NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Ferrorresonancia en Transformadores de Distribución
Parte N° 1

1) Introducción

En el presente artículo, vamos a tratar sobre el importante fenómeno de la ferrorresonancia en los transformadores de distribución, en especial de aquellos que se encuentran instalados en los sistemas de distribución subterráneos de Media Tensión.

Lo anterior tiene su fundamentación, en el sentido de que la capacidad distribuida de los cables subterráneos de distribución, son el componente complementario a la inductancia magnetizante del transformador, en el desarrollo de este fenómeno.

Por lo tanto, la ferrorresonancia se basa en evaluar la interacción de las mencionadas capacidades de los cables con la inductancia magnetizante del transformador (núcleo ferromagnético), determinando de tal forma el estudio de un circuito no lineal y al mismo tiempo con la propiedad de saturar.

Existen varios efectos derivados de la ferrorresonancia, pero el más significativo es el desarrollo de sobretensiones elevadas, las cuales son causa de la afectación de los sistemas de aislación en distintos componentes de la instalación.

En tal sentido, hemos estructurado este trabajo en tres partes, a saber:

Parte N° 1:

- Característica de magnetización de los transformadores
- Breve descripción de la ferrorresonancia.

Parte N° 2:

- Problemas que ocasiona en la instalación de potencia y en los trafos.
- Parámetros de la red y modelado.
- Influencia de los conexionados de los trafos.
- Influencia en la operación de la línea de alimentación.

Parte N° 3:

- Establecer acciones para mitigar los efectos.
- Dinámica de la ferrorresonancia.
- Conclusiones.

En la actual Parte N° 1, trataremos sobre el importante concepto de la magnetización de los núcleos de los transformadores de distribución y la capacidad que poseen de saturar, descripta en la relación que existe entre el campo magnético y la consecuente inducción magnética.

Con este concepto ya expuesto, pasaremos a desarrollar las bases teóricas de la ferrorresonancia, en forma breve y sin entrar en profundidad en los formalismos matemáticos asociados.

Es decir, nuestra exposición será principalmente descriptiva, tratando de exponer los fundamentos más importantes de este proceso electromagnético.

En las Partes N° 2 y N° 3, ahondaremos en los factores que contribuyen al desarrollo de la ferrorresonancia, así como sus efectos en las instalaciones.

También se abordará el conjunto de acciones a adoptar, con el fin de atenuar los citados efectos.

Cerraremos este trabajo con una breve descripción de la dinámica de la ferrorresonancia, tema de sumo interés en el estudio de este proceso electromagnético a través del tiempo, con consecuencias de características caóticas, según sea el estado del sistema.

2) Característica de magnetización de los transformadores

Sabemos que los transformadores poseen núcleos magnéticos, los cuales se caracterizan por tener un bajo valor de reluctancia (ℜ), o bien un alto valor de la permeabilidad magnética (μ), con el fin de contener el flujo en el circuito magnético que conforman los bobinados primario y secundario.

Otra magnitud de importancia es la permeabilidad magnética relativa (μ_r), la cual establece la siguiente relación entre la permeabilidad magnética y la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_r = 4\pi x10^{-7}$ H/m):

