

Aplicación de la técnica del barrido de frecuencia, en el diagnóstico de los devanados de dos autotransformadores de potencia

Application of sweep frequency technique in the diagnosis of windings of two power autotransformers

Ramón Pérez Hernández^I, Orestes Hernández Areu^{II,*}

^IEmpresa de Construcciones de la Industria Eléctrica (ECIE), La Habana, Cuba

^{II}Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

*Autor de la correspondencia: orestesh@electrica.cujae.edu.cu

Recibido: 27 de agosto de 2023

Aprobado: 16 de octubre de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ ABSTRACT

Se describe la aplicación del análisis de respuesta al barrido de frecuencia (SFRA) como herramienta de diagnóstico de fallas en dos autotransformadores de una subestación. A diferencia de los transformadores de potencia, los autotransformadores poseen, en cada fase del devanado de alta tensión, una bobina serie y otra común, que deben ensayarse por separado para poder discriminar el estado de cada una de ellas. Se muestran los resultados obtenidos empleando la configuración de admitancia de circuito abierto y realizando un barrido desde la frecuencia de 10 Hz hasta 1000 kHz. Las comparaciones de las funciones transferenciales de respuesta se hicieron entre fases de un mismo autotransformador y para el análisis de los resultados se aplicó el método estadístico de los Coeficientes de Correlación. Se comprobó que la ocurrencia de varios eventos de cortocircuitos y malas operaciones, provocaron modificaciones en la geometría de los devanados de ambos equipos.

Palabras clave: SFRA, detección de falla, autotransformador.

The application of swept frequency response analysis (SFRA) as a fault diagnosis tool in two autotransformers of a substation is described. Unlike power transformers, autotransformers have, in each phase of the high voltage winding, a series coil and a common coil, which must be tested separately in order to discriminate the state of each of them. The results obtained using the open circuit admittance configuration and sweeping from the frequency of 10 Hz to 1000 kHz are shown. Comparisons of the transference response functions were made between phases of the same autotransformer and the statistical method of Correlation Coefficients was applied to analyze the results. It was found that the occurrence of several short circuit events and poor operations, caused modifications in the geometry of the windings of both devices.

Keywords: SFRA, failure detection, autotransformer.

INTRODUCCIÓN

El ensayo de barrido de frecuencia SFRA (Sweep Frequency Response Analysis), es un método de diagnóstico que se emplea para evaluar el estado de los parámetros internos de las máquinas eléctricas en general y de los transformadores en particular. Aunque los parámetros internos de las máquinas eléctricas quedan definidos en el momento de su construcción, estos pueden ser afectados posteriormente, por algún estrés mecánico o eléctrico. En el año 2018, A.Kamalaselvan y R.Muthaiah [1], refieren que el estrés eléctrico ocurre como resultado de procesos transitorios en los sistemas de potencia que pueden originar fallas tales como cortocircuitos entre espiras o entre discos, llegando hasta fallas en la pared de aislamiento, sin embargo, se ha demostrado que la transportación y el emplazamiento de los transformadores han sido causantes de estrés de naturaleza mecánica con deformaciones internas en los equipos.

Cómo citar este artículo:

Ramón Pérez Hernández y Orestes Hernández Areu. Aplicación de la técnica del barrido de frecuencia, en el diagnóstico de los devanados de dos autotransformadores de potencia. Ingeniería Energética. 2024. 45 (1), enero/abril. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

En el año 2018; O. Hernández y otros [2], aseveraron que los parámetros internos de un transformador, están asociados a la geometría del mismo y que cambian cuando hay algún tipo de deformación o desplazamiento en las bobinas o en el núcleo magnético. Debe acotarse que, en muchas ocasiones, sin evidenciarse deformaciones o desplazamientos, pueden verificarse alteraciones en algunos parámetros que son detectables mediante la técnica del SFRA. La ejecución de este método de diagnóstico requiere de datos de referencia en condiciones de buen estado técnico de la máquina para compararlos con los resultados de la respuesta ante la prueba. Por lo tanto, las diferencias entre los datos de referencia y las nuevas respuestas medidas se refieren a su falla. En 2019, O. Hernández y otros [3], plantean que un aspecto importante es que esta prueba necesita de un criterio experto para la identificación de las fallas posibles.

