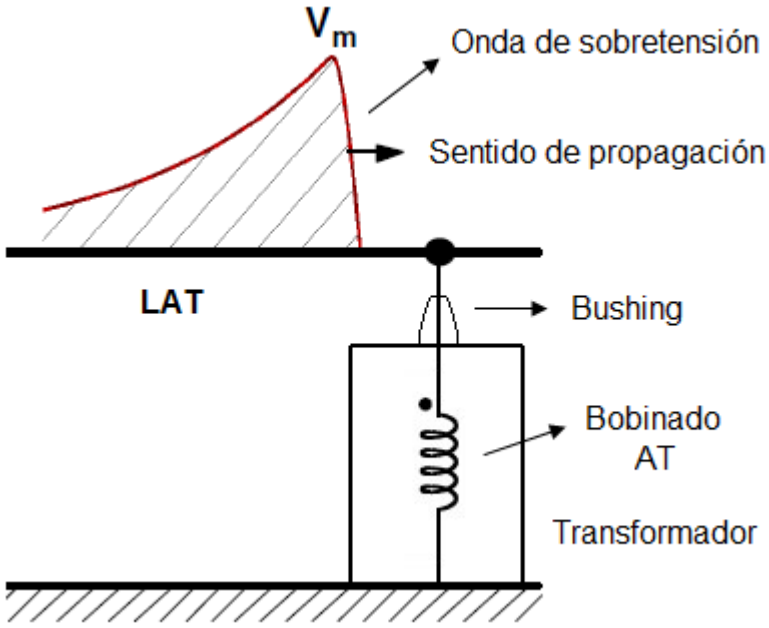
El sistema de aislación de un transformador de potencia o distribución, debe estar diseñado para poder resistir las solicitaciones derivadas de los estados de sobretensión que se presenten en el SEP.

De tal forma, en primer lugar habrá que determinar la característica en la distribución de la tensión a lo largo de los bobinados, ante una sobretensión específica.

Como vimos en la Parte 1 del artículo, tanto las sobretensiones atmosféricas como de maniobra, poseen una característica impulsiva en sus ondas de corriente y tensión, por lo que la determinación del perfil de la tensión en los bobinados deberá calcularse atendiendo a este hecho.

En la figura N° 1 se observa una onda de sobretensión por descarga atmosférica que se propaga a través de los conductores de una línea de transmisión (LAT) y que se dirige hacia las acometidas de los bobinados primarios en AT de un transformador.

Figura N° 1



Se destaca la característica de la onda de sobretensión, que, como ya hemos visto en la parte 1, es de muy corta duración y fuertemente amortiguada, representándose por una onda normalizada del tipo 1,2/50 µs.

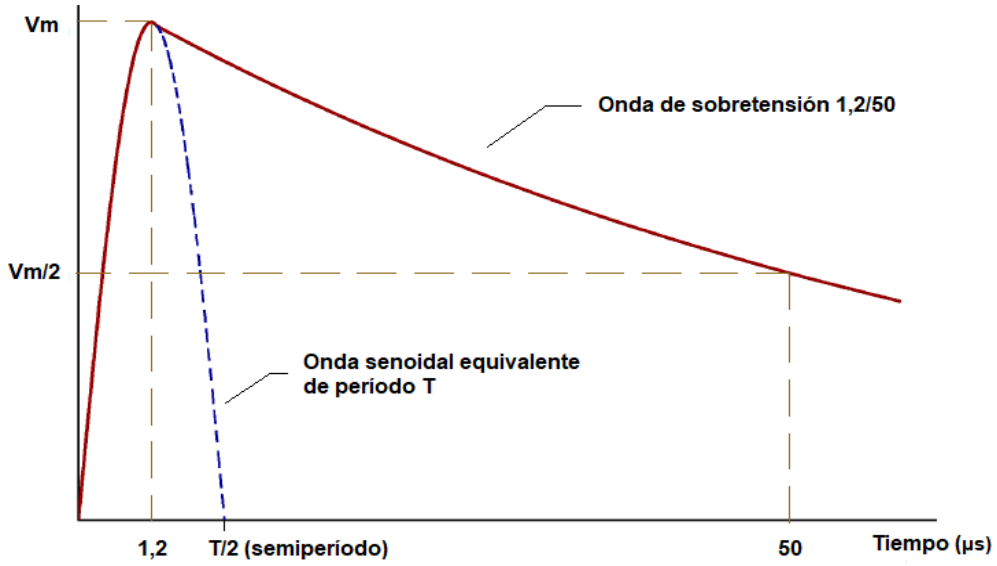
Por lo tanto, esta sobretensión, al alcanzar los terminales del bobinado del transformador, provocará que éste experimente una variación de su perfil de tensión, de forma tal que en el tiempo de 1,2 µs alcance su valor pico, según sea el nivel Vm de la onda. Luego, el perfil de tensión, tendrá un decrecimiento paulatino, estableciendo que, transcurridos 50 µs, el valor de la tensión se reducirá según el valor mitad del nivel Vm.

