

Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia

Carlos Pérez Rojas, Sigridt García Martínez

Para citar este artículo: [Pérez Rojas Carlos, García Martínez Sigridt. 2021. Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia. Ciencia Nicolaita, número 82, 105-118. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.543>](#)

Ver material suplementario

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia

Carlos Pérez Rojas^{1*}, Sigridt García Martínez¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 11 de enero de 2021

Aceptado: 22 de febrero de 2021

RESUMEN

El Análisis de Respuesta a la Frecuencia (FRA, Frequency Response Analysis), es una excelente herramienta en el diagnóstico y detección de fallas internas en el transformador, como lo son: el desplazamiento y deformación de devanados, debidos a fuerzas electromagnéticas como resultado de corrientes de falla, aflojamiento de los soportes de los devanados a consecuencia de descargas eléctricas o transporte del transformador. Este tipo de fallas están involucradas básicamente con el cambio en la geometría del transformador en su conjunto, factor que altera los parámetros RLC (Resistor, Inductor, Capacitor), que representan al transformador y por ende sus puntos de resonancia. En la literatura se tiene el estándar del comportamiento de los transformadores trifásicos con núcleo de tres piernas. En este trabajo se realiza el análisis de las pruebas que se obtienen en un transformador de doble núcleo de los que se utilizan en los hornos de arco, cuya característica principal es que alimentan altas corrientes sobre un amplio rango de voltajes.

PALABRAS CLAVE: Barrido en la frecuencia, transformadores de horno de arco, fallas internas.

ABSTRACT

The Frequency Response Analysis (FRA), is an excellent tool for the diagnosis and detection of internal faults in a transformer, such as: a displacement and winding deformation due to electromagnetic forces as a result of fault currents, the loosening of winding supports as a consequence of electric shocks or when the transformer is transported. These type of faults are mainly involved with the change in the geometry of the transformer as a whole, a factor that alters the RLC (Resistor, Inductor, Capacitor), parameters which represent the transformer, and therefore, its resonance points. The standard behavior of the three-phase three limbs transformer can be found in the literature. In this work, an analysis of the tests, which were applied in a double core transformer that is commonly used in arc furnaces, was carried out. The main feature of these transformers is that they feed high currents over a wide range of voltages.

KEYWORDS: Sweep frequency, Arc furnace transformers, Internal Faults.

1. Introducción

La estructura interna de un transformador representa un conjunto de circuitos RLC multicoplados, lo anterior implica que sus diferentes modos serán excitados a valores distintos de frecuencia. Esto permite obtener una representación de la geometría del transformador identificando, mediante su excitación, los distintos modos que responden a diferentes frecuencias. De lo expuesto se deduce que cualquier cambio en la geometría del transformador, provocado por movimientos o deformaciones en los devanados, núcleo o ambos, modificará los modos que a su vez cambiarán sus frecuencias de resonancia originales (Modley, 2006; Nirgude *et al.*, 2004). Esta técnica permite, mediante la excitación de un pequeño voltaje en un rango de frecuencias de 20 Hz a 2 MHz, o mayores, excitar las frecuencias de resonancia del transformador, identificando con esto la geometría propia del mismo, por lo que cualquier cambio en su geometría se reflejará como un desplazamiento de los puntos de resonancia o bien en la trayectoria de la respuesta obtenida, permitiendo así detectar fallas internas en el transformador.

Este método, para su análisis, se compone de dos pasos, donde el primero de ellos consiste en contar con la prueba de fábrica del transformador (Coffen *et al.*, 2002), conocida como huella digital del mismo, que permite dar un seguimiento a la condición interna de los devanados y núcleo del transformador mediante su comparación con pruebas posteriores, realizadas éstas de forma periódica o bien posterior al sometimiento del transformador a grandes esfuerzos eléctricos debidos a fallas severas o bien ante desplazamientos del transformador por motivo de una posible reubicación del mismo o movimientos sísmicos de gran relevancia. Lo anterior permitirá detectar variaciones en la respuesta del barrido en la frecuencia para así de-

terminar la posible existencia de fallas internas en el mismo. El segundo paso consiste en que cuando no se cuente con una prueba previa de la respuesta del transformador, se comparan los resultados ya sea con unidades gemelas o bien entre la respuesta obtenida en las diferentes fases del transformador probado, partiendo del hecho de que las fases laterales deben comportarse de manera idéntica entre sí, debido a que las trayectorias magnéticas son simétricas y del conocimiento previo de las respuestas típicas esperadas para las diferentes conexiones de un transformador.