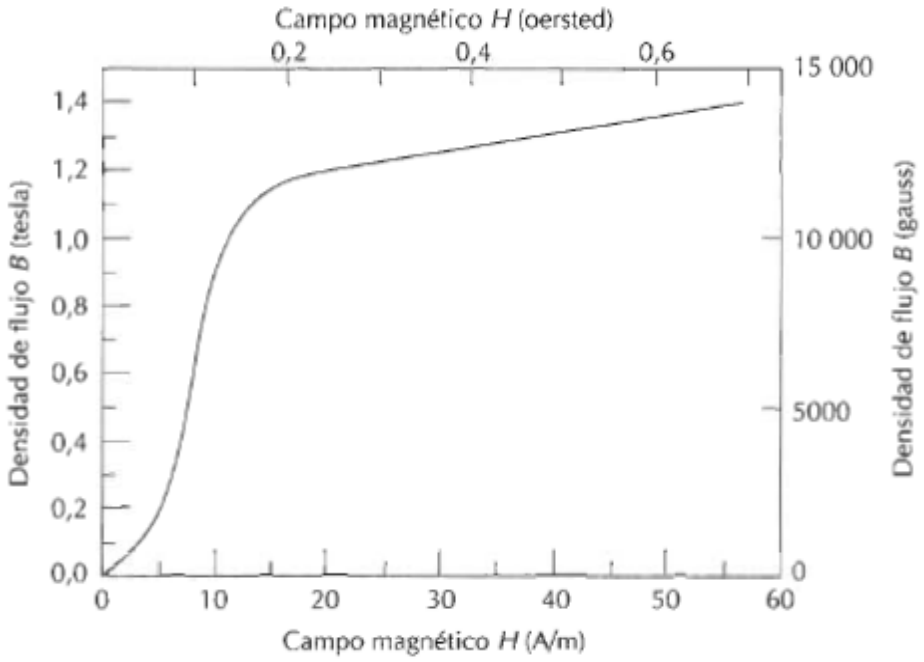
$$\mu = \mu_r \times \mu_0$$

La permeabilidad, o bien la permeabilidad relativa (adimensional), son parámetros que miden la capacidad de un cierto material para ser magnetizado, es decir, la capacidad de inducir un campo B en el material, a partir de un campo magnético externo.

La relación entre el campo magnético (H) y la inducción magnética (B), es la siguiente:

$$\mathrm{B} = \mu \times \mathrm{H}$$

La característica de magnetización de un material es la curva que relaciona ambas magnitudes físicas, siendo, para un material ferromagnético, una relación del tipo no lineal, tal cual se observa en la siguiente figura.



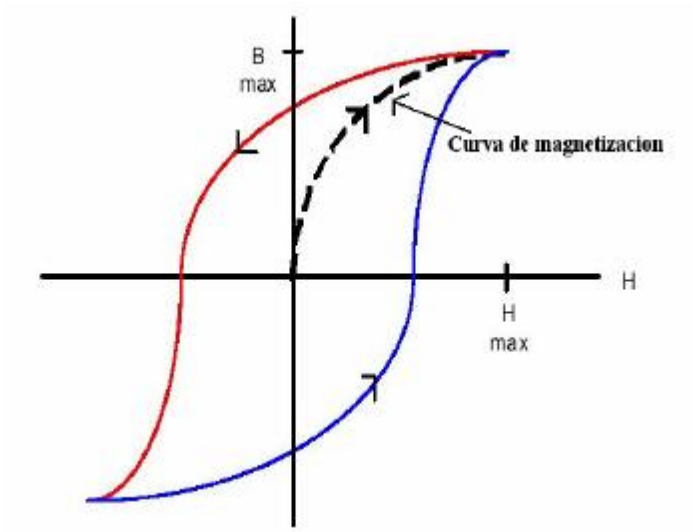
La anterior, corresponde a un material ferromagnético de aleación Fe-Si, comúnmente utilizado en la conformación de los núcleos magnéticos de los transformadores.

A modo de comparación, podemos establecer que para un material Fe-Si de grano orientado, de aleación 97 %- 3%, la μ_r puede adquirir valores de 1500 a 2000.

En relación con el fenómeno de la ferrorresonancia, es importante tener en cuenta el comportamiento magnético del material, atendiendo al proceso de histéresis.

Lo anterior refiere a que la curva B-H del material ferromagnético describe un lazo, como consecuencia de una etapa de saturación y de magnetismo remanente.

En la siguiente figura se observa la trayectoria que sigue la magnetización, en un ciclo de aplicación del campo magnético H y la consecuente inducción magnética B.