Se concluye que, los bobinados del transformador deberán diseñarse atendiendo al perfil de tensión que provocará la sobretensión, resistiendo la aislación la solicitación asociada.

Como un primer intento de abordar este tema, debemos prestar atención a las frecuencias presentes en este tipo de sobretensiones, ya que nos determinarán las condiciones circuitales que permitirán representar a los bobinados del transformador.

En tal sentido, notamos que el frente de la onda puede representarse (aproximadamente) a través de una onda senoidal con un período T = 4,8 µs (es decir T = 4 x 1,2 µs). En la figura N° 2 destacamos esta representación, notando que el valor máximo se alcanza en el tiempo t = 1,2 µs.

Figura N° 2



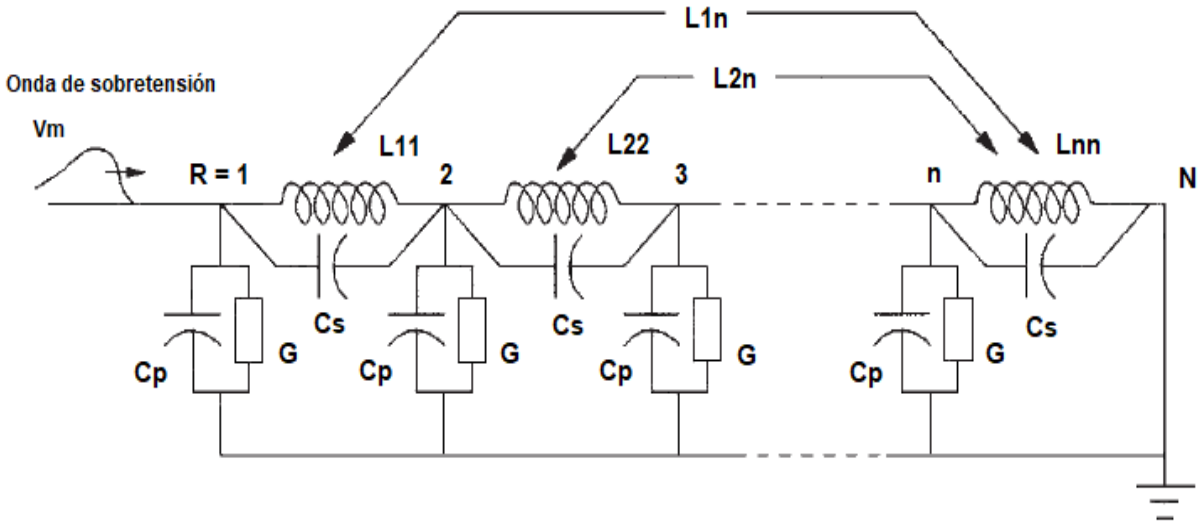
Por lo tanto, la frecuencia de la onda senoidal equivalente durante los primeros instantes de la aplicación de la sobretensión sobre los bobinados del transformador, tendrá un valor de:

$$f = \frac{1}{4{,}8 \text{ x } 10^{-6} \text{ s}} \rightarrow f = 208{,}3 \text{ kHz}$$

En estos niveles de frecuencia, la representación clásica de los bobinados (circuito R-L), deja de tener sentido, ya que las capacidades entre bobinas y entre éstas a tierra (cuba, núcleo), tendrán una significación importante, con reactancias capacitivas muy pequeñas que provocarán la circulación de corrientes considerables sobre estos componentes.

Por lo tanto, el circuito equivalente que representa el bobinado del transformador, ante la existencia de una sobretensión de las características anteriormente citadas, será como se indica en la figura N° 3.

Figura N° 3



SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Siendo:

