

Factores que influncian en el Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) en transformadores de potencia.

Jorge Zarate **Francisco Cardozo**
Facultad Politécnica- Universidad Nacional del Este.

Ing. Domingo Maldonado **Ing. Armando Ortiz.**
ITAIPIU BINACIONAL

PARAGUAY

RESUMEN

Los transformadores de potencia son esenciales para un sistema eléctrico, constituyéndose en el nexo entre la generación y el punto de utilización consumo de energía. La técnica conocida como Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) consiste en registrar el comportamiento de las características del transformador aplicando una señal de tensión de baja amplitud que varía en un amplio rango de frecuencias sobre una de sus terminales, y midiendo la respuesta en otra terminal.

De este modo, es posible medir y evidenciar posibles alteraciones mecánicas antes que las mismas causen fallas graves. Existen factores externos que influyen en los ensayos de FRA, tales como: impedancia del equipo de medición, amplitud del voltaje de la señal, longitud de conductores de medición, posición de puesta a tierra, magnetización del núcleo entre otros. El objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia de la posición de puesta a tierra y voltaje de la señal en los resultados de las mediciones de ensayo para el transformador monofásico elevador 18/500kV de 75 MVA. El ensayo se realiza con dos posiciones del punto de puesta a tierra y dos voltajes de alimentación. La señal se aplica al devanado de alta tensión y baja tensión para posibilitar un mejor análisis.

PALABRAS CLAVES

FRA, alteraciones mecánicas de transformador, factores externos, frequency response analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son equipos esenciales dentro de un sistema eléctrico, constituyéndose en una conexión vital entre la central de generación y el punto de utilización de la energía. La mayoría de los transformadores que actualmente se encuentran en servicio llevan encima entre 20 y 30 años de servicio y van llegando al límite de vida para el cual fueron diseñados. Esta situación conlleva a un aumentado riesgo de fallo del equipo, lo que puede tener consecuencias muy graves.

Las fallas mecánicas se caracterizan por la alteración de la impedancia del transformador, y es en este punto donde la técnica de Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) brilla por su capacidad para el análisis de esas alteraciones. Actualmente el FRA es considerado como un método efectivo, no destructivo y sensible, para la evaluación de la integridad mecánica de núcleos, devanados, y estructuras de sustentación de transformadores de potencia. El ensayo es realizado inyectando una señal de voltaje de baja amplitud y de frecuencia variable en una terminal del transformador y midiendo la respuesta en otra terminal.

Es importante mencionar que en transformadores nuevos también pueden detectarse fallas mecánicas, las cuales pueden ocurrir en el transporte desde la fábrica al local donde será puesto en servicio. La detección de las fallas mecánicas a tiempo puede reducir costos de eventos no planeados como: mantenimientos aperiódicos y cortes de energía.

El núcleo y devanado de un transformador de potencia pueden ser vistos como una red eléctrica compleja de resistencias, inductancias propias y mutuas, capacitancias a tierra y serie. Entonces, la respuesta en frecuencia (FRA) de una red de tal complejidad, es única y puede ser considerada lo que se denomina su huella digital. Cambios en la geometría del transformador entre los elementos de su red causa desvíos en su respuesta en frecuencia. Las diferencias entre los resultados de la huella digital y el de un posterior ensayo es una indicación de deformación o desvío de algún componente de la parte activa del transformador.

El ensayo de FRA se caracteriza por la capacidad que tiene para volver a realizarse con el tiempo y obtener el mismo resultado. A su vez, en diversas experiencias prácticas [2, 3, 4, 5] se han demostrado que el ensayo es sensible a factores externos, los cuales deben ser tomados en cuenta de modo a minimizar sus efectos en la respuesta del ensayo. Los factores más comunes que influyen son: posición y técnicas de conexión de las terminales, interferencias electromagnéticas, flujo residual en el núcleo, especificación del equipo de medición, tensión de la señal, entre otros. Es tal la necesidad de minimizar el efecto de los factores externos que es necesario tener documentado todos los procedimientos para realizar el ensayo, de modo a estandarizar el proceso. Esto asegura la reproducción del ensayo, no dando espacio a dudas del resultado obtenido. Una variación en la respuesta denota una falla mecánica, siempre y cuando el ensayo sea realizado de la manera más fiel posible con la que se realizó el ensayo de referencia del cual se obtuvo la huella digital del transformador.

