NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Ferrorresonancia en Transformadores de Distribución
Parte N° 3

1) Introducción

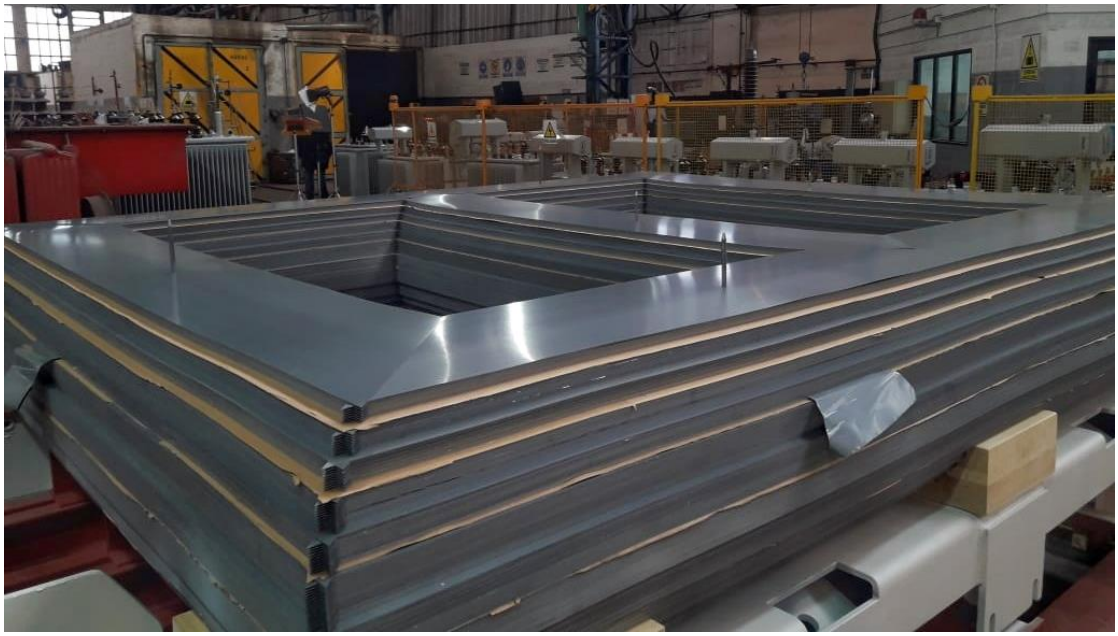
A continuación, vamos a desarrollar la última parte (N° 3) del artículo de Ferrorresonancia en Transformadores de Distribución.

Como ya habíamos adelantado, los temas a tratar refieren a las acciones preventivas a adoptar para conseguir una eliminación, o bien reducción, de los efectos derivados del proceso de ferrorresonancia (sobretensiones).

De igual forma, vamos describir, de forma conceptual, el importante ítem de la Dinámica de la Ferrorresonancia, el cual permite estudiar este proceso a lo largo del tiempo.

A tal fin, trataremos, en esta última parte, los siguientes temas:

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



2) Establecer acciones para mitigar los efectos

Habiendo ya explicado los eventos que pueden presentarse en la instalación (ítems 4 y 5 de la Parte N° 2) y que son factores principales en el desarrollo del fenómeno de

ferrorresonancia, a continuación vamos a describir las distintas acciones que se pueden adoptar, con el fin de eliminar, o bien reducir, los efectos nocivos.

En esencia, los eventuales métodos a adoptar, se basan en conseguir los siguientes objetivos:

2.1) Evitar que se formen circuitos inductivos-capacitivos no lineales en la instalación. Este ítem quedará mejor explicado en el tema de la Dinámica de la Ferrorresonancia.

2.2) Evitar que la relación Xc y Xm sea tal que favorezca la probabilidad del desarrollo del proceso de ferrorresonancia. Ver el ítem 5 de la Parte N° 2.

2.3) Incorporar módulos resistivos en la instalación MT, de forma tal de reducir las sobretensiones generadas por el estado de ferrorresonancia.