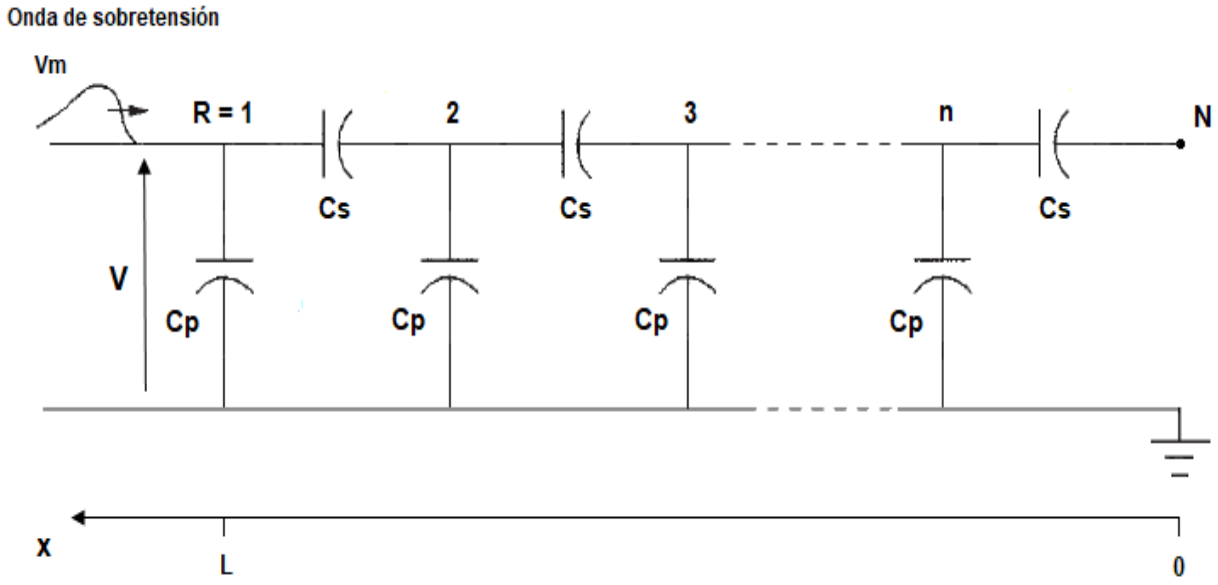
Lii = inductancia propia de la bobina “i”, por unidad de longitud.
Lij = inductancia mutua entre la bobina “i” y la bobina “j”, por unidad de longitud.
Cs = Capacidad serie o longitudinal entre bobinas, por unidad de longitud.
Cp = Capacidad paralelo o transversal entre bobinas y el potencial de tierra, por unidad de longitud.
G = Conductancia paralelo entre las bobinas y el potencial de tierra, por unidad de longitud.
R = punto inicial del bobinado.
N = punto neutro del bobinado (en este caso puesto a tierra).

En la figura previa se observa el terminal de neutro del bobinado conectado al potencial de tierra. Nosotros veremos, en el presente trabajo, esta condición, así como la del neutro aislado.

Una primer simplificación al modelo será la de despreciar los componentes inductivos y conductivos de las bobinas, en relación a los correspondientes capacitivos, considerando las altas frecuencias en juego.

Por lo tanto, el circuito equivalente con los parámetros capacitivos, quedará como se indica en la figura N° 4.

Figura N° 4



Se destaca que en este caso hemos dejado sin conectar el terminal de neutro del bobinado al potencial de tierra, ya que nuestra intención es la de evaluar distintas condiciones de operación del transformador, en relación al conexionado del neutro.

También se destaca la incorporación del eje axial “x” del bobinado, adoptando la referencia cero en la posición del punto neutro. Por lo tanto, “L” será la longitud axial del bobinado, referenciando así al punto inicial o de inyección de la sobretensión (R).

A los fines del cálculo se definen los siguientes parámetros:

Csl = capacidad serie o longitudinal total = Cs / L.
Cpt = capacidad paralelo o transversal total = Cp L.

En este modelo, el perfil de tensión, a lo largo del bobinado, se podrá representar por “u(x, t)” y si consideramos el perfil en el instante inicial de aplicación de la sobretensión (un tiempo comprendido entre t = 0 y t = 1,2 μs), podemos indicarlo por la expresión:

$u_0(x) = u(x, 0)$ = perfil de tensión a lo largo del bobinado (eje x) en el instante inicial.

La resolución de este sistema se basa en considerar la ecuación diferencial que rige el comportamiento de una onda que se propaga a través de un circuito netamente capacitivo, con las condiciones de borde fijadas por el tipo de conexionado del neutro.

De tal forma, tendremos dos casos bien definidos, conexionado del neutro del bobinado al potencial de tierra y neutro del bobinado aislado del potencial de tierra.

La ecuación diferencial que describe el fenómeno será:

$$\frac{d^2u_0(x)}{dx^2} - \frac{Cp}{Cs}\,u_0(x) = 0$$

Como ya comentamos, se determinan dos casos, en relación al tipo de conexionado del terminal de neutro, fijando así las condiciones de borde para la resolución analítica de la ecuación diferencial.

Tendremos:

a) <u>Neutro puesto a tierra</u>

Sin entrar en los detalles de la resolución de esta ecuación diferencial, la solución será, adoptando como excitación un escalón de impulso de magnitud Vm y estando el neutro conectado al potencial de tierra:

$$u_0(x) = Vm\,\frac{\operatorname{senh}(kx)}{\operatorname{senh}(kL)}$$

En donde:

$$k = \sqrt{\frac{Cp}{Cs}}$$

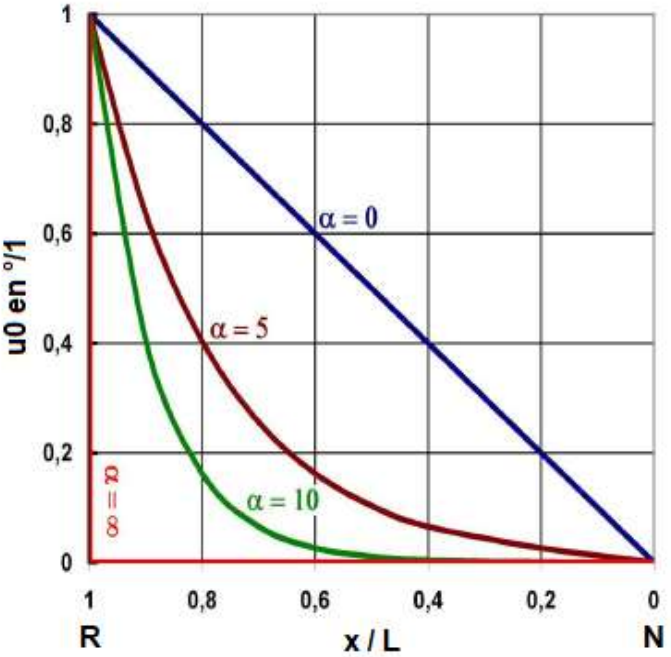
La unidad de k es [1/m].