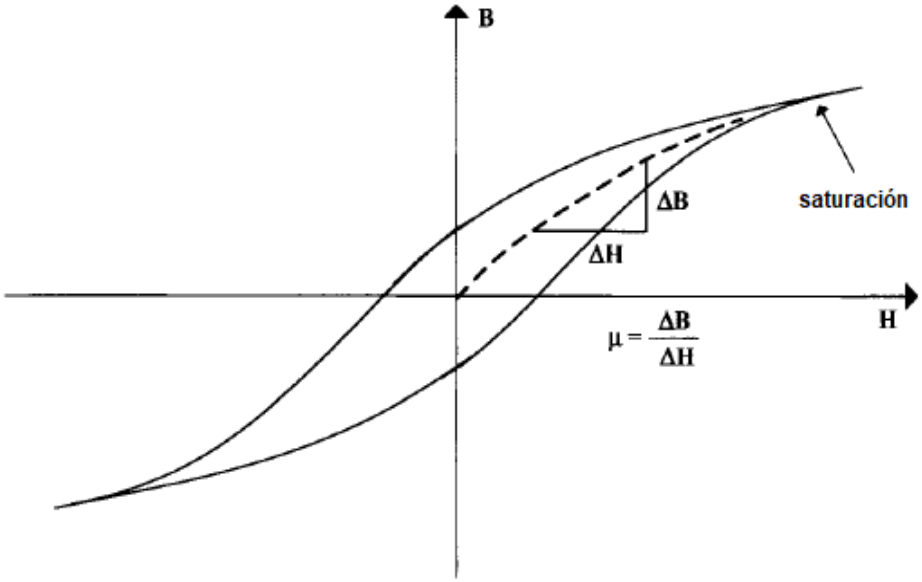


Claramente se destaca una primera etapa de relación casi lineal entre H y B (con pendiente pronunciada), para luego alcanzar una segunda de saturación, con una pendiente reducida. Es decir, ante un aumento proporcional del campo magnético H, la inducción B crecerá levemente.

Al alcanzar el campo máximo H_{max}, y proceder a su disminución (reducción de la corriente aplicada), la inducción también disminuirá su valor, pero con la particularidad que, al alcanzar al valor nulo del campo H, la misma poseerá un valor remanente, asociado a los dipolos magnéticos que aún quedarán magnetizados en el interior del material.

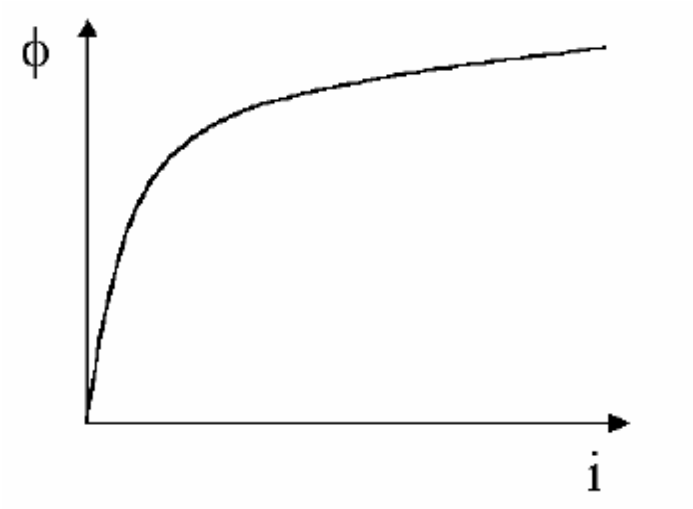
Este proceso de magnetización, característico de los materiales ferromagnéticos, es el que determina el comportamiento no lineal de los mismos, asociándolo a la variación punto a punto de la permeabilidad magnética μ.

A continuación podemos observar, en forma gráfica, la relación de μ con H y B.



Este hecho es el factor clave para entender el proceso de ferrorresonancia, ya que la reactancia magnetizante del transformador dependerá del valor que adquiera la permeabilidad magnética, en el punto de operación de la máquina.

Teniendo en cuenta que el campo magnético (H) es proporcional a la corriente aplicada al circuito (H ~ I) y que la inducción magnética se encuentra en relación lineal con el flujo magnético que se desarrolla en el material (B ~ ϕ), entonces la característica de magnetización también es equivalente a representarla como la relación entre I y ϕ, tal cual se observa en la siguiente figura.



