

Estado de la condición mecánica de los transformadores mediante respuesta de frecuencia de barrido

Departamento de Ingeniería
Nova Miron
www.novamiron.com.ar

Introducción

En el presente escrito, se expondrán las bases de aplicación del análisis de la respuesta en frecuencia (FRA, del inglés '*Frequency Response Analysis*') en transformadores de distribución y potencia.

La base de aplicación de esta técnica de diagnóstico se justifica a través de las distintas etapas del ciclo de vida de un transformador, el cual representa uno de los activos más importantes de un sistema de potencia o de producción industrial.

Es por esta razón que, desde el punto de vista de la gestión de activos, se deberá prestar mucha atención y esfuerzos en disminuir los tiempos

necesarios para diagnosticar eventuales estados de fallas y aplicar consecuentemente los correctivos requeridos. La disponibilidad y confiabilidad del transformador serán cruciales en el mantenimiento de la continuidad del suministro de energía a los respectivos consumos.

Todo esto ha motivado la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de diagnóstico, con el fin de establecer con precisión el estado de condición del transformador, optimizando las tareas de mantenimiento y aumentando al mismo tiempo la confiabilidad del sistema en sus funciones.

En la parte que nos ocupa, se expondrán los siguientes ítems:

- » Descripción de la técnica del FRA
- » SFRA en el ciclo de vida de los transformadores
- » Modos de fallas mecánicas en transformadores
- » Detección de los modos de fallas con el SFRA

Descripción de la técnica del FRA

El FRA es una técnica de diagnóstico aplicada principalmente a transformadores de distribución y potencia con el fin de determinar problemas mecánicos internos, en base al análisis de la respuesta en frecuencia.

Destacamos que, si bien la función principal es la de detectar fallas mecánicas, también puede ser utilizada para establecer la condición de fallas de origen eléctrico.



En la práctica existen dos técnicas, a saber:

- » LVI FRA (del inglés, 'Low Voltage Impulse Frequency Response Analysis')
- » SFRA (del inglés, 'Sweep Frequency Response Analysis')

LVI FRA

Esta técnica se basa en aplicar una tensión impulsiva en un terminal de un bobinado del transformador, y medir el pulso de corriente resultante en el otro terminal del bobinado.

El pulso aplicado contiene el rango de frecuencias requeridas para evaluar el estado del bobinado. La información resultante se muestrea, se almacena en el dominio del tiempo, y finalmente se transforma al dominio de la frecuencia para su análisis (aplicación de la transformada rápida de Fourier; FFT, por sus siglas en inglés).

SFRA

En este caso, la técnica se basa en aplicar señales senoidales de igual amplitud (de baja tensión) y de diferentes frecuencias (barrido de frecuencias).

Para cada frecuencia, se mide la señal aplicada a un terminal del bobinado, asignándola como "Referencia", y la señal de "Respuesta", obtenida en el otro terminal del bobinado. La diferencia entre la referencia y la respuesta se almacena en módulo y fase para su posterior análisis.

Estas diferencias corresponden a la variación, tanto en amplitud como de fase, de la señal de salida como consecuencia de la propagación de la señal de entrada en el circuito interno que conforma el bobinado (análogo a una línea de transmisión corta con parámetros distribuidos).

La información se almacena para cada frecuencia de muestreo, por ejemplo, en el dominio de la frecuencia, para su representación en un diagrama de Bode, en magnitud y fase.

Un rango típico de barrido es de veinte hertzios (20 Hz) a dos megahertzios (2 MHz), adquiriendo aproximadamente doscientas muestras por década (escala logarítmica).

Para ambos casos, la impedancia del transformador se mide a distintas frecuencias, considerando que aquella es una función de esta, debido a la constitución interna de la máquina.

Destacamos que, de aquí en más, nuestra exposición se basará en la descripción de la técnica SFRA, ya que es la más ampliamente utilizada en la práctica.

En la figura 1, se muestra un esquema del sistema de medición con su conexionado al transformador a evaluar.