Se debe aclarar que actualmente, se emplean métodos matemáticos y análisis estadísticos para detectar e identificar de forma automatizada las fallas, pudiendo prescindirse de la opinión de un experto. En el año 2020, A. A. Alawady y otros [4], advierten que cada falla tiene una huella digital o una respuesta de frecuencia característica, por lo que, mediante el análisis de diferentes respuestas de las mediciones, se detectan múltiples tipos de fallas y también se identifica la gravedad de las mismas. También, en el mismo año estos autores, realizan tres publicaciones [5-7], donde coinciden en que las respuestas que se obtienen consisten en funciones de transferencia de tensión entre los devanados para una gama de frecuencias de 20 Hz a 2 MHz dividida en cuatro regiones. Esto es cierto, aunque este criterio se puede ampliar argumentando que también se pueden obtener funciones de transferencia de corriente y que el análisis puede hacerse en otra gama de frecuencias y tres bandas caracterizadas como; bandas de baja, media y alta frecuencia.

En 2020 N. F. M. Yasidy otros [8], plantean que la respuesta del devanado de un autotransformador puede ser afectada por el devanado terciario, debido al efecto de acoplamiento entre los devanados. A esto hay que agregar que debe tomarse el cuidado de ensayar por separado la bobina serie y común de cada fase de los autotransformadores para poder discriminar el estado de cada una de ellas. En 2021 Salem Mgamal Al-Ameri y otros [9], publican que el SFRA tiene ventajas sobre otros métodos de diagnóstico como la medición de la corriente magnetizante y la medición de las capacitancias del devanado, por ser más sensible en la identificación de deformación del devanado, inclinación y flexión del conductor.

Ciertamente, la practica ha demostrado esta aseveración, a lo que hay que agregar que ya actualmente, existen equipos de SFRA que pueden realizar esta prueba en línea, lo cual representa una ventaja adicional sobre los otros métodos de diagnóstico mencionados que aun se ejecutan fuera de línea. En este trabajo se mostrarán los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica de SFRA fuera de línea a dos autotransformadores de potencia (AT), mediante el empleo del equipo Megger FRAX 150, empleando la configuración de admitancia de circuito abierto y realizando un barrido desde la frecuencia de 10 Hz hasta 1000 kHz, dividida en tres bandas (baja, media y alta). Las comparaciones de las funciones transferenciales de respuesta se hicieron entre fases en un mismo autotransformador y para el análisis de los resultados se aplicó el método estadístico de los Coeficientes de Correlación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los autotransformadores objeto de este estudio se identifican por 1AT y 2AT. Fueron construidos por el mismo fabricante en el año 1980, el 1AT comenzó a dar servicio en el año 1986 y el 2 AT en el año 2000, operando los dos en paralelo. Son idénticos con devanados terciarios. Tienen parámetros nominales; 250 MVA, 220/110/11 kV y grupo de conexión Yn/Yn/ Δ -11. Factores como la ocurrencia de cortocircuitos, las descargas atmosféricas, la sobreexplotación, la continuidad de la operación una vez transcurrida su vida útil, entre otros, han podido provocar problemas de operación de estos equipos y es muy probable que hayan disminuido su capacidad para soportar los esfuerzos causados por estos eventos. Estas máquinas, debido a su criticidad requieren un cuidado especial, ya que defectos importantes pueden pasar inadvertidos y provocar la baja técnica de estas.

Por este motivo se hace necesario diagnosticar su estado técnico, promoviendo un adecuado mantenimiento predictivo, mediante el método del Análisis de Respuesta al Barrido de Frecuencia, capaz de detectar indicios de problemas, donde otras técnicas son incapaces [10, 11]. Durante el período de explotación se han presentado varios episodios de cortocircuitos, que han afectado de alguna manera el estado de estos autotransformadores. De acuerdo a la estadística existente en la subestación, desde el año 2001 hasta la fecha se han desarrollado los siguientes eventos:

- Siete errores de operación, por equivocaciones del personal durante manipulaciones que provocaron fuertes cortocircuitos monofásicos.
- Explosión de un pararrayo de la fase B de los transformadores de potencial de la barra colectora.
- Energización de las barras de 110 kV con desconectivos monofásicos de tierra dejados en posición cerrada.
- Cortocircuitos en las líneas de salida de la subestación por causa de tormentas eléctricas, caída de fases a tierra o de cable protector partido y caído sobre las fases.
- Otros que ocurrieron en los primeros años de servicio, de los que no se tiene estadísticas.

