



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

Orestes Hernández  
José G. Sánchez

Recibido: Julio del 2006  
Aprobado: Septiembre del 2006

### Resumen / Abstract

Cada día cobra más importancia en el tema de los transformadores de potencia, la necesidad del diagnóstico de los mismos y la detección de averías o anomalías que pudieran surgir durante su explotación. Existen métodos para el diagnóstico de estos equipos, a través del llamado: Análisis de la respuesta en la frecuencia (FRA); en Cuba, aún no se ha introducido ninguna técnica de esta naturaleza, pero se comienzan a investigar sus potencialidades y posibilidades de introducción. Inicialmente se ha realizado un estudio de las fuentes que abordan este tema. En este artículo, se presenta la primera parte de un análisis que se ha realizado del estado mundial del arte sobre las técnicas de diagnóstico en transformadores a partir de su respuesta en el dominio de la frecuencia, específicamente sobre los métodos de diagnóstico de transformadores mediante el análisis de su respuesta en frecuencia, empleando la transformada rápida de fourier (FFT).

Palabras claves: Transformadores, diagnóstico de transformadores

*Every day it gets paid more importance in the topic of the power transformers, the necessity of the diagnosis and the failures or anomalies detection than they could arise during their exploitation. Methods exist for the diagnosis of these equipments, through the called frequency response analysis (FRA); in Cuba, techniques of this nature has not still been introduced, but begins to investigate its potentialities and introduction possibilities. As beginning of this investigation process, has been carried out a study of the sources that approach this topic. In this article, is presented the first part of an analysis that has been carried out about the state of the world art on techniques of diagnostic of transformers from its frequency domain response. This part is about those methods of diagnostic of transformers by means of the analysis of their frequency response, using the fast fourier transformed (FFT).*

*Key words: Transformers, diagnostic of transformers*

### INTRODUCCIÓN

La realización de las pruebas de impulsos y de cortocircuito dinámico a los transformadores de potencia, exigen la aplicación de métodos para determinar si pasó satisfactoriamente o no, el ensayo.

La IEEE Std C57.12.90 - 1993. Part I. IEEE Standard Test Code for Liquid- Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers,<sup>1</sup> establece en sus procedimientos de pruebas de impulsos a transformadores, el registro de todos los oscilogramas

de los impulsos de tensión aplicados (onda reducida, ondas cortadas, frente de onda, si lo requiere y onda plena) y de la corriente circulante a tierra (onda reducida y onda plena). Con toda esta información se propone el siguiente método:

- a) Comparación de los oscilogramas de corriente a tierra.
- b) Comparación de los oscilogramas de impulsos de tensión aplicada.
- c) Medición de los pulsos de tensiones y corrientes inducidos o transferidos a otros devanados.

También para determinar si un transformador pasó, satisfactoriamente o no el ensayo de cortocircuito dinámico, existen varias pruebas de comprobación que pueden dar indicios de la ocurrencia de una anomalía en el equipo.

La *IEEE Std C57.12.90 - 1993. Part II. IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers*,<sup>2</sup> establece un procedimiento para este fin, donde se emplea un método de análisis de la respuesta del transformador a señales de pulsos de baja tensión (LVI).

La aplicación de LVI antes y después de cada cortocircuito durante el ensayo y la comparación de los oscilogramas, se emplea para la detección del movimiento de los devanados de los transformadores.

En la actualidad, existen otros métodos de diagnóstico y detección de fallas en transformadores de potencia, mediante el análisis de sus respuestas en los dominios del tiempo y la frecuencia, excitándolos con determinadas señales de entrada que pueden ser escalones de pulsos, otras son impulsos y otras, señales de corriente alterna, algunos de estos, son:

- a) Métodos de diagnóstico de transformadores mediante el análisis de su respuesta en frecuencia (FRA), empleando la transformada rápida de fourier (FFT).
- b) 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 tratarán algunos de estos métodos de diagnóstico de fallas cuando la excitación se realiza mediante señales de pulsos o impulsos y se emplea la FFT. Tales métodos son los **métodos de diagnóstico de transformadores mediante el análisis de su respuesta en frecuencia (FRA), empleando la transformada rápida de fourier (FFT)**.

### **Método de diagnóstico de transformadores por FRA con pruebas de impulsos de alta tensión (HVIFRA).<sup>3</sup>**

Cuando la onda de tensión es lo único que se considera en la detección de fallas en los devanados, en realidad,

se está aplicando una forma simple de confirmar la existencia de fallas severas, debido a que, solo bajo condiciones de fallas severas, habrán diferencias bien visibles en la forma de onda de la tensión. Sin embargo, si la falla no es tan severa, como entre pocas espiras de un devanado, la forma de onda de tensión, no ofrece virtualmente ninguna indicación de su existencia. Todos los oscilogramas son, esencialmente idénticos, fundamentalmente, cuando se trata de una falla menor.