De esta relación, se define el coeficiente “α” (adimensional), denominado <u>Constante de Distribución</u>:

$$\alpha = \sqrt{\frac{Cpt}{Csl}} = k\,L$$

Representando gráficamente el perfil de tensión a lo largo del bobinado con el neutro puesto a tierra, para distintos valores del parámetro “α” (ó k = α / L), tendremos:

Figura N° 5



Teniendo la solución del perfil de tensión $u_0(x)$, podemos analizar, a continuación, los casos extremos de la distribución.

a.1) <u>Caso de α = 0</u>

Ocurre cuando las capacidades a tierra del bobinado son prácticamente despreciables (Cp ~ 0).
Como consecuencia de la alta frecuencia, en el instante inicial de aplicación de la sobretensión, el efecto inductivo del bobinado se puede despreciar, por lo que el circuito equivalente estará conformado solamente por las capacidades en serie (Cs). En tal caso, el perfil de tensión presentará una característica uniforme, tal como se puede ver en la figura N° 5.

a.2) <u>Caso de α → ∞</u>

Ocurre cuando las capacidades serie del bobinado son prácticamente despreciables (Cs ~ 0).
Acá nos encontramos con el caso en que toda la corriente de entrada circulará solamente en la primera bobina, la cual será la que soportará toda la tensión aplicada.

Un hecho importante a tener en cuenta es que el esfuerzo dieléctrico sobre la aislación del bobinado, estará directamente relacionado con el gradiente máximo del perfil de tensión.
Por lo tanto:

Gradiente máximo del perfil de tensión = $GU_{max} = \left[\frac{du_0(x)}{dx}\right]_{x=L} = k\,Vm\,\coth(kL)$

Este valor máximo se establece en el inicio del bobinado en la posición x = L.
Debido que a los efectos prácticos se cumple kL > 3, entonces se puede aproximar la coth(kL) al valor unidad.
Se tendrá:

$GU_{max} = k\,Vm$ [V/m].

$GU_{max} / Vm = k = \alpha / L$.

La conclusión importante que se deriva de este resultado es que, cuanto mayor sea el valor de "α", es decir cuánto mayor sea el valor de la capacidad transversal total, mayor será la solicitación dieléctrica en el extremo del bobinado conectado a la línea de AT.
Esta condición, se deberá tener muy en cuenta al diseñar el bobinado del transformador.

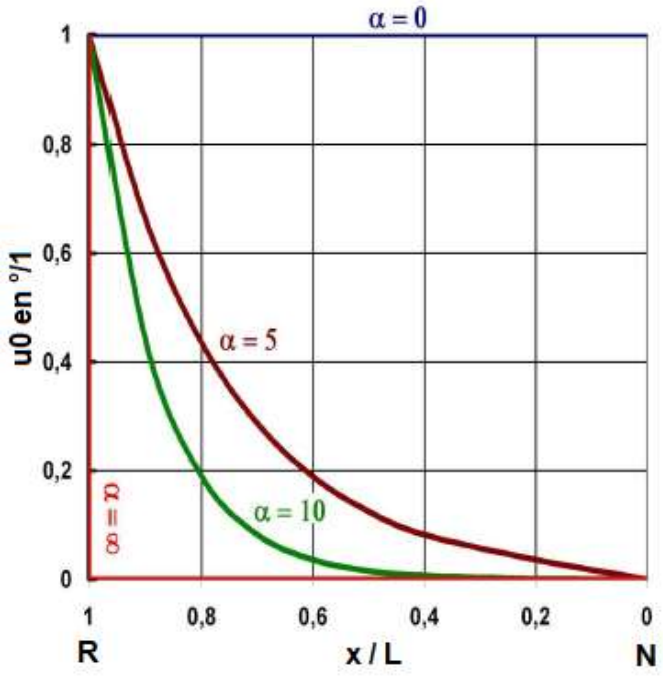
b) <u>Neutro aislado</u>

Si el neutro se encuentra aislado del potencial de tierra, la expresión del perfil de tensión será:

$$u_0(x) = Vm\,\frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)}$$

Cuya característica, para distintos valores de "α", será:

Figura N° 6



Ahora tendremos:

b.1) <u>Caso de α = 0</u>

Al ser las capacidades a tierra del bobinado prácticamente nulas, el bobinado quedará completamente aislado del potencial de tierra, no circulando corriente sobre el mismo y por lo tanto no habrá caídas de tensión
En esta situación, todos los puntos del bobinado quedarán al mismo nivel de tensión, dado por u_0 = 1 °/1.

b.2) <u>Caso de α → ∞</u>

Se presenta el mismo estado que en el caso del neutro conectado al potencial de tierra.
Por lo tanto, toda la corriente de entrada circulará solamente en la primera bobina, la cual soportará toda la tensión aplicada.

