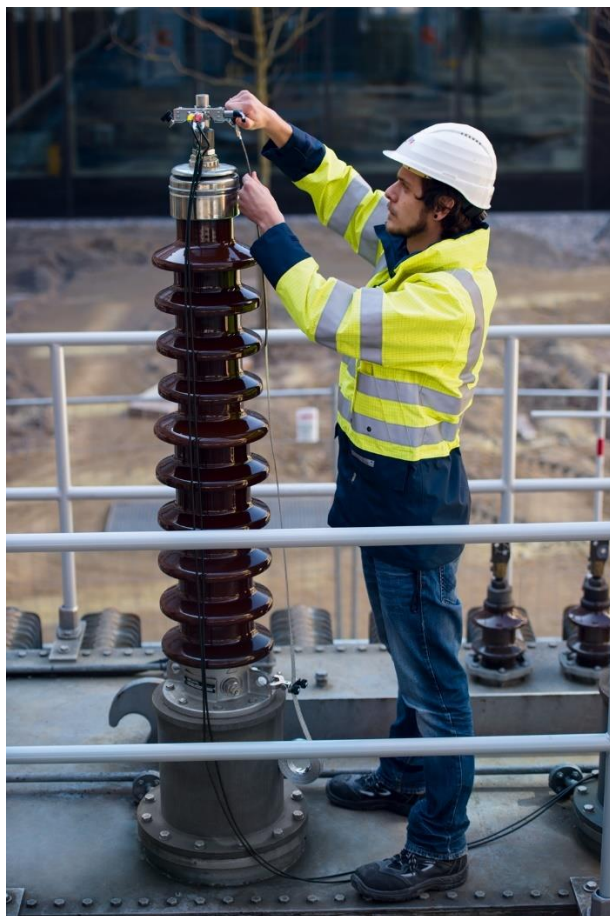




Mediciones confiables y reproducibles de la respuesta en frecuencia de transformadores de potencia

Prof. Dr. Stephanie Uhrig, Universidad de Ciencias Aplicadas de Múnich
Michael Rädler, OMICRON electronics GmbH

Resumen

El análisis de respuesta en frecuencia de barrido (SFRA) se ha convertido en un método estándar para evaluar la integridad mecánica y eléctrica de la parte activa del transformador de potencia. Ofrece una sensibilidad muy alta para evaluar posibles daños después del transporte o para la resolución de problemas después de un evento específico, como una falla cercana con altas fuerzas de cortocircuito. Sin embargo, los usuarios a menudo tienen dificultades para conseguir una alta reproducibilidad, lo que es esencial para una evaluación confiable del estado. Las desviaciones, causadas por problemas de reproducibilidad, pueden dar lugar a interpretaciones erróneas, inspecciones innecesarias o actividades de mantenimiento costosas. Este documento se centra en las mejores prácticas para realizar mediciones SFRA altamente repetibles y reproducibles.

1 Introducción

El método de análisis de respuesta en frecuencia de barrido (SFRA, siglas en inglés de Sweep Frequency Response Analysis) se introdujo para verificar la integridad de la parte activa de un transformador de potencia. Después de la fabricación, los transformadores de potencia se transportan al lugar de instalación, a menudo a largas distancias, utilizando diferentes tipos de transporte, como barco, tren o camión. Tanto durante el transporte como durante la carga de un vehículo a otro, el transformador puede verse sometido a golpes mecánicos. También puede recibir estos golpes debido a terremotos o impactos mecánicos causados por las fuerzas de cortocircuito después de una falla. Todos estos golpes pueden provocar una deformación o un movimiento parcial de la parte activa. Las mediciones de diagnóstico comunes, tales como la relación de transformación, incluidas las corrientes de excitación, la impedancia de cortocircuito a la frecuencia nominal y la respuesta en frecuencia de las pérdidas por dispersión (FRSL), pueden tener desventajas en cuanto a su sensibilidad para detectar y probar las deformaciones mecánicas. Por ejemplo, el pandeo de un devanado no suele influir en las mediciones de la relación o de la resistencia del aislamiento y es difícil de detectar en un cambio de capacitancia. En comparación con dichas mediciones, el SFRA es el método más sensible para una evaluación confiable del núcleo y del devanado [1]. Este documento describe varias de las mejores prácticas para realizar mediciones SFRA con el fin de garantizar resultados de prueba altamente repetibles y reproducibles.

2 Fundamentos del método SFRA

El método SFRA comprende una medición de respuesta en frecuencia altamente repetible y reproducible en un transformador de potencia y la posterior comparación con una huella existente, también llamada medición de referencia [3], [4]. En principio, se utilizan comúnmente tres métodos para evaluar los trazos de SFRA medidos:

- Basado en el tiempo (los resultados actuales del SFRA se comparan con los resultados anteriores de la misma unidad)
- Basado en la construcción (el SFRA de un transformador se compara con el de otro transformador del mismo diseño)
- Basado en la fase (los resultados del SFRA de una fase se comparan con los otros trazos de la misma unidad)

El método preferido es la comparación basada en el tiempo. Sin embargo, la medición de la huella o de referencia no está disponible en la mayoría de los casos. Sin embargo, mediante una simple comparación de los gráficos SFRA de las fases o mediante una comparación basada en el tipo, se puede lograr una evaluación satisfactoria de los resultados. Incluso si se dispone de una huella del transformador, la experiencia ha demostrado que la comparación debe realizarse con cuidado, ya que en algunos casos las desviaciones observadas no se deben a deformaciones, sino a mediciones en diferentes condiciones o a errores de medición [8]. Para superar estos factores engañosos, en el presente documento se propone el concepto de comparación exhaustiva basada en el tiempo.

