

Operación y Mantenimiento de transformadores de distribución en redes con contenido armónico

# Parte 2 – Análisis de la acción del contenido armónico en la operación y mantenimiento de transformadores

#### 1. Introducción

Continuando con lo establecido en la primer parte de este escrito, vamos a desarrollar en la presente los aspectos relacionados con los efectos de los contenidos armónicos en las ondas de tensión y corriente sobre los transformadores de distribución.

En primer término haremos una descripción resumida de las clases de armónicos que pueden presentarse en los sistemas eléctricos de potencia, así como la definición de parámetros característicos que permiten cuantificar los efectos no deseados en la operación de los dispositivos.

Finalmente, trataremos los efectos que ocasionan las componentes armónicas en la operación y mantenimiento de los transformadores de distribución. Se analizarán las pérdidas adicionales por contenido armónico y el consecuente sobrecalentamiento que trae aparejado.

Concluiremos con algunas descripciones que permitan lograr un efectivo diseño, operación y mantenimiento de los transformadores, instalados en ambientes con alta contaminación armónica.

Destacamos que la presente exposición se basará fundamentalmente en la acción de los armónicos en los transformadores de distribución inmersos en aceite mineral dieléctrico.

## 2. Características de armónicos en los sistemas eléctricos de potencia

Los armónicos que pueden manifestarse en un sistema eléctrico de potencia, se agrupan en las siguientes clases:

# a) Armónicos enteros

Corresponden a las ondas no senoidales periódicas, en las cuales las frecuencias de cada una son múltiplos enteros de la frecuencia de red (o fundamental). Podemos expresar las ondas armónicas, tanto de tensión como de corriente, de la siguiente forma:

$$v(t) = V_0 + \sum_{h=1}^{n} V_h \cos(h\omega_1 t + \alpha_h) = V_0 + v^{(1)}(t) + v^{(2)}(t) + \cdots$$

$$i(t) = \, I_0 + \, \sum_{h=1}^n I_h \, \, cos(h\omega_1 t \, + \, \beta_h) = I_0 \, + \, i^{(1)}(t) \, + \, i^{(2)}(t) \, + \, \cdots$$

Siendo h un número entero y  $\omega_1$  = 2  $\pi$  f<sub>1</sub>. En donde f<sub>1</sub> es la frecuencia fundamental.

Una característica común en las instalaciones eléctricas, es la existencia de armónicos con simetría de media onda, es decir aquellas ondas de tensión o corriente en donde solamente existen los armónicos impares (h = 1 (fundamental), h = 3, h = 5, etc.).



Los armónicos de orden par no suelen ser comunes en las instalaciones, por lo que generalmente se atribuyen a alguna anomalía operacional (por ej. operación incorrecta en dispositivos electrónicos de potencia). Obviamente existen excepciones, como es el caso de los sistemas de rectificación de media onda, etc.

### b) Armónicos Triplen

En este caso las ondas poseen frecuencias correspondientes a <u>múltiplos impares</u> del 3er ar<u>mónico</u>, es decir, h = 3, 9, 15, 21, 27, ...

Revisten suma importancia en los sistemas de potencia con la estrella puesta a tierra, ya que tienden a sobrecargar al conductor de neutro, por la existencia de una corriente de circulación en éste.

Lo anterior debe su causa a que los armónicos de 3er orden de la corriente del neutro, son 3 veces mayores a la corriente de fase de 3er armónica, por encontrarse pulsando éstos en fase.

## c) Interarmónicos

Se caracterizan por poseer frecuencias que <u>no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.</u>

Se manifiestan como frecuencias discretas o como un espectro de banda.

Deben su causa a la operación de cicloconvertidores, máquinas asincrónicas, convertidores estáticos de frecuencia, etc.

Un efecto, principalmente nocivo de estos armónicos, es la generación de cuplas parásitas de baja frecuencia en las máquinas rotativas asincrónicas.