En este trabajo se analiza el efecto de la posición de conexión del punto de referencia a tierra y el voltaje de la señal aplicada, ya que como se ha dicho, cada transformador es un caso particular y es necesario estandarizar para cada uno, buscando minimizar la posibilidad de error en posteriores ensayos.

2. ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (FRA).

Entre las técnicas del monitoreo existentes, el Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) es una herramienta relativamente nueva. La técnica puede ser utilizada para evaluar la integridad mecánica de los transformadores, y tiene alta sensibilidad para la detección de fallas mecánicas y eléctricas sus

devanados, como desplazamientos de bobinas, corto-circuito entre conductores, envejecimiento de la aislación, entre otros. El trabajo más representativo en la literatura sobre el ensayo de FRA aplicado a transformadores de potencia es [1]. El trabajo desarrollado en el año 1978 tiene como objetivo diagnosticar alteraciones mecánicas en los devanados del transformador sin la apertura del equipo.

Para realizar una medición de FRA (Figura 1), una tensión es inyectada a una terminal con referencia al tanque del transformador. La tensión medida en la terminal donde se inyecta la señal es utilizada como referencia para el cálculo a realizarse. El segundo parámetro (señal de respuesta) es la tensión leída en la impedancia medida a través de otra terminal del transformador con referencia al tanque. La amplitud de la respuesta del ensayo de FRA es la relación entre la señal de respuesta (V_r) y la tensión de entrada (V_s) como una función de la frecuencia (generalmente presentada en dB)

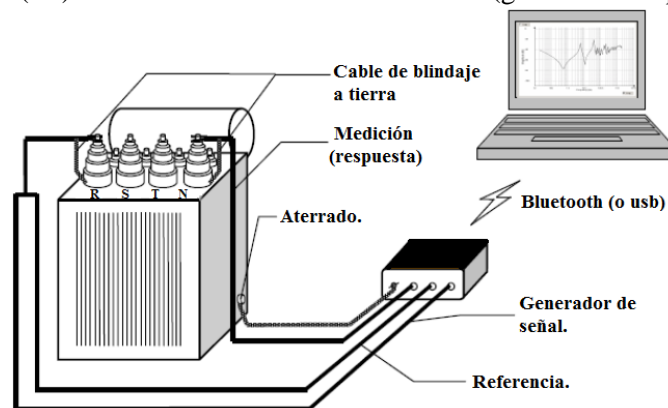


Figura 1: Esquema de conexión básica para la medición del ensayo FRA.

La señal de entrada y el cable de referencia son conectadas juntas cerca de la parte superior del aislador pasante del transformador como se observa en la Figura 2. Una extensión del cabo de tierra es extendida a lo largo del cuerpo del aislador pasante hasta la brida (falange), para conectar los cables al tanque. El mismo principio es aplicado para el cable de respuesta.

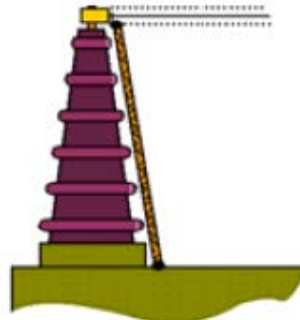


Figura 2: Conexión del cable de medición al aislador pasante.

3. FACTORES QUE INFLUENCIAN LAS MEDICIONES DE FRA.

A seguir se detallan los factores que pueden influenciar los resultados de las mediciones de FRA en los transformadores, cada punto debe ser propiamente documentado para asegurar la repetitividad de los ensayos y evitar posibles errores en los diagnósticos.