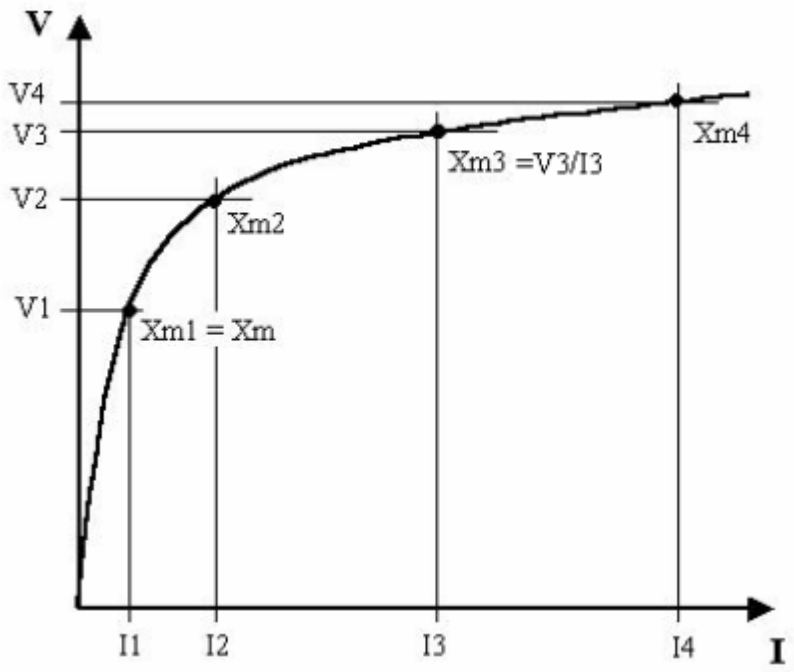
La inductancia de magnetización del transformador, vendrá dada por la relación:

$$\mathrm{Lm} = \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{di}}$$

La cual representa la pendiente a la curva en el punto en cuestión, que, como ya comentamos, no será constante, sino que tendrá una variación punto a punto de la característica. Se observa que este parámetro posee una variación lineal en el primer tramo de la característica, para luego disminuir con el aumento de la corriente.

Debido a que el flujo magnético se encuentra relacionado en forma proporcional a la tensión, a través de la Ley de Faraday ($\mathrm{e} = \mathrm{N}\,\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{dt}}$), también se puede representar la característica de magnetización con la curva V-I.

En la siguiente figura se observa dicha característica, además de especificar, en cada punto de operación, el valor que adquiere la reactancia magnetizante del transformador $\left(\mathrm{Xm} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{I}}\right)$.



