



Técnicas de diagnóstico en transformadores a partir de su respuesta en el dominio de la frecuencia. Estado mundial del arte. Parte II

Orestes Hernández
José G. Sánchez

Recibido: Julio del 2006
Aprobado: Septiembre del 2006

Resumen / Abstract

Entre los métodos para el diagnóstico de transformadores de potencia se encuentran los métodos de detección de averías a través del llamado análisis de la respuesta en la frecuencia (FRA). En un artículo anterior, se presentó la primera parte del estudio que se ha realizado del estado mundial del arte sobre las técnicas de diagnóstico de transformadores a partir de su respuesta en el dominio de la frecuencia y empleando la transformada rápida de Fourier (FFT). Esta segunda parte, trata específicamente, sobre los métodos de diagnóstico de transformadores mediante el análisis de la respuesta a un barrido de frecuencia (SFRA), sin la utilización de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Palabras clave: Transformadores, diagnóstico de transformadores

In the methods for the diagnosis of power transformers there are the failure detection methods called frequency response analysis (FRA). In a previous article, the first part of a study that has been carried out about the world art state on the techniques of diagnostic in transformers from its response in the frequency domain and using the fast Fourier transformed (FFT), was presented. This second part, tries specifically about the methods of diagnostic of transformers by means of the sweeping frequency response analysis (SFRA), without using the fast Fourier transformed (FFT).

Key words: Transformers, diagnostic of transformers

INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia se diseñan para resistir tensiones normales de operación, las sobretensiones a las que pueden estar expuestos, los esfuerzos térmicos a que estarán sometidos según sus características de carga y los esfuerzos electrodinámicos debidos a los cortocircuitos externos. En su interior pueden generarse desplazamientos o daños durante el transporte de las máquinas si la estructura mecánica de los devanados y núcleo no están sujetos suficientemente. Cuando un transformador ha sufrido alguna situación anómala, es necesario verificar su estado para estar conscientes de su capacidad residual para resistir los esfuerzos y contingencias a que podrá verse sometido nuevamente.

En la actualidad existen varios métodos de detección de fallas en transformadores de potencia, mediante el análisis de sus respuestas en los dominios del tiempo y la frecuencia, excitados con determinadas señales de entrada, algunas son escalones de pulsos, otras son impulsos y otras, señales de corriente alterna, por ejemplo:

- a) Método de diagnóstico de transformadores por su respuesta a impulsos de alta tensión en el dominio del tiempo (HVI).
- b) Método de diagnóstico de transformadores por su respuesta a impulsos de baja tensión (LVI).
- c) Métodos de diagnóstico de transformadores mediante el análisis de su respuesta en frecuencia (FRA), empleando la transformada rápida de Fourier (FFT).

d) Métodos de diagnóstico de transformadores mediante el análisis de su respuesta en frecuencia (FRA), sin utilizar la transformada rápida de Fourier (FFT).

En este trabajo se analizarán algunos de estos métodos de diagnóstico de fallas cuando la excitación se realiza mediante señales sinusoidales de corriente alterna en un rango de frecuencia y no se emplea la FFT. Estos métodos son los métodos de diagnóstico de transformadores mediante el análisis de su respuesta al barrido de frecuencia (SFRA).

La aplicación de esta técnica necesita una especie de analizador de redes con los siguientes elementos:

1. Un generador de barridos de frecuencias de corriente alterna.
2. Un detector de al menos dos canales con digitalizador de señales.
3. Un software capaz de calcular la relación entre las magnitudes de entrada y salida, las diferencias de fase entre estas y plotear los resultados en función de la frecuencia.
4. Una computadora para procesar todo y una impresora donde imprimir los resultados.

MÉTODO DE SFRA DESARROLLADO EN HYDRO TORONTO

En este método,¹ el generador debe proporcionar una onda sinusoidal cuya frecuencia pueda ser programada desde unos pocos herzt (Hz) hasta 13 MHz. La prueba consiste en inyectar varias señales sinusoidales de tensión, secuencialmente, a distintas frecuencias, por un terminal del transformador (terminal de entrada) y recibir su respuesta por otro terminal (terminal de salida).

Se realizan los registros de las señales incidentes y de las respuestas en el dominio del tiempo para cada frecuencia, se digitalizan, mediante software, se determinan sus relaciones de magnitud (en decibeles, dB) y fase, y se almacenan estos resultados para después plotearlos en función de la frecuencia.