3.1. Condición del transformador.

Las condiciones previas al ensayo deben ser documentadas. Entre las condiciones del transformador que pueden influenciar el resultado se tienen: posición del conmutador de TAPs, aisladores pasantes, puesta a tierra del neutro, temperatura, humedad, estado del aceite y el papel, TCs internos, devanado terciario, entre otros.

3.2. Equipos.

Este factor debe ser documentado, de ser posible se deben utilizar los mismos equipos (cables, generador de impulsos, etc.) para futuras mediciones, o de lo contrario, utilizar equipos con las

mismas especificaciones técnicas tales como precisión, calidad, impedancia de los cables, desvío de error, etc.

3.3. Puesta a tierra inadecuada.

La puesta a tierra inadecuada así como el cambio en la posición de la puesta tierra, puede provocar alteraciones en la respuesta del ensayo de FRA que puede llevar un error en el análisis. En la Figura 3 se presentan los desvíos que pueden ocurrir debido a la puesta tierra inadecuada.

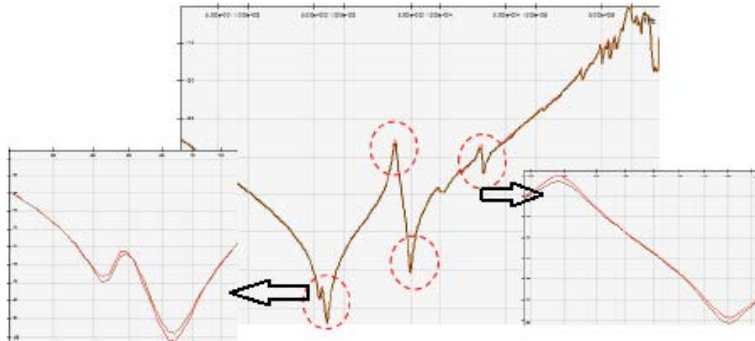


Figura 3: Efecto de la puesta a tierra inadecuada.

Dependiendo del tipo de configuración utilizado para el ensayo la influencia del punto de puesta a tierra tiene mayor o menor influencia, además depende del tipo de transformador que está bajo ensayo ya que como se ha dicho anteriormente cada transformador es un caso de estudio único y para un transformador puede tener influencia y para otro no.

3.3.1. Técnicas de conexión.

Las conexiones realizadas hasta ahora por la gran mayoría de los dispositivos utilizados envuelven conexiones con cables que introducen altas inductancias en el circuito medido. Esta es una de las causas de que varios ensayos no consigan llegar a escalas de frecuencia más altas, pues introducen cada vez más ruidos en la medición, comprometiendo así la repetitividad de las respuestas. En la Figura 4 se muestra la forma correcta de conexión a puesta tierra, normalmente se realiza en la brida del aislador pasante utilizando la menor distancia posible.

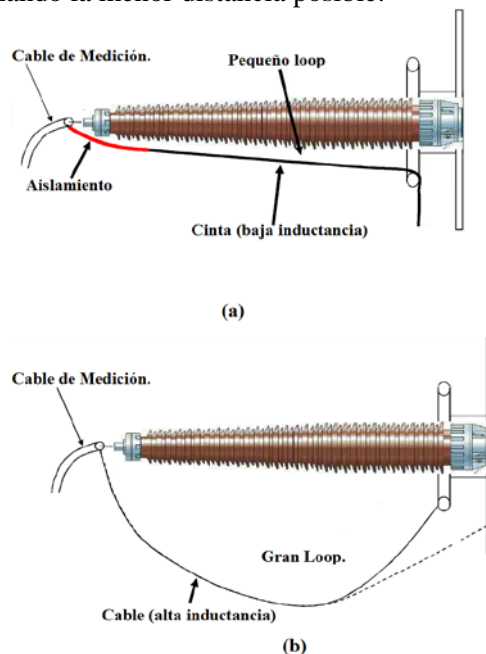


Figura 4: Conexión del cable de medición al aislador pasante: (a) Correcto. (b) Incorrecto.