# d) Subarmónicos

Corresponden a ondas cuyas frecuencias <u>son menores a la frecuencia</u> fundamental.

Deben su causa a fenómenos de resonancia entre armónicos de corriente o tensión, con las capacidades e inductancias (serie) del sistema de potencia. Este efecto es conocido como de "Resonancia Subsincrónica".

También se relacionan con sistemas de operación altamente inductivos, así como aquellos que se encuentran conformados con grandes bancos de capacitores.

## e) Armónicos Característicos

Son las ondas cuyas <u>frecuencias se asocian a la secuencia dada por (12 k + 1)  $f_1$ .</u> El número k pertenece a los enteros.

El origen se puede asignar a la operación de inversores y rectificadores.

#### f) Armónicos No Característicos

En este caso, las ondas poseen <u>frecuencias en la secuencia dada por (12 k -1)  $f_1$ .</u> El número k pertenece a los enteros.

Deben su causa a la operación de sistemas eléctricos de características no simétricas.



### g) Armónicos de secuencia

Podemos agruparlos de la siguiente forma:

#### - De secuencia positiva

Las frecuencias de las ondas vienen dadas por la secuencia:  $h f_1$ , con h = 1, 4, 7, 10, ...).

Ocurren al operar con cargas no lineales en sistemas de potencia.

## De secuencia negativa

Las frecuencias de las ondas vienen dadas por la secuencia:  $h f_1$ , con h = 2, 5, 8, 11, ...).

También deben su causa al operar con cargas no lineales en sistemas de potencia.

## - De secuencia homopolar

Las frecuencias de las ondas vienen dadas por la secuencia:  $h f_1$ , con h = 3, 6, 9, 12, ...).

Se originan al operar con desbalances.

## h) Armónicos Espaciales

Refieren a los armónicos en los flujos magnéticos de las máquinas eléctricas rotativas (máquinas sincrónicas y asincrónicas).

Son consecuencia de la asimetría geométrica de los circuitos magnéticos del estator y del rotor.

Pertenecen a la secuencia de frecuencias dada por:  $h f_1$ , siendo h un número entero.

### i) Armónicos Temporales

Corresponden a los armónicos de tensión y corriente en las máquinas eléctricas rotativas, a dispositivos de electrónica de potencia (fuentes inversoras, PWM, etc.) y a condiciones anómalas en el sistema de potencia (desbalances y fallas).

En las máquinas eléctricas rotativas se generan por la saturación del núcleo magnético.

Como los espaciales, pertenecen a la secuencia de frecuencias dada por:  $h f_1$ , siendo h un número entero.

#### 3. Parámetros para cuantificar la distorsión armónica

Sin ser exhaustivos en la formulación matemática de las expresiones, asociadas a los parámetros que permiten cuantificar el nivel de contaminación armónica en una instalación eléctrica, haremos a continuación una breve descripción de aquellos que consideramos los más representativos, a los fines del presente trabajo.



#### Podemos establecer:

## a) Factor armónico o Distorsión armónica individual

Representa una medida de la contribución de la armónica k-ésima, en relación a la componente fundamental.

La expresión es la siguiente:

$$FA = \frac{I_{ef(k)}}{I_{ef(1)}}$$

## b) <u>Distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés)</u>

Es un índice que cuantifica el contenido armónico de la onda distorsionada, estableciendo así una medida del valor efectivo de los armónicos.

Se especifica tanto para la onda de tensión como de corriente. Por ejemplo, la expresión de la THD para la onda de corriente es:

$$THD_i(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} [I(k)]^2}}{I(1)}$$

Es decir, es la relación entre el valor eficaz de los armónicos, expresado en porcentual del valor eficaz de la fundamental.

Un valor de THD del 5 % es el límite típico especificado para indicar un nivel de distorsión entre bajo y alto.