Circuito de medición

Se utilizan cuatro cables coaxiales de 50 Ω , apropiados para minimizar los efectos de reflexión de ondas. Deben tener la longitud adecuada para conectar el analizador de redes a los terminales del transformador en prueba. Uno de estos cables es utilizado para llevar la señal al terminal de entrada del transformador, otros dos cables son usados para censar las señales de tensión y corriente en el propio terminal de entrada y el tercero, para censar la señal de tensión de salida del terminal de salida del transformador.

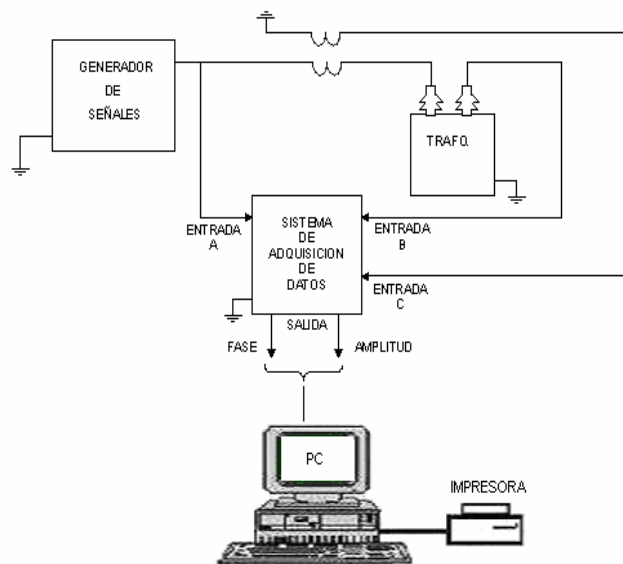
Las ondas de tensión son medidas directamente entre los terminales del transformador y el tanque puesto a tierra. La onda de corriente, se mide empleando un transformador de corriente de alta frecuencia, que debe "machear" con la impedancia característica del cable coaxial.

Las diferencias de amplitudes y fases de las señales medidas, son registradas en el *display* de la computadora o en la impresora. En la figura 1 se muestra el esquema de prueba.

Debe conectarse una resistencia atenuadora de un kilohm ($k\Omega$) entre cada terminal que no se esté usando y el tanque del transformador para ayudar a atenuar las oscilaciones de los devanados no excitados y para minimizar las capacitancias parásitas a los *bushings*. Como protección a las señales de las líneas y la interferencia externa de frecuencia de potencia, la alimentación de todo el sistema debe realizarse a través de un transformador de aislamiento, apantallado. Todos los chasis de los instrumentos, el *shield* de los cables y la pantalla del transformador de aislamiento deben ser conectados a la tierra del tanque del transformador a prueba.

Operación del equipamiento

La frecuencia de la señal de salida debe ser variada a pasos discretos en un rango de un kilohertz a 10 MHz, con un barrido total de 100 s, dividido en 1 000 pasos de 100 ms de duración.



Esquema de prueba de este método de SFRA.

En un primer grupo de mediciones, se registra diferencialmente, la relación entre las amplitudes de la señal de tensión del terminal de salida del transformador y la señal de tensión del terminal de entrada, es decir, V_o/V_i y sus correspondientes diferencias de fase. Después, cambiando la conexión de uno de los cables, se registra la relación entre la tensión y la corriente en el terminal de entrada, es decir, V_i/I_i o la impedancia de entrada junto con la relación de fases. Esto se hace para cada devanado.

Propuesta para la normalización del ensayo

Uno de los objetivos de estos ensayos es reducir al mínimo el número de pruebas, agrupar aquellos resultados que se espera que sean similares por la simetría en las fases del transformador y comparar las respuestas entre las propias fases del equipo, buscando alteraciones que denoten algún problema. Mediante este método se obtienen los siguientes resultados:

- Los ensayos realizados inyectando la señal por algún terminal del devanado de alta tensión (AT) y obteniendo la respuesta en otro terminal del propio devanado (H-H), enfatizan los efectos producidos por los extremos de los devanados de AT.
- Los ensayos realizados inyectando la señal por algún terminal del devanado de baja tensión (BT) y obteniendo la respuesta en otro terminal del propio devanado (X-X), enfatizan los efectos producidos por los extremos de los devanados de BT.
- Los ensayos realizados inyectando la señal por el terminal neutro de un devanado de AT en Y, y obteniendo la respuesta en otro terminal del propio devanado (Ho-H), enfatizan los efectos producidos por el interior del propio devanado de AT.
- Los ensayos realizados inyectando la señal por el terminal neutro de un devanado de BT en Y, y obteniendo la respuesta en otro terminal del propio devanado (Xo-X), enfatizan los efectos producidos por el interior del propio devanado de BT.
- Los ensayos realizados inyectando la señal por el terminal neutro de un devanado de AT en Y, y obteniendo la respuesta en otro terminal del devanado de BT (Ho-X), enfatizan los efectos producidos por el acoplamiento capacitivo entre los devanados de AT y BT.
- Los ensayos realizados inyectando la señal por un terminal del devanado de AT y obteniendo la respuesta por el terminal neutro del devanado de BT en Y (H-Xo), enfatizan también, los efectos producidos por el acoplamiento capacitivo entre los devanados de AT y BT.
- Los ensayos realizados inyectando la señal por un terminal del devanado de AT y obteniendo la respuesta

por un terminal del devanado de BT (H-X), enfatizan también, los efectos producidos por el acoplamiento capacitivo entre los devanados de AT y BT.

- Los ensayos deben realizarse en cada fase por separado, dado que si por ejemplo, la prueba se hace entre H1 y H2, entonces, al menos dos devanados de AT, que están en columnas diferentes, quedarían en serie, lo cual dificulta determinar en cuál de los dos está el supuesto problema. Esto quiere decir, que siempre que se pueda, en devanados en delta, deben abrirse las conexiones, lo cual es una limitante.

MÉTODO DE SFRA DESARROLLADO EN ABB DE ITALIA

Este método de SFRA² fue desarrollado para cubrir esta falta de sensibilidad;^{3,4} está basado en la asunción de que cualquier deformación mecánica puede asociarse con un cambio en el circuito equivalente capacitivo - inductivo y por consiguiente perceptible a través de una función de transformación.

En esencia, el método consiste en aplicar a un terminal de la fase del transformador una señal de baja tensión sinusoidal de un barrido de frecuencias cubriendo un rango entre 10 Hz y 2 MHz, y medir en el otro extremo de la fase, la amplitud de la respuesta con respecto a la señal de la entrada.

El barrido aplicado mantiene el mismo nivel de tensión para cada frecuencia analizada, de manera tal, que se obtengan resultados reproducibles y más exactos. Por tanto, la misma precisión de las mediciones debe obtenerse en el laboratorio y en el campo.

Para este método, que esencialmente es por comparación, es útil tener datos de referencia: en particular sería aconsejable tener las pruebas de referencia del transformador nuevo y comparar las mediciones en las diferentes fases de la vida de la máquina, aunque también se pueden comparar las respuestas de cada fase.

La prueba se realiza considerando dos configuraciones para el devanado que no se está probando:

Devanado abierto y flotando: Con esta configuración, puede apreciarse el efecto del acoplamiento mutuo entre las bobinas de AT y la de BT, y el efecto del circuito magnético.

Devanado en cortocircuito: Con esta configuración, los efectos del acoplamiento mutuo y del circuito magnético no son apreciables y solo será visto el efecto del devanado que se está probando.

La experiencia ha demostrado que en la evaluación de los resultados de este ensayo debe tenerse en cuenta la respuesta obtenida en tres rangos diferentes de frecuencias:

1. Frecuencia menor a 10 kHz.

Para esta, se evidencian los fenómenos relacionados con el núcleo y los circuitos magnéticos del transformador. El análisis en este rango debe tener en cuenta que el magnetismo residual puede modificar ligeramente, la respuesta obtenida de un ensayo a otro. En esta frecuencia se pueden apreciar fallas de bobinas, devanados abiertos y problemas en el circuito magnético.

2. Frecuencia de 5 kHz a 500 kHz.

Para esta se aprecian fenómenos relacionados con el movimiento radial entre los devanados.

3. Frecuencia mayor a 200 kHz.

Para esta, se evidencian deformaciones axiales de cada devanado.