2.1 Medición de respuesta en frecuencia

La parte activa de un transformador de potencia, compuesta por el devanado, el núcleo, el aislamiento y los cables de conexión, forma una red eléctrica compleja como se indica en la Figura 1. Tal red tiene características únicas que pueden visualizarse por la respuesta en frecuencia: Se aplica una señal de baja

tensión sinusoidal de frecuencia variable de, por ejemplo, 10 V, a un terminal y la respuesta (U2) se mide en otro terminal (Figura 2). Para medir la amplitud, fase y frecuencia de la señal inyectada, se conecta un canal de medición de referencia (U1) al mismo punto de inyección que la fuente [2]. La respuesta en frecuencia consiste en la amplitud, relación y diferencia de fase entre ambos terminales.

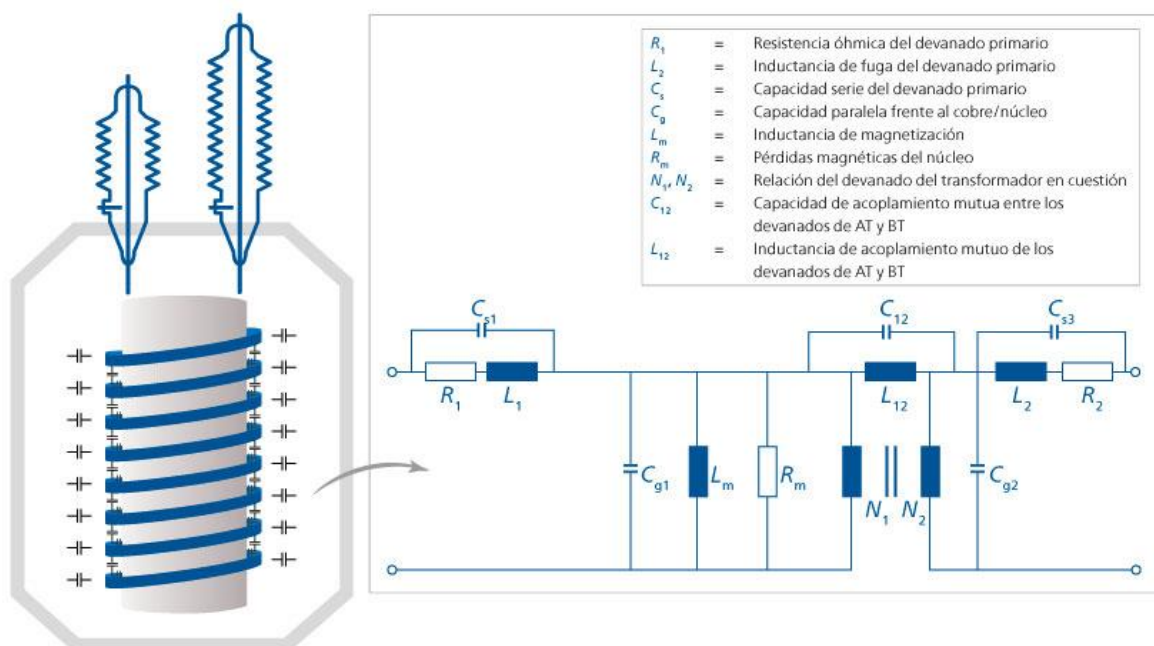


Figura 1: Circuito equivalente R-L-C simplificado de un transformador de potencia

La respuesta en frecuencia puede medirse de diferentes maneras para obtener más información y poder realizar una evaluación más sofisticada. El planteamiento más común es la medición en circuito abierto. De este modo, la respuesta en frecuencia se mide entre dos terminales del mismo nivel de tensión, dejando todos los demás terminales abiertos. Al cortocircuitar los terminales del otro nivel de tensión (por ejemplo, el devanado de baja tensión al medir los devanados de alta tensión), se realiza una medición en cortocircuito. Una medición capacitiva entre devanados describe una prueba entre dos devanados en la misma columna del núcleo (por ejemplo, el devanado de alta y baja tensión), mientras todos los demás terminales están abiertos. También se realiza una medición inductiva entre dos devanados en la misma columna de núcleo, mientras que los terminales de medición se instalan en cada terminal de devanado y el otro extremo del devanado se conecta a tierra.

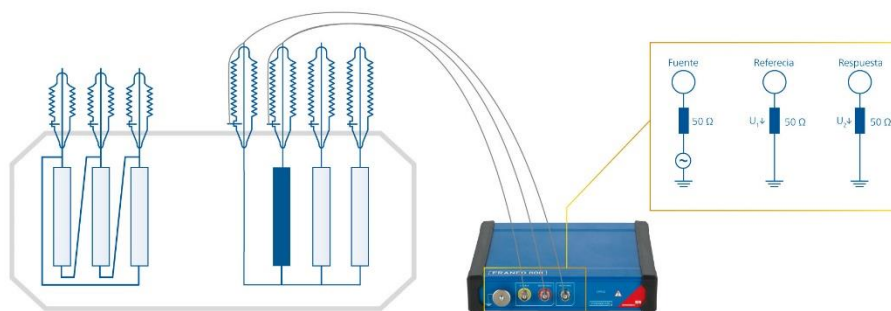


Figura 2: Configuración típica de un análisis de respuesta en frecuencia de barrido

