

Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) para Evaluación de Desplazamientos y Deformaciones de Devanados en Transformadores de Potencia

Ing. Sergio Alejandro Chedid, Artec Ingeniería Mercosur

Resumen

El análisis de la respuesta en frecuencia por el método de barrido en frecuencia SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) es una técnica de diagnóstico para detectar deformaciones y desplazamientos (entre otras fallas eléctricas y mecánicas) de devanados de transformadores de distribución y de potencia. El SFRA como técnica de diagnóstico debe integrar las mediciones off-line y la interpretación de los registros para dar una valoración adecuada de la condición de los devanados.

El objetivo principal es detectar desplazamientos luego de sobre corrientes causadas por fallas pasantes, fallas de CBCs, sincronizaciones fallidas, etc. Otras aplicaciones son la verificación de la condición mecánica luego del transporte y la detección de cualquier problema que produzca cambios en la distribución de inductancia o capacitancia en transformadores (fallas en el núcleo, problemas en la puesta a tierra del núcleo o pantallas, etc.).

La comparación con otras técnicas de diagnóstico muestran que las ventajas principales del FRA son su sensibilidad a una variedad de fallas de arrollamientos y una menor dependencia de mediciones previas de referencia, pero se hace necesaria una metodología de interpretación sistemática y objetiva.

Indice

- Introducción
- Algunas definiciones
- Comportamiento de los componentes básicos
- Tipos de fallas por fuerzas de cortocircuito y deformación de los bobinados
- Algunos tipos de falla que se pueden detectar con FRA
- FRA en la práctica
- Metodología de interpretación
- Guía de lineamiento para interpretación de los resultados de FRA
- Ejemplos de uso de FRA
- Conclusión
- Bibliografía

Introducción

El principal interés de las mediciones FRA en transformadores es la de detectar deformaciones en los bobinados que puedan haber resultado como consecuencia de las fuerzas electromagnéticas que ocurren dentro del transformador como consecuencia de fallas pasantes, fallas en el conmutador bajo carga, fallas de sincronización, etc.

Las deformaciones en los bobinados pueden dar como resultado fallas debido a daños en la aislación entre espiras, resultando en vueltas cortocircuitadas, lo que significa la inmediata finalización de la vida de la máquina.

Se espera que los transformadores sobrevivan un número de cortocircuitos sin fallas, pero una vez que se produce una deformación significativa de los bobinados, la probabilidad de sobrevivir nuevos cortocircuitos se ve reducida fuertemente debido al incremento de las tensiones electromagnéticas. Aún más, cualquier reducción en la sujeción del bobinado debido al achicamiento de la aislación causado por el envejecimiento incrementará la probabilidad de falla.

Otra de las aplicaciones de la técnica de medición de FRA es la de verificar la integridad mecánica de un transformador después del transporte, lo que brinda una herramienta confiable para confirmar que el núcleo y los bobinados no sufrieron ningún daño mecánico debido a las sacudidas durante el transporte.

Debido a que las mediciones de FRA pueden brindar información acerca de la consistencia geométrica de la estructura del bobinado y el núcleo, estos ensayos siendo utilizados como controles para aseguramiento de la calidad.

Algunas definiciones

Análisis de respuesta en frecuencia (FRA – Frequency Response Analysis)

Cualquier medición que muestre la dependencia de la frecuencia de los bobinados de un transformador a una señal aplicada que sea hecha con la intención de detectar deformaciones de los bobinados a través de los efectos resultantes de los cambios en las inductancias y capacitancias distribuidas.

Método de barrido en frecuencia (SFRA – Sweep FRA)

Es la respuesta en frecuencia medida directamente debida a la inyección de una señal de frecuencia variable en uno de los terminales y con la medición de la respuesta en el otro terminal.

Método de tensión de impulso (LVI – Low Voltage Impulse)

Es la respuesta en frecuencia medida indirectamente debida a la inyección de una señal de impulso de una forma particular en un terminal y midiendo la respuesta en el otro terminal, y luego para ver los resultados aplicar la transformación del dominio en el tiempo al dominio de la frecuencia.