Por lo tanto y en base a los eventos descriptos en la Parte N° 2, podemos detallar las siguientes acciones preventivas:

a) <u>Limitación de la capacidad del cable de MT</u>

En este caso lo que se busca es reducir el valor absoluto de la capacidad eléctrica del cable y por lo tanto aumentar la reactancia capacitiva.
Sabemos (ver ítem N° 5 de la Parte 2) que la relación Xc/Xm es determinante en la probabilidad de establecimiento de un proceso de ferrorresonancia en un trafo.
Según ya hemos visto, logrando que Xc >> Xm, se tendrá una disminución en la citada probabilidad de ocurrencia del fenómeno.
Lo anterior se logra limitando la longitud efectiva del cable en el trazado de la instalación de MT.
Vale aclarar que este método no es práctico, en la medida de que la distribución de la instalación ya se encuentre prefijada de antemano.

b) <u>Limitación de la longitud del cable de MT</u>

Se trata de obtener la longitud crítica del cable de alimentación de MT, de forma tal de lograr que la reactancia capacitiva sea mucho mayor que la reactancia magnetizante.
Lo anterior se basa en establecer el valor de la tensión, con la línea bajo estudio en condición de abierta, en función de la relación Xc/Xm.
Operando, se podrá calcular la longitud mínima o crítica del cable, a partir de la cual la instalación tendrá una alta probabilidad de entrar en un estado de ferrorresonancia.

c) Uso de cables de MT con baja capacidad

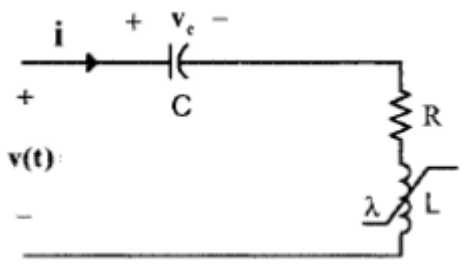
De la mano de lo anterior, otra acción será la de utilizar en la instalación, cables de MT con baja capacidad específica.

d) Limitación de la inductancia magnetizante

Este parámetro no puede variarse, ya que es una característica intrínseca de diseño y constructiva del transformador.
Por lo tanto, no se considera práctico la modificación del valor de la inductancia magnetizante (o reactancia magnetizante) para reducir los efectos de la ferrorresonancia.
Un detalle a tener en cuenta en el diseño del transformador es que éste posea una mayor capacidad de sobreexcitación, de forma tal de que opere en un mayor rango lineal de la característica de magnetización.

e) Inserción de módulos resistivos

En estado de ferrorresonancia (Xc = Xm), la corriente quedará limitada solamente por los componentes resistivos de la instalación, tal cual se observa en la siguiente figura.



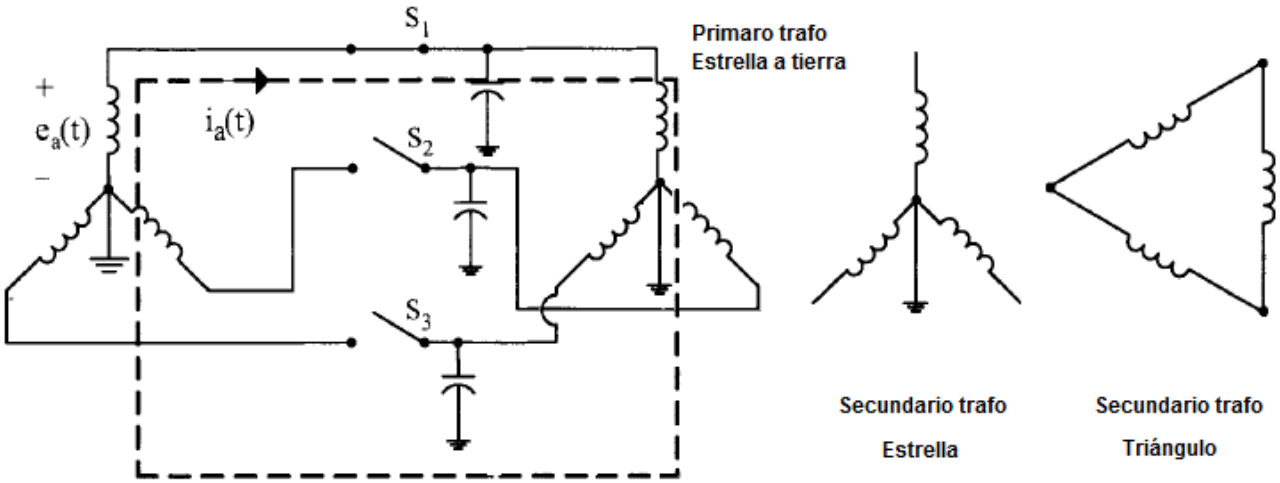
En esta situación, la corriente máxima será: I_{max} = V/R.
Este valor de corriente, junto a los correspondientes a las reactancias capacitiva y magnetizante, determinarán los niveles de sobretensión sobre cada componente.
A los efectos de limitar estos niveles, pueden insertarse módulos resistivos en la instalación, de forma tal de reducir el valor de I_{max} y por lo tanto de las sobretensiones asociadas.