Desde hace varios años en uno de los autotransformadores, específicamente en el 2AT, se han presentado puntos calientes en la tornillería, que une la carcasa o campana de la cuba con la base. Este fenómeno se ha estado monitoreando con ayuda de imágenes infrarrojas que confirman un calentamiento anormal en varios de los tornillos.

Aplicación de la técnica de diagnóstico SFRA para identificar posibles fallos

En la literatura especializada consultada, se proponen y comparan métodos estadísticos para analizar los resultados de la técnica de SFRA como son; el Coeficiente de Correlación, la Desviación Estándar y otros [12-15], también se han propuesto técnicas matemáticas como el Índice de Calidad de respuesta de frecuencia para evaluar la condición mecánica de los devanados del transformador[16], el Modelo de Árbol de Decisión y Red Neuronal Completamente Conectada[17], el Método Grupal de manejo de datos mediante Redes Neuronales Artificiales[18],etc.

En este artículo, se emplea como herramienta para interpretar los resultados,el método de los Coeficientes de Correlación de la Norma China DL/T-911-2004, así como los criterios de las normas IEEE C57.149-2013, IEC 60076-18-2012y CIGRE Technical Brochure N° 445.

Las configuraciones de ensayo posibles del SFRA son [19]: (Ver figura1).

- Admitancia de Circuito Abierto, Y_0
- Admitancia de Cortocircuito, Y_{cc}
- Interdevanado Capacitivo, IC
- Interdevanado Inductivo, II

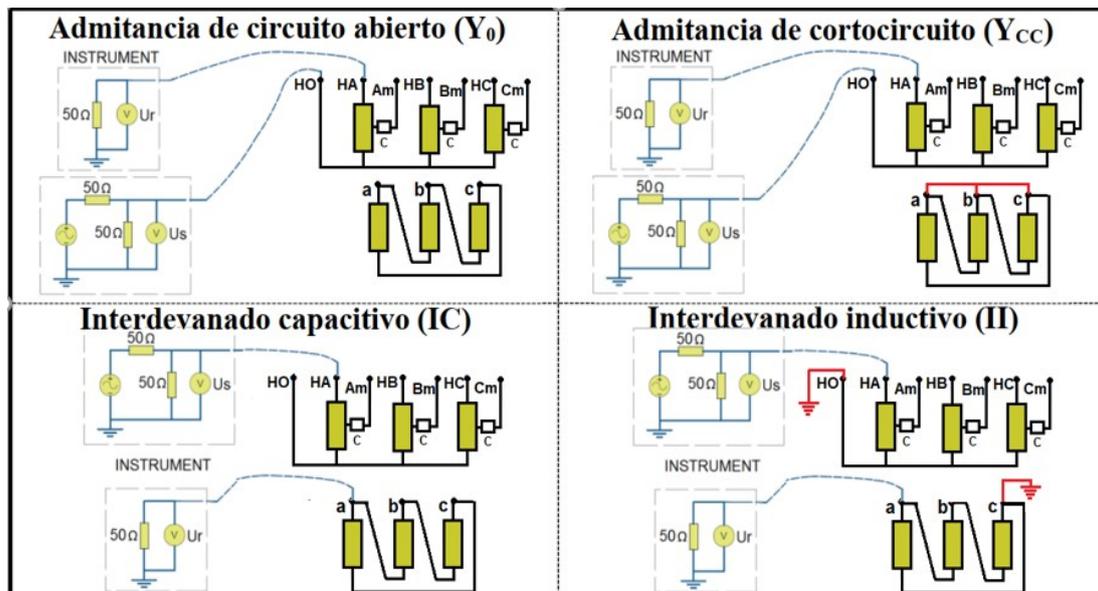


Fig. 1. Configuraciones de SFRA

En este estudio, solo se presentan los resultados obtenidos con la configuración admitancia de circuito abierto (Y_0) en los devanados de alta, media y baja tensión. La configuración de Y_0 se ejecuta desde el extremo de un devanado a otro extremo, con todos los otros terminales flotando. Este tipo de medición es aplicable tanto a transformadores monofásicos como transformadores trifásicos y se puede clasificar en las siguientes categorías: devanados de baja tensión, devanados de alta tensión, devanados terciarios, devanados serie y devanados comunes (las dos últimas categorías aplican para autotransformadores) [19].

