NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Ferrorresonancia en Transformadores de Distribución
Parte N° 2

1) Introducción

Siguiendo con lo ya detallado en la Parte N° 1 del artículo, procederemos a describir, en esta Parte N° 2, las causas y efectos de la ferrorresonancia en las instalaciones de MT que poseen transformadores de distribución.

Como ya adelantamos en la primer parte, se pueden distinguir distintos efectos, asociados a este fenómeno electromagnético, pero el más importante es el desarrollo de sobretensiones elevadas. Éstas, a su vez, son la causa del desarrollo de problemas en los sistemas de aislación en los equipos de la instalación.

En esta segunda parte vamos a describir los siguientes ítems:

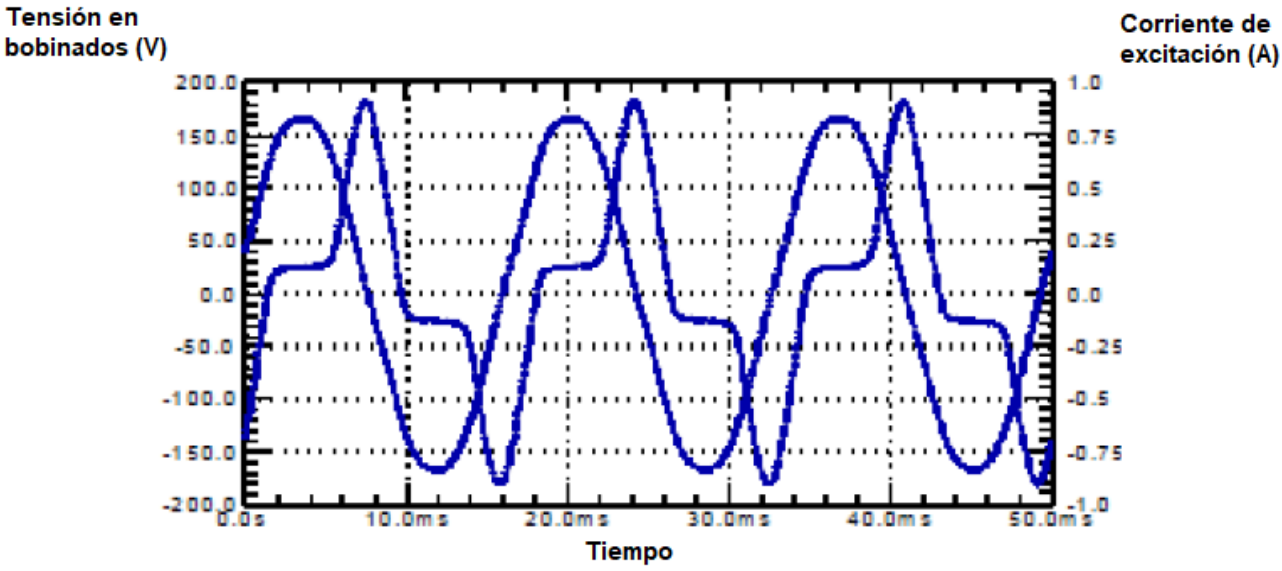
-Problemas que ocasiona en la instalación de potencia y en los trafos.
-Parámetros de la red y modelado.
-Influencia de los conexionados de los trafos.
-Influencia en la operación de la línea de alimentación.

2) Problemas que ocasiona en la instalación de potencia y en los trafos

Teniendo en cuenta lo ya visto en la Parte N° 1 del presente trabajo, podemos resumir, a continuación, los distintos tipos de problemas que ocasiona la ferrorresonancia, principalmente el desarrollo de sobretensiones.