RESULTADOS DEL MÉTODO

Caso 1: Transformador elevador trifásico de 130 MVA 15/400 kV en servicio

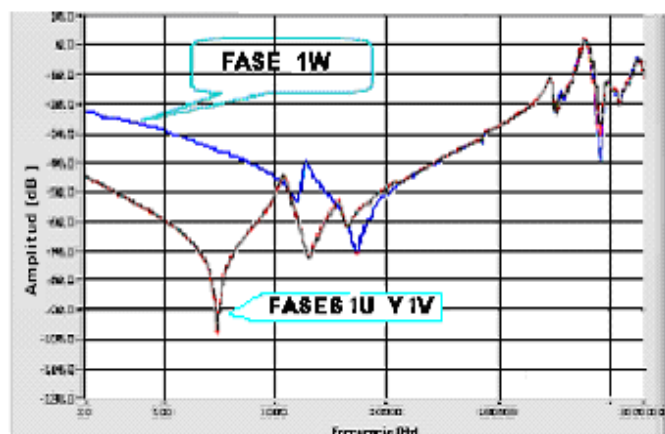
Este transformador había hecho operar la protección del diferencial sin que la protección Buchholtz haya evidenciado algún problema.

Un chequeo adicional en línea del sistema analizador de gases disueltos (DGA), mostró un aumento importante de hidrógeno y la máquina fue sacada de servicio, planteándose una revisión completa de la misma desconectada.

Debido a que no se tenían datos de referencia para este equipo específico, los ensayos de SFRA, se llevaron a cabo mediante comparaciones entre diferentes configuraciones del circuito.

Mediciones llevadas a cabo en los devanados de AT (400 kV) en estrella.

Estos resultados se aprecian en las figuras 2 y 3.



Mediciones en AT con BT abierto y flotando.

2

En la figura 2, puede observarse que la respuesta en frecuencia que corresponde para la fase W, se desvía substancialmente de las respuestas de las otras dos fases, sobre todo, para las frecuencias menores a 20 kHz. La respuesta a frecuencias más altas no se afecta prácticamente, lo que excluye la posibilidad de deformaciones geométricas del devanado. Tales desviaciones grandes en frecuencias bajas, están relacionadas con una variación de la relación de transformación de la fase, posiblemente, debida a un cortocircuito entre espiras del enrollado y(o) a la apertura de alguna parte del propio devanado, afectando el acoplamiento magnético.

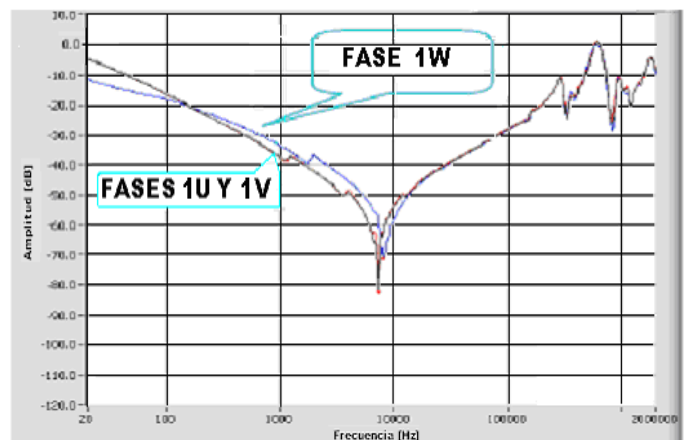
Este mismo fenómeno, también es visible en la figura 3, para bajas frecuencias, sin embargo, la desviaciones son menores, debido a que con el devanado de BT en cortocircuito, el acoplamiento inductivo se afecta mucho, y la sensibilidad para las frecuencias bajas se reduce, además de que, siendo la reactancia de cortocircuito mucho más pequeña que la reactancia de vacío, la señal de respuesta de baja tensión es mucho más atenuada.

Mediciones llevadas a cabo en los devanados de BT (15 kV) en delta

Las mediciones de SFRA se repitieron en los devanados de baja tensión, abriendo la conexión delta y manteniendo, en un caso los devanados de alta tensión abiertos y flotando, y en el otro caso, poniéndolos en cortocircuito.

Estos resultados se aprecian en las figuras 4 y 5.

Las formas de ondas de las respuestas, confirmaron que la avería solo se verificó en la fase W. El ensayo que se llevó a cabo con el devanado de AT en cortocircuito, arrojó una perfecta superposición de todas las ondas, corroborando la idea de un problema en el devanado de AT.