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Medición de la admitancia de circuito abierto Y_0 en los autotransformadores 1AT y 2AT

La Norma China DL/T-911, para la interpretación de los resultados, permite referenciar los resultados investigados y realizar las comparaciones necesarias para determinar las posibles deformaciones de los devanados, mediante los Coeficientes de Correlación R . En la tabla 1, se muestra la relación entre el Coeficiente de Correlación R y el grado de deformación del devanado, parabandas de frecuencias bajas (R_{LF}), medias (R_{MF}) y altas (R_{HF}):
 R_{LF} :(1kHz-100 kHz), R_{MF} :(100kHz-600 kHz) y R_{HF} :(600kHz-1 MHz).

Tabla 1. Relación entre el Coeficiente de Correlación R y el grado de deformación del devanado según la Norma China DL/T 911-2004

Grado de Deformación	R_{LF}	R_{MF}	R_{HF}
Bobina Normal	$R_{LF} \geq 2,0$	$R_{MF} \geq 1,0$	$R_{HF} \geq 0,6$
Deformación ligera	$2,0 > R_{LF} \geq 1,0$	$1,0 > R_{MF} \geq 0,6$	
Deformación obvia	$1,0 > R_{LF} \geq 0,6$	$R_{MF} < 0,6$	
Deformación seria	$R_{LF} < 0,6$		

Ensayo de las bobinas serie y común en ambos AT

En la figura 2, se puede observar la conexión de la bobina serie y común de un AT. La entrada de la señal se realizó por el terminal neutro (H0) por ser común para las tres fases y las salidas se obtuvieron por los extremos de las bobinas de alta tensión (HA, HB, HC) y media tensión (Am, Bm, Cm) respectivamente. Los devanados de baja tensión se mantuvieron con sus terminales en circuito abierto (C/A).

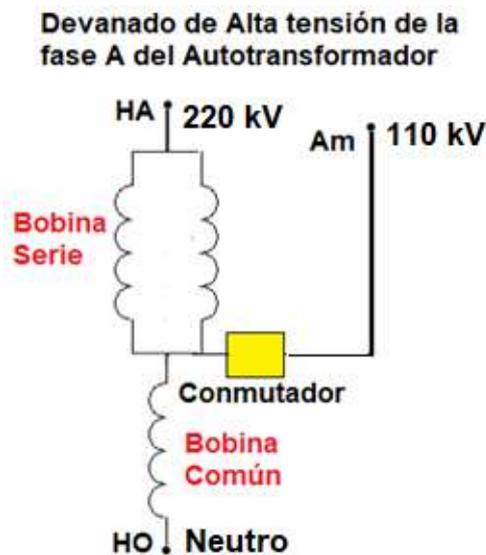


Fig. 2. Esquema de la conexión de la bobina serie y común en una de las fases del AT

Solo se presentarán en los análisis, aquellos casos donde se presentan desviaciones, los casos que no tengan desviaciones apreciables, se obviarán.

Análisis del Coeficiente de Correlación a las frecuencias entre 1kHz y 100 kHz (R_{LF})

De acuerdo a los resultados de R_{LF} , en los dos AT (ver figuras 3 y 4), las curvas amplitud-frecuencia de las fases C, son las de referencias para ambos autotransformadores.