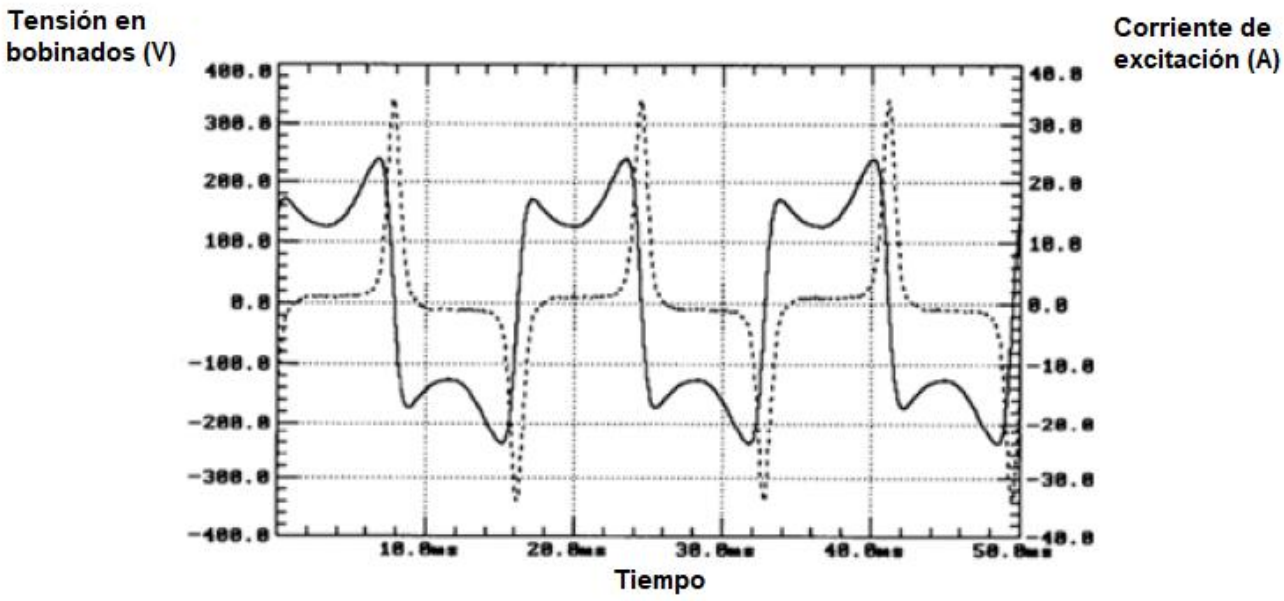
a) Contaminación armónica

Durante el desarrollo del proceso de ferrorresonancia, el punto de operación del núcleo magnético del trafo corresponde a la zona de saturación.
Lo anterior lleva a que la forma de la corriente se distorsione (ver Parte N° 1, ítem N° 2 "Característica de magnetización de los transformadores") y por lo tanto se incremente el contenido armónico de la onda.
De igual forma, la onda de tensión también se verá afectada por la consecuente contaminación armónica.
En la siguiente figura se observan las ondas de tensión y de corriente en un transformador en vacío, sin presentar un estado de ferrorresonancia.
Se destaca el contenido poliarmónico de la corriente de excitación (componentes impares), mientras que la onda de tensión mantiene su forma senoidal.
Un hecho a considerar es que el máximo de la onda de corriente es aproximadamente del orden del 7% de la corriente nominal, representando un valor relativamente bajo.



Para el caso de presentarse un estado de ferrorresonancia (incorporación de una reactancia capacitiva en serie con la reactancia magnetizante), se destaca, en la

siguiente figura, una distorsión mayor en la onda de corriente, así como en la de tensión.
En este caso el pico de la onda de corriente de excitación es del orden de 2,5 veces del correspondiente al valor nominal.



b) <u>Sobrecalentamiento del núcleo</u>

Al momento de establecerse una sobretensión en el arrollamiento del trafo, se tendrá un estado de saturación en el núcleo magnético, debido al aumento de la densidad del flujo.
Lo anterior llevará a un incremento consecuente de la corriente de excitación, ya que la permeabilidad magnética efectiva del núcleo disminuirá.
Además, se incrementarán las corrientes de Foucault, como consecuencia de la existencia de un campo eléctrico inducido por el aumento del flujo magnético.
La magnitud del campo eléctrico inducido se verá también aumentada por el contenido armónico de la tensión en el arrollamiento del trafo, al momento de la ferrorresonancia (ítem a).
La suma de todas estas causas será el aumento de las pérdidas en el núcleo magnético.