3.4. Tensión de salida.

En la Figura 5 se muestra una medida realizada en el devanado de 230 KV de un transformador de 100 MVA con tensiones de prueba de 2,83 V y 10 V. Puede notarse un desvío en la zona de baja frecuencia. Con la finalidad de estandarizar la medición y asegurar su repetitividad, se debe documentar la tensión de inyección utilizada en la primera medición, para luego utilizar la misma tensión en ensayos futuros.

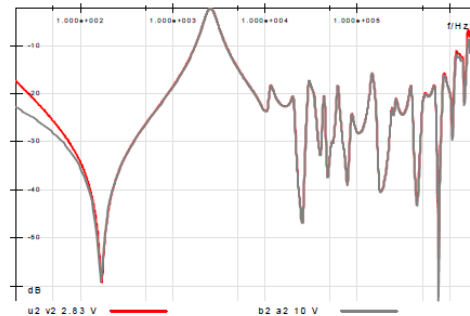


Figura 5: Medidas con tensiones diferentes en un mismo devanado.

4. ESTUDIO DE CASO.

A continuación se detallan los esquemas utilizados para la realización del ensayo al transformador monofásico de la Figura 6. Estos esquemas fueron modificados de los presentados por [6] ya que los presentados en ese trabajo son para transformadores trifásicos. Los devanados de alta tensión para el transformador ensayado son representados con las letras H1 y H0. Los devanados de baja tensión por las letras X1 y X2. La terminal Vs es la que inyecta la tensión al devanado y la terminal Vr es la que mide la respuesta de la señal aplicada.



Figura 6: Transformador de Potencia monofásico de 275 MVA.

4.1. Tipo de Ensayo A: Señal en devanado de Alta tensión - Devanado de Baja tensión en circuito abierto.

En este esquema la impedancia de magnetización del transformador es el parámetro principal caracterizando la respuesta en baja frecuencia (por debajo del primer punto de resonancia). Es el esquema más utilizado por su simplicidad y también por el hecho de que permite examinar cada bobinado por separado.

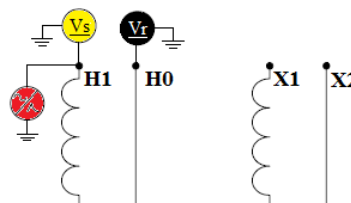


Figura 7: Ensayo A: Señal en devanado de Alta tensión - Devanado de Baja tensión en circuito abierto.

4.2. Tipo de ensayo B: Señal en devanado de Alta tensión - Devanado de Baja tensión en corto circuito.

En este ensayo se obtienen informaciones relacionadas a la impedancia de pérdidas a baja frecuencia y la influencia del núcleo cuando hay presencia de magnetismo residual.

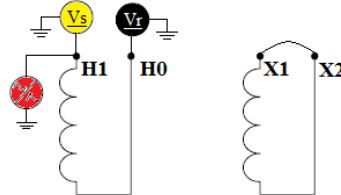


Figura 8: Ensayo B: Señal en devanado de Alta tensión - Devanado de Baja tensión en corto circuito.

4.3. Tipo de Ensayo C: Capacitivo entre devanados con señal aplicada en el devanado de Alta Tensión.

La señal es aplicada en el extremo del devanado de Alta Tensión y se mide la respuesta en el final del devanado de Baja Tensión. La respuesta obtenida en este esquema es dominada en bajas frecuencias por la capacitancia existente entre los devanados.

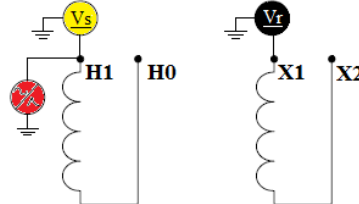


Figura 9: Ensayo C: Capacitivo entre devanados con señal aplicada en el devanado de Alta Tensión.

4.4. Tipo de Ensayo D: Inductivo entre devanados con señal aplicada en el devanado de Alta Tensión.

La señal se aplica en la terminal de alta tensión y la respuesta en la terminal correspondiente de baja tensión, con la otra punta de ambos bobinados puestos a tierra. Las bajas frecuencias de la respuesta son determinadas por la relación de transformación de los devanados.