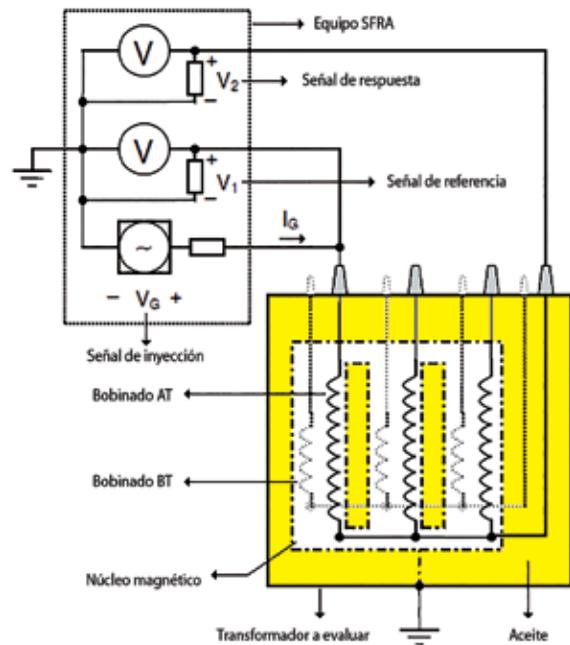


Figura 1

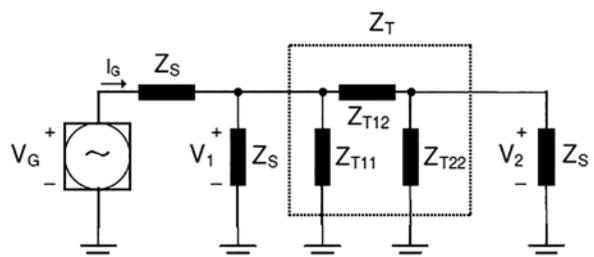


Figura 2

En la figura 2, se observa un circuito equivalente de la tecnología SFRA, aplicada a la medición de los parámetros del transformador (teoría del cuadripolo).

Tendremos:

- » V_G : señal de inyección (amplitud constante de baja tensión y frecuencia variable)
- » V_1 : señal de referencia
- » V_2 : señal de respuesta
- » Z_s : impedancia de medición (por lo general, de cincuenta ohms —50 Ω—)
- » Z_T : impedancia total del transformador
- » Z_{T12} : impedancia del arrollamiento
- » Z_{T11} y Z_{T12} : impedancias a tierra (a través de la aislación del bobinado y los bushings)

Sin entrar en los detalles del modelado interno del transformador, considerando a la frecuencia como variable independiente, podemos decir que la representación se basa en esquemas R-L-C, adoptando una red pasiva-bilateral (modelo más simple para el análisis).

SFRA en el ciclo de vida de los transformadores

Teniendo en cuenta el ciclo de vida de un transformador, podemos decir que la técnica SFRA es de amplio uso en todas sus etapas.

Recordando el esquema del ciclo de vida de un transformador (figura 3), podemos detallar a continuación las diferentes aplicaciones que encuentra esta técnica de diagnóstico durante sus sucesivas etapas.

Veamos a continuación cómo se puede aplicar.

Durante y después de la fabricación (etapa de prepuesta en servicio)

Permite el seguimiento en el proceso de fabricación, en cuanto a la calidad del conformado de las estructuras (arrollamientos, núcleo magnético, sistema de amarres).

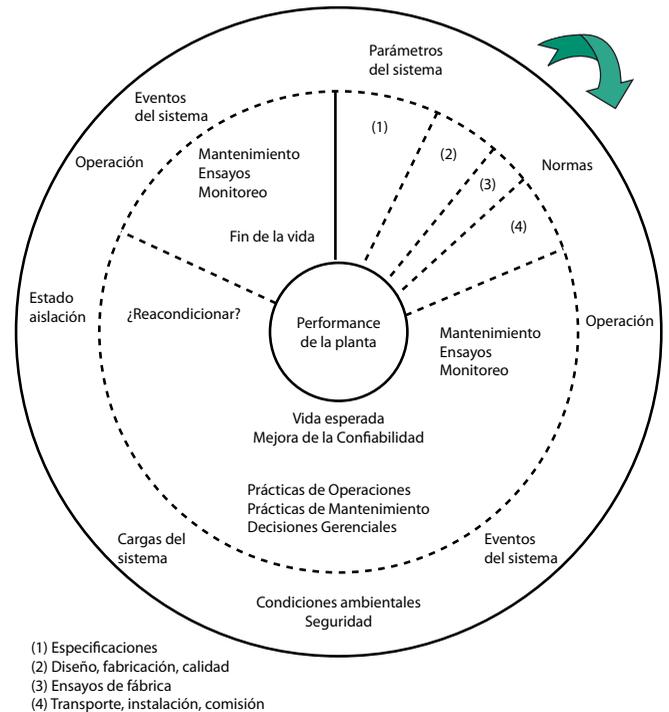


Figura 3

También permitirá establecer el estado de la condición mecánica del transformador, una vez finalizados los ensayos de fábrica, en especial, el de cortocircuito de potencia.

Después del transporte (etapa de prepuesta en servicio)

Recordemos que el transporte es una de las tareas críticas en la etapa de prepuesta en servicio del ciclo de vida, debido a los eventuales impactos que puede sufrir la máquina durante el trayecto hasta el lugar definitivo de emplazamiento.

El FRA permite establecer, luego de finalizado el transporte, si el transformador se encuentra en condiciones satisfactorias en su condición mecánica.

Después del montaje (etapa de prepuesta en servicio)

Finalizado el montaje del transformador en su lugar de emplazamiento definitivo y antes de su puesta en servicio, el FRA es una herramienta fundamental en el comisionamiento. Permite

determinar el estado de la condición mecánica antes de su puesta en servicio, verificando así el correcto montaje de la máquina.

Las características relevadas del FRA en esta etapa serán asignadas de referencia inicial (huella digital) para los sucesivos controles de seguimiento (análisis basado en el tiempo).