c) <u>Incremento de las pérdidas en los cables</u>

Como consecuencia de la distorsión armónica en la onda de corriente, que trae aparejada la ferrorresonancia (ítem a), se tendrá un aumento de las pérdidas por efecto Joule, en los cables de alimentación.
Lo anterior se relaciona con el efecto pelicular, dependiendo de las componentes de frecuencia que posea la onda de corriente resultante.

d) Incremento del campo eléctrico en las acometidas de los cables

Los cables de potencia de MT se verán muy afectados por el desarrollo de la ferrorresonancia, debido al incremento del campo eléctrico en el interior de los mismos (se manifiesta entre el conductor, el aislamiento principal y la pantalla metálica que se encuentra puesta a tierra).
La densidad del campo eléctrico será mayor en los extremos o acometidas de los cables, ya que éstas determinan una zona de menor permitividad dieléctrica, dada por el aire que la circunda. Si bien se recurre al recubrimiento con materiales que poseen una permitividad dieléctrica similar al del aislamiento principal, este efecto será preponderante ante un estado de sobretensión anómalo.
La acción persistente de la ferrorresonancia, así como el incremento del campo eléctrico en las acometidas, será la causa de la degradación prematura de la aislación de los cables de MT y su eventual falla.

e) Fallas en los descargadores de sobretensión

Se relaciona con la alta densidad de energía que los descargadores deberán disipar a tierra, al momento de generarse una sobretensión por ferrorresonancia.
La alta corriente, que circulará por los mismos, será un factor principal en la degradación y consecuente falla de estos dispositivos de protección.

f) Calentamiento de componentes metálicos

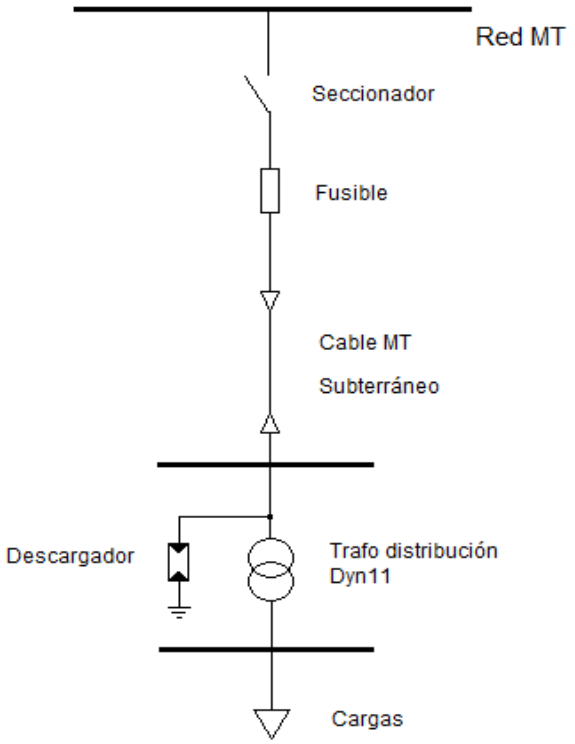
Debido al aumento de la densidad del flujo, en el estado de ferrorresonancia, éste tenderá a cerrarse sobre componentes metálicos que conforman la estructura del trafo.
Lo anterior determina la creación de circuitos magnéticos no deseados, cuyo efecto directo es el calentamiento de las partes metálicas involucradas.
Este calentamiento adicional e interno del trafo, es una eventual causa del incremento en la degradación de los componentes aislantes (proceso de ferrorresonancia persistente en el tiempo).

g) Contaminación acústica

Al momento de la ferrorresonancia y el desarrollo consecuente de sobretensiones en los bobinados del transformador, sobre el núcleo se tendrá una alta densidad de flujo magnético.
En tal sentido, este incremento en la densidad del flujo será la causa de un aumento del ruido, asociado al proceso de magneto-estricción (variación dimensional cíclica de las chapas magnéticas, por la acción del flujo variable en el núcleo).
El nivel de la densidad del flujo en el interior del trafo será el que determine el grado de la vibración consecuente con la magneto-estricción y por lo tanto del ruido generado por este proceso.