f) Dispositivos de maniobra de acción rápida

Se recurre al uso de equipos de maniobra trifásicos de acción rápida, de forma tal de evitar que una o dos fases queden solamente conectadas en la instalación.
Este método es muy efectivo, pero encarece la instalación.

g) Conexionado de los transformadores

Teniendo en cuenta lo ya visto en ítem 4 de la Parte 2, los conexionados de los trafos trifásicos son determinantes en favorecer, o no, la ocurrencia del proceso de ferrorresonancia.
Un aspecto importante a considerar es que cuando el lado de MT esté conectado en estrella con el neutro a tierra, la ferrorresonancia no podrá ocurrir.
Lo anterior se justifica, ya que el neutro del trafo puesto a tierra, conforma un circuito que cierra las eventuales corrientes que circulen por las reactancias magnetizantes, evitando así que las capacidades de los cables queden integradas al circuito.
De esta forma se evita la conformación de un circuito serie L-C con probabilidad de entrar en resonancia.
En la siguiente figura se destaca el caso de un conexionado con el primario en estrella con el neutro a tierra y dos líneas abiertas (solamente conectada la correspondiente a la fase "a").



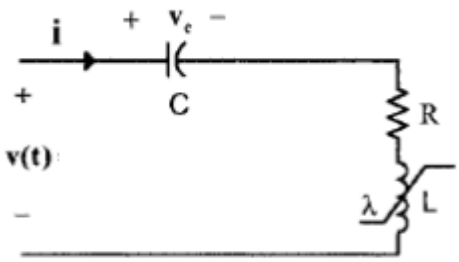
De igual forma podemos tener un esquema en donde quedan fuera de la configuración circuital las capacidades de los cables, para el caso de tener una sola línea abierta.

3) Dinámica de la ferrorresonancia

Teniendo en cuenta las propiedades no lineales y de histéresis del núcleo magnético, el fenómeno de la ferrorresonancia resulta muy complejo de analizar y de predecir el estado temporal.

Este hecho tiene su causa principal en un eventual estado de comportamiento caótico del sistema.

Adoptando el modelo simplificado del ítem 3 de la Parte N° 2, en donde se despreciaba la componente resistiva Rp (pérdidas en el núcleo magnético), se tiene:



En donde L = Lm, R = R2 y C = capacidad del cable de alimentación.

La tensión de alimentación al transformador es senoidal pura.

Como ya habíamos comentado, para obtener una solución más precisa, la componente resistiva Rp deberá tenerse en cuenta en el modelo.

También habíamos asumido que la corriente circulante podía representarse a través de una función cúbica del flujo concatenado por los bobinados del transformador. En tal sentido: $i(t) = k\,\lambda(t)^3$.

Las ecuaciones diferenciales que describen el proceso de la ferrorresonancia, se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dfrac{d\lambda(t)}{dt} = v(t) - vc(t) - R\,i(t) \\[2ex] \dfrac{dvc(t)}{dt} = \dfrac{i(t)}{C} \end{cases}$$

Obteniendo:

$$\begin{cases} \dfrac{d\lambda(t)}{dt} = V_{max}\,\mathrm{sen}(\omega t) - vc(t) - R\,k\,\lambda(t)^3 \\ \dfrac{dvc(t)}{dt} = \dfrac{k\,\lambda(t)^3}{C} \end{cases}$$

Este sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden puede simplificarse en una ecuación de segundo orden, quedando, luego de operar:

$$\frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + 3\,k\,R\,\lambda(t)^2\frac{d\lambda(t)}{dt} + \frac{k}{C}\,\lambda(t)^3 = \omega\,V_{max}\cos(\omega t)$$

La característica principal de esta ecuación es que representa un sistema no lineal, susceptible de entrar en una condición de comportamiento caótico en el tiempo.

Al mismo tiempo, la resolución analítica de esta ecuación es muy compleja, por no decir imposible, por lo que se deberá recurrir a métodos numéricos.