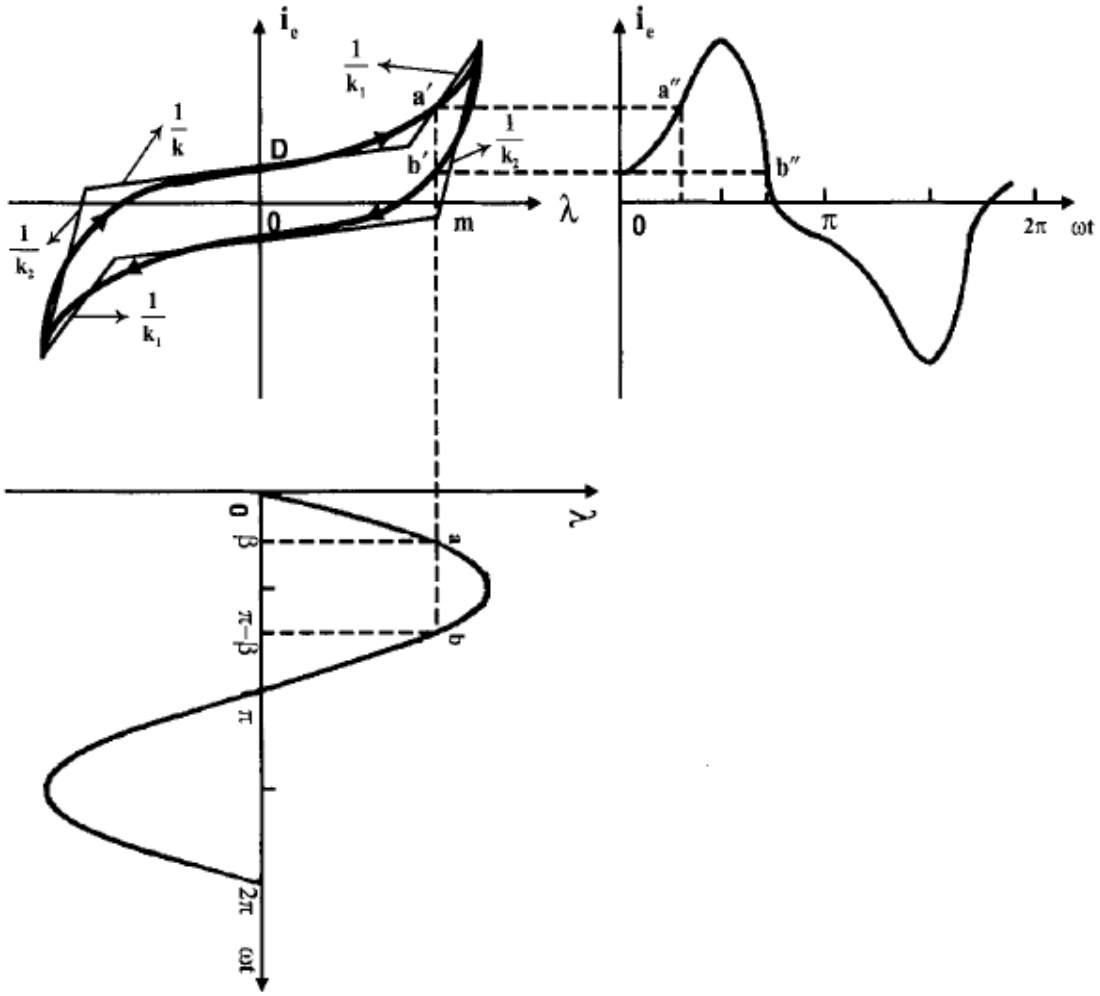
Se destaca que el valor de la reactancia magnetizante se aproxima, en este caso, por la pendiente en el punto de operación, en vez de considerar la tangente en dicho punto de la curva. A los efectos prácticos, esta aproximación se considera válida.

También será conveniente detallar la característica de la corriente magnetizante o de excitación (I = Ie), la cual será necesaria para producir el campo magnético H en el núcleo del transformador.

La no linealidad de la característica de magnetización, así como la histéresis propia del núcleo, hacen que esta corriente posea una forma no senoidal (poliarmónica), asimétrica y con un desfase en adelanto respecto al flujo magnético.

En la siguiente figura se detalla el método gráfico-analítico, para obtener la característica de la corriente de excitación, en función del flujo concatenado en el bobinado de excitación ($\lambda = N \times \phi$) y la correspondiente curva de magnetización-histéresis.

Los parámetros k, k1 y k2, refieren a coeficientes analíticos de linealización, asociados a la curva de magnetización-histéresis.



Se puede observar la forma no senoidal y asimétrica de la corriente magnetizante (excitación), así como el desfase en adelanto, respecto a la onda del flujo concatenado en el bobinado primario de excitación del transformador.

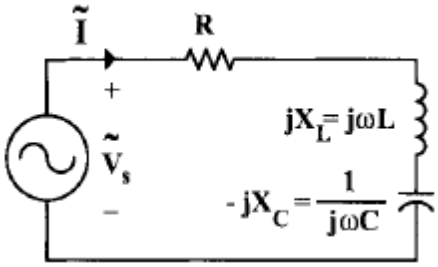
3) Breve descripción de la ferrorresonancia

Será oportuno, antes de describir el proceso de ferrorresonancia, hacer una introducción al proceso, más sencillo, de la resonancia lineal.