El desarrollo en las pruebas de respuesta a la frecuencia se ha debido principalmente a la experiencia práctica, conocimiento físico del sistema y la interpretación de resultados. De aquí la importancia de resaltar el análisis de un transformador de doble núcleo. Los transformadores de doble núcleo son los usados en los hornos de arco donde se requieren enormes cantidades de corriente para fundir el material. Debido a que estos transformadores son especiales, se considera de gran valor los resultados presentados y posible referencia para trabajos futuros.

La prueba de FRA es no destructiva, basada en el hecho de que cada devanado del transformador tiene una frecuencia característica que es sensitiva al cambio de los parámetros eléctricos del devanado, principalmente su equivalente inductivo y capacitivo. Cualquier movimiento mecánico debido a situaciones internas o externas se verá reflejado en estos parámetros eléctricos lo que conlleva un cambio en la respuesta de la frecuencia característica.

Los transformadores para horno de arco, de acuerdo con Kulkany y Khaparde (2013), son usados en varias industrias, tal como la industria del acero y en otras diferentes donde se requieran altas corrientes difíciles de conseguir con transformadores convencionales. Igualmente se indica el creciente aumento en el uso

de estos transformadores de arco eléctrico, de ahí la importancia del análisis que se presenta en este artículo.

2. Transformadores de Doble Núcleo

La aplicación principal de los transformadores de doble núcleo es como transformadores de horno de arco en la producción de acero. Son construidos para hornos de acero, principalmente de arco grande, hornos de cucharón, hornos de arco corto y sumergido. Los transformadores de horno de arco (AFT, Arc Furnace Transformer) operan bajo condiciones dinámicas muy severas con sobrecorrientes y sobrevoltajes, debido a los cortocircuitos generados por el horno. De todos los aparatos que producen arco eléctrico en un sistema de potencia, son los hornos de arco eléctrico los que pueden causar los problemas más severos, porque representan una fuente de armónicos de gran capacidad concentrada en un lugar específico. Los hornos de arco eléctrico (EAF, Electric Arc Furnace) son una de las principales causas del parpadeo de voltaje, mismo que afecta a los consumidores conectados a las mismas líneas, debido a la alta demanda de corriente de las cargas (Knnit.com, 2021).

Los EAF utilizan el efecto térmico de un arco eléctrico para fundir el contenido del horno. En el EAF se tienen tres electrodos conectados a las terminales secundarias del AFT. Por lo tanto, el transformador tiene que ser especialmente diseñado para soportar cortocircuitos en el lado secundario, además, un transformador alimentando un horno de arco tiene que entregar una corriente extraordinariamente alta a voltajes relativamente modestos, digamos entre 200 y 1000 Volts. Sus rangos de potencia varían entre 50 y 100 MVA y son bastante comunes las corrientes en el secundario de más de 50 KA alcanzando en ocasiones los 200 KA.

La reactancia de dispersión necesita ser mantenida tan baja como sea prácticamente posible, tomando en consideración el diseño mecánico de los devanados y los soportes de las estructuras. Los transformadores de horno cuentan con un devanado regulador independiente que es un devanado con derivaciones. La variación del porcentaje de reactancia sobre el rango completo de cambios de derivación depende de la disposición de los devanados.

El proceso de fundición en un horno requiere una potencia inicial muy grande para fundir la carga del horno, la potencia requerida después de esto para el refinamiento del material derretido es menor. El requerimiento de potencia variable a la entrada se logra cambiando el voltaje de alimentación del horno de manera continua sobre un rango amplio mediante el uso de un cambiador de derivación bajo carga (OLTC, on-load tap changer). Su uso es primordial donde no se desea tener interrupciones temporales de suministro en el cambiador de derivación. Debido a que la regulación requerida es muy fina, se requiere de un OLTC con gran número de pasos.

El arreglo más utilizado para aplicaciones de hornos de mediana y alta potencia es el transformador de horno con un arreglo elevador como se muestra en la [Figura 1](#).

El transformador elevador en las salidas aumenta o reduce el voltaje del secundario del transformador principal. El devanado primario del transformador elevador es alimentado del devanado de derivación del transformador principal y el voltaje de alimentación es seleccionado de tal forma que resulte en condiciones de operación menos costosas para el OLTC. Así, el costo del OLTC es muy bajo en este arreglo. También la variación del voltaje del secundario es igual de una derivación a otra a través del rango de regulación. Normalmente, el transformador principal y el transformador elevador son

colocados en el mismo tanque minimizando el tamaño de las conexiones entre los devanados secundarios de ambos transformadores.