Amplitud del FRA

La magnitud de la respuesta relativa a la señal inyectada, se la expresa usualmente en dB calculada como $20 \times \log_{10}(V_{\text{respuesta}} / V_{\text{inyectada}})$

Angulo de fase FRA

Es el desfasaje de ángulo de la respuesta relativa a la de la señal inyectada

Comportamiento de los componentes básicos

Para un mejor entendimiento de la respuesta en frecuencia de las resistencias, inductancias y capacitancias de un transformador, se mostrará a continuación el comportamiento individual simplificado de los mismos.

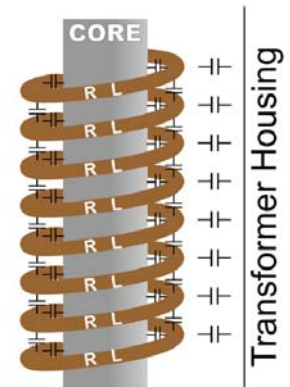


Figura 1 – Componentes distribuidos RLC.

Resistencia

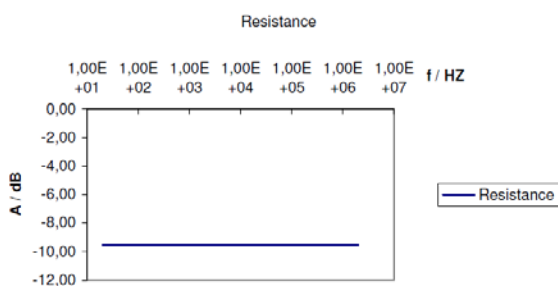


Figura 2 – Gráfico de comportamiento teórico de una resistencia

La señal es atenuada debido a la resistencia pero es independiente de la frecuencia. En un modelo real el resistor mostrará cierta impedancia debido a la construcción física del mismo.

Inductancia

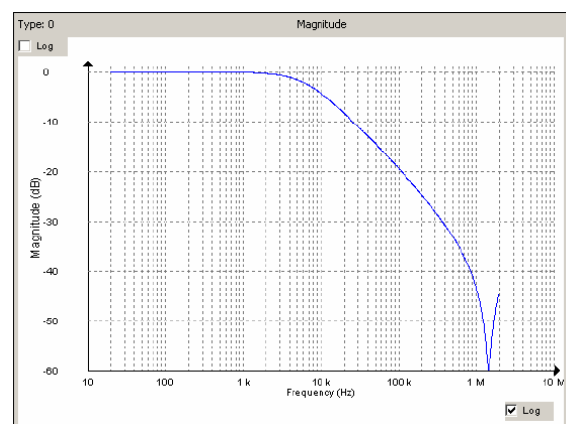
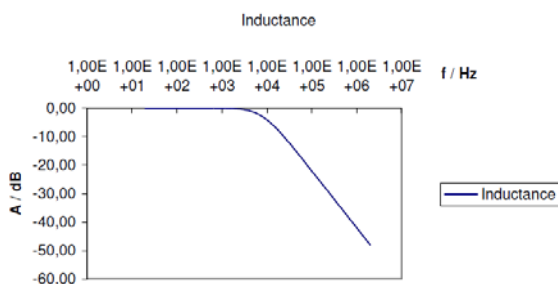


Figura 3 – Gráfico de comportamiento teórico de una inductancia vs comportamiento real.

Aquí se muestra el comportamiento comparado teórico vs real de una inductancia de 1mH. Se observa que no hay atenuación hasta la frecuencia de corte a partir de allí la atenuación empieza a caer. Una diferencia respecto de la simulación teórica es que a una frecuencia de

aproximadamente 1.45 MHz la influencia de la capacitancia distribuida en la bobina causa una reducción en la atenuación.

