Nota técnica: “Gestión del Ciclo de Vida de Transformadores en Plantas Fotovoltaicas. Parte 3”

1. Pérdidas por corrientes de Foucault y adicionales

Como ya comentamos en la Parte 2, de esta serie de artículos, las componentes armónicas de la corriente de carga son la causa principal de dos efectos significativos en los transformadores, a saber:

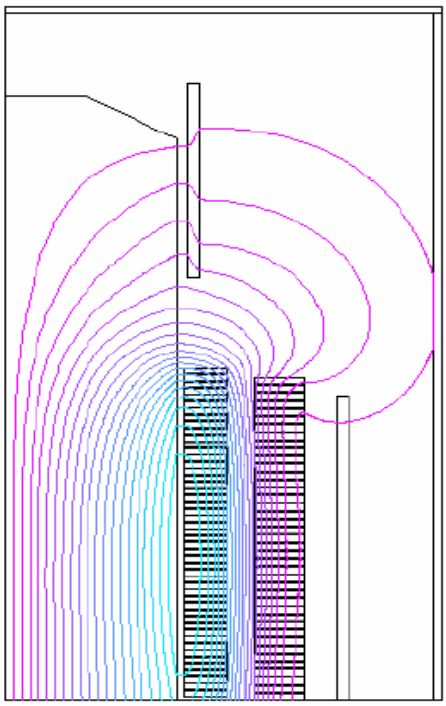
- Aumento de las pérdidas en los bobinados (representan las pérdidas por corrientes de Foucault en áreas conductoras, así como las pérdidas adicionales en los conductores).

- Sobrecalentamiento anormal en el volumen de la máquina.

En este ítem vamos a describir los efectos de las pérdidas de Foucault y adicionales en los bobinados y en el siguiente, haremos una introducción sobre el efecto térmico sobre el transformador y su consecuente sobrecalentamiento.

Para comprender el efecto de los armónicos de corriente sobre los bobinados, será importante establecer que éste se encuentra íntimamente relacionado con la forma en que se distribuye el campo magnético.

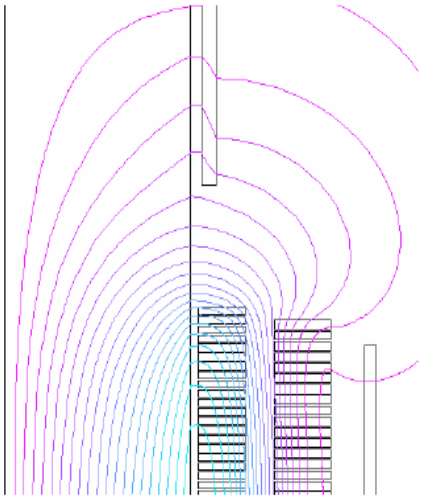
En la siguiente figura se observa la distribución de las líneas del campo magnético a lo largo de los bobinados de BT y MT y el cierre a través del núcleo magnético.



Es importante tener en cuenta que, por el efecto pelicular, el flujo magnético no concatenará a todos los conductores que conforman los bobinados de MT y BT.

Este hecho será más significativo para las componentes armónicas de altas frecuencias.

En la siguiente figura se observa un detalle ampliado de la distribución de las líneas del campo magnético en la parte superior de los bobinados de MT y BT, destacando el efecto de dispersión a una frecuencia dada.



Se observa un incremento del campo magnético disperso.

Como ya hemos indicado, esta componente se expresa de la siguiente forma, en referencia a las pérdidas por Foucault en operación nominal:

$$\mathrm{Pf} = \mathrm{Pfn} \sum_{k=1}^{kmax} k^2 \times \left(\frac{Ik}{In}\right)^2$$

Siendo:

Pfn = Pérdida por Foucault en condiciones nominales.
Pf = Pérdida por Foucault por actividad armónica.
In = Valor eficaz de la corriente a frecuencia nominal y carga nominal.
Ik = Valor eficaz de la corriente del armónico de orden k.