La capacidad del transformador elevador es mucho menor que la del transformador principal, siendo suficiente sólo para propósitos de regulación. Además, los diámetros de los núcleos son diferentes, los circuitos magnéticos de los dos transformadores tienen generalmente la misma distancia de centro a centro y la misma altura de ventanas para facilitar las conexiones

entre sus devanados secundarios. Si se quisiera reducir el material del núcleo, la distancia de centro a centro del transformador elevador puede ser menor, pero las conexiones se vuelven un poco más complicadas. Debido a que las corrientes en los devanados secundarios del transformador principal y del primario del transformador elevador son iguales se utiliza el mismo tipo y tamaño de conductor para ambos devanados.

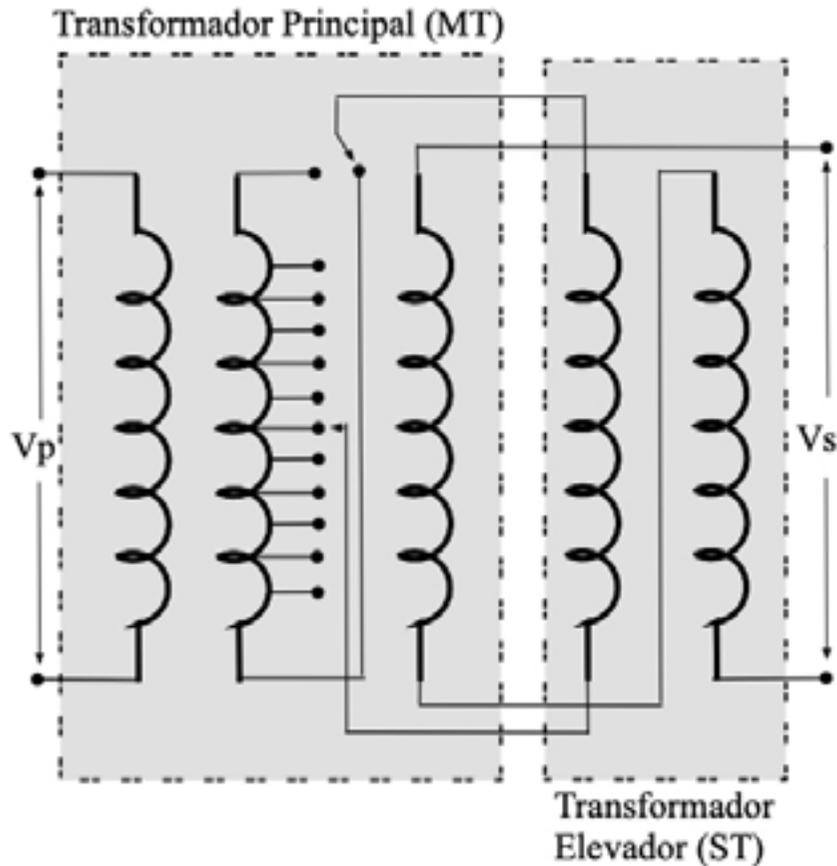


FIGURA 1. Transformador de horno, arreglo elevador

También los dos devanados son a menudo conectados en una figura de ocho, como se muestra en la Figura 2, evitando conexiones extras entre ellos. Se requiere un arreglo especial

para levantar los dos devanados de los núcleos ensamblándolos simultáneamente (Knnit.com, 2021).

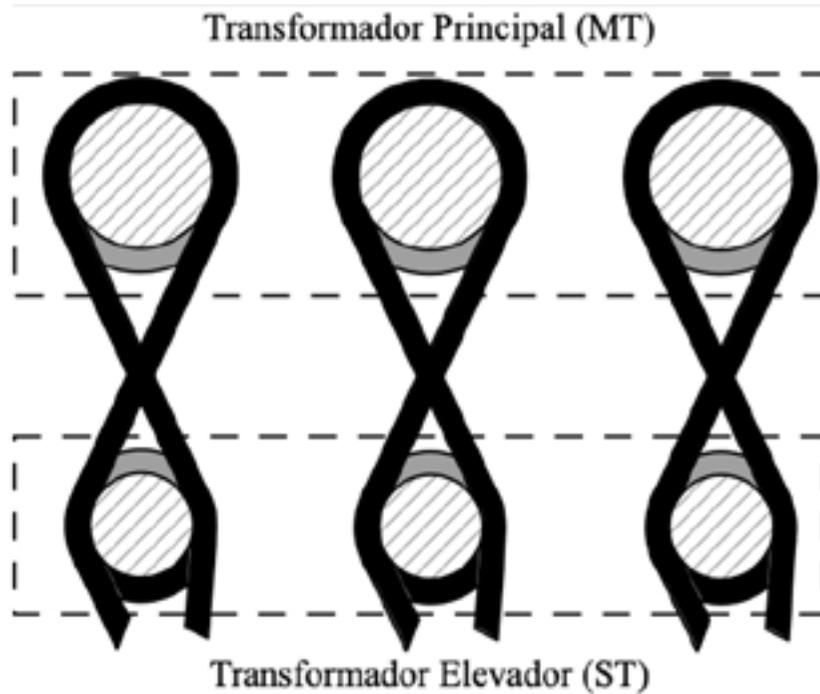


FIGURA 2. Conexión en ocho.