Capacitor

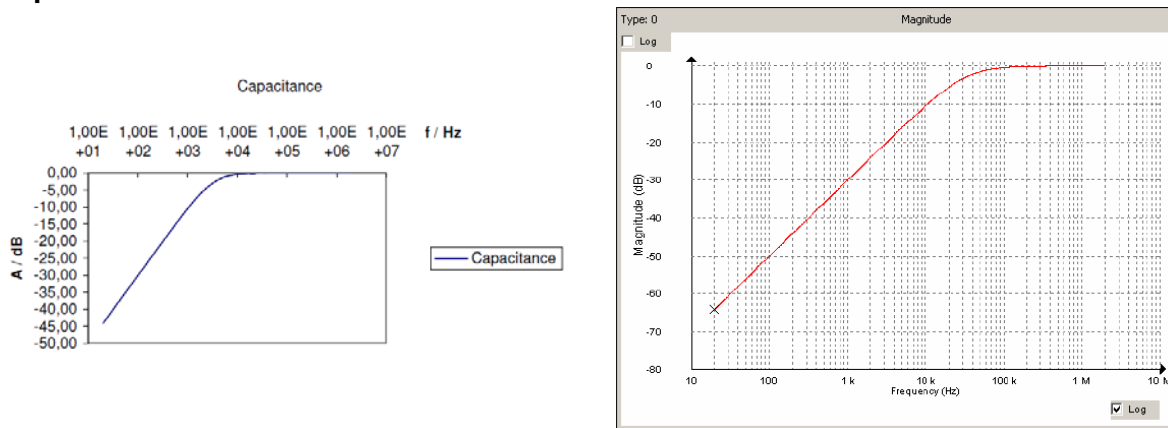


Figura 4 – Gráfico de comportamiento teórico de una capacitancia vs comportamiento real.

Se puede observar que la comparación del comportamiento teórico y real de un capacitor es muy similar.

Comportamiento real de una bobina de 600 espiras con y sin núcleo

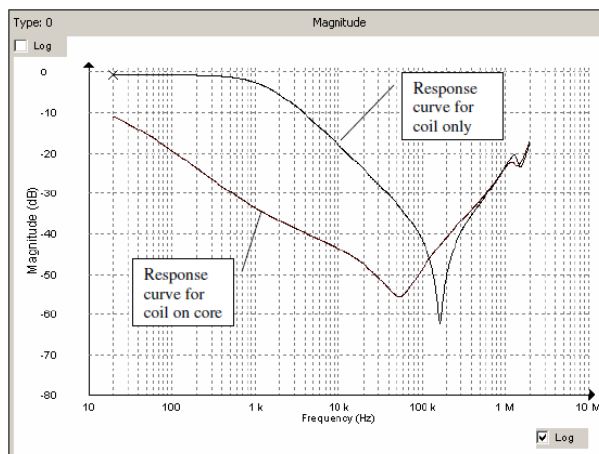


Figura 5 – Gráfico de comportamiento real de una bobina de 600 espiras

La bobina sin el núcleo muestra un comportamiento muy similar a la bobina de 1 mH indicada anteriormente con un primer punto de resonancia a 166 kHz y un segundo punto a 1.55 MHz.

Cuando se inserta el núcleo la inductancia crece fuertemente y se vuelve fuertemente dependiente de la frecuencia. El primer punto de resonancia ocurre ahora a los 53 kHz y el segundo a 1.42 MHz. (2)

Tipos de fallas por fuerzas de cortocircuito y deformación de los bobinados

Se indica un breve resumen de los puntos más relevantes de estos tipos de fallas.

Cuando un transformador está sometido a corto circuitos en la red a la que está conectado, experimenta incrementos considerables en las corrientes que lo atraviesa durante el tiempo de duración de la falla externa. La magnitud de la corriente de falla pasante resultante es usualmente mucho mayor (hasta 20 veces) que aquellas de servicio normal, ya que no están limitadas por la impedancia de la carga y puede que estén solo limitadas por la impedancia del transformador. La amplitud de la primera corriente de pico puede alcanzar casi dos veces el valor de la corriente de corto circuito permanente. El cortocircuito puede devenir por la aparición de defectos en otra parte de la red, o como resultado de un transitorio generado por el sistema o por el medio ambiente, por ej caída de rayos cercanos, que pueden causar una falla de fase a tierra. Los transformadores que están expuestos a sincronizaciones fuera de fase en una red experimentarán corrientes de valor similar o mayores que aquellas de fallas pasantes.