En este caso, el gradiente máximo de tensión vendrá dado por:

Gradiente máximo del perfil de tensión = $GU_{max} = \left[\frac{du_0(x)}{dx}\right]_{x=L} = k\,Vm\,\tanh(kL)$

Este valor máximo se establece en el inicio del bobinado en la posición x = L.
Sabiendo que kL > 3, entonces tanh(kL) ~ 1.
Por lo tanto:

$GU_{max} = k\ Vm$ [V/m].

$GU_{max} / Vm = k = \alpha / L$.

Por lo tanto, el valor del gradiente máximo en el inicio del bobinado, para el caso de tener un neutro aislado, es el mismo que para el caso de que el neutro se encuentre conectado al potencial de tierra.

Valores típicos de la Constante de Distribución (α) se encuentran entre 5 a 20 (bobinado continuo de discos).

Cualquier táctica de diseño que promueva la reducción de "α", logrará una distribución más uniforme del perfil de tensión, lo cual llevará también a reducir la solicitación dieléctrica en los bobinados.

2. Especificación de las capacidades de los bobinados

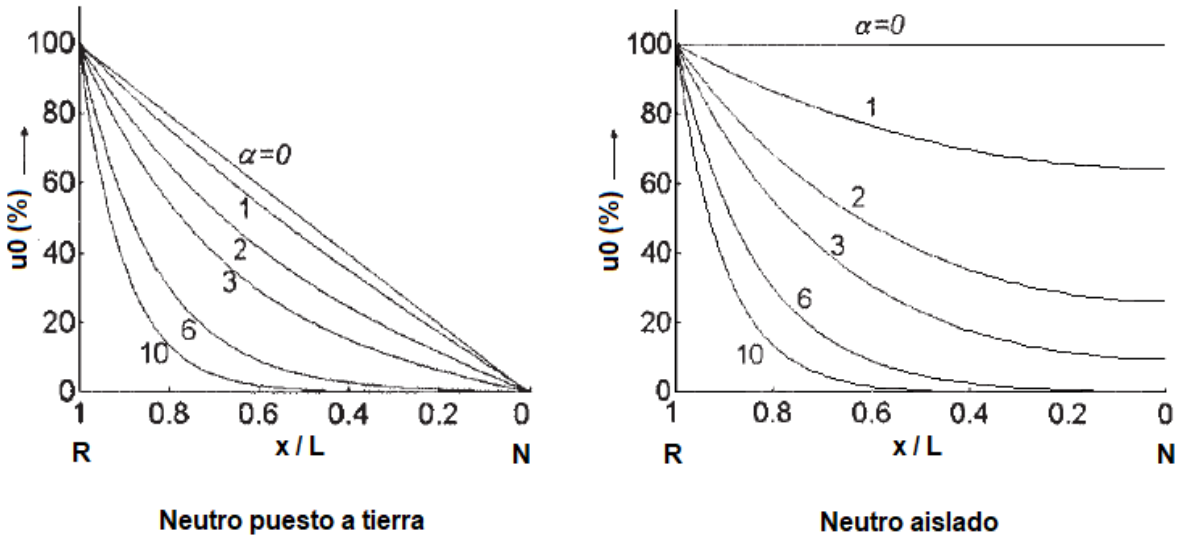
Como hemos visto en el ítem previo, la capacidad longitudinal total (Csl) y la capacidad transversal total (Cpt) del bobinado, determinan la solicitación dieléctrica en el extremo inicial del mismo, ante la presencia de sobretensiones amortiguadas, de frente de onda con pendiente pronunciada.

También vimos que en el extremo inicial del bobinado se establece el máximo gradiente de tensión y por lo tanto la máxima solicitación dieléctrica.

En la figura N° 7 volvemos a representar las características del perfil de tensión, para ambos casos del conexionado del neutro del bobinado, con el fin de compararlas.

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Figura N° 7



De la figura se observa que, para valores de “α” entre 0 e ∞, se obtienen perfiles de tensión iniciales comprendidos entre estos extremos, para ambos tipos de conexionado del neutro del transformador.

Como vimos en el ítem 1, las inductancias del bobinado no tienen influencia en los instantes iniciales de aplicación de la onda de sobretensión, por el nivel de frecuencia en este estado temporal.

Luego de transcurrido el tiempo en que las altas frecuencias dominan el fenómeno, las inductancias volverán a tener preponderancia, por lo que en el estado final, una vez la sobretensión se haya extinguido, el perfil de tensión será uniforme.