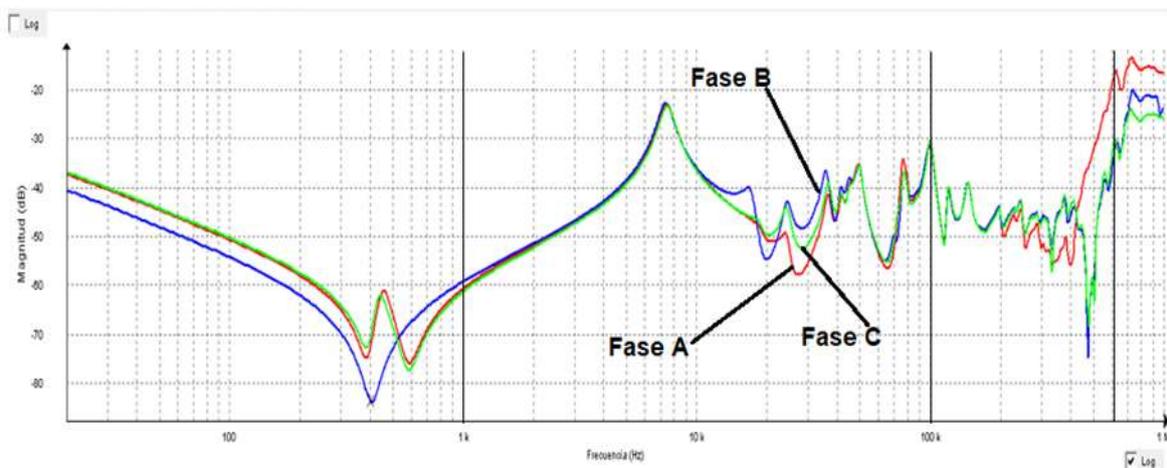


Fig. 3. Curvas características de admitancia de circuito abierto en autotransformador 1AT

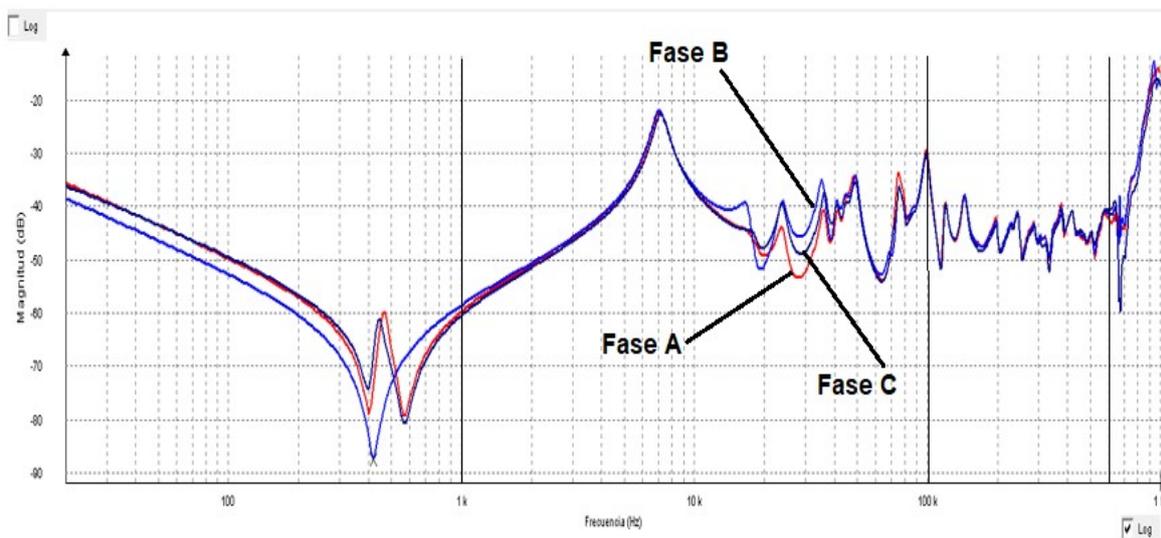


Fig. 4. Curvas características de admitancia de circuito abierto en autotransformador 2AT

En ambos AT se observa una ligera distorsión en las fases A y B entre las frecuencias 10 kHz y 40 kHz. Las fases A y B se han desplazado con relación a la C, la fase B por encima y la fase A por debajo, lo que es característico de una deformación axial. Además, se observa la aparición de una nueva resonancia en la fase B (color azul en ambos gráficos), aproximadamente a los 18 kHz, lo que es representativo de un desplazamiento o deformación adicional en esta fase. En la tabla 2, se muestran los resultados del Coeficiente de Correlación para la gama de bajas, medias y altas frecuencias

Tabla 2. Resultados del Coeficiente de Correlación para la gama de bajas, medias y altas frecuencias

Medición	R_{LF}	R_{MF}	R_{HF}	Grado de Deformación
Autotransformador 1AT				
Entrada por HO, medición por HA	1,17	0,05	0,71	Deformación Obvia
Entrada por HO, medición por HB	1,63	0,09	0,79	Deformación Obvia
Entrada por HO, medición por HC	1,47	1,60	1,25	Deformación Ligera
Autotransformador 2 AT				
Entrada por HO, medición por HA	1,25	1,89	2,16	Deformación Ligera
Entrada por HO, medición por HB	1,53	1,36	1,37	Deformación Ligera
Entrada por HO, medición por HC	1,60	1,61	1,39	Deformación Ligera