Las fallas pasantes en bobinados de transformadores (tal como las corrientes normales de carga) establecen un campo magnético en el espacio entre bobinas. Este es también llamado flujo de pérdida que junto con el flujo magnetizante normal del núcleo, y la reactancia de pérdida resultante o impedancia de cortocircuito es el principal factor limitante de la corriente de cortocircuito y es uno de los principales parámetros especificados en un transformador.

En la mayor parte del alto axial del bobinado del núcleo de un transformador, la interacción entre el flujo axial de pérdida predominante y las corrientes circulares del bobinado resultan en fuerzas electromagnéticas radiales en los bobinados que tienden a separarlos. Lo más crítico de esto son las fuerzas hacia adentro de los bobinados interiores que dar como resultado dobladuras o abolladuras del bobinado.

En los finales de los bobinados de un transformador con núcleo, el flujo de pérdida ya no es puramente axial sino que margina fuera de ambos bobinados. La interacción entre la componente radial de este campo y las corrientes de las bobinas produce fuerzas electromagnéticas que actúan axialmente y tienen a comprimir los bobinados. Una presión extrema puede producir la inclinación de los conductores individuales en el bobinado. En el diseño y construcción de grandes transformadores, se presta una muy especial atención a para estar seguros que ambos bobinados sean simétricos respecto de sus centros electromagnéticos. Si esto no se hace o hay algún posterior desplazamiento debido a encogimiento de la aislación, por ejemplo, entonces las fuerzas electromagnéticas ya no estarán balanceadas y pueden existir fuerzas axiales netas actuando sobre los bobinados individuales. Ya que los bobinados de los núcleos no se hacen enteramente circulares sino que tiene cierto grado de espiralamiento, entonces también existirán fuerzas de torsión actuando sobre los bobinados que tenderán a ajustarlos. (1)

Entonces como resultado de las fuerzas radiales y axiales actuando sobre los bobinados se pueden ver principalmente los siguientes modos de falla.

Algunos tipos de falla que se pueden detectar con FRA

- Movimiento del núcleo
- Fallas a tierra del núcleo
- Deformación de los bobinados
- Desplazamiento de los bobinados
- Colapso parcial de los bobinados
- "Hoop buckling" o abollamiento del bobinado
- Estructuras rotas
- Espiras en corto o bobinados abiertos

Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) para Evaluación de Desplazamientos y Deformaciones de Devanados en Transformadores de Potencia

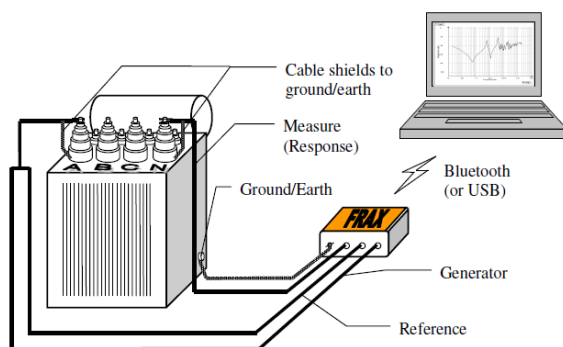
5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay



FRA en la práctica

Conexiones y circuitos de ensayo

Para realizar la medición de FRA, una tensión (sea esta con barrido en frecuencia o con señal de impulso) se inyecta a un terminal del transformador con referencia contra el tanque. La tensión medida en el terminal de entrada se usa como referencia para el cálculo de FRA. Un segundo parámetro (señal de respuesta) es usualmente la tensión tomada en la impedancia medida a través del un segundo terminal del transformador con referencia al tanque. La respuesta en amplitud del FRA es la relación entre la señal de respuesta V_r y la señal de la fuente V_s como una función de la frecuencia (generalmente presentada en dB)