El devanado secundario de un transformador de horno está constituido por un número de bobinas en paralelo arregladas verticalmente y conectadas por medio de barras de cobre verticales. El arreglo de ida y retorno es usado para las conexiones de entrada/salida reduciendo el campo magnético y las pérdidas asociadas en las partes estructurales cercanas. Es preferible un devanado secundario conectado en delta, debido a que la corriente circulante por éste será reducida. Muchas veces los finales de cada fase del devanado secundario son extraídas del tanque y la conexión delta es realizada en el horno. Esto minimiza las caídas de voltaje inducido en el conductor y puede lograr un mejor balance por fase en las corrientes de los electrodos. El devanado de bajo voltaje (secundario del transformador principal), es invariablemente el devanado más expuesto y el devanado de alto voltaje (primario del transformador elevador), puede ser localizado junto al núcleo. En tal caso el devanado de regulación (con derivaciones), está entre los devanados de alta y de baja. Tal

disposición de devanados reduce la variación de porcentaje de impedancia a medida que la posición de derivación se cambia de un valor mínimo a uno máximo en el diseño de flujo variable (Knnit.com, 2021; Heathcote, 2007; Villanueva-Hernández, 2007). En la [Figura 3](#) se muestra el arreglo de los devanados y los núcleos del transformador de horno. El funcionamiento en general del transformador de horno puede apreciarse mejor en la [Figura 4](#), donde para propósitos prácticos se muestra una vista de perfil del transformador de horno permitiendo ver sólo una fase del transformador, además los devanados han sido defasados sobre las piernas para su apreciación. En el núcleo del transformador principal (MT), se puede apreciar en la parte superior el devanado primario, en el centro el devanado con derivaciones y en la parte de abajo el devanado secundario. En el núcleo del transformador elevador (ST), se puede apreciar en la parte superior el devanado de excitación y en la parte de abajo el devanado secundario.



FIGURA 3. Arreglo de los devanados y núcleos del transformador de horno. Figura tomada de www.tamini.com

Si se tiene una corriente en el devanado primario, como se indica en la [Figura 4](#), se genera un campo magnético de abajo hacia arriba en el núcleo principal, que induce una corriente que genera un flujo en sentido contrario en los devanados con derivaciones y secundario. Como resultado, en el núcleo secundario se tiene un flujo generado por el devanado secundario que va de arriba hacia abajo y, dependiendo de la conexión entre las terminales P0-P1 ó P0-P2 en el devanado de excitación, se tendrá un flujo que se suma o se resta al generado por el devanado

secundario en el núcleo pequeño, la magnitud que se suma o resta dependerá de la posición del tap en el devanado con derivaciones, lo que se puede apreciar en la [Figura 4](#).

Como se puede ver la estructura de construcción respecto al núcleo y devanados difiere mucho del transformador de horno en comparación al tradicional de un núcleo, de aquí la importancia de ver la respuesta en la frecuencia para este tipo de transformadores y que sirva como referencia para futuras aplicaciones.