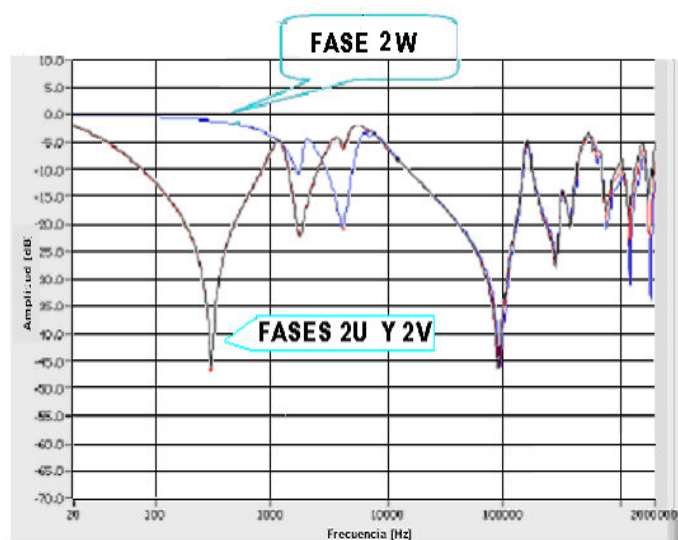
Mediciones en AT con BT en cortocircuito.

3

No fue necesario un procesamiento extenso de los resultados de los ensayos de SFRA, como por ejemplo, la evaluación numérica de las diferencias de las formas de onda entre la fase dañada y las otras fases, etc., porque la avería más importante fue descubierta y era inevitable abrir la máquina y llevar a cabo los trabajos de la reparación necesarios.

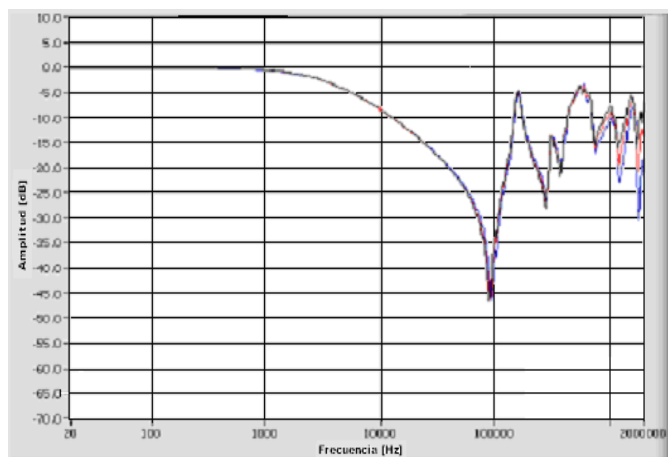
Una serie de pruebas tradicionales se llevó a cabo después del ensayo de SFRA; medición de relación de transformación, resistencia de los devanados e inductancia de dispersión, todas las pruebas confirmaron la hipótesis.

La apertura de la máquina, con la inspección visual de la parte activa mostró un cortocircuito entre dos espiras del devanado de AT de la fase W, con la apertura de parte del propio devanado. No se apreció deformación mecánica en los enrollados.



Mediciones en BT con AT abierto y flotando.

4



Mediciones en BT con AT en cortocircuito.

5

El transformador se reparó in situ, a través del remplazo del devanado de AT de la fase W.

La figura 6 muestra la bobina dañada.

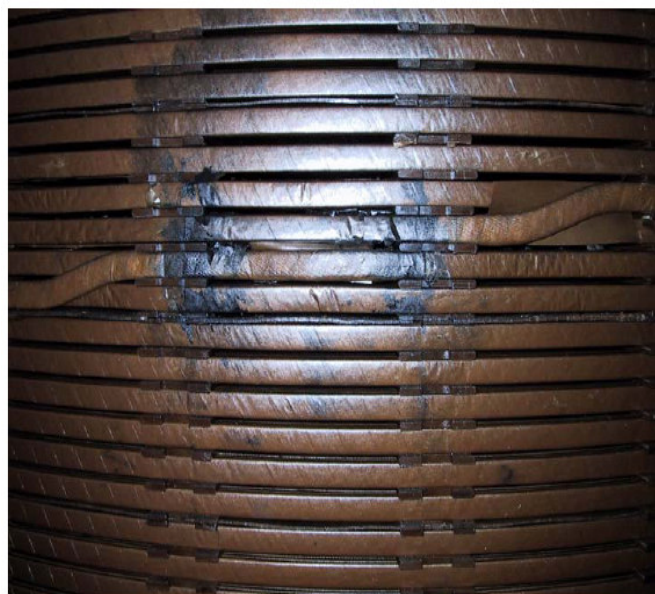
Caso 2: Transformador monofásico de 60/30-30 MVA 400/27.5-27.5 kV, durante una prueba de cortocircuito dinámico