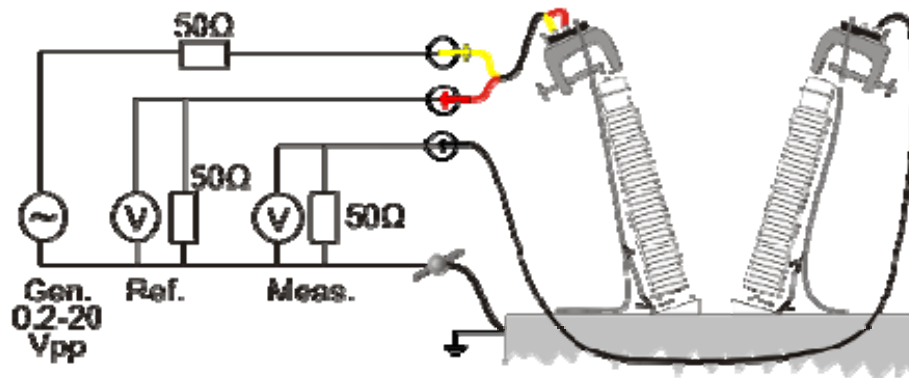


Figura 6, 7 y 8 – Vista esquemática del conexionado y de pinzas para conexionado

A continuación se describe el conexionado estándar para la medición de FRA. El cable coaxial de la inyección de la señal y el de medición de referencia están conectados juntos cerca del punto alto del bushing. Una extensión de cable de puesta a tierra corre a lo largo del cuerpo del bushing hacia abajo hasta la brida para conectar el cable de blindaje al tanque. El mismo principio se aplica al cable de respuesta.

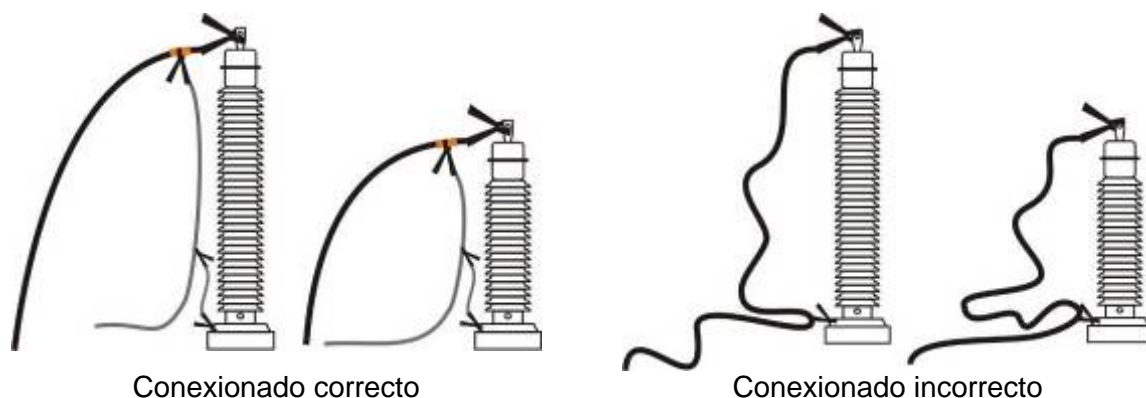


Figura 9 –Conexionados de puesta a tierra

Performance del instrumento

Los trabajos realizados por diversos investigadores permiten establecer las diferencias entre SFRA y LVI e identificar algunas ventajas del SFRA sobre el LVI tales como una mejor relación señal/ruido y repetibilidad. (4)

Las prácticas realizadas por los grupos de trabajo de CIGRE (1) han mostrado que debajo de los 10 kHz el método LVI era incapaz de reproducir la respuesta en baja frecuencia.

También se recomienda instrumentos con un rango de medición de -100 dB a +20dB que sería suficiente para cubrir todos los casos. Notar que esto implica un rango dinámico del instrumento de -120 dB para lograr una buena medición.

Los transformadores pequeños tienen una mayor atenuación a la primera resonancia. El ruido inherente del instrumento es a menudo la fuente de limitación principal, no necesariamente la estática de la subestación.