## c) Distorsión de demanda total (TDD, por sus siglas en inglés)

Con el fin de incorporar un índice que relacione la distorsión armónica con el total de la corriente nominal que circula por la instalación, se definió este factor de la siguiente forma:

$$TDD_i(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} [I(k)]^2}}{In}$$

De la expresión, se observa la recomendación de adoptar la secuencia de armónicos hasta el nivel 50.

# 4. Efectos de la distorsión armónica sobre los transformadores de distribución

Las componentes armónicas son causa principal de dos grandes efectos en los transformadores, a saber:

- Aumento de las pérdidas en los bobinados (pérdidas por corrientes de Foucault en áreas conductoras y pérdidas adicionales en los conductores).
- Sobrecalentamiento anormal en el volumen de la máquina.



Antes de iniciar una exposición de los problemas citados, vamos a describir la incidencia del origen de cada componente armónica sobre éstos.

A grandes rasgos podemos clasificar la incidencia por origen, de la siguiente forma:

## a) Armónicos en la onda de corriente

Estos armónicos son muy importantes en los sistemas eléctricos de potencia ya que son la causa principal del aumento de las pérdidas adicionales en los bobinados y otras partes estructurales de los transformadores.

Tendremos:

#### Pérdida por la resistencia óhmica de los bobinados

Debido al aumento del valor eficaz de la corriente de carga, como consecuencia de las componentes armónicas, también aumentará esta pérdida ya que son directamente proporcional al cuadrado del citado valor eficaz.

# - Pérdida adicional en los bobinados

Como se encuentran relacionadas con el flujo magnético, se determina que varían con el valor eficaz de la corriente de carga al cuadrado y de la frecuencia al cuadrado.

Es importante tener en cuenta que por el efecto pelicular, el flujo magnético no concatena a todos los conductores que conforman los bobinados, a altas frecuencias.

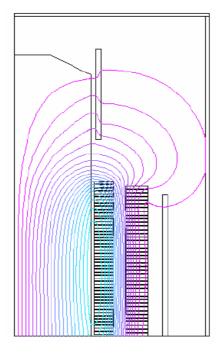
La forma en que los contenidos armónicos incrementan las pérdidas adicionales en los bobinados, se puede comprender, atendiendo a que en los extremos de los mismos se tiene un incremento del campo magnético disperso, en la dirección radial.

Este fenómeno lleva a que las componentes armónicas sean la causa del incremento de las pérdidas adicionales, en especial en los extremos de los bobinados, aumentando en consecuencia la temperatura del punto caliente (ver ítem 5).

En la siguiente figura se observa la distribución de las líneas del campo magnético a lo largo de los bobinados de un transformador, destacando las líneas de dispersión en los extremos de los mismos.

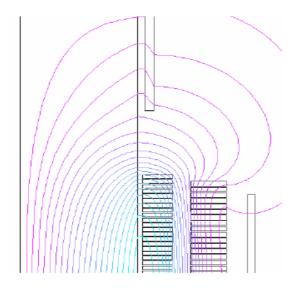
Figura N° 1





A continuación se observa un detalle de la distribución de las líneas del campo de dispersión, en el extremo superior de los bobinados.

Figura N° 2



Como ya habíamos comentado, el incremento de estas pérdidas, por la actividad armónica, será la causa directa de un sobrecalentamiento en el transformador.



Esta componente se expresa de la siguiente forma:

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

Siendo:

Pfn = pérdida adicional en los conductores en condiciones nominales.

Pf = pérdida adicional en los conductores 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.

A los fines prácticos, se define el Factor de Pérdidas Adicionales para los conductores de los bobinados y para un dado espectro armónico de la onda de corriente, de la siguiente forma:

$$F_{HL} = \frac{Pf_{p_A}}{Pf_{Sp}} = \frac{\sum_{k=1}^{kmax} (k \times Ik)^2}{\sum_{k=1}^{kmax} Ik^2}$$

 $Pf_{PA}$  = pérdida adicional en los conductores de los bobinados para una corriente poliarmónica.

Pf<sub>SP</sub> = pérdida adicional en los conductores de los bobinados para una corriente senoidal pura.