Debido a este inconveniente, los criterios de pruebas más precisos se basan en la comparación de las formas de ondas de corrientes. Como criterio más aceptado está el mencionado en la referencia 1, pero este método tiene también varias desventajas:

1. Depende de la interpretación visual, es decir, que la sensibilidad del método está limitada por la resolución del registrador en general. Los resultados pueden ser ambiguos para fallas menores que involucren una muy pequeña sección del devanado.

2. La otra desventaja de este método es que la magnetización del núcleo puede dar una falsa alarma dado que el método está basado en la premisa de una variación de la reactancia del enrollado del transformador, como resultado de una falla, pero la reactancia inductiva también cambia con la saturación del circuito magnético.

Estos inconvenientes en las mediciones en el dominio del tiempo llevan a considerar otra forma para la interpretación de estos ensayos, llevando las respuestas al dominio de la frecuencia.

Es decir, si las formas de ondas de corrientes se convierten al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de fourier (FFT), se apreciarán diferencias claras, incluso para los casos vistos anteriormente.

El método está basado en el uso de un digitalizador (tarjeta de adquisición de datos) que suplante la necesidad de interpretación visual de los oscilogramas de la prueba de impulso. La disponibilidad de formas de ondas digitalizadas, permite una rápida comparación automatizada de las respuestas a impulsos y sus características en el dominio de la frecuencia con excelentes resultados, a través del uso de la transformada rápida de fourier (FFT).

La experiencia indica, que aún las averías que involucran una sola espira, pueden ser fácilmente descubiertas mediante este método por distintas vías, es decir, a partir de la parte real o imaginaria de la FFT de la forma de onda de la corriente o a través de la magnitud de la FFT o del ángulo de fase de la FFT.

Dentro de estas vías, el ángulo de la fase de la FFT, parece ser el indicador más preciso. El método también parece apuntar con exactitud, la situación de la falla dentro del devanado del transformador.

Con un software apropiado, se plotean varias magnitudes en dependencia de qué tipo de comparación se requiera, por ejemplo:

- Las formas de onda originales en el dominio del tiempo.
- La parte real de la transformada de la onda original.
- La parte imaginaria de la transformada de la onda original.
- La magnitud de la transformada de la onda original.
- El ángulo de fase de la transformada de la onda original.

Los ploteos de la parte real y la parte imaginaria de la FFT de la corriente, son muy similares para cada medición. Sin embargo, las mediciones que corresponden a circunstancias de fallas distintas, son claramente diferenciables por este método.

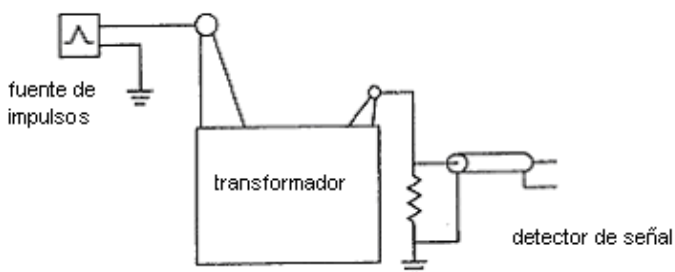
La envolvente de las curvas, obviamente, también varía para cada falla diferente.

El resultado de la FFT es un número complejo que también puede interpretarse en lo referente a su magnitud y ángulo de fase.

### Método de diagnóstico de transformadores por FRA con pruebas de impulsos de baja tensión (LVIFRA)<sup>4</sup>

Ya antes del año 1980, el método de LVI<sup>2</sup> era utilizado para obtener información sobre las condiciones de los transformadores. La figura 1, muestra el esquema simplificado de pruebas para este método.

Para esta prueba, se utiliza un generador de baja tensión repetitivo (recurrente), que suministre un pulso de voltaje a los terminales del equipo y se registra la respuesta del pulso de la corriente a tierra.



Esquema simplificado de pruebas para el método de LVI.

Las variaciones en las capacitancias entre espiras producidas por la deformación del conductor son reflejadas en la forma de onda de la corriente. Midiendo de manera diferencial, las formas de ondas de las corrientes que circulan a tierra, antes y después de cada cortocircuito durante esta prueba, se podrá obtener la mayor sensibilidad para la detección del movimiento del devanado.