2.2 Métodos de análisis para mediciones SFRA

Dependiendo de sus principales influencias, los diferentes modos de falla se mostrarán más fuertes en diferentes rangos de frecuencia. Por ejemplo, los fenómenos del núcleo influirán en la región de baja frecuencia, mientras que los problemas de conexión lo harán en el rango de muy alta frecuencia por encima de 1 MHz [1]. La experiencia demuestra que los problemas de configuración, tales como no seguir el concepto del trenzado más corto, pueden influir en la respuesta en frecuencia incluso a 500 kHz. Sin embargo, es difícil facilitar una tabla general que muestre la relación entre el rango de frecuencia y las características del transformador, ya que hay demasiados factores que influyen en el rango de frecuencia (por ejemplo, la potencia nominal MVA, el tipo de devanado, el nivel de tensión, etc.). Las referencias básicas se encuentran en el folleto de CIGRE. Se pueden utilizar diferentes herramientas de análisis basadas en índices matemáticos [5] o cambios característicos dentro de las curvas medidas [6].

Para cada análisis, es necesario realizar una medición de la huella o línea de referencia. Si es posible, siempre se debe hacer una comparación con una medición previa del mismo transformador usando la misma configuración [7], lo que llamamos una comparación basada en el tiempo. Una medición de referencia de este tipo puede proceder, por ejemplo, de pruebas de puesta en servicio o pruebas exhaustivas realizadas en sitio. Alternativamente, si no se dispone de una medición de referencia de este transformador, la respuesta en frecuencia puede compararse con un activo gemelo. Los activos gemelos suelen tener una respuesta en frecuencia muy similar, pero no idéntica, como se muestra en la Figura 3. Por lo tanto, las pequeñas desviaciones son aceptables y no necesariamente indican un problema.

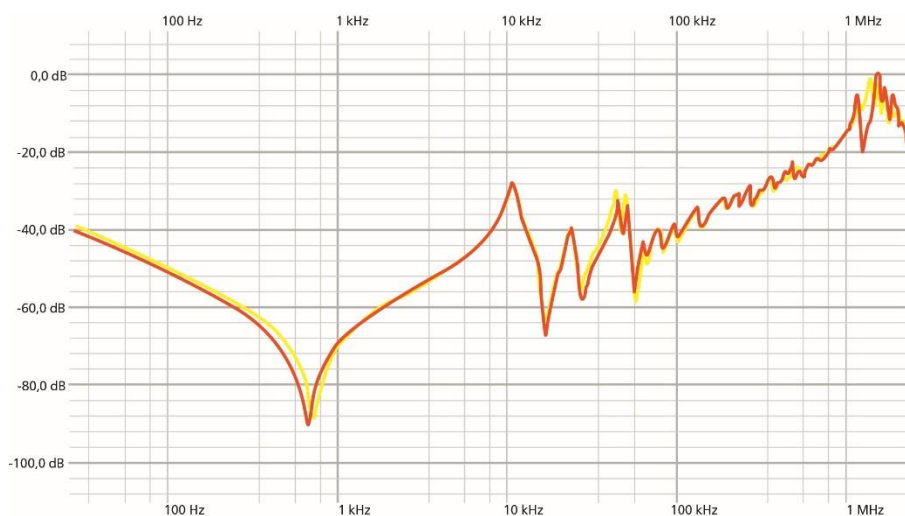


Figura 3: Respuesta en frecuencia medida en una prueba de circuito abierto en transformadores gemelos (devanado de discos intercalados de 200 MVA, 230 kV).

En los casos en que no se disponga de ningún trazo de un activo gemelo, podrían aplicarse comparaciones de fase a fase. Una buena comparación sólo es posible en el caso de un diseño simétrico, que no se da exactamente en los diseños más comunes. Incluso las mayores desviaciones pueden ser causadas por diferencias constructivas entre fases. Por lo tanto, las comparaciones de fase a fase requieren la mayor experiencia. Típicamente, la fase central incluye la mayor desviación, mientras que las otras dos fases se superponen con una similitud razonable. Las principales desviaciones entre la fase central y las fases exteriores se suelen encontrar a frecuencias más bajas, que se ven afectadas principalmente por el núcleo debido a las diferentes trayectorias de flujo.



Figura 4: Comparación de los trazos de respuesta en frecuencia medidos en tres fases del mismo transformador (devanado de discos intercalados de 200 MVA, 230 kV)

3 Importancia de la técnica de conexión

El SFRA es un método muy sensible utilizado para detectar incluso los cambios más pequeños dentro de la red eléctrica de un transformador de potencia. La ventaja de ser altamente sensible a veces puede ser una desventaja en términos de repetibilidad y sensibilidad al ruido. Por lo tanto, la técnica de conexión utilizada es esencial para garantizar un alto grado de reproducibilidad, especialmente en el rango de altas frecuencias, por ejemplo, superiores a 500 kHz [1], [9].

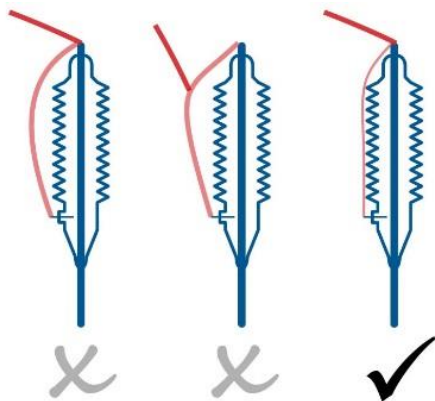


Figura 5: Esquema de la configuración recomendada según IEC 60076-18



Figura 6: Ejemplo del concepto de conexión del trenzado más corto: los cables de medición (negros) se conectan al terminal de la borna y el trenzado de puesta a tierra se conecta a la brida del terminal y de la borna.