El fenómeno quedará descripto, en el estado inicial, por la influencia de las capacidades (Cs y Cp) del bobinado, con perfiles según se indica en la figura N° 7, dependiendo del valor “α”.

Entonces, podemos decir que la Constante de Distribución “α” representa el grado de desviación de la distribución inicial de la tensión con respecto a la distribución final de la misma, la cual es de característica lineal – uniforme.

Queda en claro que, para poder diseñar efectivamente un bobinado que pueda resistir los esfuerzos dieléctricos de las sobretensiones, será fundamental conocer los valores de las capacidades serie y paralelo.

A continuación veremos distintos métodos que permiten calcular/estimar las capacidades involucradas.

a) <u>Capacidades en paralelo</u>

Quedan comprendidas todas las capacidades en la magnitud Cp, como ya hemos visto. Podemos tener:

a.1) <u>Capacidad entre dos bobinados o bobinado interno y núcleo magnético</u>

Se puede estimar con la siguiente expresión:

$$C_{bt} = \frac{\epsilon_0 \pi D_m h_b}{\left(\frac{e_a}{\epsilon_a}\right) + \left(\frac{e_p}{\epsilon_p}\right)}$$

Siendo:

D_m = diámetro medio entre el espacio de ambos bobinados.
h_b = altura de los bobinados.
e_a = espesor del aceite.
e_p = espesor de la aislación de papel.
ε_a = permitividad dieléctrica relativa del aceite.
ε_p = permitividad dieléctrica relativa del papel.

a.2) Capacidad entre un bobinado y la cuba

En este caso se puede estimar con la siguiente expresión:

$$C_{bc} = \frac{2\pi\epsilon_0 h_b}{\cosh^{-1}(\frac{d}{R})}\left[\frac{e_a + e_p}{\left(\frac{e_a}{\epsilon_a}\right) + \left(\frac{e_p}{\epsilon_p}\right)}\right]$$

Siendo:

d = distancia entre el eje del bobinado y la cuba.
h_b = altura del bobinado.
R = radio del bobinado.
e_a = espesor del aceite.
e_p = espesor de la aislación de papel.
ε_a = permitividad dieléctrica relativa del aceite.
ε_p = permitividad dieléctrica relativa del papel.

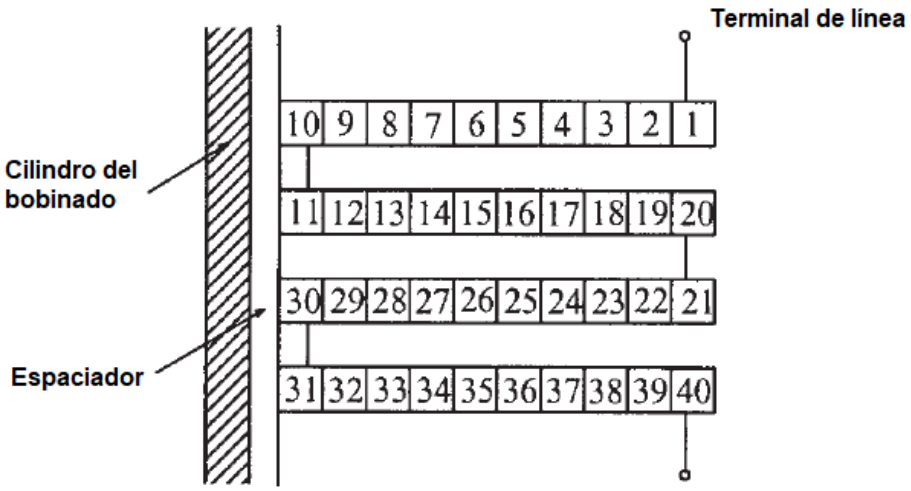
b) Capacidades en serie

b.1) Bobinado continuo

En este tipo de bobinado la capacidad en serie total vendrá dada por las capacidades entre vueltas de las bobinas y las capacidades conformadas entre discos.
Las capacidades entre vueltas, al estar en serie, dan como resultado una menor capacidad equivalente. Lo mismo ocurre con las correspondientes a los discos.

En la figura N° 8 se observa la distribución de un bobinado continuo.

Figura N° 8



Como ya hemos comentado, este tipo de bobinado presenta la desventaja de tener una reducida capacidad en serie o longitudinal total (Csl) y por lo tanto un consecuente alto valor del Coeficiente de Distribución "α".
Con el fin de disminuir los efectos del alto gradiente de tensión ante sobretensiones, se procede a instalar pantallas electroestáticas, las cuales mejoran el perfil de tensión y reducen los esfuerzos dieléctricos en el terminal de línea.
Para establecer la capacidad en serie habrá que considerar tanto la capacidad entre vueltas de las bobinas, así como la correspondiente entre discos del bobinado.
La capacidad entre vueltas de las bobinas viene dada por:

$$Cv = \frac{\epsilon_0 \epsilon_p \pi D_m (a_c + e_p)}{e_p}$$

Donde:

D_m = diámetro medio del bobinado.
ε_p = permitividad dieléctrica relativa del papel aislante.
a_c = ancho del conductor sin tener en cuenta la aislación de papel, en la dirección axial.
e_p = espesor total del papel aislante.