De acuerdo a estos resultados, no es posible localizar en cuál de las dos bobinas (serie o común) de cada fase, ocurrió la deformación. Esto se podrá discriminar, a partir de la prueba de admitancia a circuito abierto entre el terminal neutro (HO) y el devanado de media tensión (Am, Bm, Cm), donde solo interviene la bobina común. Las bobinas serie y común están situadas en forma concéntrica alrededor del núcleo, en este caso, las fuerzas electromagnéticas originadas por los cortocircuitos que han tenido lugar en la sección de 110 kV de la subestación, han provocado interacciones de estas bobinas, en ambos autotransformadores.

Análisis del Coeficiente de Correlación a las frecuencias entre 100 kHz y 600 kHz

A diferencia del 2AT, en el 1AT existe una deformación obvia en las bobinas de las fases A y B. Los valores de 0,05 y 0,09 respectivamente están muy por debajo de 0,6 ($R_{MF} < 0,6$). La fase C de color verde, aunque presenta una deformación ligera, se toma como referencia, siendo la fase A de color rojo, la más distorsionada, y luego con menor distorsión la fase B de color azul. En estas frecuencias es donde se detecta la mayor influencia de los cortocircuitos en la estructura del devanado, la formación de nuevas resonancias en la fase A indica que es la más deformada, además, la magnitud en dB es superior a ± 3 dB [20, 21], por lo que se puede atribuir a un efecto de deformación axial en esta fase.

Es posible que la presencia de distorsiones en esta gama de frecuencias en el 1AT, se deba a que el mismo se puso en servicio en 1986 y el 2AT en el año 2000. En este período de 14 años en que el 1AT estuvo operando en solitario, pudo haber sido objeto de varios eventos de cortocircuito, los que fueron causantes de las deformaciones señaladas en este punto. Es probable que las distorsiones presentadas en ambos AT en estas frecuencias, fueron resultados de eventos posteriores al año 2000, cuando los dos equipos comenzaron a funcionar en paralelo.

Análisis en las bandas de alta frecuencia entre 600kHz y 1000 kHz

En el 1AT, la no coincidencia de las fases A y B con la C de referencia, está dada por la distribución no homogénea de las barras que unen las bobinas con los terminales de los aisladores de alta tensión. Un incremento de la capacitancia entre las fases distorsionadas y tierra es poco probable, ya que, entre la carcasa y cada fase de alta tensión, está la bobina de regulación y de acuerdo al ensayo que involucra esta última, no se observan distorsiones, como se verificó posteriormente.

Ensayos de la bobina común, la de regulación y los contactos del conmutador hasta el terminal de media tensión de 110 kV(Am, Bm y Cm)

La posición del conmutador corresponde a la posición No. 1, abarcando toda la bobina de regulación; la salida de la señal se recibe por los extremos de las fases de las bobinas de media tensión (Am, Bm, Cm). El devanado terciario de 11 kV tiene sus terminales abiertos y flotando.

Análisis del coeficiente de Correlación a las frecuencias entre 1 kHz y 100 kHz (R_{LF})

Como se puede observar en las figuras 5 y 6, las curvas características en las bandas de baja, media y alta frecuencias, ofrecen resultados similares. No obstante, de acuerdo a los Coeficientes de Correlación obtenidos y presentados en la tabla 3, aparece una ligera deformación en las respuestas de las tres fases, en la banda de 40 kHz a 50 kHz, en los dos AT.