En la norma IEC 60076-18 se describe detalladamente el procedimiento recomendado para una configuración de medición adecuada y reproducible (Figura 5). Se recomienda utilizar cables coaxiales de doble apantallamiento que se conectan al terminal de la borna. A partir de aquí, debe establecerse una conexión a la brida o tanque con una tierra de baja inductancia, preferiblemente usando un trenzado de aluminio plano y ancho en lugar de un simple cable. Como se explica en [9], los trenzados tienen una gran superficie, una baja inductancia, y la malla reduce el considerable efecto pelicular por encima de 80 kHz. En consecuencia, la estructura del trenzado ofrece una mejor conductividad para altas frecuencias, resultando en una supresión de ruido más eficiente hacia tierra en comparación con el uso de simples cables.

La longitud de la conexión a tierra influye en la respuesta en frecuencia. Para lograr una alta reproducibilidad, se recomienda utilizar la longitud más corta posible tirando del trenzado firmemente a lo largo del cuerpo de la borna, tal como se muestra en la Figura 6.

Además de la propia técnica de conexión, es importante establecer un contacto eléctrico adecuado respectivamente entre el terminal, la brida y la pinza de medición utilizada. La limpieza del terminal y la eliminación de las capas de laca ayudan a reducir la resistencia de contacto. Los modernos dispositivos SFRA disponen de una comprobación del bucle de tierra para asegurar conexiones adecuadas con una baja resistencia de contacto a tierra.

4 Factores que influyen en la respuesta dieléctrica

Como se ha tratado anteriormente, es esencial para un método comparativo como el SFRA, ofrecer la mayor confianza para excluir los factores influyentes relacionados con la configuración de la medición o los factores externos que se describirán en el siguiente capítulo. En aras de la exhaustividad, cabe mencionar que para los casos de uso descritos se utilizó el sistema de prueba SFRA OMICRON FRANEO 800 y la medición de circuito abierto de extremo a extremo se llevó a cabo en varios activos.

4.1 Factores relacionados con la configuración de la medición

Cortocircuito y puesta a tierra de devanados terciarios y terminales de neutro separados

El tipo de medición "circuito abierto" o "cortocircuito" define si los terminales del nivel de tensión opuesto deben ser cortocircuitados o no. Esto significa que, cuando se mide el lado de alta tensión, se define si conviene o no cortocircuitar los terminales de baja tensión.

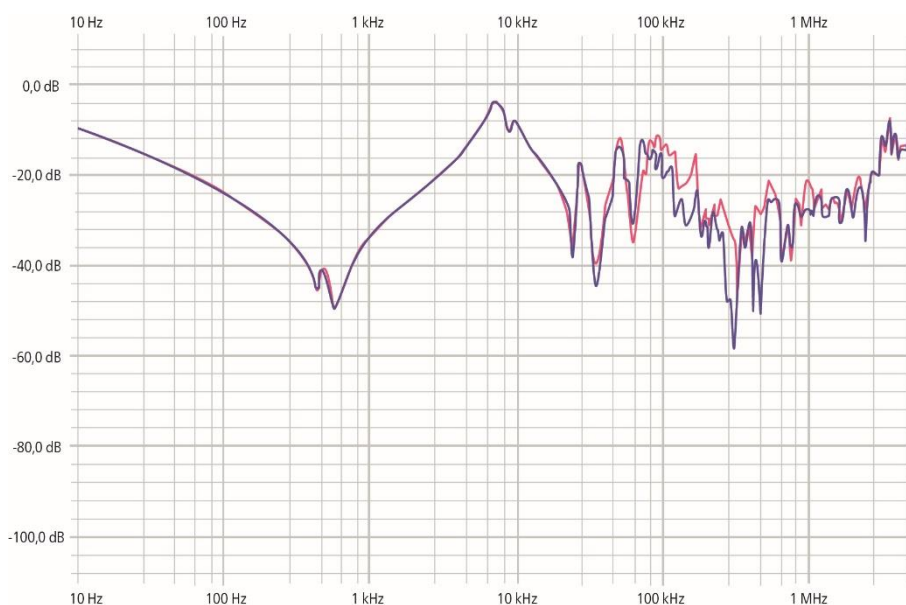


Figura 7: Influencia del terciario conectado a tierra (azul) y no conectado a tierra (rojo) en las curvas de circuito abierto de BT medidas

El tipo de medición no facilita información sobre cómo manejar los terminales neutros separados o devanados terciarios que influyen significativamente en la respuesta en frecuencia medida. Incluye devanados terciarios flotantes, cerrados o puestos a tierra. La Figura 7 muestra las desviaciones entre dos mediciones en circuito abierto realizadas en los devanados de baja tensión con devanados terciarios con y sin conexión a tierra. Se pueden observar varias desviaciones, especialmente dentro del área de acoplamiento mutuo (interacción de los devanados) en la respuesta en frecuencia medida. En general, la respuesta en frecuencia para la inductancia de magnetización y la capacitancia paralela no se ven afectadas. Por lo tanto, se recomienda dejar todos los demás terminales abiertos y sin conexión a tierra como se recomienda en la norma IEEE C57.149 [3].

Dirección de la medición

La dirección de medición, es decir, en el caso de transformadores de potencia conectados en estrella, de fase a neutro o de neutro a fase, influye significativamente en el comportamiento de alta frecuencia, como

se muestra, por ejemplo, en la Figura 8. Si no se especifica lo contrario, se sugiere conectar la fuente y el cable de referencia al terminal de fase y el cable de respuesta al terminal de neutro [3], [4].