La capacidad entre dos discos consecutivos del bobinado será:

$$Cd = \epsilon_0 \pi D_m (R + e_e) \left[\frac{k}{\frac{e_p}{\epsilon_p} + \frac{e_e}{\epsilon_a}} + \frac{(1-k)}{\frac{e_p}{\epsilon_p} + \frac{e_e}{\epsilon_e}} \right]$$

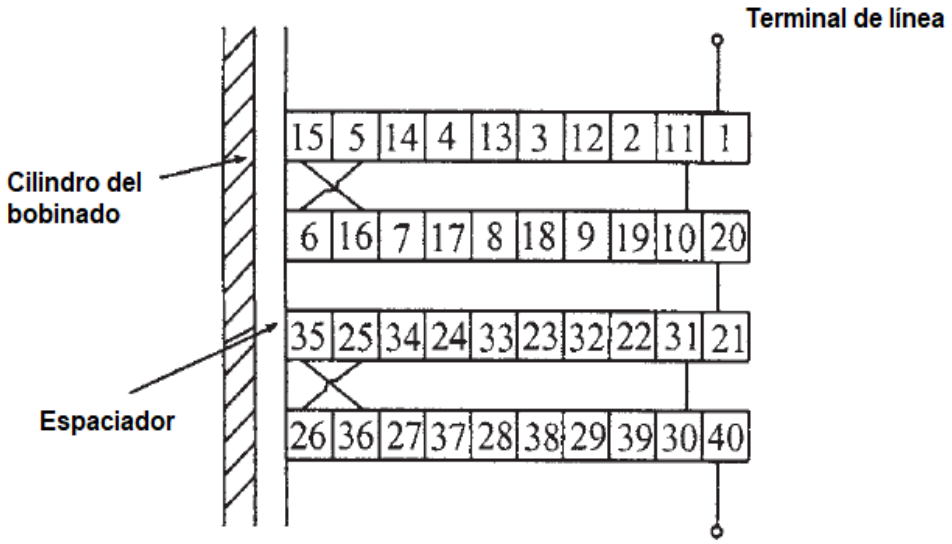
Donde:

ε_a = permitividad dieléctrica relativa del aceite.
ε_e = permitividad dieléctrica relativa de los separadores radiales entre discos.
k = fracción de la circunferencia ocupada por el aceite.
R = profundidad radial del bobinado.
e_e = espesor de los separadores radiales entre discos.

b.2) Bobinado intercalado

Con esta configuración se consigue incrementar la capacidad serie total del bobinado, al distribuir dos vueltas consecutivas con una vuelta que se encuentra eléctricamente más alejada en el conformado.
Lo que se logra es incrementar la tensión entre vueltas eléctricamente adyacentes, aumentando de tal forma la capacidad serie total del bobinado.
En la figura N° 9 se observa este tipo de configuración.

Figura N° 9



Se consigue una distribución bastante uniforme del perfil inicial de tensión, como consecuencia de una sobretensión impulsiva, debido a una disminución apreciable del valor de “α”.
La capacidad en serie para este bobinado será:

$$C_{si} = \frac{C_v}{4}\left[N_D + \left(\frac{N_D - 1}{N_D}\right)^2 (N_D - 2)\right]$$

Siendo:

C_v = capacidad entre vueltas de las bobinas.
N_D = número de vueltas de las bobinas por disco del bobinado.

Para el caso general de que $N_D >> 1$, se tendrá:

$$C_{si} = \frac{C_v}{2}\,[N_D - 1]$$

Se obtiene un aumento apreciable en la capacidad serie del bobinado, siendo muy usado en transformadores de potencia de AT y EAT.

3. Diseño óptimo de los bobinados ante sobretensiones

La transición entre el estado de distribución inicial de tensión y el estado final (con preponderancia de las inductancias del bobinado), ocurrirá a través de un proceso transitorio.

Durante este proceso, habrá una interacción de energía eléctrica (capacidades) y magnética (inductancias), provocando así oscilaciones en la respuesta.

Estas oscilaciones serán de magnitud apreciable, en la medida que las distribuciones inicial y final sean muy diferentes, es decir, cuando el perfil inicial de tensión tenga un valor alto de “α”.

Es decir, la premisa principal en el diseño de los bobinados del transformador para soportar esfuerzos dieléctricos derivados de la acción de sobretensiones impulsivas, será la de lograr que las distribuciones de tensión en la etapa inicial sea lo más parecida posible a la correspondiente en la etapa final.

Por lo tanto, podemos enunciar algunas consideraciones a tener en cuenta en la etapa de diseño de los bobinados de un transformador, en relación a las componentes capacitivas que lo conforman.

- Con el fin de conseguir que las distribuciones de tensión inicial y final posean la menor desviación posible, entre una y otra, deberá diseñarse el bobinado con un valor de “α” lo más pequeño posible. Es decir, se deberán reducir las capacidades en paralelo y/o incrementar las capacidades en serie.