Se trata de un transformador monofásico con dos devanados secundarios (BT1 y BT2) posicionados en columnas separadas que se sometió a la prueba de cortocircuito dinámico y posteriormente se ensayó por el método de SFRA además de la medición de inductancia de dispersión para verificar los efectos de la prueba.

El devanado BT1, presentó síntomas de algún problema después de la aplicación de la última corriente, esto fue confirmado por una variación del 6 % en su inductancia de dispersión medida.

Las figuras 7 y 8 muestran los registros hechos a los devanados BT1 y BT2, respectivamente, superponiendo las respuestas antes y después de ocurrir la falla.

En la figura 9, se observan las dos respuestas del devanado BT2, junto con una curva que representa la diferencia calculada de las mismas. Pueden verse variaciones muy importantes entre las formas de onda del SFRA.

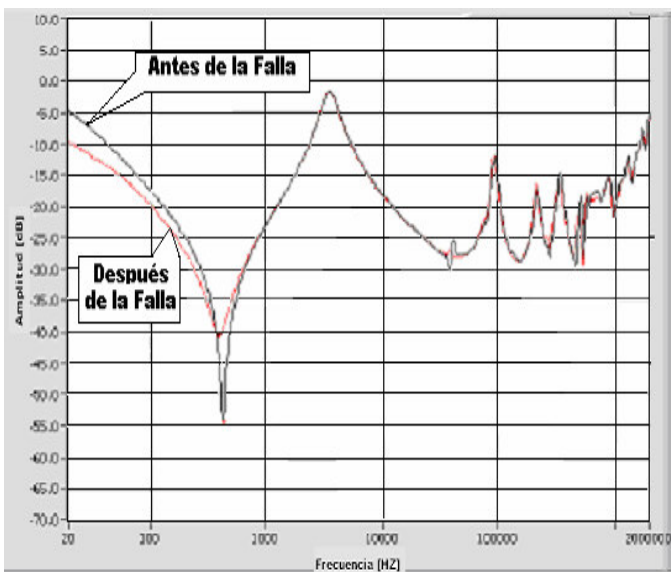


Daño al devanado de AT de la fase W visto después de abrir el transformador.

6

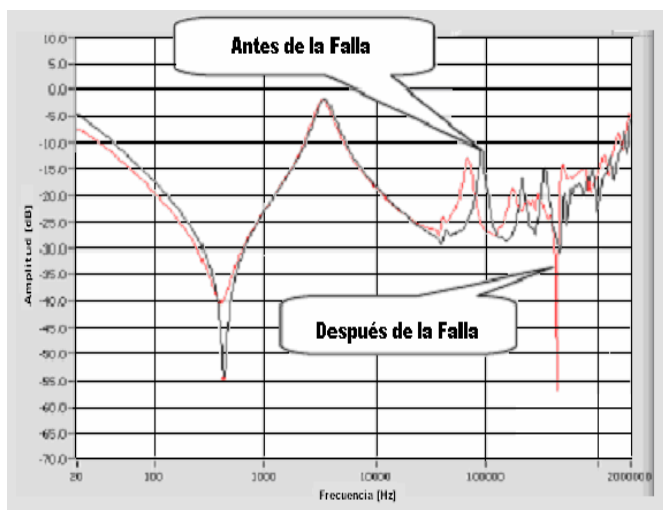
Los valores de las diferencias, expresados en decibeles son pequeños (dentro de 5 dB) para las frecuencias menores a 50 kHz (si no se toma en cuenta el pico negativo que ocurrió a los 700 Hz aproximadamente, asociado con el magnetismo residual del núcleo del transformador). Los valores más notables de diferencias son apreciados para las frecuencias mayores de 50 kHz.

Las diferencias en las formas de ondas están relacionadas con los efectos de los esfuerzos electrodinámicos de la corriente de cortocircuito que ha generado las variaciones geométricas en la estructura interior de la máquina causando una variación en las capacitancias de acoplamiento longitudinal y transversal del transformador.