Para esto consideremos el siguiente circuito lineal RLC, en donde:

V_S = fuente de alimentación.

R = resistencia total del circuito.
X_L = reactancia inductiva total de los componentes del circuito.
X_C = reactancia capacitiva total de los componentes del circuito.



El módulo de la corriente que circulará en el circuito será:

$$I = \frac{V_S}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Para la condición en que $X_L = X_C$, se dice que el circuito entra en un estado de resonancia, provocando que la corriente que circula sea máxima, limitada solamente por la resistencia R ($I = V_S/R$).

Teniendo en cuenta que el valor de R es mucho menor a los correspondientes de las reactancias, tanto inductiva como capacitiva, se deduce que la corriente que circulará en un estado de resonancia será muy elevada.

La consecuencia de lo anterior será la existencia de sobretensiones en los componentes inductivos ($V_L = X_L$ x I) y capacitivos ($V_C = X_C$ x I), con resultados de características perjudiciales en la instalación.

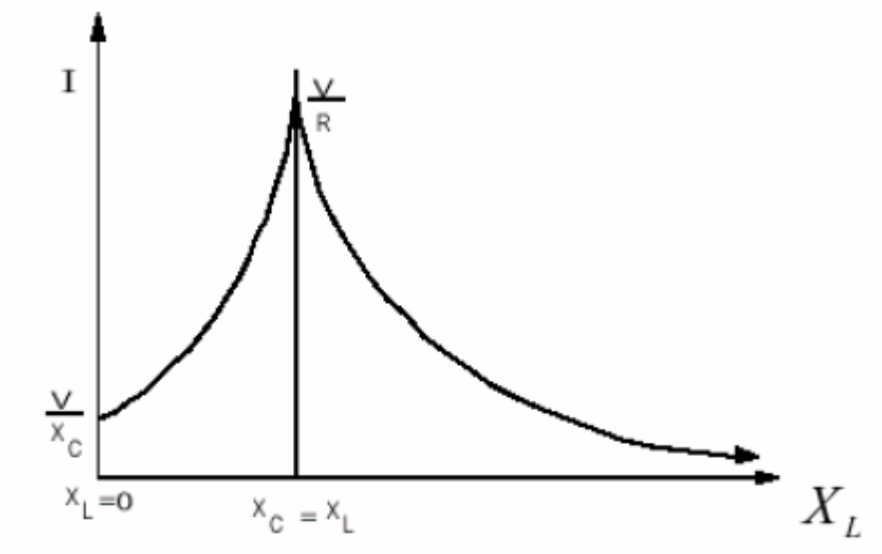
Como nuestro interés se basa en estudiar la variación de la corriente en función de X_L (debido a la variación de la reactancia magnetizante de los transformadores), con una X_C manteniendo un valor prácticamente constante a través del tiempo, vamos a analizar esta característica.

Al tener la resistencia R un valor mucho menor, comparado con los componentes reactivos, se puede asumir que la corriente toma un valor, cuando XL = 0, de V/X_C. Cuando X_L toma valores muy grandes, la corriente se reduce prácticamente a un valor nulo.