- Lo anterior implica que, para reducir las capacidades en paralelo, como se desprende de la expresión de C_{bc} en el ítem 2, se requiere aumentar las distancias entre el bobinado y las partes metálicas (por ej. la cuba). Ver el parámetro “d” en el apartado a.2 del ítem 2.

- Considerar la decisión anterior, llevará a tener un transformador de mayor tamaño, lo cual puede resultar en una solución no práctica o no deseada.

- También hay que tener en cuenta que los valores de las capacidades en paralelo dependen de parámetros geométricos (diámetro medio entre bobinados y el radio del bobinado) que son fundamentales en otras consideraciones del diseño.

- Por todo lo dicho previamente, la decisión de reducir la capacidad en paralelo lleva a esta opción, por lo general, a tornarse impráctica desde el punto de vista técnico-económico.

- También se puede lograr un bajo valor de "α" aumentando los valores de las capacidades en serie del bobinado, con la adopción específica en el diseño de un tipo dado de configuración en el mismo.

- Un técnica para soportar los esfuerzos dieléctricos en transformadores de Un < 132 kV es la de reforzar la aislación en las bobinas extremas (terminal de línea), ya que son las que tienen aplicado el mayor gradiente de tensión, que, como ya destacamos, es mayor a medida que "α" aumenta.

- Para transformadores con Un ≥ 132 kV, además de reforzar la aislación en las bobinas extremas, se instalan pantallas electroestáticas alrededor de los bobinados. Esta configuración permite aproximar la distribución inicial de tensión a la correspondiente α = 0.

- La técnica anterior representa un problema técnico-económico, debido a que a mayores tensiones se dificulta el diseño de las pantallas electroestáticas y al mismo tiempo aumentan los espacios internos en el transformador.

- El desarrollo de los bobinados intercalados ha permitido aumentar las capacidades en serie y reemplazar la técnica de pantallas electroestáticas.

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

4. Conclusiones

- Las sobretensiones impulsivas son ondas viajeras que se propagan a través de los conductores de las LAT, derivadas de procesos transitorios con origen en perturbaciones internas o externas a la red.

- Los efectos de las sobretensiones atmosféricas cobran importancia para niveles de tensión de la red < 300 kV. El nivel del aislamiento de los equipos, así como la coordinación de las protecciones, en las redes de distribución, son determinantes para este tipo de sobretensiones.

- El estudio de las sobretensiones de maniobra permite establecer las solicitaciones dieléctricas sobre los equipos instalados en las redes de AT y de EAT con Un > 300 kV.

- Lo anterior tiene su justificación ya que las sobretensiones de maniobra, como consecuencia de los estados de energización y desenergización de las LAT por acción de los interruptores, son la causa de esfuerzos dieléctricos significativos, los cuales provocan deterioro en las aislaciones de los equipos, en especial los transformadores.

- En tal sentido, para niveles de tensión > 300 kV, las sobretensiones de maniobra son determinantes para realizar la coordinación de la aislación.

- La capacidad longitudinal total del bobinado viene dada por las capacidades entre espiras de las bobinas y las capacidades entre secciones de los discos que lo conforman.

- La capacidad transversal total del bobinado viene dada por las capacidades entre las bobinas y el núcleo, cuba.

- El valor del gradiente máximo en el inicio del bobinado para el caso de tener un neutro aislado, es el mismo que para el caso de que el neutro se encuentre conectado al potencial de tierra.

- La Constante de Distribución "α" mide el grado de desviación de la distribución inicial de la tensión con respecto a la distribución final de la misma (lineal – uniforme).

- Las bobinas extremas, correspondientes al terminal de línea del transformador, son las que tienen aplicado el mayor gradiente de tensión y por lo tanto son las que deben tener una alta capacidad de resistir las solicitaciones dieléctricas ante sobretensiones impulsivas.

- Una técnica efectiva para que los bobinados puedan resistir esfuerzos dieléctricos en transformadores de Un < 132 kV es la de reforzar la aislación en las bobinas del terminal de línea. Son las que tienen aplicado el mayor gradiente de tensión, que como ya destacamos es mayor a medida que "α" aumenta.

- Para transformadores con Un ≥ 132 kV, además de reforzar la aislación en las bobinas extremas, se instalan pantallas electroestáticas alrededor de los bobinados del tipo continuo. Estas pantallas conforman anillos aislados abiertos, de forma tal que no configuren una espira en cortocircuito.

- El desarrollo de los bobinados intercalados ha permitido incrementar apreciablemente las capacidades en serie de los mismos, logrando así perfiles de tensión muy uniformes y en consecuencia reducir las solicitaciones dieléctricas en el extremo de línea.

- La configuración intercalada también ha permitido reemplazar las pantallas electroestáticas, mejorando de tal forma el factor de espaciamiento en el transformador y reduciendo, al mismo tiempo, la cantidad de materiales requeridos.

Ingenieria Nova Miron S.A.