3) Parámetros de la red y modelado

El sistema a evaluar es el siguiente:



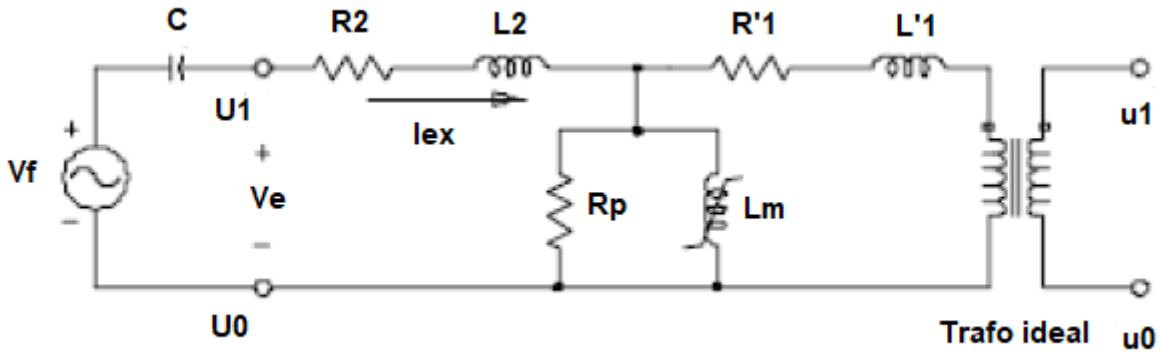
Con el fin de establecer el circuito equivalente de este sistema, en primer lugar vamos a considerar al cable subterráneo de MT como una reactancia capacitiva.

En tal sentido, se procede a despreciar tanto la componente resistiva como inductiva del cable, debido a que las mismas no son significativas, en comparación con la capacidad del mismo. Este último hecho debe su razón a que la longitud del cable se asume como corta.

Es importante destacar que la capacidad del cable se establece entre el conductor que lo conforma y la pantalla equipotencial metálica que lo envuelve, la cual se encuentra conectada al potencial de tierra.

Teniendo en cuenta la configuración circuital indicada en la Parte N° 1, ítem N° 3 “Breve descripción de la ferrorresonancia”, a continuación se muestra el circuito equivalente del sistema de distribución, en donde el transformador en vacío, se representa por las componentes resistivas de los bobinados y las inductancias de dispersión, tanto del primario como del secundario referidas.

Se destaca que con el subíndice 2 se alude al lado de MT y con el subíndice 1 al de BT.



La componente resistiva Rp se asocia con las pérdidas en el núcleo magnético (por corrientes de Foucault y por histéresis) y Lm es la inductancia magnetizante, de característica no lineal y variable en el tiempo, como ya hemos visto en la Parte N° 1.

Con el fin de establecer un modelo sencillo de análisis, podemos realizar un conjunto de simplificaciones, a estos fines.

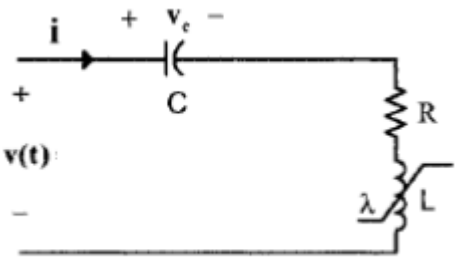
Por ejemplo, podemos descartar del modelo las componentes del lado BT, ya que al estar el trafo en vacío, no circulará corriente.

A continuación, se puede despreciar la inductancia de dispersión L2, por poseer un valor reducido en comparación con la inductancia magnetizante.

Por último, la resistencia Rp también puede no considerarse en el modelo. Pero con la salvedad que esta decisión, de primera instancia, no llevará a una solución precisa del fenómeno de la ferrorresonancia.

Para una solución analítica más precisa, esta componente deberá incorporarse en el modelo, pero a nuestros fines bastará con no tenerla en cuenta y así obtener un sistema más sencillo.

Por lo tanto, el circuito equivalente quedará representado de la siguiente forma:



En donde L = Lm y R = R2.

Se considera que la tensión de alimentación es senoidal pura.

El flujo concatenado por los bobinados del transformador será una función de la corriente, según se establece en la característica de magnetización del núcleo (ver Parte N° 1, ítem 2 "Característica de magnetización de los transformadores").

Para la misma se puede asumir una relación cúbica dada por: $i(t) = k\,\lambda(t)^3$.