Se consideran como resultados aceptables de esta prueba, los siguientes:

- La no ocurrencia de variaciones en los oscilogramas de los LVI durante toda la serie de ensayos.
- Pequeños cambios de amplitud o ángulo de fase después de un cortocircuito, pero que permanecen invariables en las pruebas subsiguientes.
- Pequeñas variaciones de amplitud o ángulo de fase después de un cortocircuito, pero se recupera la forma de onda original en las pruebas subsiguientes.

Los siguientes resultados se consideran que requieren más investigación:

- Pequeñas variaciones de amplitud o ángulo de fase después del primer cortocircuito de máxima amplitud y aumento de estas variaciones en cada prueba subsiguiente.
- Una variación apreciable del oscilograma de LVI durante el curso de la serie de pruebas.

Variaciones grandes en la magnitud de la onda pueden indicar movimiento o deformación radial en el devanado. Los movimientos radiales no afectan la fase o la frecuencia de la señal.

Cambios en la fase de la señal indicarán que una de las columnas se ha movido axialmente. Cuando ocurren grandes movimientos axiales, la fase de la onda puede cambiar hasta en 180°.

La correlación de este tipo de movimientos o variaciones de un registro a otro depende de la sensibilidad del sistema de prueba y si las respuestas de un transformador a otro, varían.

Los principales problemas del LVI radican en la insuficiente estabilidad y reproducibilidad de los resultados porque dependen de la longitud, posición exacta de los cables y la configuración del sistema de medición. También, por lo abrupto del frente de la señal, se necesita un procedimiento de calibración exhaustivo y tomar medidas para evitar los efectos de la interferencia exterior.

Los métodos de FRA, tratan de corregir las desventajas que presenta el método de LVI y aumentan la sensibilidad para la detección de deformaciones o fallas en los devanados.

En el método LVI se recomienda usar una caja de guarda coaxial con el *shield* puesto a tierra sobre cada *bushing* para minimizar el efecto de las capacitancias a las estructuras cercanas puestas a tierra. Los métodos de FRA no necesitan de esta caja de guarda para obtener buena sensibilidad y repetitividad de las mediciones.

Estos métodos, registran en un caso, la señal de tensión aplicada,  $x(t)$  y la señal de tensión de salida,  $y(t)$  y en otro caso, durante el mismo ensayo, la señal de tensión aplicada  $x(t)$  y la señal de corriente de entrada,  $y(t)$ .

A partir de estas señales tomadas en el dominio del tiempo, calculan la función de transferencia  $H(j\omega) = Y(j\omega)/X(j\omega)$  a través de la transformada rápida de fourier (FFT), la función  $H(j\omega)$ , será, en un caso, la relación de la tensión de salida a la tensión de entrada y en el otro caso, será la admitancia de entrada.

#### Realización técnica de los métodos de FRA<sup>4</sup>

Antes de realizar las mediciones por cualquier método de FRA el transformador debe tener todos sus terminales desconectados y aislados de las barras para minimizar los efectos de las capacitancias entre el equipo y las barras, este efecto puede ser variable y desbalanceado en dependencia de la localización relativa del transformador.

El cambiador de derivaciones debe estar en la posición de mayor regulación en todas las fases. Esto permite estandarizar todas las mediciones a las respuestas del devanado completo.

Utilizando las ventajas de los sistemas de procesamientos de señales, se emplea un método mediante el cual, las señales analógicas  $x(t)$  y  $y(t)$  en el dominio del tiempo, son registradas simultáneamente a través un digitalizador acoplado a una computadora personal y convertidos en señales digitales en magnitud y tiempo. Estas señales pudieran ser directamente ploteadas, como en las pruebas de impulsos, o servirán como punto de partida para el procesamiento de señales para calcular las transformadas de las tensiones.

La figura 2 muestra el principio del cálculo de la transformada.

Las cuestiones más importantes que se resuelven con estos métodos, son:

- Los problemas con los terminales de conexión y la interferencia.
- El registro digital sin errores.
- La alta resolución en el espectro de frecuencia.
- La buena reproducibilidad.
- La facilidad de aplicación.

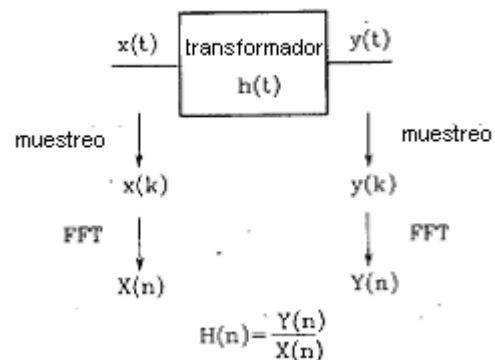
La reproducibilidad de los resultados con el método de LVI, como ya se expresó, depende de la longitud y posición exacta de los cables de medición. En los métodos de FRA, si se utilizan cables de medición de iguales longitudes e impedancias características, sus influencias se cancelan debido a que los efectos son los mismos en ambas señales medidas.