La resolución de la misma, entra en el campo de la Teoría Dinámica No Lineal de Sistemas y Teoría del Caos.

Sin entrar en los detalles inherentes a ambas teorías, solamente vamos a efectuar una descripción conceptual de este fenómeno electromagnético.

Por su naturaleza no lineal, la ferrorresonancia es muy sensible a los valores que posean los parámetros que describen la ecuación (C, R y k), así como de las condiciones iniciales que se adopten para efectuar el análisis de este proceso.

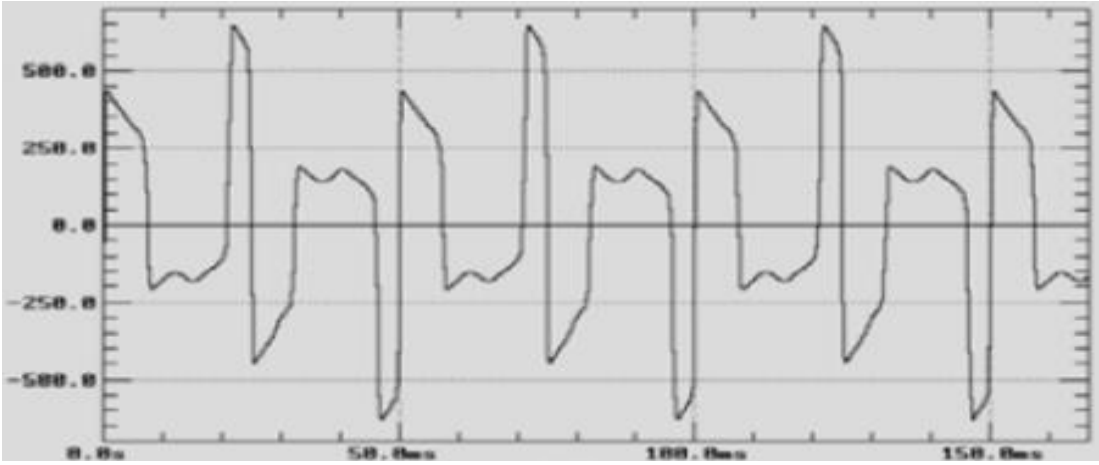
En tal sentido, las respuestas temporales (del flujo "λ", la corriente "i" y las tensiones (sobretensiones) en L y C) pueden ser del tipo periódico (estable) o bien caótico, es decir, sin capacidad de poder predecir los distintos estados del sistema a través del tiempo.

Lo interesante es que es posible la transición de un estado estable a otro caótico, en forma espontánea, dependiendo, como ya comentamos, de los valores que adquieran los parámetros y eventuales perturbaciones que se presenten en la instalación.

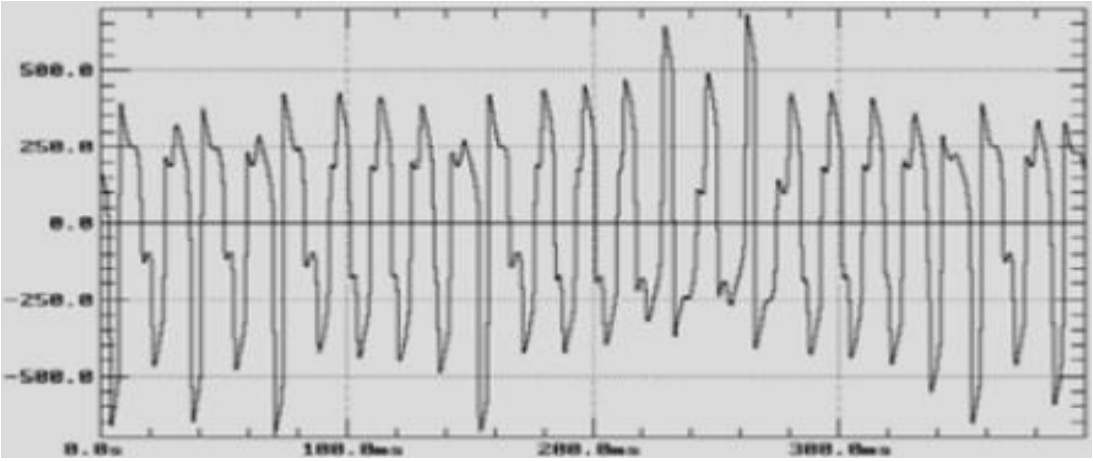
Lo anterior refiere a que resulta casi imposible determinar una respuesta temporal única y reversible en el proceso de ferrorresonancia, en el caso de que la misma entre en un estado caótico.