Teniendo en cuenta que el análisis será planteado sobre un modelo basado en el dominio del tiempo, podemos establecer, a continuación, el sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el proceso de la ferrorresonancia.

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

Obteniendo:

$$\begin{cases} \dfrac{d\lambda(t)}{dt} = V_{max}\,sen(\omega t) - vc(t) - R\,k\,\lambda(t)^3 \\[2ex] \dfrac{dvc(t)}{dt} = \dfrac{k\,\lambda(t)^3}{C} \end{cases}$$

A partir de este sistema vamos a analizar, en la Parte N° 3, el comportamiento dinámico de la ferrorresonancia, así como los efectos resultantes sobre la instalación.

4) Influencia de los conexionados de los trafos

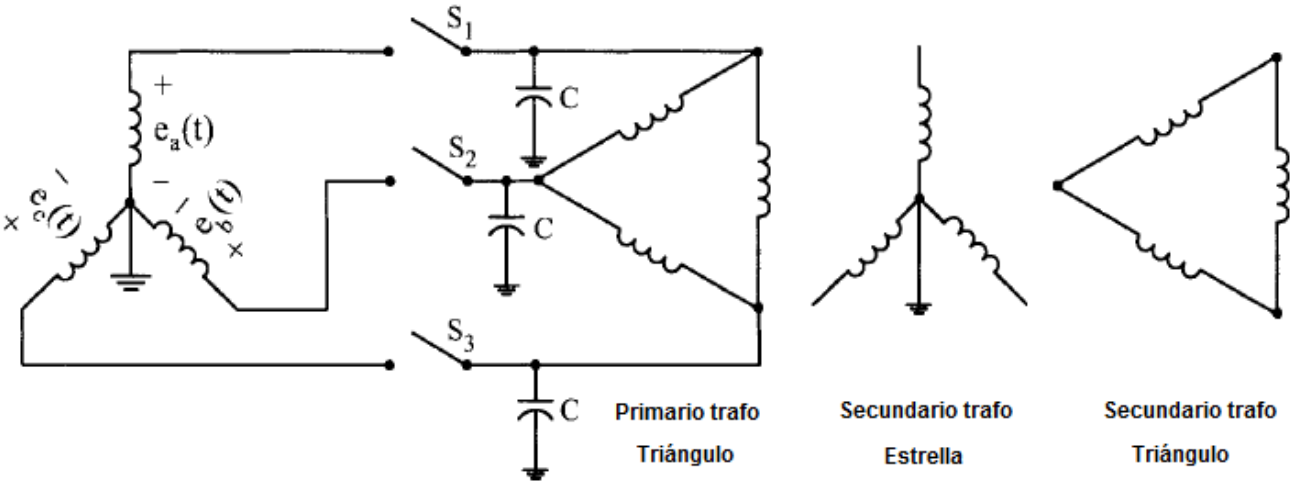
Analizaremos los sistemas trifásicos y por lo tanto los esquemas de trafos asociados a los mismos.

a) <u>Conexión triángulo en MT</u>

En la figura se detalla la red de MT, rígidamente puesta a tierra, así como los dispositivos de interrupción/seccionamiento y los cables subterráneos de MT (con la representación a través de la capacidad C a tierra) que alimentan al trafo.
Este trafo posee un esquema con conexionado triángulo en MT y estrella (con neutro a tierra o aislado) o en triángulo, en el lado de BT.
El trafo se encuentra operando en vacío, o bien con una carga ligera (menor al 20 % de la nominal).