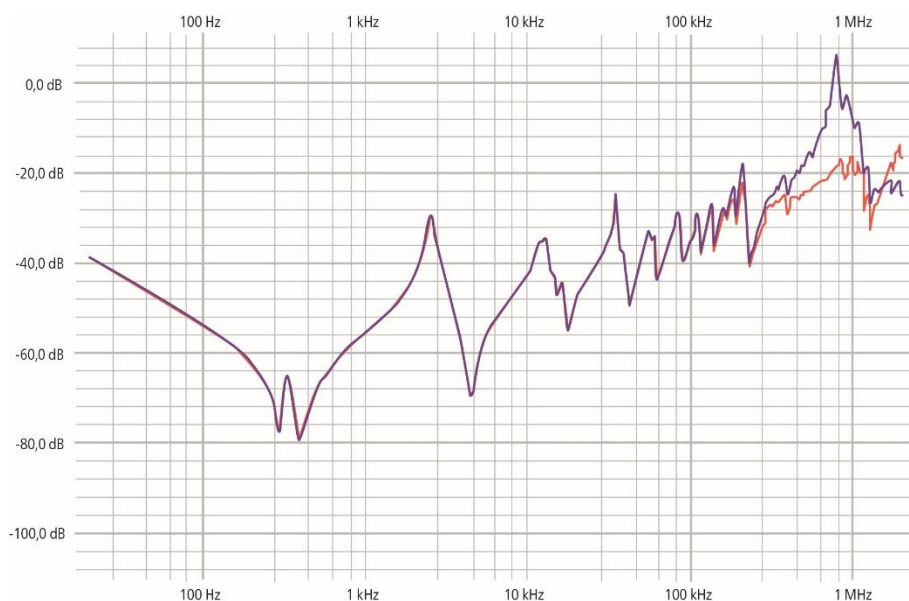


Figura 8: Dirección de medición de la influencia, fuente a fase (azul) o fuente a neutro (rojo)

Tensión de salida

En el rango de baja frecuencia, la respuesta en frecuencia es dominada por la inductancia de magnetización del núcleo y por lo tanto, depende de la tensión de salida, tal como se muestra en la Figura 9. La curva residual no se ve afectada por la tensión de salida, ya que los devanados del transformador pueden considerarse como un sistema lineal que, en principio, no se ve afectado por la tensión de salida.

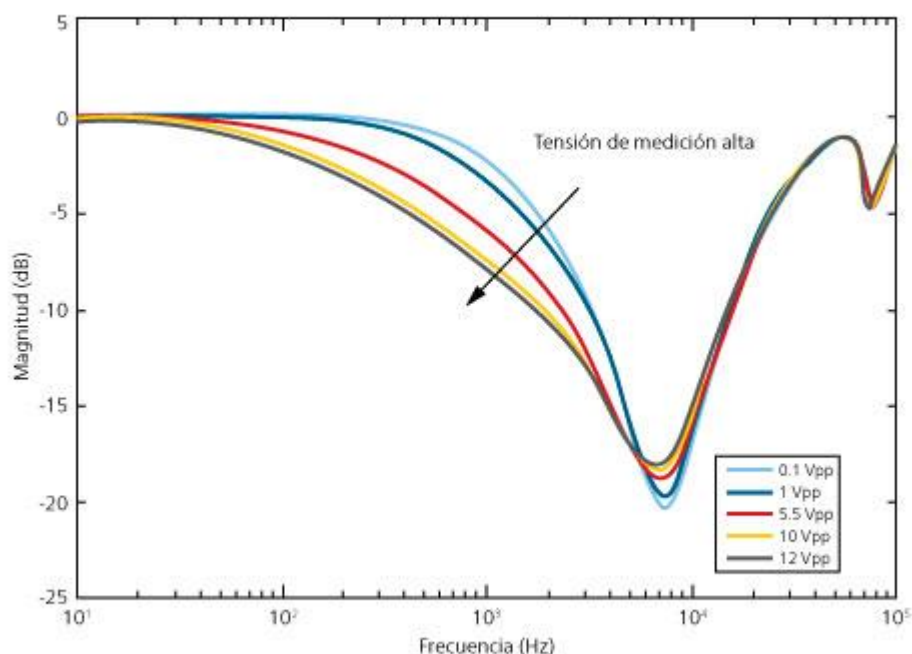


Figura 9: Efecto de las tensiones de salida seleccionadas; influencia de las diferentes tensiones de salida en la inductancia de magnetización L_m

Cables de puesta a tierra y de medición

Los diferentes procedimientos para conectar los cables de medición y de conexión a tierra se explican en la norma IEC 60076-18 [4]. La manera más común es usar pinzas especialmente diseñadas para conectar el cable BNC de doble apantallamiento al terminal de fase y utilizar un cable trenzado respectivamente para conectar a tierra el apantallamiento entre la pinza y la brida de la borna. Como se describe en la sección 3, el uso de un trenzado en lugar de un cable reducirá significativamente la influencia del ruido, especialmente a una frecuencia próxima a la de la red. Además, la longitud de la conexión a tierra es esencial para la región de baja frecuencia, como se muestra en la Figura 10. Cuando se utilizan conexiones de una longitud fija, la posición de la conexión influye en la respuesta en frecuencia. Por lo tanto, el concepto de adaptar el cable de puesta a tierra para asegurar el camino más corto a tierra, ofrece el grado más alto de reproducibilidad.