Debido a que el rango de frecuencia de interés es hasta unos pocos megahertz (MHZ), pueden utilizarse cables coaxiales ordinarios.

Existe un método de FRA que emplea como señal de entrada, impulsos de baja tensión y fue desarrollado en el año 1992, en los laboratorios KEMA de Holanda.<sup>5</sup>

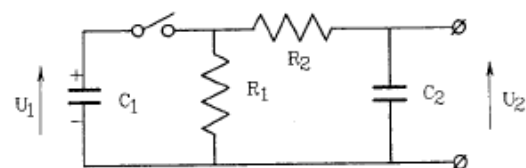
El método utiliza como fuente, un generador de impulsos de baja tensión de doble exponencial del tipo establecido por la norma IEC 60, con posibilidades de varias ondas y un contenido de frecuencia conocido.

En las figuras 3 y 4, se muestran el circuito simplificado del generador y el esquema de prueba para el método de FRA.



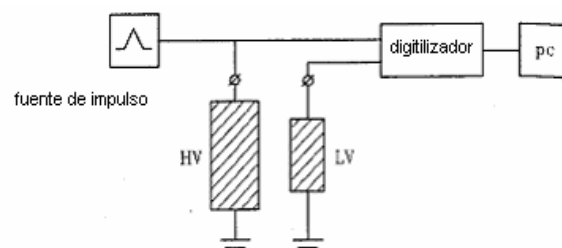
Principio del cálculo de la transformada.

2



Circuito simplificado del generador de impulsos.

3



Esquema de prueba para el método de FRA.

4

En este caso, la función de transferencia es la transformada de Fourier de la respuesta de impulso  $h(t)$  y es (para sistemas lineales) solo dependiente de la forma de la onda de la señal de entrada  $x(t)$ .

La fuente de impulsos debe tener una salida variable continua entre 0 y 300 V, para hacer eficiente el uso de la resolución del digitalizador.

Un pulso de tensión relativamente alta, tiene un efecto positivo sobre la señal con relación a la razón de ruido del digitalizador, aunque haya interferencia, por ejemplo, en mediciones realizadas en subestaciones con transformadores cercanos energizados.

Si se emplea el llamado **impulso de un megahertz**, se puede utilizar una velocidad de muestreo de 2 MHz porque las componentes de frecuencia por encima de un megahertz, no sobrepasan el nivel de ruido producido por digitalizador.

Al conectar el transformador como carga al generador, se va a modificar la forma de onda de impulso, la caída de la señal por debajo del nivel de ruido del digitalizador, puede ocurrir a menores frecuencias, por lo que, incluso, puede utilizarse una velocidad de muestreo menor.

## CONCLUSIONES

1. El método de diagnóstico de transformadores por FRA con pruebas de impulsos de alta tensión (HVIFRA), necesita una base de datos grande de formas de onda de corrientes para que pueda usarse para identificar la condición de falla de una manera oportuna.
2. Son muy útiles las mediciones hechas en la fábrica para establecer esta base de datos.
3. Este método es fácil de aplicar con las técnicas actuales de computación.
4. La FFT es un método muy conocido de procesamiento de señales que puede estar accesible en los utilitarios actuales. Realiza la transformación de cada forma de onda de corriente en menos de 30 s y los resultados son capaces de discriminar una falla que involucre menos del 0,5 % del devanado.
5. El método de diagnóstico de transformadores por FRA con pruebas de impulsos de baja tensión (LVIFRA), tiene una reproducibilidad suficientemente buena para permitir la detección de variaciones en los registros antes y después de la prueba de cortocircuito o ante la eventualidad de movimiento de bobinas por cualquier causa.

6. El tiempo total del cálculo de la admitancia en magnitud y en fase a partir de las señales registradas en el dominio del tiempo, es menos de 60 s con los medios de procesamiento actuales.

## REFERENCIAS

1. *IEEE Std C57.12.90 - 1993. Part I, IEEE Standard Test Code for Liquid- Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.*
2. *IEEE Std C57.12.90 - 1993. Part II, IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers.*
3. Stuffle, Linda R. and R. Eugene Stuffle. "A Computerized Diagnostic Technique Applicable to HV Impulse Testing of Transformers", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, April, 1990.
4. **Richenbacher, A.G.:** *Frequency Domain Analysis of Responses From L.V.I. Testing of Power Transformers.* 43rd Doble Int'l Client Conference, 1996.
5. **Vaessen, P.T.M. and E. Hanique:** "A New Frequency Response Analysis Method for Power Transformers", *Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, Holanda, January, 1992.

## 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