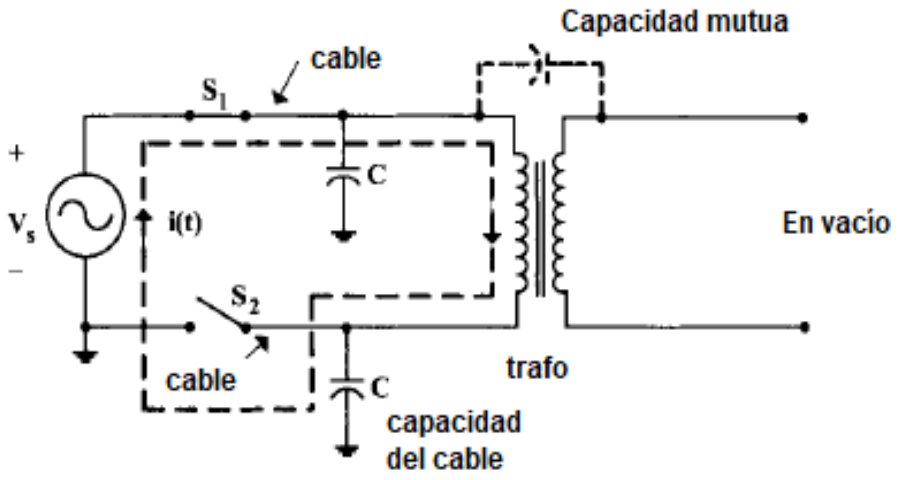
El punto singular y que es motivo de nuestro trabajo, ocurre cuando el valor de X_L se iguala al de X_C, determinando así el estado de resonancia en el circuito o instalación.

En este caso ($X_L = X_C$), la corriente adquiere un valor muy elevado, dado por la relación V/R, con las consecuencias de sobretensión ya comentadas.

A continuación, podemos observar la característica de la corriente, en función de X_L.



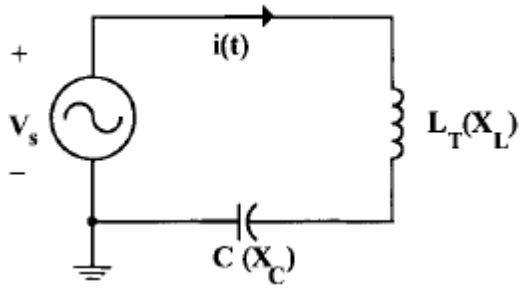
Si ahora consideramos una instalación conformada por un transformador monofásico, conectado a una red a través de cables de distribución subterráneos y en condición de operación en vacío, tendremos:



Para el análisis, podemos despreciar la capacidad mutua, entre los bobinados del primario y secundario del transformador, es decir, solamente tendremos en cuenta las capacidades distribuidas a tierra de los cables de conexión de la red.

Asumiendo que el interruptor S_2 se encuentre abierto, con S_1 cerrado, se observa que, aún en un estado de vacío, circulará una corriente magnetizante, debido a que el circuito se cerrará a través de la capacidad C del cable. Es decir, el transformador se encontrará energizado.

Bajo estas condiciones, el circuito equivalente será:



Se destaca que se ha despreciado la resistencia de los cables y del transformador, en comparación con los valores de las reactancias inductivas y capacitivas. También se aprecia que los valores de ambas componentes reactivas poseen características variables.

Si bien las capacidades son susceptibles de variar en el tiempo, debido a las operaciones de maniobras en la red (banco de capacitores y topología de los cables), podemos considerar constante este parámetro, para nuestro estudio.

Sin embargo, el parámetro que se encontrará más afectado por las variaciones en el tiempo será la X_L, que, como ya vimos, está asociado a la reactancia magnetizante del transformador, de comportamiento no lineal y variable.

Por lo tanto, la conclusión que obtenemos de esta primera aproximación al estudio de un transformador en vacío, interactuando con la red, es que, cuando se produzca en algún instante de tiempo la condición $X_L = X_C$, la instalación entrará en un estado de resonancia, provocando que la corriente adquiera un valor muy elevado (limitado solamente por las componentes resistivas, no indicadas en el circuito).

Además, como ya comentamos previamente, este estado será la causa de la generación de sobretensiones elevadas sobre los componentes de la instalación, en especial sobre los bobinados del transformador.

A este estado se lo designa de Ferrorresonancia.

Sobre la base de estos principios, trataremos, en la Parte N° 2 de este artículo, abordar los problemas que se derivan en la instalación, como consecuencia de las sobretensiones generadas, así como los factores que influyen en el establecimiento del estado de ferrorresonancia.

En este último caso, cobra importancia fundamental los distintos tipos de conexionados que pueden establecerse en un transformador trifásico de distribución.

Ing. Ernesto Zelaya.
Ing. Francis Barboza.
Junio de 2019.