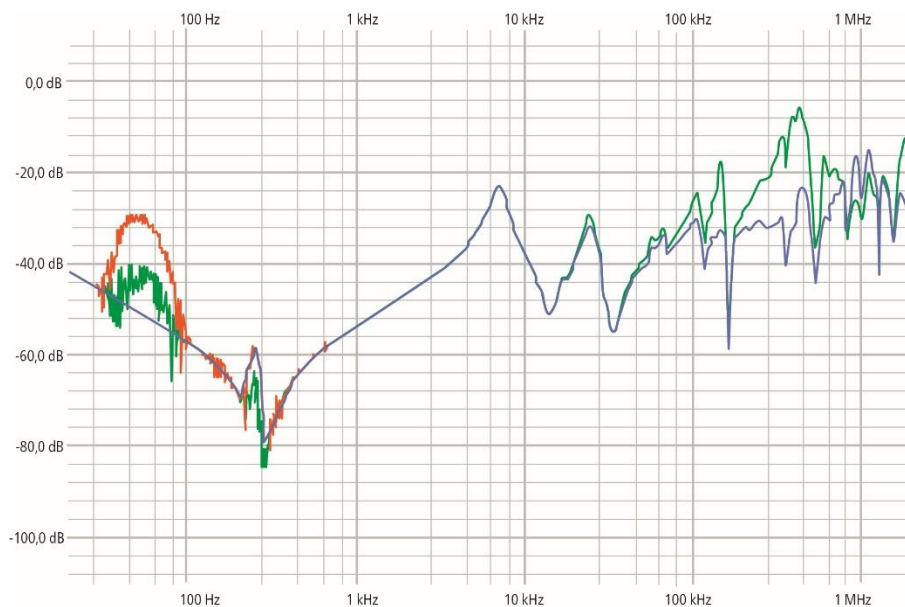


Figura 10: Influencia de diferentes técnicas de conexión, menor influencia de ruido y mayor repetibilidad mediante el uso de un trenzado de tierra en el concepto de trayecto más corto (azul), conexión de cable (verde) y trenzado de tierra con un mayor bucle (rojo).

Posición del cambiador de tomas y bornas

De acuerdo con las normas aplicables, las pruebas SFRA deben realizarse con la misma configuración de transformador, incluyendo las bornas o la posición del cambiador de tomas. A veces se utilizan bornas de prueba durante las pruebas de aceptación en fábrica y las bornas finales se montan en sitio. Al comparar la respuesta en frecuencia medida en fábrica con la medida en sitio, es muy probable que se produzcan desviaciones en el rango de alta frecuencia. Cambiar la posición del cambiador de tomas causará cambios continuos en la forma de la curva en un amplio rango de frecuencias, como se muestra en la Figura 11. Se recomienda realizar mediciones para cada fase relevante en la posición más baja, más alta y media del cambiador de tomas, mientras se cambia continuamente de la posición más alta a la más baja [3], [4].

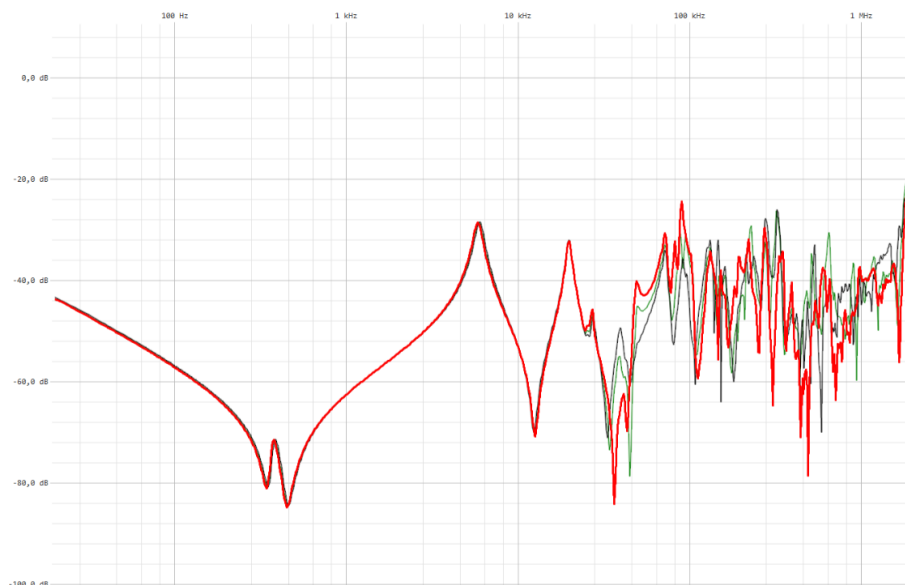


Figura 11: Influencia de la posición del cambiador de tomas (toma 1: rojo, toma 2: verde, toma 3: negro) en la respuesta en frecuencia de un transformador de potencia

Contacto entre el terminal de borna y la conexión a tierra

Uno de los errores de conexión más típicos es un contacto no deseado de la conexión a tierra con el terminal de borna. Este error influye en la respuesta en frecuencia, principalmente en las frecuencias más altas, como se muestra en la Figura 12. Se recomienda utilizar una funda aislante en los trenzados con el fin de evitar este cortocircuito.