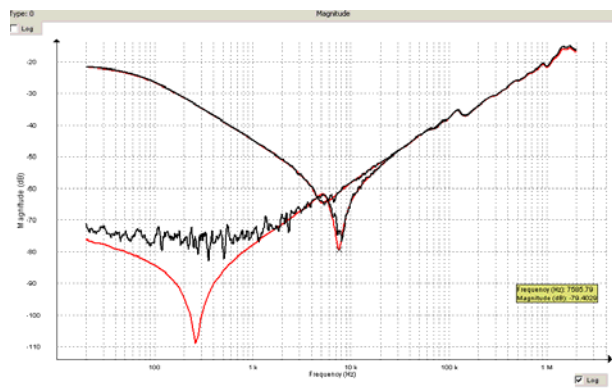


Figura 10 – Ejemplo de una medición con problemas debido al ruido vs otras sin ruido

Principales tipo de ensayo FRA

Ensayo: Final con final (abierto)

En este tipo de ensayo la señal se aplica en una punta del bobinado y la respuesta se mide en la otra punta.

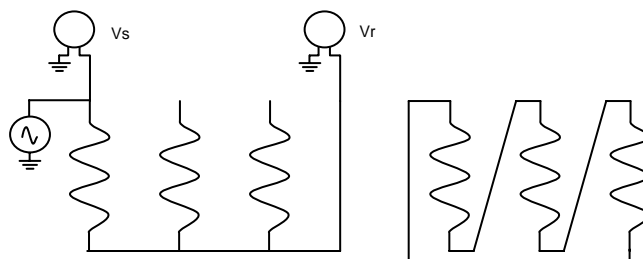


Figura 11 – Conexión final con final (abierto)

Aquí la impedancia de magnetización del transformador es el parámetro principal caracterizando la respuesta en baja frecuencia (debajo del primer punto de resonancia). Es el test más usado por su simplicidad y que permite examinar cada bobinado por separado.

Ensayo: Final con final (cortocircuitado)

Este ensayo es similar a anterior, pero con un bobinado en la misma fase cortocircuitado.

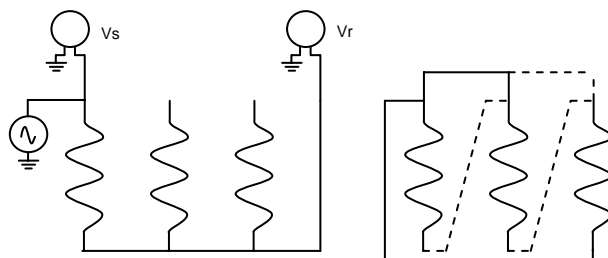


Figura 12 – Conexión final con final (cortocircuitado)

Esta medición permite que la influencia del núcleo se mueva hacia abajo entre 10 y 20 kHz ya que la respuesta en baja frecuencia se caracteriza por la inductancia de pérdidas en vez de la inductancia de magnetización. La respuesta en altas frecuencias es similar a la obtenida con el método anterior.

Este ensayo es de especial interés cuando se quiere obtener información relacionada con la impedancia de pérdidas a baja frecuencia o cuando se quiere resolver dudas acerca del análisis de la influencia del núcleo cuando hay presencia de magnetismo residual.

Ensayo: Capacitivo entre bobinados

La señal se aplica a un extremo de un bobinado y la respuesta se mide en el final de otro bobinado en la misma fase. Por definición, este tipo de ensayo no se puede realizar entre los bobinados serie y comunes de los auto transformadores.

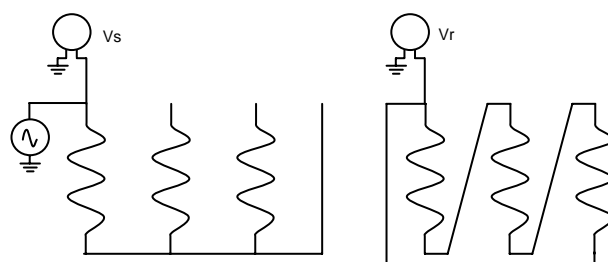


Figura 13 – Conexión capacitiva entre bobinados

La respuesta en esta conexión es dominada en bajas frecuencias por la capacitancia entre bobinados.

Ensayo: Inductivo entre bobinados

La señal se aplica al terminal del lado de alta tensión y la respuesta se mide en el terminal correspondiente en el lado de baja tensión, con la otra punta de ambos bobinados puestos a tierra.