#### Otras pérdidas adicionales

La acción del flujo de dispersión sobre distintas estructuras metálicas del transformador, también será la causa de la generación de pérdidas, como ser en el núcleo magnético, cuba, etc.

La existencia de componentes armónicas provocará el aumento de estas pérdidas adicionales, con un consecuente incremento de la temperatura en las zonas estructurales afectadas.

Lo anterior, en los transformadores en aceite, será un factor importante en el aumento de la temperatura del punto caliente en el volumen del líquido aislante.

Se pueden expresar de la siguiente forma:

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

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.



Observamos que se utiliza un factor de 0,8 como exponente del armónico de orden k. Este valor es especificado en las normas y verificado experimentalmente.

De igual forma que en el ítem previo, se define el Factor de Pérdidas Adicionales localizadas en otras partes conductoras y para un dado espectro armónico de la onda de corriente.

Tendremos:

$$F_{HLop} = \frac{Pop_{pA}}{Pop_{SP}} = \frac{\sum_{k=1}^{kmax} k^{0.8} \times Ik^2}{\sum_{k=1}^{kmax} Ik^2}$$

Pop<sub>PA</sub> = pérdida adicional en otras partes conductoras para una corriente poliarmónica.

Pop<sub>SP</sub> = pérdida adicional en otras partes conductoras para una corriente senoidal pura.

## b) Armónicos en la onda de tensión

Es importante tener en cuenta que las componentes armónicas de la onda de tensión son causa de generación de armónicos en la onda del flujo magnético que concatena un bobinado, según se establece en la siguiente expresión:

$$\phi k = \frac{Uk}{j(\omega k)N}$$

Siendo:

Uk = componente armónica k-ésima en la onda de tensión.

φk = componente armónica k-ésima en la onda del flujo magnético.

 $\omega$  = pulsación angular en la frecuencia fundamental.

k = orden k-ésimo del armónico.

N = número de espiras del bobinado.

Debido a que la distorsión armónica en la onda de tensión en los sistemas eléctricos, no debe exceder el límite del 5 %, así como las amplitudes de las componentes son relativamente pequeñas en relación a la fundamental, se pueden obviar éstas, en una primera instancia sin obtener errores apreciables, a la hora de evaluar los efectos sobre los transformadores.

En tal sentido, de aquí en más, cuando hagamos referencia a los efectos de los contenidos armónicos, estaremos directamente involucrando a los que pertenecen a la onda de corriente.

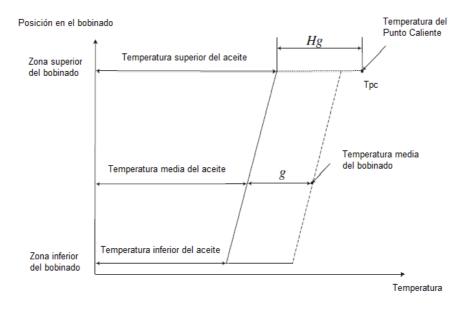
# 5. Sobretemperatura en el transformador

Como ya hemos comentado, los armónicos son causa de sobrecalentamiento interno en el transformador, debido al incremento de las pérdidas adicionales.

Antes de proceder a detallar este fenómeno adverso, vamos a describir los principios básicos del calentamiento en un transformador en aceite. En la figura N° 3 podemos observar los parámetros involucrados.



Figura N° 3



En este caso el perfil de temperatura del aceite, a la lo largo de los bobinados del transformador, es de característica lineal, adquiriendo un valor inicial en la zona inferior, asignado a la Temperatura Inferior del aceite y otro final correspondiente a la Temperatura superior del aceite.

El perfil de temperatura de los bobinados también se caracteriza por su linealidad, relacionándose con el del aceite a través de un factor de incremento constante "g".

Formalmente, el factor "g" se define como el incremento promedio de la temperatura de los bobinados, con respecto a la temperatura promedio del aceite, a corriente nominal.