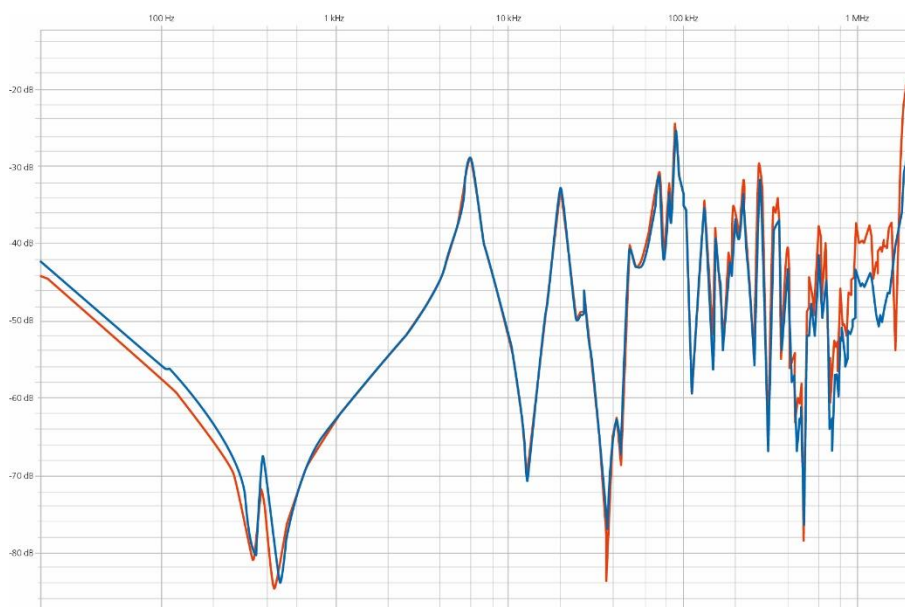


Figura 12: Respuesta en frecuencia medida en el lado de alta tensión en una prueba de circuito abierto; conexión correcta (rojo) y cortocircuito entre el terminal y la tierra en la referencia (azul).

4.2 Otros factores influyentes

Magnetización residual

La magnetización residual es un fenómeno frecuente causado por mediciones anteriores, como la medición de la resistencia del devanado de CC. Esto puede evitarse mediante la desmagnetización antes de realizar las pruebas SFRA. La influencia revela, en particular, en el rango de frecuencias muy bajas, tal como se muestra en la Figura 13, dónde se desplaza la resonancia del núcleo hacia la derecha. Las otras partes del trazo de SFRA no se ven afectadas por este fenómeno. Por lo tanto, el magnetismo residual puede identificarse de manera sencilla y por lo general no influye en el análisis posterior.

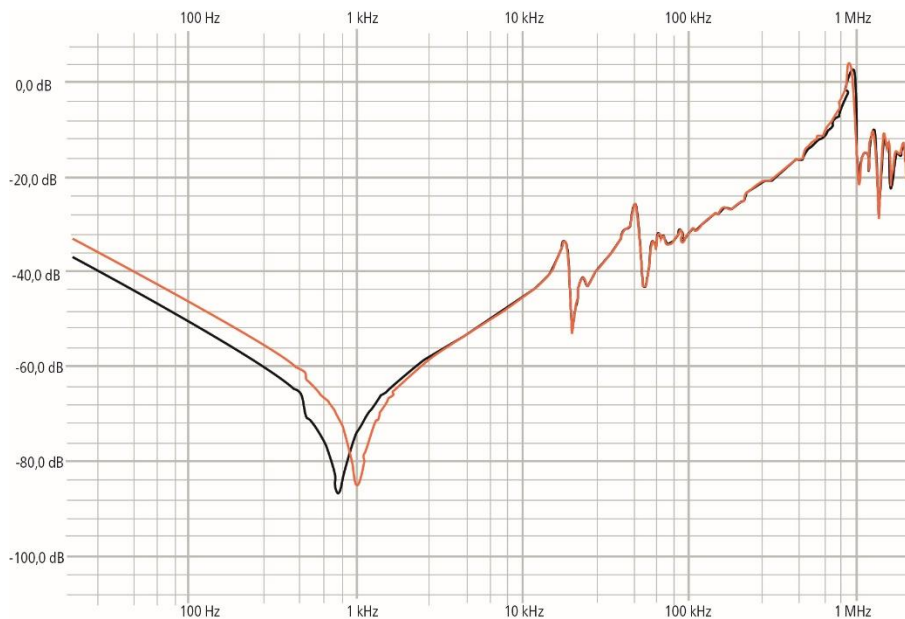


Figura 13: Respuesta en frecuencia de un transformador de potencia medida en una prueba de circuito abierto antes (rojo) y después (negro) de la desmagnetización.

Aislamiento líquido

Un transformador de potencia debe medirse siempre con la misma configuración en sitio. Esto incluye el aislamiento, ya que influye significativamente en la respuesta en frecuencia. Cuando se comparan las mediciones SFRA de un transformador de potencia con y sin aceite, como se muestra en la Figura 14, se puede observar un desplazamiento sistemático de las frecuencias características. Esto es causado por los diferentes dieléctricos (aire/gas con $\epsilon_{r,gas} = 1$ o aceite con $\epsilon_{r,aceite} = 2,2$) y corresponde aproximadamente al valor teórico que puede calcularse como la raíz cuadrada de la permitividad relativa del aceite mineral [11].