También habíamos indicado que, una expresión de uso práctico para calcular la componente de pérdidas adicionales en las partes conductoras del transformador, tomando como referencia la debida a la operación nominal, es:

$$\mathrm{Pop} = \mathrm{Popn} \sum_{k=1}^{kmax} k^{0,8} \times \left(\frac{Ik}{In}\right)^2$$

Siendo:

Popn = Otras pérdidas adicionales en condiciones nominales.
Pop = Otras pérdidas adicionales por actividad armónica.
In = Valor eficaz de la corriente a frecuencia nominal y carga nominal.
Ik = Valor eficaz de la corriente del armónico de orden k.

Sabemos que, al estar estas pérdidas relacionadas con el flujo magnético, las mismas variarán con la magnitud del valor eficaz de la corriente de carga al cuadrado y de la frecuencia al cuadrado, para el caso de la componente de Foucault y con un exponente de “0,8” para la componente adicional.

Entonces, podemos decir que, en principio, como consecuencia de la actividad armónica, tendremos un incremento del campo magnético disperso, generando así un incremento significativo de las pérdidas.

Por lo tanto, el incremento de estas pérdidas, será la causa directa de un sobrecalentamiento adicional efectivo en el interior del transformador.

En base a lo ya visto en la Parte 2 y en la presente Parte 3, podemos expresar la pérdida en carga, como se indica a continuación:

$$\mathrm{Pc} = \mathrm{Pdc} + \mathrm{Pf} + \mathrm{Pop}$$

Pc = Pérdida en carga del transformador.
Pdc = Pérdida en las resistencias de los bobinados por actividad armónica.

Y la pérdida total en el transformador, incorpora la debida a las pérdidas en vacío:

$$\mathrm{Pt} = \mathrm{Pc} + \mathrm{P0}$$

Pt = pérdida total del transformador.
P0 = pérdida en vacío del transformador.

A partir de las expresiones indicadas, se podrán obtener los parámetros relacionados con el Modelo Térmico del transformador (tanto en régimen estacionario como dinámico).

Un parámetro clave será la Temperatura del Punto Caliente (Tpc), la cual representa la mayor temperatura en la parte superior de los bobinados y que por lo tanto, será fundamental para analizar y evaluar la pérdida de vida del transformador.

Cabe aclarar que, la forma óptima de obtener la Tpc será a través de la medición directa, con el uso de sensores de fibra óptica. Pero este método resulta impráctico para transformadores ya operativos y que no tengan instalados los sensores, por lo que la mejor alternativa será la de calcular (estimar) la Tpc, a partir del Modelo Térmico.

2. Modelo y efecto térmico en el transformador

Considerando lo indicado en la Parte 1 y Parte 2, las componentes armónicas de la corriente de carga son causa de un efectivo sobrecalentamiento interno en el transformador, debido al incremento de las pérdidas en los bobinados, en el núcleo magnético y otras partes estructurales.

A continuación, vamos a describir los conceptos básicos, asociados al proceso de calentamiento en un transformador en aceite.

En tal sentido, se establece un Modelo Térmico Lineal de los perfiles de temperaturas internos del aceite y de los bobinados.

Con el fin de establecer las características de los perfiles, se asigna un valor inicial en la zona inferior del bobinado, correspondiente al parámetro **Temperatura Inferior del Aceite (Tia)**.

De igual forma, se asigna un valor final, en la zona superior del bobinado, correspondiente al parámetro **Temperatura Superior del Aceite (Tsa)**.

Por lo tanto, el perfil de temperaturas de los bobinados adquiere, en este modelo, un perfil lineal, asociado con el perfil del aceite.

Esta relación de perfiles se materializa a través de un parámetro “g”, el cual se denomina **Factor de Incremento de Temperatura**, cuya característica fundamental, en el Modelo Térmico adoptado, es que permanece con un valor constante a lo largo del perfil y a lo largo del tiempo.

Es así que, al factor “g”, se lo define como el incremento promedio de la temperatura de los bobinados, con respecto a la temperatura promedio del aceite, a corriente nominal.

Un parámetro importante del Modelo Térmico Lineal, es la **Temperatura del Punto Caliente (Tpc)**, la cual se asocia a la mayor temperatura que pueden alcanzar los bobinados en todo momento.