También deberá implementarse ante la necesidad de relocalizar el transformador, debido a los movimientos involucrados en esta operación.

Determinación del estado de la condición (etapa de vida esperada y de fin de la vida)

Refiere al seguimiento de rutina del transformador, desde su puesta en servicio hasta que finaliza su vida útil. Los intervalos de aplicación de esta técnica serán función de los estados previos relevados.

Otra aplicación la encontramos cuando requerimos establecer el estado de la condición mecánica al finalizar tareas de mantenimiento correctivo, o bien, ante eventuales resultados no satisfactorios de los ensayos y monitoreos.

Luego de eventos durante el SEP (etapa de vida esperada y de fin de la vida)

Ante eventos de fallas en el SEP, el FRA permitirá evaluar si la máquina ha sufrido daños internos.

Debemos tener muy en cuenta los efectos ocasionados por fallas de cortocircuito, así como las

solicitaciones derivadas de las sobretensiones. (Ver más abajo el ítem “Modos de fallas mecánicas en transformadores”).

También deberá implementarse luego de actividades sísmicas o climáticas de solicitaciones intensas. (Ver más abajo el ítem “Modos de fallas mecánicas en transformadores”).

Modos de fallas mecánicas en transformadores

A continuación, destacaremos, de manera sintética, los distintos modos de fallas mecánicas que pueden ocurrir en un transformador de potencia.

Cortocircuitos externos

- » Hay que tener muy en cuenta que, como consecuencia del aumento de la capacidad de cortocircuito en los sistemas de potencia modernos, se han incrementado al mismo tiempo las solicitaciones en los transformadores ante eventos de cortocircuitos.
- » La corriente de cortocircuito es causa de una fuerza pulsante unidireccional, cuya magnitud es proporcional al cuadrado de la amplitud de la corriente.
- » El efecto inmediato será el de generar una alta sollicitación mecánica sobre los arrollamientos, con los consecuentes daños colaterales.

Sobretensiones y sobrecargas

- » La aplicación en forma reiterada de la corriente de *in-rush*, como por ejemplo cuando existen maniobras frecuentes de arranque y parada, es causa de generación de una sobretensión que puede llevar a la falla.
- » Las sobretensiones de origen atmosférico y de maniobra también son causa del desarrollo de transitorios con niveles altos de tensión que afectan a los arrollamientos.

Transporte

- » Se consideran todos los efectos que se generan durante el transporte del transformador y que



son causa de daños en sus estructuras internas (arrollamientos, núcleo magnético, abrazaderas, etc.). (Ver más arriba, "Después del transporte (etapa de prepuesta en servicio)".

- » Es importante tener en cuenta que, aún con leves desajustes en alguna parte de un arrollamiento, este hecho es factor potencial para el desarrollo de una falla ante un evento a futuro de solicitación por cortocircuito.

Actividad sísmica y eventos climáticos

- » En las regiones propensas a la actividad de movimientos telúricos, será fundamental considerar las eventuales solicitaciones mecánicas que puedan provocar daños internos en el transformador.
- » De igual forma, para aquellos casos en donde se desarrollan eventos climáticos con solicitaciones mecánicas intensas (huracanes/tornados).

Detección de modos de falla con SFRA

Si agrupamos los modos de falla en clases características, podemos determinar cuatro, bien definidas. Estas son:

- » Térmica
- » Dieléctrica
- » Eléctrica
- » Mecánica

Antes de describir las funciones del FRA en la detección de fallas, será importante recordar que, para establecer el estado de la condición general de



un transformador, se requiere de información variada, como ser:

- » Historia clínica
- » Historia operacional
- » Resultados de ensayos y monitoreos
- » Resultados de inspecciones visuales
- » Registros de procesos y eventos

También será oportuno recordar los siguientes principios:

- » Un solo ensayo no es suficiente para determinar el estado del transformador
- » Importancia de disponer de los ensayos de fábrica y de comisionamiento

Retomando la técnica del FRA, esta es útil para detectar desplazamientos y/o deformaciones en los arrollamientos, así como problemas localizados en el núcleo magnético y contactos internos.

Una de las características principales es que, además de detectar desplazamientos radiales de los arrollamientos (igual que con el ensayo de impedancia de cortocircuito), también detecta desplazamientos axiales. En este último caso, el ensayo de impedancia de cortocircuito no es efectivo.

Tendremos las siguientes anomalías, según su origen:

- » Mecánicas: deformaciones en los arrollamientos, desplazamientos de los arrollamientos, desplazamiento del núcleo magnético, ruptura o desajuste de los arrollamientos o estructuras de amarre.
- » Eléctricas: espiras en corto o circuito abierto de arrollamiento, deficientes o faltantes de puestas a tierra, problemas en los contactos del CBC.

Como conclusión, podemos decir que el nivel de la resistencia mecánica del transformador es un parámetro que debe ser evaluado a lo largo del tiempo, ya que su degradación disminuye la capacidad de la máquina a soportar esfuerzos electrodinámicos, así como afectar indirectamente al sistema de aislación (problema mecánico que se deriva en un problema dieléctrico). ■