Se destaca que la mayor temperatura que pueden alcanzar los bobinados es la indicada con Tpc, correspondiendo a la Temperatura del Punto Caliente. Se puede expresar de la siguiente forma:

$$Tpc = Ta + \Delta T0 + \Delta Th$$

En donde:

Ta = Temperatura ambiente.

 $\Delta T0$  = Incremento de la temperatura del aceite en la zona superior del bobinado, con respecto a la Ta.

 $\Delta$ Th = Incremento de la temperatura del punto caliente con respecto a la temperatura superior del bobinado.

Este último parámetro se puede expresar, en primera instancia, de la siguiente forma:  $\Delta Th = Hg$ .

Además,

$$\Delta T0 = \ \Delta T0 n \left[ \frac{1 + R \times FC^2}{1 + R} \right]^n$$



Siendo:

 $\Delta$ T0n = Incremento de la temperatura del aceite en la zona superior, con respecto a la Ta, a carga nominal.

R = Relación de las pérdidas con carga a corriente nominal, con respecto a las pérdidas en vacío.

FC = Factor de carga = relación entre la corriente de carga y la nominal.

n = exponente empírico que depende del método de refrigeración del transformador.

**H = Factor del Punto Caliente**, el cual representa el incremento de las pérdidas por efecto pelicular, en los finales de los bobinados. Es decir, es el factor que incorpora las alinealidades a las cuales se encuentra sometido el transformador, en su operación.

Su valor, depende del tamaño del transformador, así como de su impedancia de cortocircuito y del tipo de diseño adoptado para los bobinados.

De 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:

$$H = \left(\frac{P_{a-max}}{P_{a-med}}\right)^{0.8}$$

P<sub>a-max</sub> = Pérdidas en los bobinados en el punto caliente en (°/1).

 $P_{a-med}$  = pérdidas medias en los bobinados en (°/1).

La forma en que el contenido armónico influye en el sobrecalentamiento de la máquina, queda formalizado a través de la siguiente expresión:

$$Ptt = Pfen + \left(Pjn + Pfn \times F_{HL} + Popn \, \times \, F_{HLop}\right) \times \, FC^2$$

Ptt = pérdida total en el transformador.

Pfe = pérdida nominaol en el hierro.

Pin = pérdida nominal en las resistencias óhmicas del transformador.

A partir de la expresión anterior se puede evaluar el sobrecalentamiento en el medio aislante del transformador, como consecuencia de las componentes armónicas en la onda de corriente y el consecuente incremento de las pérdidas adicionales, tanto en los bobinados como en otras partes conductoras de la máquina.

Además, se podrá establecer la diferencia térmica entre el punto más caliente (Temperatura del Punto Caliente) y la temperatura ambiente, o bien la temperatura superior del aceite.

## 6. Evaluación de la capacidad de carga del transformador

De lo anterior, queda bien establecido que será un factor importante el de determinar la capacidad de carga de un dado transformador de distribución, con el fin de alimentar una carga alineal que genera contenidos armónicos en la instalación.

En tal sentido, podemos encarar el desclase ocasionado, en 3 grandes grupos, a saber:



# a) Desclase a través de la medición directa de las pérdidas

Se basa en determinar la reducción de la potencia aparente del transformador, para cada distorsión armónica de corriente, tratándose de no exceder las pérdidas nominales.

Se tiene en cuenta que, tanto la reducción de la potencia aparente como la capacidad de la potencia activa, son función de la THD.

# b) Desclase por el factor K

Con el fin de cuantificar la capacidad de un transformador de entregar su potencia nominal (o corriente nominal) con un dado contenido armónico en la onda de corriente, se define el factor K de la siguiente forma:

$$K = \frac{\sum_{k=1}^{kmax} (k^2 \times Ik^2)}{In^2}$$

Tiene en cuenta el hecho de que el impacto de las cargas no lineales sobre el transformador, depende fundamentalmente de la naturaleza del espectro armónico.