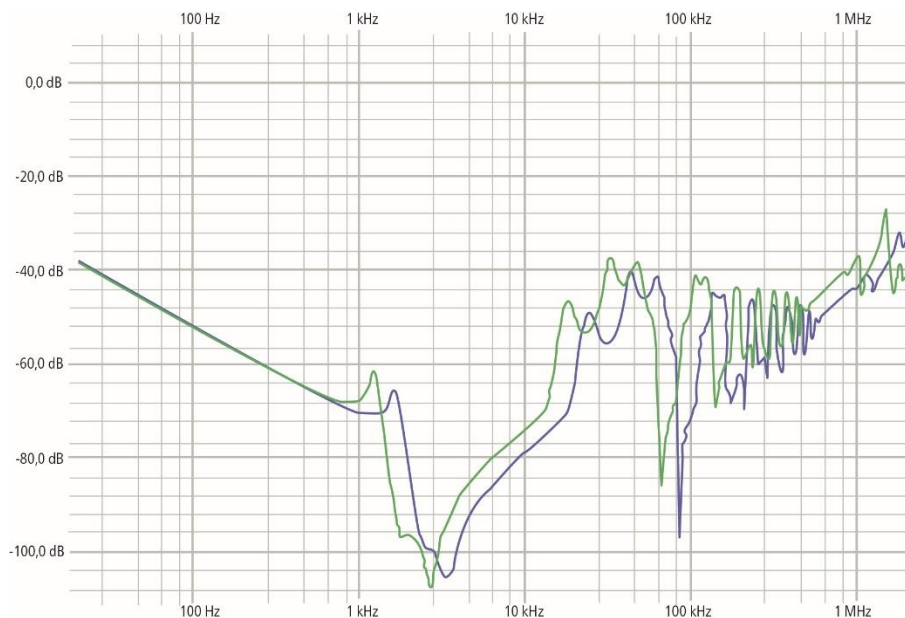


Figura 14: Trazos de AT medidos con tanque lleno de aceite (verde) y sin aceite (azul)

Temperatura

Las condiciones ambientales, tales como la temperatura, pueden influir en las respuestas medidas en frecuencia. Sin embargo, las investigaciones han demostrado que los coeficientes térmicos en el desplazamiento de los puntos de resonancia con la temperatura son muy pequeños [12]. Como consecuencia, el desplazamiento puede ignorarse en el rango típico de temperaturas entre 15°C (59°F) y 70°C (185°F).

Conclusión

Se ha indicado la importancia de una técnica de conexión adecuada. Se han tratado las ventajas de la técnica sugerida por IEC 60076-18 en comparación con otras técnicas. Además de un alto grado de reproducibilidad, el uso de trenzados de conexión a tierra en lugar de simples cables ayuda a evitar la influencia del ruido de banda estrecha a frecuencias próximas a la de la red y aumenta la reproducibilidad, especialmente en el rango de alta frecuencia por encima de 500 kHz.

Se han nombrado y descrito factores que influyen en la respuesta en frecuencia y se han dado ejemplos del cambio en la forma de la curva. Esto incluye su influencia en la configuración de la medición, tal como el cortocircuito o la conexión de la puesta a tierra de los devanados terciarios, la dirección de medición, la tensión de salida, la técnica de conexión o la posición del cambiador de tomas. Además, se han tratado otros efectos, como la magnetización residual, la influencia del aislamiento o los cambios debidos a la temperatura y la humedad.

Bibliografía

- [1] Cigré WG A2/26, "Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)", Brochure 342, Paris 2008
- [2] T. Leibfried, K. Feser, Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999, pp.1333-1341.
- [3] IEEE Std C57.149, "IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers", 2013
- [4] IEC 60076-18, "Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response", 2012
- [5] NCEPRI, "Application Guideline for Transformer Winding Distortion Test Technology", China 1999
- [6] Cigré WG A2/26, "Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)", Electra N°228, Paris 2006
- [7] J. Christian, K. Feser, Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, January 2004, pp.214-220.
- [8] Juan L. Velásquez, et al., "Noise in FRA Measurements: Sources, Effects and Suppression," OMICRON DMPT Workshop 2009.
- [9] S. Tenbohlen, R. Wimmer, K. Feser, A. Kraetge, M. Krüger, J. Christian: The influence of grounding and connection technique on the repeatability of FRA-results, Proceedings of the XVth International Symposium on High Voltage Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007.
- [10] R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser, M. Michael Krüger: „Richtlinien für den Messaufbau für eine hohe Reproduzierbarkeit der FRA-Messergebnisse“, ETG Fachtagung Diagnostik elektrotechnischer Betriebsmittel, Kassel, Germany 19.-20. September 2006
- [11] J. Christian, R. Wimmer: "Comparability of transfer function results", European Transactions on Electrical Power 2006, issue 16, pages137-146
- [12] R. Wimmer, K. Feser, J. Christian: "Reproducibility of Transfer Function Results", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, Netherlands, August 25-29, 2003

Biografías



Michael Rädler es Dipl. Ing. (FH) en ingeniería industrial de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Mittweida, Alemania. Tras graduarse en HTL (escuela técnica de ingeniería de grado medio) de Bregenz, Austria, en 2007, comenzó su carrera profesional como ingeniero de aplicaciones en OMICRON electronics, donde se centró en los transformadores de potencia. Desde septiembre de 2013 es Gerente de producto del sistema de pruebas primarias multifuncionales de OMICRON para la puesta en servicio y mantenimiento de subestaciones (CPC 100). Ha publicado varios artículos sobre mediciones eléctricas en transformadores de potencia y es miembro del Cigré y del grupo de trabajo de SFRA.



La Prof. Dra. Stephanie Uhrig (de soltera, Ratzke) es profesora de ingeniería eléctrica en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Múnich. Desde 2010 hasta 2017 fue Gerente de producto de OMICRON Energy, Austria, donde se centró en las mediciones de respuesta dieléctrica y el análisis de respuesta en frecuencia. Obtuvo sus títulos de Dipl. Ing. y Dr. Ing. en la Universidad Técnica de Múnich (TUM), Alemania, en 2003 y 2009.