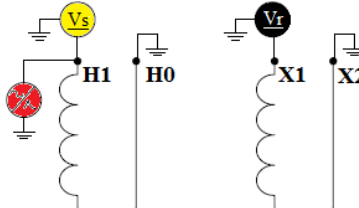


Figura 10: Ensayo D: Inductivo entre devanados con señal aplicada en el devanado de Alta Tensión.

De la misma manera, se realizan los ensayos aplicando la señal en el devanado de baja tensión con las denominaciones de ensayo: a, b, c, y d análoga a cada configuración presentada en esta sección.

5. RESULTADOS.

Los ensayos son realizados con dos puntos de referencia a tierra y dos tensiones de alimentación para cada esquema de conexión, se totalizan 24 mediciones. Los resultados son agrupados de modo a facilitar la presentación de los mismos.

5.1. Señal aplicada al devanado de Alta Tensión.

5.1.1. Medición tipo A.

En la Figura 11 se muestra la superposición de las 3 respuestas en frecuencia de las mediciones realizadas con la configuración A, como se puede observar, existe una diferencia en la zona de baja frecuencia. Esta diferencia es debido a que en esa banda de frecuencias la respuesta es dominada por el núcleo magnético y esta configuración se encarga de mostrar variaciones en el núcleo, por ello al haber una tensión de alimentación distinta o una variación en el punto de tierra, la respuesta presenta una diferencia.

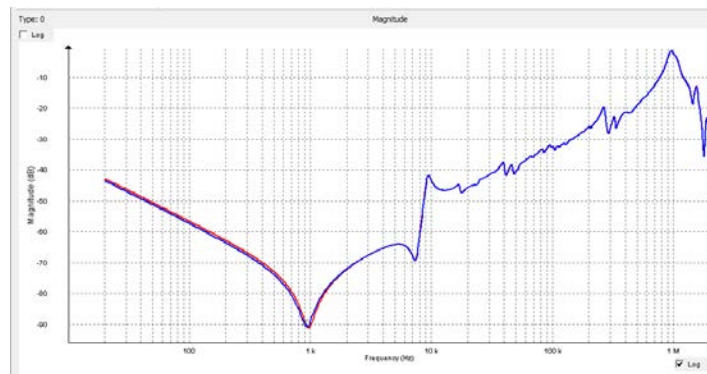


Figura 11: Superposición de los 3 ensayos realizados con la configuración A.

5.1.2. Medición tipo B, C y D.

La superposición de las respuestas de los tres ensayos realizados con las configuraciones B, C y D como se observan en la Figura 12 son perfectas, para este transformador, los factores de puesta a tierra y tensión de entrada no tienen efectos y no causarían errores de interpretación cuando se realicen estas configuraciones de ensayo.