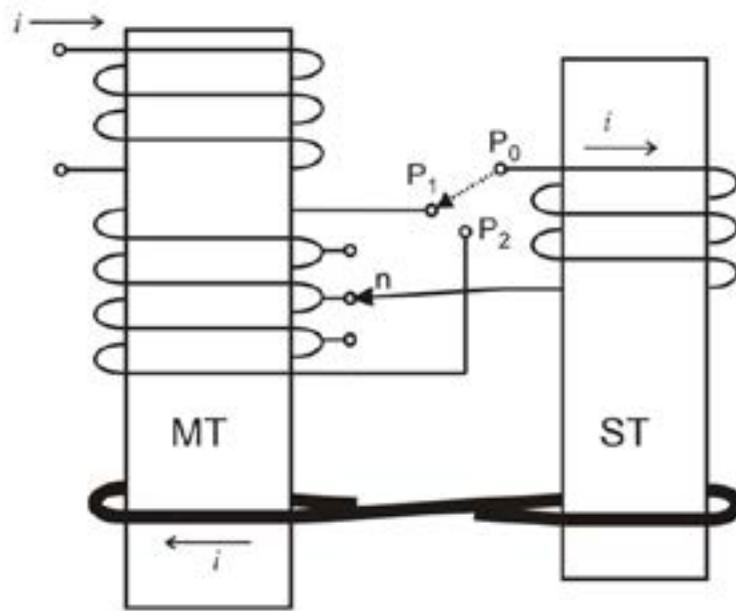


FIGURA 4. Vista lateral de un transformador de doble núcleo

3. Respuesta típica de un transformador Δ -Y

Con el objetivo de ver el alcance de la aplicación del FRA en transformadores de potencia se presentan los resultados de su aplicación a un transformador trifásico de tres piernas. Las

principales pruebas que se realizan consisten en: pruebas de circuito abierto de alta y baja tensión y pruebas de cortocircuito en las cuales se alimenta el lado de alta tensión mientras se cortocircuita el lado de baja tensión. La respuesta típica de estas pruebas en un transformador conectado en Δ -Y se muestran en la Figura 5.

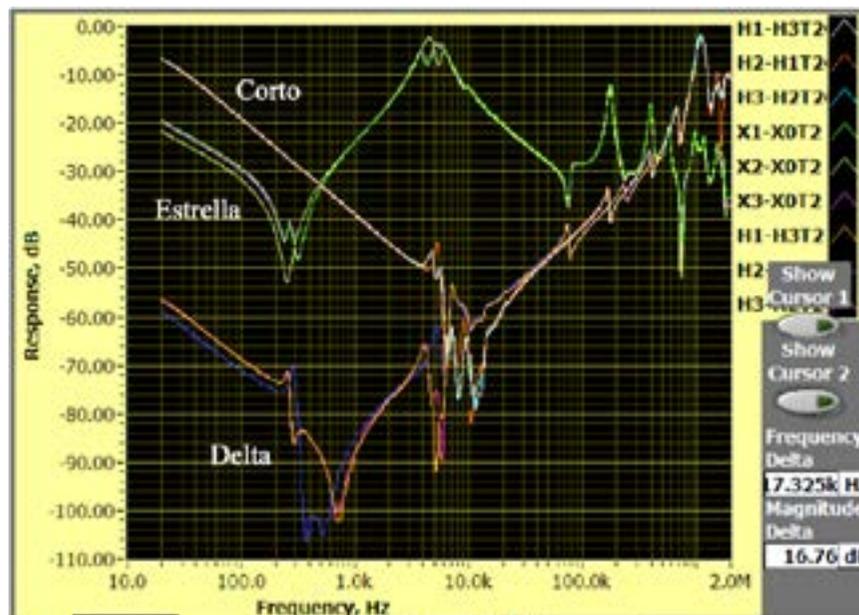


FIGURA 5. Respuesta típica para una conexión Δ -Y

La Figura 5 muestra la respuesta clásica para las pruebas de circuito abierto tanto para una conexión delta como para una conexión estrella, así mismo, se muestra la respuesta de la prueba de cortocircuito. De aquí se observa que la respuesta en la prueba de circuito abierto de las fases laterales tanto para la conexión delta como para la conexión estrella son idénticas mientras que la fase central en ambos casos refleja una mayor impedancia debido a la diferencia en las trayectorias de la estructura magnética del transformador, así como puntos de resonancia distintos. Por su par-

te la prueba de cortocircuito presenta un comportamiento idéntico debajo de los 4 kHz y posteriormente se cumple el hecho de que las fases laterales presentan un comportamiento idéntico mientras que la fase central refleja en su respuesta un incremento en su impedancia y cambios en distintos puntos de resonancia.

Es importante señalar que diferentes rangos de frecuencia están asociados con las distintas fallas posibles dentro del transformador en devanados y núcleo, tal como se observa en la Figura 6.