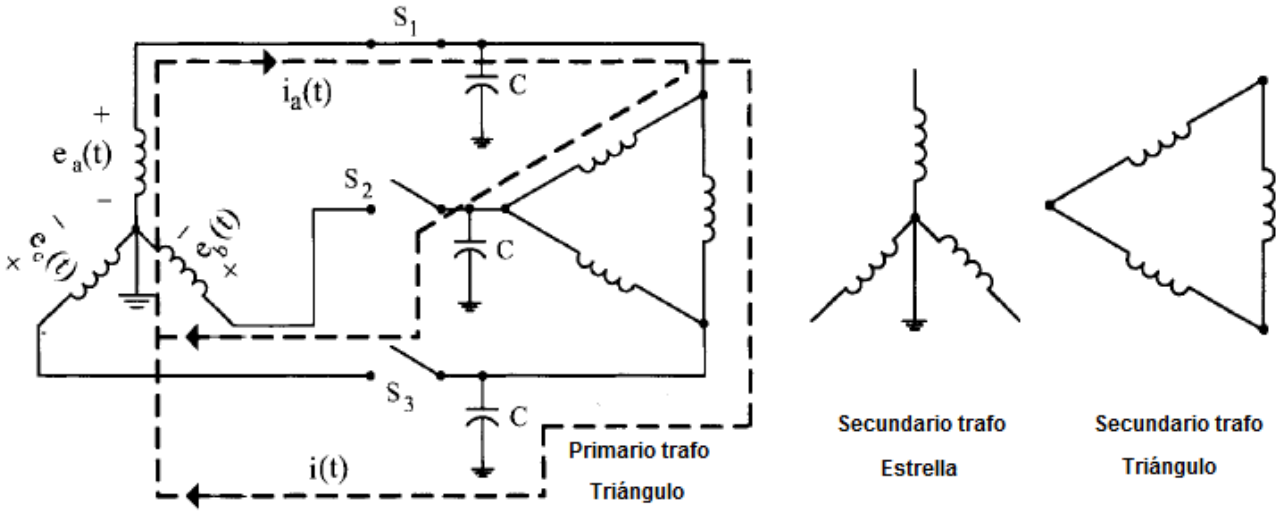
En el estado inicial, se asume que los dispositivos de interrupción se encuentran abiertos, por lo que el trafo no se encuentra energizado (Figura N° a1).

Figura N° a1



Un factor que promueve la ferrorresonancia es cuando una o dos fases se encuentran conectadas, resultando en un desbalance en el conexionado del trafo.
En la Figura N° a2 se muestra el caso de una fase conectada (fase a), observando que si bien el trafo se encuentra en vacío, quedará igualmente energizado debido a las capacidades a tierra de los cables de alimentación.

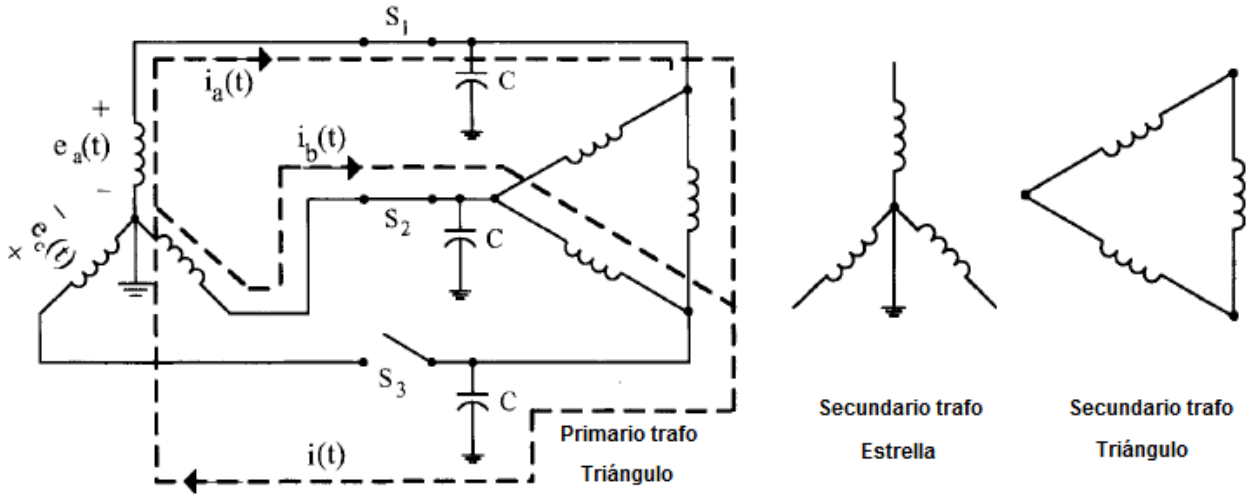
Figura N° a2



La corriente en la fase a (ia) se distribuye simétricamente en dos columnas del trafo ("a-b" y "a-c"), cerrándose por la tierra del sistema, a través de las capacidades a tierra de los cables de las fases b y c.