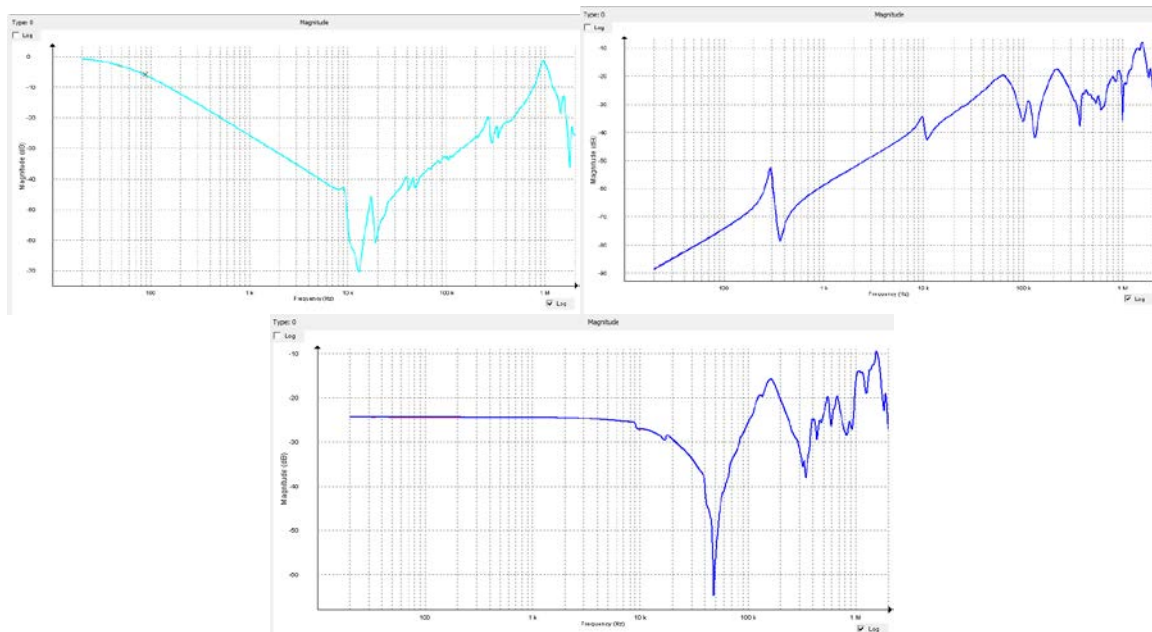


Figura 12: Superposición de los 3 ensayos realizados con la configuración B, C y D.

5.2. Señal aplicada al devanado de Baja Tensión.

5.2.1. Medición Tipo a.

En la Figura 13 se muestran las respuestas en frecuencia de las dos mediciones para distintos voltajes de señal, como se puede observar, existe una diferencia en la zona de

baja frecuencia que es dominada por el núcleo magnético del transformador (antes de la primera resonancia), nuevamente esto al igual que en el caso de la señal aplicada al devanado de Alta Tensión es debido a que esta configuración de ensayo analiza el núcleo magnético y es sensible a las variaciones de la tensión de la señal. Se recomienda establecer una tensión fija para futuras mediciones para evitar posibles errores de interpretación en las respuestas.

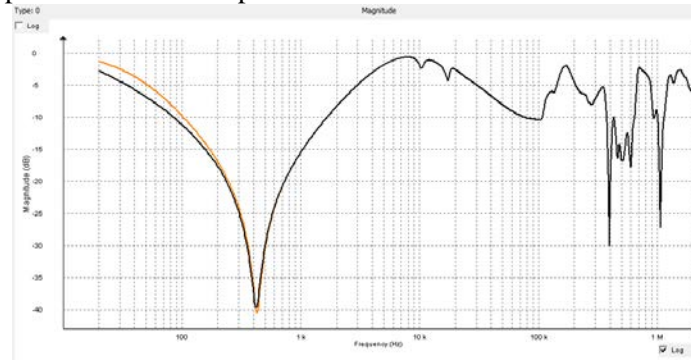


Figura 13: Superposición de las respuestas de los ensayos para tensión de señal de 2V y 10V de la configuración a.

Para el caso de cambio de la posición del punto de referencia a tierra en la Figura 14 se observa la respuesta en frecuencia de las dos mediciones, existiendo una diferencia significativa en la zona de baja frecuencia y en la de alta frecuencia. La zona de baja frecuencia es dominada por el núcleo magnético del transformador (antes de la primera resonancia) y la de alta frecuencia es dominada por la influencia de las terminales de conexión del ensayo. Debido a que se ha variado la posición de una terminal de conexión, es de esperarse un cambio en las altas frecuencias tal y como se ha comprobado con el ensayo.