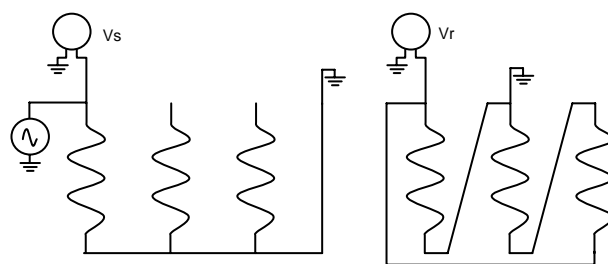


Figura 14 – Conexión inductiva entre bobinados

Metodología de interpretación

FRA es un método comparativo para conocer la condición de los transformadores de potencia.

Para evaluar los resultados de FRA, actualmente se realiza por comparación visual directa o por procesamiento de los datos obtenidos o la utilización de guías de lineamientos generales para la interpretación de los resultados.

En los últimos años se ha avanzado hacia la búsqueda de un método sistematizado para la detección de situaciones de fallas.

Si bien de momento solo existe la norma China DL/T 911-2004 que considera el análisis FRA en deformación de transformadores. (5)

Guía de lineamiento para interpretación de los resultados de FRA

La interpretación de los resultados de FRA conlleva cierta experiencia, pero existen algunos lineamientos y algunas conclusiones generales pueden ser hechas de los resultados conocidos.

En general, las curvas cambiarán de forma y se verán distorsionadas en el rango de las bajas frecuencias (debajo de los 5 kHz) si hay algún problema con el núcleo y en las altas frecuencias (por encima de los 10 kHz si hay problemas en el bobinado). Cambios menores de 3 dB comparados con la línea de base se pueden considerar normales y dentro de la tolerancia.

De 5 Hz a 2 kHz cambios de +/- 3 dB (o más) pueden indicar un bobinado abierto o cortocircuitado, magnetismo residual o movimientos del núcleo.

De 50 Hz a 20 kHz cambios de +/- 3 dB (o más) puede indicar movimiento masivos de un bobinado respecto al otro.

De 500 Hz a 2 MHz cambios de +/- 3 dB (o más) puede indicar deformaciones dentro de un bobinado.

De 25 Hz a 10 MHz cambios de +/- 3 dB (o más) puede indicar problemas con las conexiones de los bobinados y/o del conexionado del cableado de ensayo.

Nótese que hay una gran superposición en las frecuencias, lo que puede indicar más de un diagnóstico. (3)

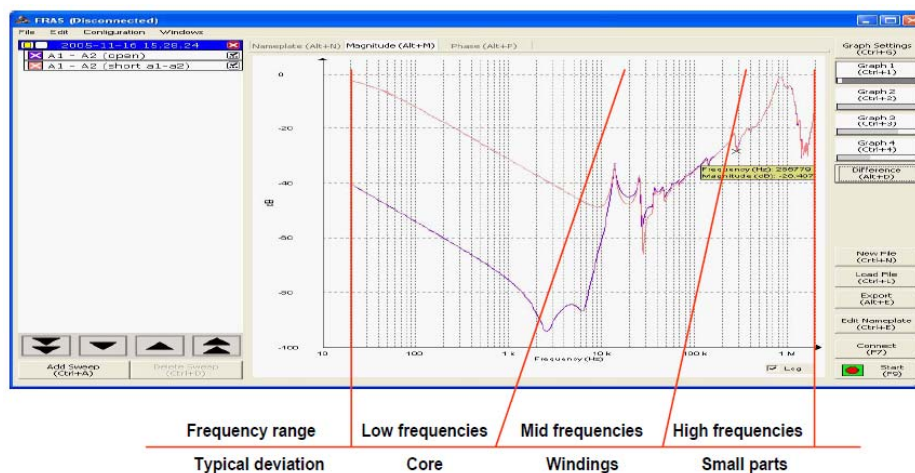


Figura 15 - Este gráfico debe tomarse como una indicación general ya que hay superposición de frecuencias que sugieren más de un diagnóstico.(6)

Una conclusión comúnmente aceptada (conforme la experiencia) es que los desvíos en frecuencia (incluso los más pequeños) entre respuestas comparadas de FRA es un indicador de condiciones serias de falla. Otra conclusión es que diferencias de atenuación menores a 3 dB son normalmente debido a causas poco relevantes y no una indicación de daño serio.