Representa los eventuales efectos de sobrecalentamiento que provoca el uso de una carga no lineal, sobre el transformador.

Esta situación no lo considera el fabricante, salvo especificación en contrario a través del factor K, el cual involucra la característica intrínseca de la carga a alimentar por el transformador.

Este método se basa en calcular el armónico de la corriente de carga poliarmónica que provoca las mismas pérdidas equivalentes de la corriente de carga senoidal, de forma tal que la temperatura del punto caliente no sea excedida.

Sin entrar en detalles en la demostración de las expresiones de cálculo, podemos establecer:

$$\operatorname{Imax_{\circ/1}} = \left[ \frac{1 + \operatorname{Pfn_{\circ/1}}}{1 + \left( K \times \frac{\operatorname{In^2}}{\sum_{k=1}^{\operatorname{kmax}} \operatorname{Ik^2}} \times \operatorname{Pfn_{\circ/1}} \right)} \right]^{1/2} \tag{A}$$

Siendo:

 $Imax_{^{\circ}/1} = m$ áxima corriente eficaz armónica de carga que el transformador podrá despachar en  $^{\circ}$  /1.

Pfn<sub>°/1</sub>

= pérdida por Foucault a la temperatura de punto caliente en operación senoidal en  $^{\circ}$  /1.

En tal sentido, la reducción de la potencia aparente del transformador (RPA), indicadora del desclase, se expresa de la siguiente forma:



$$RPA = 1 - \left[ \left( \frac{U_{2NL}}{U_{2N}} \right) \times Imax_{^{\circ}/1} \right]$$
 (B)

En donde:

U<sub>2NL</sub> = tensión eficaz del secundario con contenido armónico.

U<sub>2N</sub> = tensión nominal eficaz del secundario sin contenido armónico.

# c) Desclase por el Factor de Pérdidas

Este método es un enfoque alternativo al indicado previamente. El Factor de Pérdidas se define de la siguiente forma:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{k=1}^{kmax} (k \times Ik)^2}{\sum_{k=1}^{kmax} Ik^2}$$

De las expresiones previas, se puede deducir:

$$K = \left(\frac{\sum_{k=1}^{kmax} Ik^2}{In^2}\right) \times F_{HL}$$

De tal forma, usando las expresiones (A) y (B), se podrá determinar la corriente máxima permitida y la reducción de la potencia aparente del transformador, respectivamente.

## 7. Operación y Mantenimiento de los transformadores

El seguimiento de la degradación de los distintos componentes que conforman un transformador, es un factor clave para lograr una vida útil extendida del mismo, así como tener bajo control los distintos eventos que puedan incrementar el riesgo de una falla.

Podemos detallar a continuación los parámetros críticos a monitorear, atendiendo a que el principal componente en el proceso de degradación es la aislación.

- Aceite (propiedades físicas y químicas).
- Aislación de los bobinados.
- Bushings.
- Resistencia a la corrosión de la pintura.
- Conexionados.
- Estructura del núcleo magnético.
- Estructura de la cuba.
- Estructura de los bobinados.
- Sistema de refrigeración.
- Sistema de protecciones.

Teniendo en cuenta lo antedicho, podemos resumir los efectos de los armónicos sobre los transformadores, de la siguiente forma:



- Aumento de las pérdidas en el núcleo magnético, tanto por histéresis como por Foucault.
- Aumento de las pérdidas en los conductores de los bobinados.
- Aumento de las pérdidas en partes conductoras internas del transformador.
- Saturación del núcleo magnético por variación del punto de operación en la curva característica de flujo-corriente.
- Existencia de saturación de medio ciclo en el núcleo magnético, como consecuencia de la existencia de armónicos pares y componente de continua.
- Reducción de la vida útil debido al sobrecalentamiento.
- Deterioro de la aislación en las cercanías de los terminales, debido a la solicitación de alta tensión, como consecuencia de la operación de dispositivos de electrónica de potencia.
- Disminución de la eficiencia operativa.
- Desclase de la potencia nominal (ver ítem N° 5).
- Generación de resonancia paralelo según el orden "k" del armónico, así como fenómenos de ferrorresonancia.