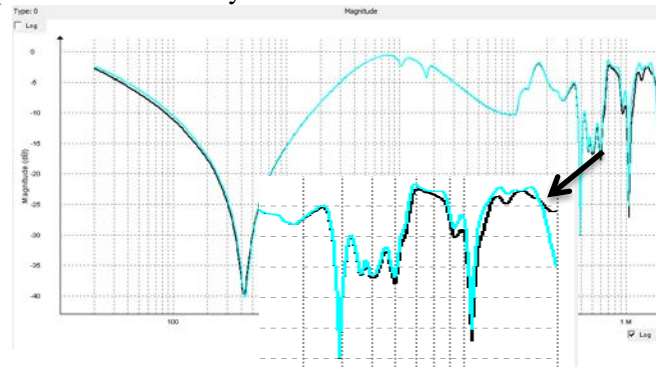


Figura 14: Superposición de las respuestas de los ensayos para punto de referencia X e Y de la configuración a.

5.2.2. Medición tipo b, c y d.

Al comparar las respuestas entre los ensayos con distintas tensiones de señal como se muestra en la Figura 15 de las configuraciones b, c y d respectivamente no se encuentran diferencias. Para este transformador en dichas configuraciones de ensayo, la variación de tensión no influye en la respuesta del ensayo de FRA.

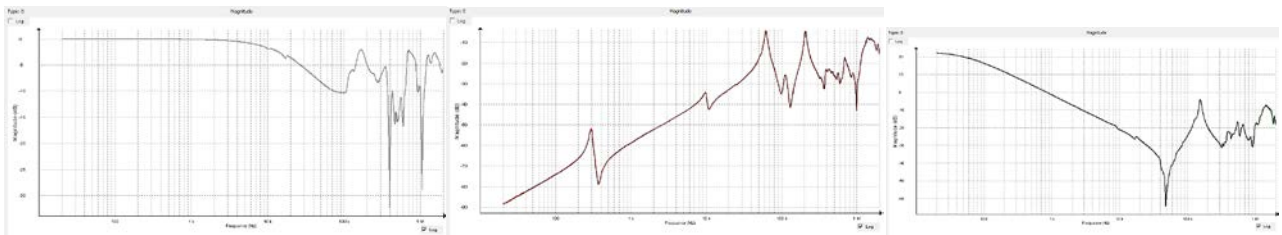


Figura 15: Superposición de las respuestas de los ensayos para tensión de señal de 2V y 10V de la configuración b, c y d.

Al comparar los resultados de las mediciones entre distintas posiciones de punto de referencia a tierra para la señal aplicada en el devanado de baja tensión puede observarse que efectivamente en las altas frecuencias (que es la zona donde puede observarse la influencia de las terminales de conexión) existen diferencias y es necesario estandarizar un punto de referencia fijo para realizar las mediciones, esto es posible observar en las Figuras 16, 17 y 18.

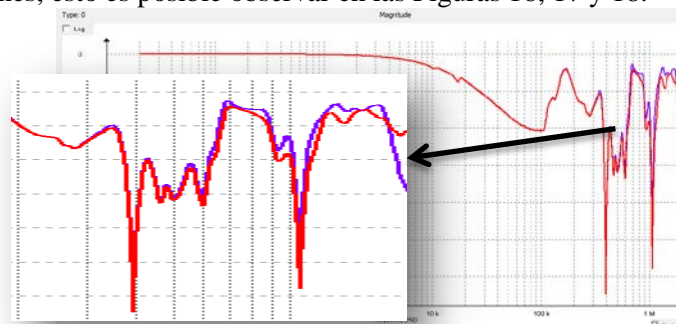


Figura 16: Superposición de las respuestas de los ensayos para punto de referencia X e Y de la configuración b.

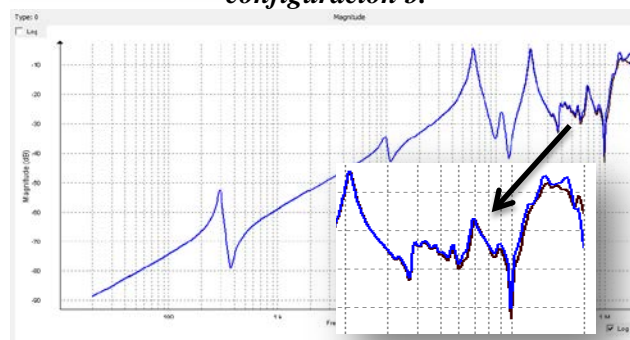


Figura 17: Superposición de las respuestas de los ensayos para punto de referencia X e Y de la configuración c.