Para el caso en que solamente dos fases se encuentren conectadas (fase a y fase b), también el trafo quedará energizado, provocando la circulación de corrientes en ambas fases (ia e ib), resultando en una corriente instantánea efectiva por tierra: i(t) = ia(t) + ib(t)
Este hecho se observa en la Figura N° a3.

Figura N° a3

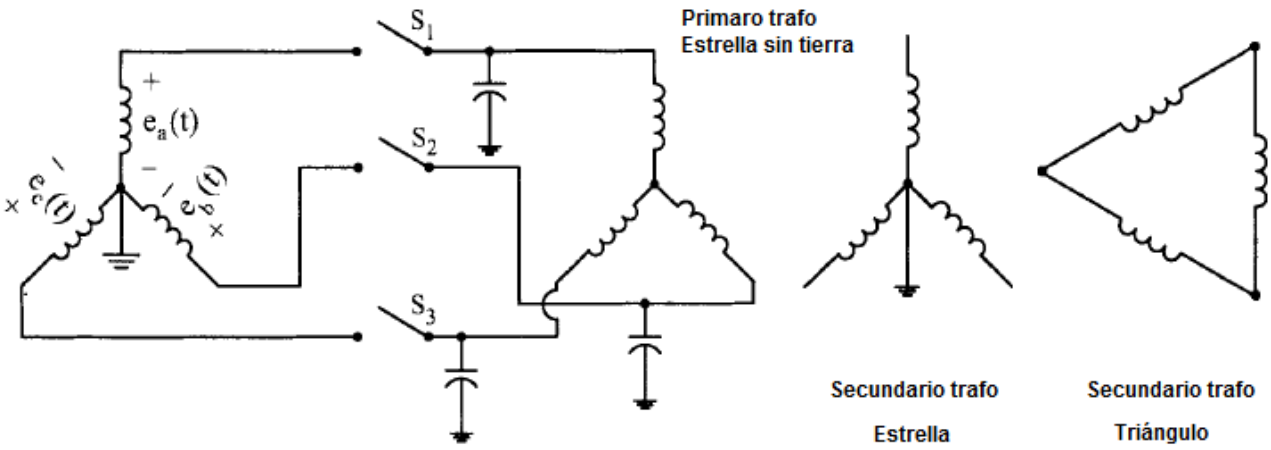


En este caso, la corriente ia se distribuye en la columna “a-c” y la corriente ib en la columna “b-c” del trafo.

b) <u>Conexión estrella aislada en MT</u>

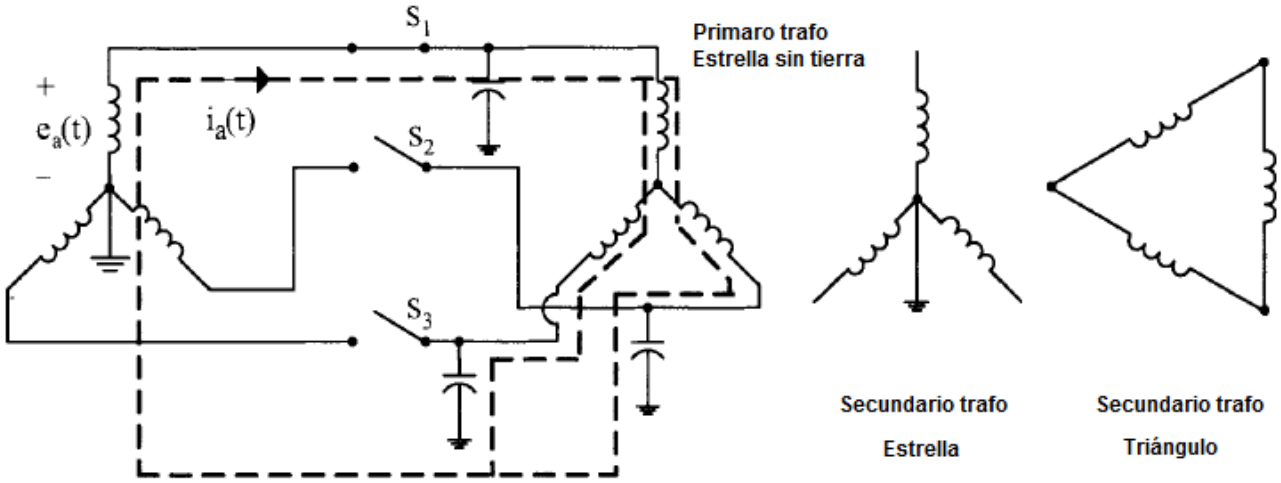
Para el caso de tener un conexionado en MT con estrella aislada (Figura N° b1), también se generan lazos de corriente que pueden promover el estado de ferrorresonancia.