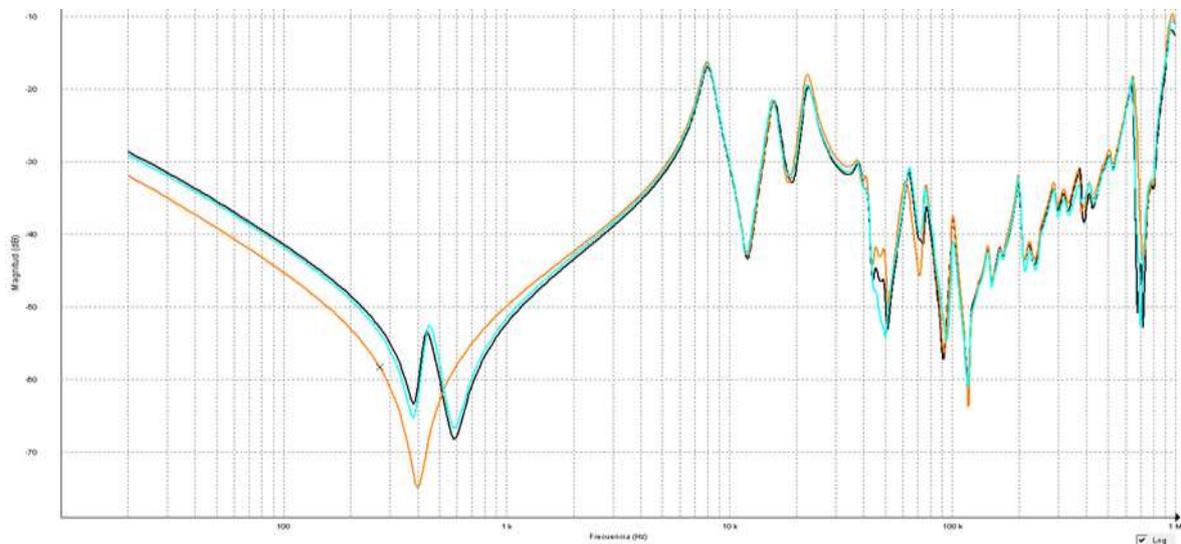


Fig. 5. Curvas amplitud - frecuencia HO - (Am, Bm, Cm) en autotransformador 1AT

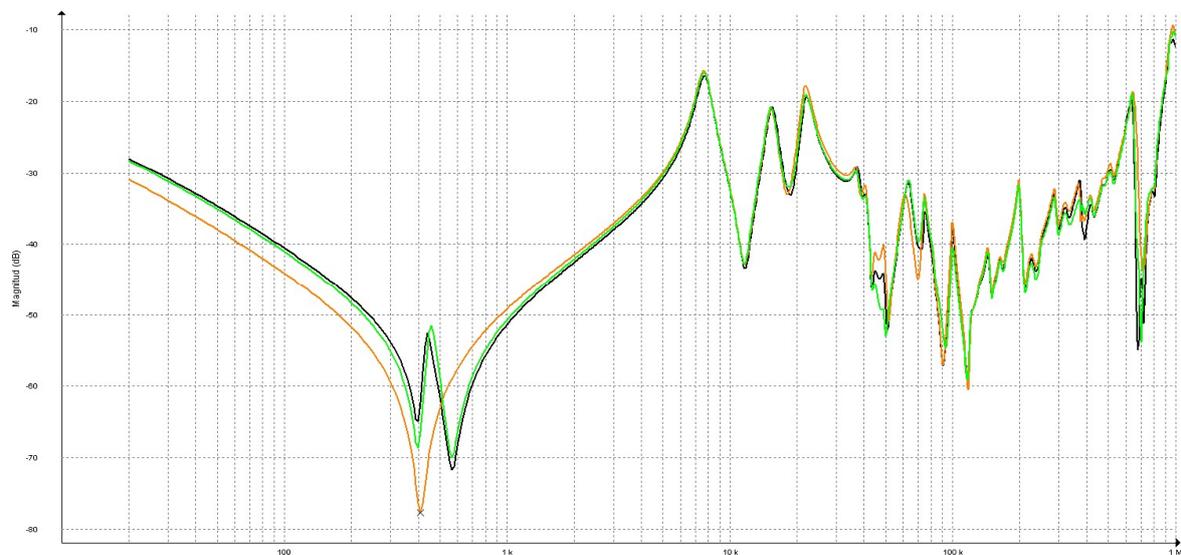


Fig. 6. Curvas amplitud - frecuencia HO - (Am, Bm, Cm) en autotransformador 2AT

Tabla 3. Resultados del Coeficiente de Correlación para la gama de bajas, medias y altas frecuencias

Medición	R_{LF}	R_{MF}	R_{HF}	Grado de Deformación
Autotransformador 1				
Entrada por HO, medición por Am	1,85	2,25	1,01	Deformación ligera
Entrada por HO, medición por Bm	1,83	1,99	1,57	Deformación ligera
Entrada por HO, medición por Cm	1,50	2,11	1,12	Deformación ligera
Autotransformador 2				
Entrada por HO, medición por Am	1,90	2,25	0,91	Deformación ligera
Entrada por HO, medición por Bm	1,98	2,00	1,40	Deformación ligera
Entrada por HO, medición por Cm	1,58	2,12	1,12	Deformación ligera