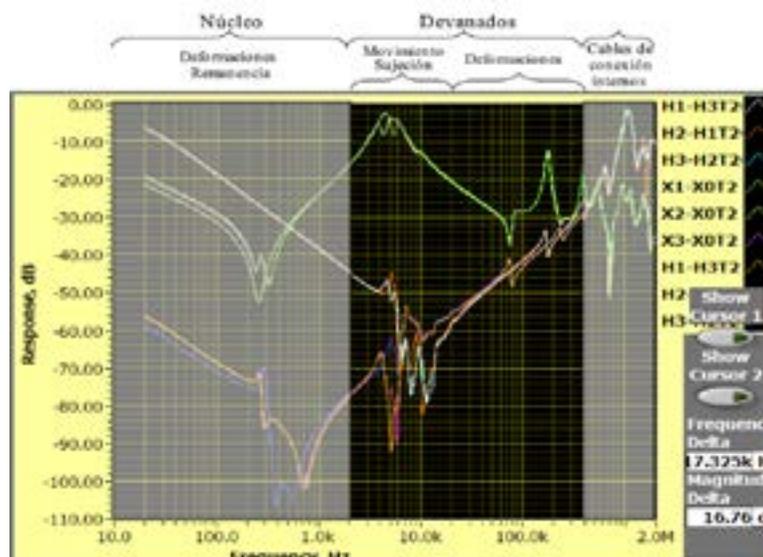


FIGURA 6. Asociación de rangos de frecuencia con fallas internas

Como puede observarse en la Figura 6, el rango de frecuencias de 20 Hz a 2 kHz excita los modos de falla correspondientes a deformaciones en el núcleo, magnetismo remanente, cortocircuitos entre espiras y circuitos abiertos en devanados (Behjat *et al.*, 2012). Por otro lado, el rango de 2 kHz a 20 kHz permite detectar desplazamientos de devanados y pérdida de los soportes de los mismos. En el rango de 20 kHz a 400 kHz es posible detectar deformaciones en los devanados y en los cambiadores de derivación. El rango restante de frecuencia de 400 kHz a 2 MHz permite detectar movimientos en

los cables de conexión interna de devanados y el cambiador de derivación.

Existen distintos factores externos que alteran la respuesta de la prueba y que deben tenerse en cuenta al momento de realizar ésta (Behjat *et al.*, 2012), ya que normalmente será complicado justificar el volver a sacar de operación el transformador por un error en la realización de la prueba a menos que existan fuertes indicios de fallas al interior del transformador en las respuestas obtenidas. Lo anterior hace evidente la necesidad de una buena capacitación del personal que realizará la prueba para

una toma de decisiones correcta en el análisis de la respuesta.

Como puede verse las respuestas a un transformador trifásico de núcleo sencillo (Figura 6), son las que se pueden encontrar en la literatura y se considera que es de gran importancia presentar resultados de estas pruebas para un transformador de arco de gran potencia. Se deben analizar con las respuestas tradicionales ya que se tienen dos grandes diferencias: los núcleos y los devanados y es precisamente donde se tiene la sensibilidad de la respuesta a la frecuencia.

conexión delta los dos. Considerando que las pruebas se realizaron estando el transformador en perfectas condiciones se considerarán estas respuestas como la referencia para pruebas futuras de la unidad, así como de otras unidades gemelas o similares. En la Figura 7 las gráficas superiores corresponden a la prueba de circuito abierto del lado de baja tensión y las gráficas inferiores son las correspondientes a la misma prueba del lado de alta del transformador de horno.

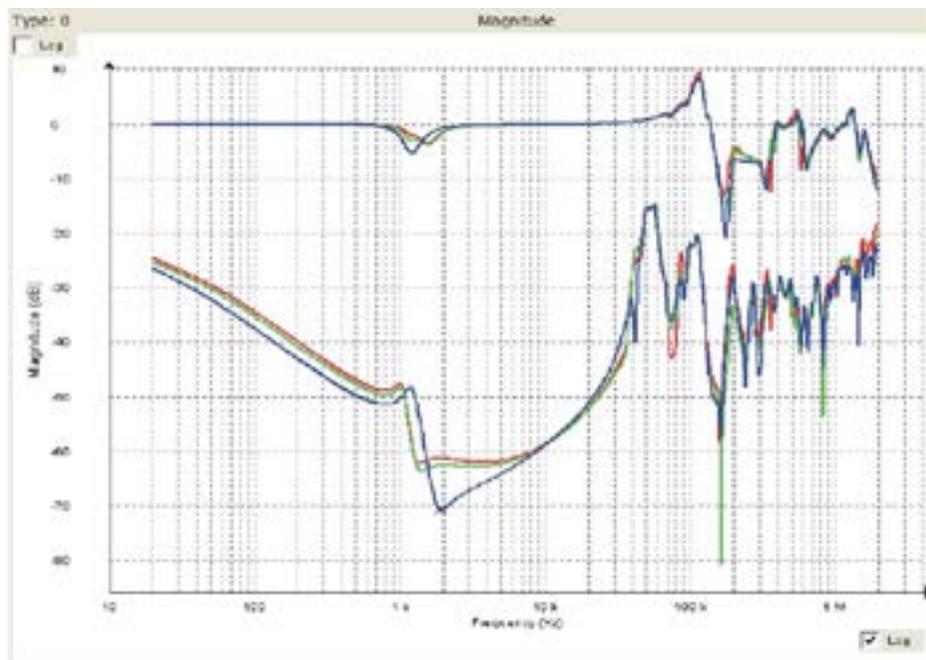


FIGURA 7. Prueba de circuito abierto, lado de alta y baja tensión.