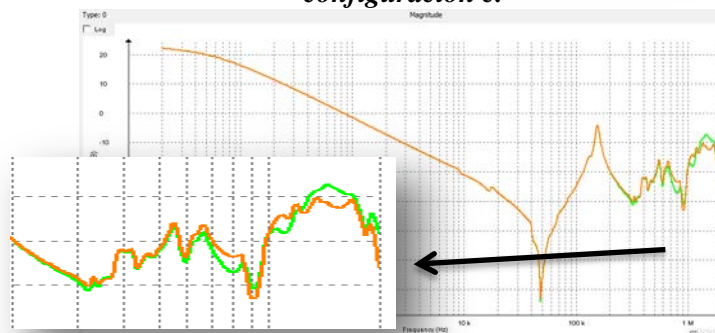


Figura 18: Superposición de las respuestas de los ensayos para punto de referencia X e Y de la configuración d.

6. Conclusiones.

El trabajo se concentra en el análisis de la influencia de la tensión de la señal y del punto de referencia a tierra en la respuesta del ensayo de FRA, con el fin de contribuir con el proceso de estandarización del ensayo para el transformador estudiado. Los resultados obtenidos son satisfactorios ya que denota que efectivamente cada transformador tiene una respuesta única para el ensayo de FRA. Algunos transformadores son muy sensibles al cambio de la posición del punto de referencia a tierra o la tensión con la que se inyecta la señal y en otros casos como el transformador ensayado, la influencia de estos factores es mínima.

Con respecto a la variación del punto de referencia a tierra, al aplicar la señal en el devanado de Alta Tensión no se encontraron diferencias en las altas frecuencias como se ha esperado, eso es debido a que las longitudes de los aisladores pasantes (en especial H0) son pequeñas y eso conlleva a la necesidad de un cable de referencia a tierra de menor longitud y así tiene poca o nula influencia en la respuesta del ensayo de FRA.

Para la señal aplicada al devanado de Baja Tensión en cambio ya se denotan las diferencias con el cambio del punto de referencia y es debido a que en el lado de Baja Tensión las distancias de los aisladores pasantes a los puntos de referencia eran mayores y con ello aumentan las longitudes de los cables de las terminales de conexión. Para la tensión de alimentación de la señal se puede observar que los cambios son mínimos para todas las configuraciones y no influyen en el ensayo. Ahora bien, puede ser observado que para la configuración de Circuito Abierto (tanto para la señal aplicada en alta tensión y baja tensión) hubo diferencias en la zona de la baja frecuencia y eso es debido a que en la configuración de circuito abierto la impedancia de magnetización del núcleo del transformador es el principal parámetro caracterizado y el mismo es sensible a las variaciones tanto de la tensión de la señal como de variaciones en el punto de referencia.

7. Bibliografía

- [1] Dick, E. P. e Erven, C. C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, volume 97, n° 6, pags.2144-2144, Noviembre 1978.
- [2] Wang, M., Vandemaar, A. J. e Srivastava, K. D. Transformer winding movement monitoring in service key factors affecting FRA measurements. IEEE Electrical Insulation Magazine, volume 20, n° 5, pags. 5-12, Setiembre 2004.
- [3] Xiaowei, L. e Qiang, S. Test research on power transformer winding deformation by FRA method. In IEEE International Symposium on Electrical Insulation Materials, pags. 837-840. Noviembre 2001.
- [4] Al Murawwi E, Mardiana R, Su Q. Charles, Barkat Braham, Effects of Terminal Connections, Noise and DC Magnetism on Sweep Frequency Response Analysis of Transformers.
- [5] Werelius P, Ohlen M, Adeen L, Brynjebo E., Measurement considerations using SFRA for condition assessment of Power Transformers.
- [6] Cigre, Working Group A2.26. Mechanical condition assessment of Transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA), Brochure 342, Abril 2008.