Mediciones en BT1 con AT abierto y flotando.

7

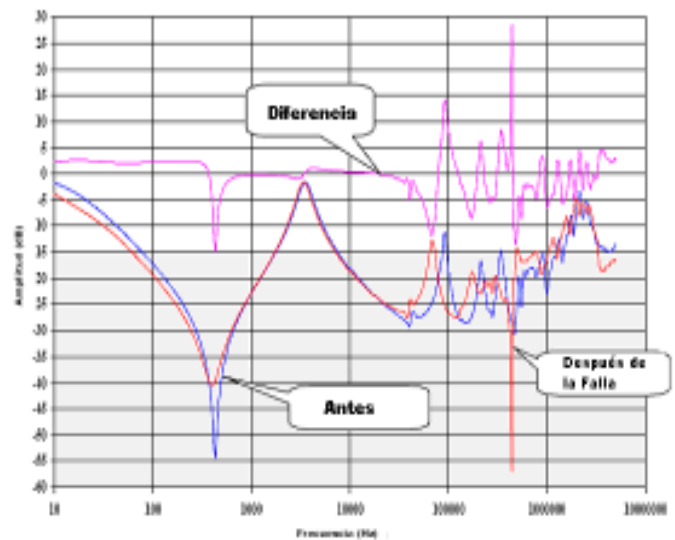


Medición en BT2 con AT abierto y flotando.

8

La máquina se abrió consecuentemente para su inspección interior y los resultados confirmaron la hipótesis: una deformación localizada en el devanado BT2, debido a la pérdida del apoyo axial superior de la bobina, esto ocasionó una deformación longitudinal del devanado, como puede observarse en figura 10.

La figura 10 muestra la gran deformación axial del devanado BT2, lo cual ha generado las variaciones de capacitancias longitudinales en toda la longitud del mismo y variaciones de capacitancias transversales en la parte superior de BT2.



Respuestas del devanado BT2, junto con una curva que representa la diferencia calculada de las mismas.

9



Daño en el devanado BT2.

10

Puede plantearse entonces que amplitudes superiores a 5 dB en los rangos específicos de frecuencia, podrían indicar la presencia de defectos críticos en la máquina. En estos casos, deben hacerse verificaciones usando otros métodos especializados más convencionales, para confirmar el diagnóstico y señalar la situación e importancia de la avería antes de proceder a abrir el equipo.

CONCLUSIONES

1. Estos métodos de SFRA constituyen una herramienta para el diagnóstico en el campo.
2. El equipamiento necesario es comercialmente obtenible. Es portátil y fácil de emplazar y operar para dar resultados repetibles.
3. La señal de entrada es concentrada a una sola frecuencia permitiendo el filtraje de otras señales recibidas para reducir el ruido.
4. Los registros de referencia no son siempre necesarios para identificar ciertos tipos de daños.
5. La información ganada con los métodos de SFRA es muy eficaz; sin embargo, la confirmación de los resultados siempre debe buscarse con otros métodos tradicionales para una valoración más segura.
6. La sensibilidad del SFRA, y la repetitividad de sus resultados, permiten visualizar averías menores.
7. El método de SFRA está basado en un análisis por comparación. La disponibilidad de oscilogramas de referencias para un tipo dado de construcción también podría permitir señalar diferencias en la construcción máquinas del mismo diseño.

REFERENCIAS

1. **Dick, E. P. and C. C. Erven:** "Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No. 6, Nov.-Dic., 1998.
2. **NIGRIS, M. DE et al.:** "Application of Modern Techniques for the Condition Assessment of Power Transformers", *ABB T&D Div. Transformatore, Italy*. 2004.
3. **IEEE Std C57.12.90 - 1993. Part I. IEEE Standard Test Code for Liquid- Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.**
4. **IEEE Std C57.12.90 - 1993. Part II. IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers.**

AUTORES

Orestes Hernández Areu

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Departamento de Alta Tensión, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail: orestesh@electrica.cujae.edu.cu

José G. Sánchez Glean

Ingeniero Electricista, Departamento de Alta Tensión, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail: jguillermo@electrica.cujae.edu.cu

C I E N C I A Y T É C N I C A

REVISTAS



PONEMOS
EN SUS
MANOS
REVISTAS
CIENTÍFICAS



Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría
cujae