Figura N° b1



En la Figura N° b2 se observa el caso de tener solamente 1 fase conectada (fase a).
Se detalla el lazo de cierre de la corriente por tierra, a través de las tres columnas del trafo en vacío.
Por la columna "a" circulará toda la corriente ia, mientras que en los dos columnas restantes ("b" y "c") esta corriente se distribuirá en forma simétrica entre ambas, circulando por las capacidades a tierra de los cables de ambas fases.

Figura N° b2



En el caso de disponer solamente de dos fases conectadas (fase a y fase b), situación que también promueve la ferrorresonancia, circularán las corrientes ia e ib.
La corriente ia circulará por la columna "a" del trafo y la corriente ib por la columna "b".
En la columna "c" circulará la corriente instantánea i(t) = ia(t)+ib(t), la cual se cerrará por la tierra del sistema, a través de la capacidad del cable de alimentación de la fase c.

5) Influencia en la operación de la línea de alimentación

En base a lo previamente explicado, los factores relacionados a la operación de la línea de alimentación, que pueden provocar la existencia de ferrorresonancia en un sistema eléctrico, pueden ser clasificados de la siguiente forma:

a) Tendido de cables subterráneos con gran reactancia capacitiva.
b) Cuando una o dos fases de un sistema trifásico, se encuentran conectadas.
c) Operación no sincronizada de cierre/apertura de transformadores de distribución.
d) Compensación capacitiva serie de líneas de transmisión.
e) Bancos capacitivos de compensación en paralelo.
f) Trafo operando en vacío.
g) Trafo operando con carga ligera (entre el 10 % al 20 % de la carga nominal).
h) Consideración de las capacidades mutuas del transformador (entre bobinados y bobinados a tierra) para sistemas de MT > 13,2 kV.
i) Uso de reactores en paralelo con núcleos operando en saturación.
j) Pérdida de la tierra del sistema, deficiente puesta a tierra, derivación a tierra a través de inductancias de dispersión.

Es muy importante tener en cuenta que el desarrollo de un proceso de ferrorresonancia no debe considerarse en sí como el desarrollo consecuente de sobretensiones en el sistema.

Un parámetro que mide la capacidad de un circuito conformado por cable-transformador de generar sobretensiones ante la existencia de ferrorresonancia, es la relación entre la reactancia capacitiva del cable y la reactancia magnetizante del trafo.

En tal sentido: $FS = \frac{Xc}{Xm}$

FS = Factor de Sobretensión (adimensional).

Por ejemplo, para trafos trifásicos con núcleo de tres columnas, se puede especificar, en base a estudios que se han realizado, que si la relación FS < 40, entonces es altamente probable que la ferrorresonancia desarrolle sobretensiones de un nivel del orden del 25 % de la tensión nominal.

Lo anterior refiere a trafos de potencias entre 60 kVA y 20 MVA, con tensiones nominales de MT en el rango de 6,6 kV a 33 kV.

En el caso de un banco trifásico, conformado por 3 trafos monofásicos, si la relación FS < 25, entonces existirá una alta probabilidad que se manifiesten sobretensiones al desarrollarse la ferrorresonancia.

Finalizaremos este artículo en la Parte N° 3, en donde detallaremos las distintas técnicas o métodos que pueden adoptarse para evitar o mitigar los problemas derivados de la ferrorresonancia.

También veremos, de forma descriptiva, el desarrollo dinámico de este proceso electromagnético, prestando atención a los distintos estados que pueden presentarse en el sistema de distribución de MT.

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