4. Análisis de la respuesta de las pruebas del transformador de doble núcleo

El transformador bajo análisis tiene una capacidad de 155 MVA, relación de transformación de 66/0.96 KV, en derivación nominal el tap se localiza en la posición 3 (Sánchez *et al.*, 2008). La Figura 7 muestra la respuesta de la prueba en circuito abierto aplicada en ambos lados primario y secundario del transformador, con

Analizando las respuestas de las Figuras 6 y 7 se pueden distinguir varias diferencias entre los resultados para un transformador de núcleo sencillo (Figura 6) y uno de horno de arco (Figura 7). Primero, en la respuesta de circuito abierto del lado de baja se puede observar que el valor de la magnitud de la impedancia es constante y muy cercano a cero en el intervalo de 20Hz a 50kHz, con excepción del punto de resonancia, no muy pronunciado, alrededor de 1.5kHz. Esta impe-

dancia es meramente resistiva ya que el devanado secundario consiste de muy pocas vueltas de un conductor muy grueso, tipo solera. Ahora, comparando la respuesta de circuito abierto del lado de alta en delta, se observa un efecto muy importante, el rango de frecuencia en que se tiene la respuesta de los devanados y núcleo. Mientras que este rango en un transformador de núcleo sencillo es de 20Hz a 400kHz, en el transformador de horno llega hasta 2MHz, lo cual es lógico ya que es muy diferente el arreglo de los núcleos y devanados en el transformador de horno. Otro aspecto importante a notar son los puntos de resonancia ya que precisamente éstos permiten realizar adecuadamente un diagnóstico de posible falla interna en el transformador; aquí se puede

ver que en el transformador de núcleo sencillo en lo referente al mismo rango de frecuencia se tienen tres puntos de resonancia, mientras que en el transformador de horno sólo se tienen dos y algo interesante con diferente pendiente. Recordando que la diferencia principal es que estos puntos de resonancia ocurren a muy diferente frecuencia. Lo destacable es que observando las gráficas, las respuestas para las fases externas son muy similares mientras que para la central hay una pequeña diferencia esto es igual en el transformador de núcleo sencillo como en el de arco, debido a la simetría de núcleos y devanados. Cabe resaltar que el análisis de la respuesta a la frecuencia para el diagnóstico de fallas internas se basa en la comparación cualitativa de las respuestas.

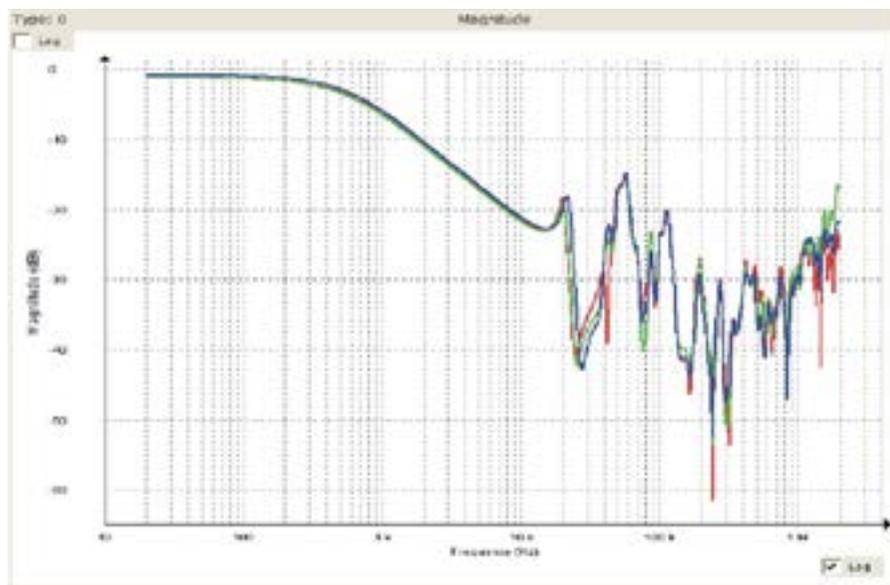


FIGURA 8. Prueba de cortocircuito, lado de alta tensión

La Figura 8 muestra adicionalmente la respuesta de cortocircuito del lado de alta donde también realizando la comparación como en el caso anterior, el primer punto a resaltar es el rango de frecuencias que es el mismo que en el caso anterior. El otro aspecto es que el valor de la magnitud de la impedancia en el transformador de núcleo sencillo inicia disminuyendo

a una pendiente constante, mientras que en el transformador de arco el valor de la magnitud de la impedancia es cero por un intervalo de 20Hz hasta 200 Hz y posteriormente disminuye pero con una pendiente menos pronunciada. Hay que resaltar que estos son los detalles que proporcionan la información necesaria para realizar un buen diagnóstico.