Se deberá tener en cuenta que la mayoría de los transformadores están especificados y diseñados para operar en un régimen de onda senoidal de frecuencia de red de 50 Hz.

El diseño se basa en que la máquina, bajo las condiciones indicadas, pueda disipar la energía calórica generada por las pérdidas internas, sin producir daños internos ni afectar significativamente la vida útil.

Resulta claro, por lo ya expuesto, que los contenidos armónicos en la onda de corriente provocarán el aumento de la pérdida interna del transformador, con un consecuente incremento de la Temperatura del Punto Caliente en los bobinados, parámetro directamente asociado a la vida útil de la aislación (papel).

Por tal motivo, se producirá un desclase de la máquina, determinando que ésta no pueda operar a su potencia nominal, declarada en la chapa de características.

Una solución a este problema, es la de reducir la carga asignada al transformador.

Otra solución, es la de recurrir a transformadores diseñados con un factor K específico al espectro de armónicos del régimen de carga, al que estará sometido.

De lo anterior se concluye que el mantenimiento de los transformadores de distribución, bajo régimen de cargas no lineales, deberá fundamentalmente concentrarse en evaluar los estados térmicos por sobrecalentamiento, así como un seguimiento de la actividad de los gases combustibles, derivados del aceite.

Será oportuno tener una descripción detallada del espectro armónico de la onda de corriente de la carga, con el fin de establecer al salto térmico adecuado entre la temperatura del punto caliente y la ambiental, ya que el mismo está directamente relacionado con la degradación y la vida útil de la aislación.

## 8. Conclusiones

Tendremos:



- Las pérdidas adicionales en un transformador, debido a las componentes armónicas en la onda de corriente, pueden establecerse a partir del conocimiento del espectro de frecuencias de la misma y del valor de dichas pérdidas a frecuencia de red (derivadas del ensayo convencional de cortocircuito).
- El incremento de las pérdidas por efecto pelicular, debido a la existencia de cargas no senoidales, pueden provocar pérdidas significativas en los arrollamientos del transformador y un consecuente aumento de la temperatura en el interior de la máquina.
- Ante cargas con altos contenidos armónicos, se deberá encarar un diseño específico del transformador, ya que su desclase será significativo, en relación a la potencia nominal declarada en la chapa de características.
- Lo anterior determina que, para reducir las pérdidas adicionales, se deberán adoptar acciones que permitan disminuir el espesor de los conductores de los bobinados, en la dirección radial, así como disminuir la altura de los mismos.
- También se podrá recurrir al uso de subconductores. Estos deberán configurarse en transposición, de forma tal que el flujo medio concatenado por todos los subconductores sea el mismo, evitando así el aumento de las pérdidas por efecto pelicular.
- Para los transformadores en aceite, bajo una operación con alto contenido armónico, el diseño se deberá orientar, principalmente, a disminuir las pérdidas adicionales en las partes conductoras, asociadas a los componentes estructurales que conforman la máquina (por ej los bulones de ajuste del núcleo magnético).
- Además, se procede a diseñar el núcleo magnético con una menor densidad de flujo, haciendo uso de aceros eléctricos de distinta clase.
- El espectro armónico de la onda de corriente de la carga, permite determinar el factor K, con el cual poder seleccionar el transformador adecuado para este régimen de operación. Valores típicos de K son: 4, 13, 20 y 40.
- Se deberá implementar un mantenimiento específico sobre los transformadores operando bajo contaminación armónica, prestando especial atención al estado térmico y a la actividad de los gases combustibles disueltos en el aceite. Lo anterior llevará a la necesidad de implementar un control de la calidad de la energía en la planta y tener conocimiento de los parámetros asociados.

Ing. Ernesto E. Zelaya. Artículo Parte 2 escrito para Nova Mirón S.A. 11/09/2018.