Como ejemplo, podemos observar las ondas de tensión que se presentan en una fase abierta, mientras las otras dos fases se encuentran conectadas al transformador.

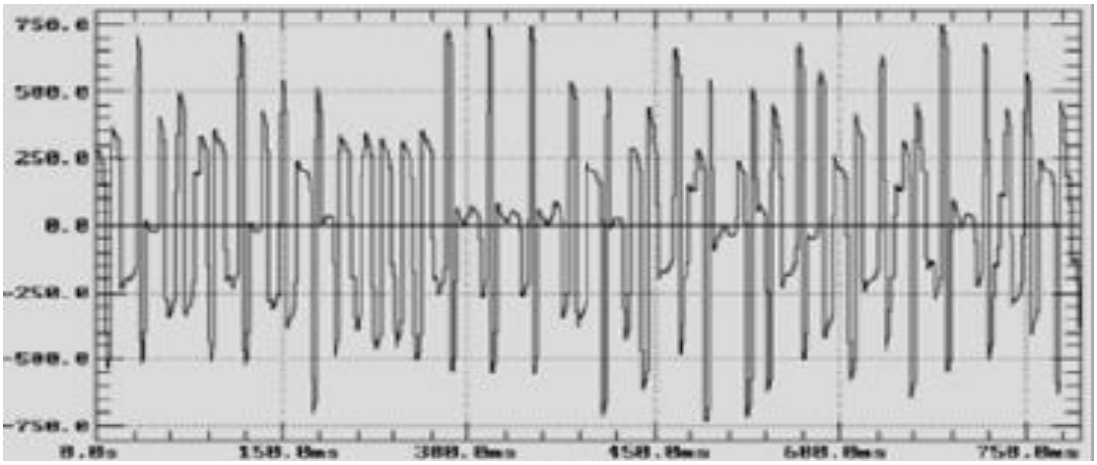
En la siguiente figura se observa la onda de tensión, para el caso de un dado valor de la capacidad C. Se destaca una característica periódica estable en el tiempo.



Si la capacidad posee un valor de 1,7 veces C, se establece un estado de transición desde el comportamiento estable al caótico. Se destaca en la siguiente figura.



Si ahora la capacidad tiene un valor de 3 veces C, el sistema ferrorresonante entra en un estado caótico, como se observa en la siguiente figura.



En conclusión, debido a la naturaleza caótica de la ferrorresonancia, el estudio de su comportamiento en el tiempo es muy complejo y sin capacidad de poder predecir los eventuales estados temporales.

Lo anterior refiere a que resultará imposible conocer los valores temporales de las sobretensiones, ya que los mismos dependerán de factores muy sensibles al sistema, como ya hemos destacado.

4) Conclusiones

- El fenómeno de ferrorresonancia puede generar sobretensiones, en los componentes de la instalación, del orden de 2,5 a 3 veces el valor de la tensión nominal de fase de la red. Este hecho será causa principal de degradación de la aislación de los componentes.
- Las sobretensiones también son causa de la activación de los descargadores de protección, circulando por éstos una corriente elevada que eventualmente puede provocar la falla de los mismos.
- La ferrorresonancia tiene una alta probabilidad de ocurrencia, si un banco de transformadores es alimentado por cables unipolares de MT apantallados, se presenta el estado de una o dos líneas abiertas, o bien el conexionado del primario del trafo no se encuentra a tierra.
- El estado de ferrorresonancia en los sistemas de distribución en MT provoca la deformación de las ondas de tensión y de corriente, así como la generación de contaminación acústica y solicitación dieléctrica adicional en los cables de alimentación.
- De igual forma, es causante de sobrecalentamiento del transformador y de operación en la zona de saturación del núcleo magnético.
- Como medida principal para atenuar el efecto de la ferrorresonancia es el de evitar que se conformen circuitos L-C en serie, a lo largo de la instalación en

que se encuentra operando el transformador de distribución, según ya hemos visto en el ítem 2.

- El proceso electromagnético de la ferrorresonancia es muy complejo de analizar, debido a la naturaleza no lineal del mismo. Se destaca la eventual entrada en un estado caótico, resultando en tal caso imposible la predicción de los estados temporales del sistema.

Ing. Ernesto Zelaya.
Ing. Francis Barboza.
Octubre 2019