5. Conclusiones

La detección de fallas incipientes en transformadores mediante la prueba de FRA ha demostrado su efectividad en múltiples ocasiones, debido a su alta sensibilidad en la detección de deformación y movimiento de desplazamiento de devanados, así como de fallas en el núcleo, sin necesidad de abrir el transformador, además de que es una prueba no invasiva ni destructiva. En este trabajo se presentó la aplicación de estas pruebas a transformadores de horno de arco de gran potencia para tener una referencia que pueda ser utilizada a nivel académico y/o industrial. Estas pruebas se analizaron y compararon con las obtenidas para un transformador de núcleo sencillo, resaltando las diferencias existentes entre ambas lo cual es vital para el que pretenda diagnosticar, ya que debe recordarse que es fundamental una amplia experiencia en la prueba y en el dispositivo a medir. Por lo tanto se considera que estos resultados son de gran valor como registro base de comparación para transformadores de horno de arco. Haciendo énfasis en esto último, estas son mediciones que se pueden tomar como la huella digital del transformador de doble núcleo para que en las siguientes pruebas de rutina, o debidas a algún percance físico o natural, sean la referencia para detectar posibles fallas internas.

Los transformadores de doble núcleo utilizados en la industria acerera, de acuerdo con Knnit.com (2021), están en crecimiento a nivel global, de aquí la importancia del tema tratado y la base para el tratamiento de este tipo de transformadores ya que por su construcción, el devanado en ocho que une a los dos núcleos, hace complicado su análisis como circuito eléctrico equivalente porque no presenta un grafo lineal y la mejor forma de modelar su comportamiento es mediante el uso de componentes RLC. Más aun, el avance de la electrónica mi-

croprocesada ha permitido elaborar los equipos para realizar la pruebas de barrido de frecuencia, con mayor exactitud y precisión, de menor tamaño y a costos más asequibles.

Importante también es resaltar la indicación de que estos resultados se pueden usar como la huella digital porque se han realizado en un transformador real y en condiciones normales de trabajo. Por supuesto, que será de gran utilidad para cuando el transformador presente alguna falla como resultado de la edad de los materiales, movimientos mecánicos, sobrecargas o descargas atmosféricas; se tiene la referencia para poder diagnosticar el tipo y magnitud de la falla que se presente a consecuencia de los disturbios indicados.

Referencias

- BEHJAT, V., A. Vahedi, A., A. Setayeshmehr, A., H. Borsi, H., y E. Gockenbach, E. 2012. "Sweep frequency response analysis for diagnosis of low level short circuit faults on the windings of power transformers: An experimental study", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, ISSN: 0142-0615, Vol: 42 (1): 78-90.
- COFFEEN, L. and C. Sweetser, C. 2002. "Different Aspects of Frequency Response Analysis (FRA)", *IEEE/PES Transformers Committee Spring 2002 Meeting* Vancouver, B.C., Canada April 14-18.
- HEATHCOTE, M. J. 2007. *The J & P Transformer Book*. 13th. Edition, Newnes, Elsevier.
- KNNIT.COM, 2021. *Electric Arc Furnace Transformers Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast, 2019–2027*, <https://www.transparencymarketresearch.com/electric-arc-furnace-transformers-market.html>.
- KULKARNI, S. V. and y S. A. Khaparde, S. A. 2013. *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics*. Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA.
- MOODLEY, L. 2006. *Sweep frequency response analysis as a diagnostic tool to detect transformer mechanical integrity*, Congress the Association of Municipal Electricity Undertakings Southern Africa.

- NIRGUDE, P. M., Channakeshava, G. B., Rajkumar, A. D., Singh, B.P. 2004. Frequency Response Analysis approach for condition monitoring of transformers, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP appos; 04 2004 Annual Report Conference on Volume, Issue, 17-20 Oct: 186-189.
- SÁNCHEZ, S., Avalos J. A., y C. Pérez. C. “ 2008. Field and laboratory experiences in sweep frequency in transformers”, Doble Engineering Company- 75th Annual International Doble Client Conference.
- VILLANUEVA Hernández, H. D. 2007. Obtención de parámetros en transformadores mediante elementos finitos usando ansys. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Tesis de Maestría.