Ejemplos de uso de FRA

Se muestran a continuación algunos ejemplos de casos de daños en transformadores, donde se puede ver la fotografía del daño y el resultado del análisis FRA.

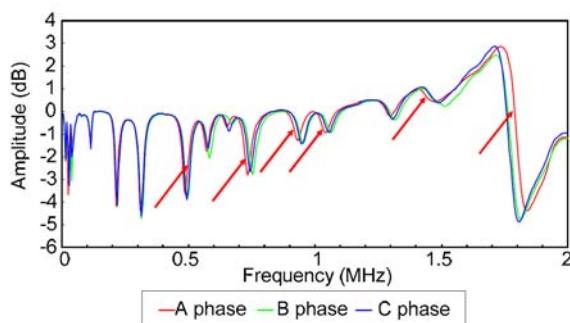
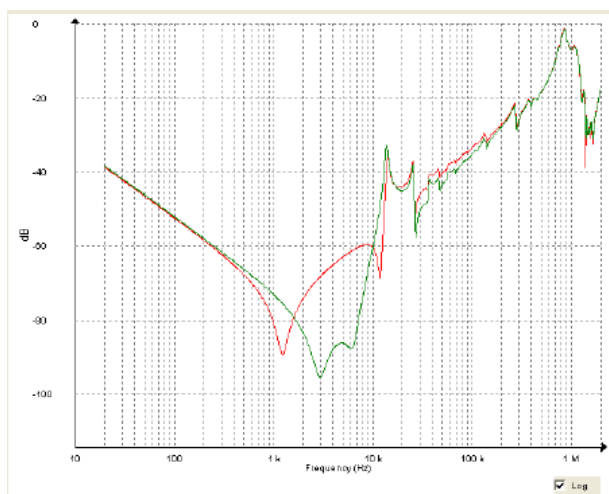


Figura 16 y 17 - Conductores inclinados en la fase A (1)



A la izquierda se muestra dos bobinados de alta tensión de dos transformadores gemelos. En la gráfica verde una medición normal y la gráfica roja muestra la medición con la puesta a tierra del núcleo desconectada.

Figura 18 – Núcleo con puesta a tierra desconectada (6)

Conclusión

La técnica de FRA es una poderosa herramienta para el personal de mantenimiento al momento de realizar un ensayo a un transformador y poder analizar rápidamente daños internos, especialmente aquellos debidos a desplazamientos internos.

También es una herramienta de gran valor para los fabricantes y los usuarios al momento de tener que realizar el transporte del transformador.

Bibliografía

- (1) CIGRE, “342-Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)” Working Group A2.26, April 2008.
- (2) Claes Bergman, “SFRA – An application that creates customer value?”, The Electrical Engineering Program, spring 2006.
- (3) United States Department of Interior Bureau of Reclamation, “Facilities Instructions, Standards, and Techniques”, Volume 3-31, June 2003, p22
- (4) J. Secue, E. Mombello y C.V. Cardozo, “Revisión del análisis de respuesta en frecuencia para evaluación de desplazamientos y deformaciones de devanados en transformadores de potencia”, IEEE Latin American Transactions Vol 5, N°5, September 2007
- (5) The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China, “DL/T 911-2004. Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers”, Diciembre 2004
- (6) Pax Diagnostics Application Guide, “FRA on Power transformers”, December 2005

Acerca del Autor

Ing. Sergio Alejandro Chedid

Graduado como Ingeniero Electricista de la Universidad de Buenos Aires.

Postgrado con grado de Maestría en economía del Instituto Torcuato Di Tella.

Es docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.

Se desempeña actualmente en la firma ARTEC INGENIERÍA y es responsable de la línea de productos PAX-Megger. Anteriormente trabajó en las empresas TRANSENER y EDESUR.

Email: sc@artecing.com.ar