Teniendo en cuenta las características previamente descriptas de este modelo, así como los parámetros que lo conforman, se puede expresar la Temperatura del Punto Caliente, de la siguiente forma:

$$\mathrm{Tpc} = \mathrm{Ta} + \Delta\mathrm{T0} + \Delta\mathrm{Th}$$

En donde:

Ta = Temperatura ambiente.
ΔT0 = Incremento de la temperatura del aceite en la zona superior del bobinado, con respecto a la Ta.
ΔTh = Incremento de la temperatura del punto caliente con respecto a la temperatura superior del bobinado.

Este último parámetro se puede expresar de la siguiente forma (en una primera instancia):

$$\Delta\mathrm{Th} = \mathrm{H}\ g.$$

En donde a **H** se lo denomina **Factor del Punto Caliente**.

Es importante destacar que ”H” representa el incremento de las pérdidas, por efecto pelicular, en los finales de los bobinados (Zona Superior), determinando así que en la parte superior del bobinado el incremento de temperatura será mayor al correspondiente incremento medio, cuya diferencia vendrá dada por el valor ΔTh.

Desde otro punto de vista, podemos decir que este factor incorpora las <u>alinealidades</u> a las cuales se encuentra sometido el transformador, en su operación bajo un dado estado de carga.

Se han establecido estudios para obtener de forma práctica este factor H, concluyéndose que su valor, dependerá del tamaño del transformador, así como de su impedancia de cortocircuito y del tipo de diseño adoptado para los bobinados.

De los resultados derivados de los estudios estadísticos, se han podido establecer los siguientes valores:

H = 1,1 para transformadores de distribución.
H = 1,3 a 1,5 para transformadores de media y alta potencia.

Una expresión analítica para el cálculo de H es la siguiente:

$$H = \left(\frac{P_{b-max}}{P_{b-med}}\right)^{0,8}$$

Siendo:

$P_{b\text{-}max}$ = Pérdidas en los bobinados en el punto caliente en (°/1).
$P_{b\text{-}med}$ = pérdidas medias en los bobinados en (°/1).

Como el parámetro $\Delta T0$ depende del estado de carga del transformador, se podrá estimar, en base a este Modelo, con la siguiente expresión:

$$\Delta T0 = \Delta T0n \times \left(\frac{1 + R\,K^2}{1 + R}\right)^n$$

En donde:

ΔT0n = Incremento de la temperatura del aceite en la zona superior del bobinado, con respecto a la Ta, en régimen de operación nominal.
K = Factor de Carga = relación entre la corriente de operación y la nominal.
R = Relación entre la pérdida en carga a régimen nominal y la pérdida en vacío.
n = Exponente que depende del método de refrigeración del transformador (valores entre 0,8 a 1).

Este Modelo permite ajustar (en una segunda instancia) el incremento de la temperatura del punto caliente con respecto a la temperatura superior del bobinado, atendiendo al tipo de refrigeración del transformador. Tendremos:

$$\Delta Th = H\ g\ K^{2m}$$

Siendo “m” un exponente que depende del método de refrigeración adoptado. Los valores se encuentran en el rango de 0,8 a 1.

La forma en que el contenido armónico de la corriente influirá en el sobrecalentamiento del transformador, quedará formalizado a través de las siguientes expresiones, sin entrar en los detalles de la deducción de las mismas:

$$Fba = \frac{\sum_{k=1}^{kmax} \left(\frac{Ik}{In}\right)^2 k^2}{\sum_{k=1}^{kmax} \left(\frac{Ik}{In}\right)^2}$$

En donde:

Fba = Factor de Pérdida Armónico en los bobinados del transformador.
k = Armónico k-ésimo del espectro de frecuencias de la corriente de carga.
Ik = Componente k-ésima de frecuencia de la corriente de carga.
In = valor de la corriente de carga nominal.

Este factor tiene en cuenta el valor de las pérdidas de Foucault adicionales, debido a la distorsión armónica de la corriente de carga.

Además tendremos:

$$Fopa = \frac{\sum_{k=1}^{kmax} \left(\frac{Ik}{In}\right)^2 k^{0,8}}{\sum_{k=1}^{kmax} \left(\frac{Ik}{In}\right)^2}$$

Fopa = Factor de Pérdida Armónico de las pérdidas adicionales en otras partes estructurales, como consecuencia de la distorsión armónica de la corriente de carga.

Departamento de ingeniería.
Nova Mirón S.A.