Si se comparan los dos AT, se puede ver que los dos acusan una deformación ligera en la bobina común. En la banda de 10 kHz a 40 kHz de las figuras 5 y 6, las deformaciones desaparecen (comparar con las figuras 3 y 4), esto permite aseverar que las distorsiones vistas en el ensayo entre el terminal del neutro y el devanado de alta tensión, donde se prueban las bobinas serie y común juntas, obedecen a una deformación ligera de la bobina serie de cada fase de los dos AT y no en la común. Esto es lógico dado que la bobina serie está expuesta al paso de corrientes de cortocircuito desde la red de 220 kV hacia los puntos de cortocircuito en la red de 110 kV (ver figura 2).

Análisis del coeficiente de Correlación a las frecuencias entre 600 kHz y 1000 kHz

La aparición de resonancias en estas frecuencias no se debe confundir con deformaciones o desplazamientos en las bobinas, si no que corresponde a las diferencias que existen en la distribución física de las barras que conectan la bobina de regulación y el conmutador en cada fase y las salidas a los terminales de media tensión, en los dos AT. La coincidencia de las curvas hasta los 1000 kHz indica buen estado de los contactos de los conmutadores.

CONCLUSIONES

1. Los resultados de obtenidos en las frecuencias menores a 1 kHz, demuestran que no existen modos de falla que afecten a los circuitos magnéticos de los autotransformadores.
2. Los ensayos en las bobinas de alta y media tensión, donde se diagnostica el estado de condición de la bobina serie y común por separado, permitieron discriminar ambas bobinas y comprobar un desplazamiento axial ligero en las bobinas serie en ambos autotransformadores.
3. Se comprobó que la exposición de los autotransformadores a varios eventos de cortocircuito, han modificado la geometría de sus devanados.
4. La aparición de resonancias en las altas frecuencias se corresponde a las diferencias que existen en la distribución física de las barras que conectan la bobina de regulación y el conmutador en cada fase y las salidas a los terminales de media tensión, en los dos AT.
5. La coincidencia de las curvas entre 600 kHz y 1000 kHz en los ensayos de la bobina común, de regulación y los contactos del conmutador hasta el terminal de media tensión, indica buen estado de los contactos de los conmutadores.

REFERENCIAS

- [1] Kamalaselvan A., Muthaiah R., “Condition Assessment and Diagnosis of Winding Insulation in Static and Rotating Machines Using Frequency Response Analysis-A Survey”. International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018, vol. 119, n. 10, p. 445-462. ISSN 1311-8080 (printed version); ISSN 1314-3395 (on-line version). [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <http://www.acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/55.pdf>
- [2] Hernández Areu, O., *et al*, “Diagnosis of faults in power transformers through the interpretation of FRA testing with artificial intelligence,” in 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2018). Ixtapa, Mexico, p. 1–5. ISBN 978-1-5386-5935-9. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/330224585_Diagnosis_of_faults_in_power_transformers_through_the_interpretation_of_FRA_testing_with_artificial_intelligence
- [3] Hernández Areu, O., *et al*, “Herramienta para el diagnóstico automático de fallas en transformadores de potencia a través de la respuesta en frecuencia con inteligencia artificial”. XIV Congreso de Internacional de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico 2019. Guadalajara, México. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/337922989_HERRAMIENTA_PARA_EL_DIAGNOSTICO_AUTOMATICO_DE_FALLAS_EN_TRANSFORMADORES_DE_POTENCIA_A_TRAVES_DE_LA_RESPUESTA_EN_FRECUENCIA_CON_INTELIGENCIA_ARTIFICIAL
- [4] A. A. Alawady, *et al*, “Phase to phase fault detection of 3-phase induction motor using FRA technique”. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). September 2020, vol. 11, n. 3, p. 1241-1248. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/20814>

- [5] S. Al-Ameri, *et al*, "Frequency response analysis for transformer tap changer damage detection" International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2020, vol. 11, n. 1, p. 350–358. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339606594_Frequency_response_analysis_for_transformer_tap_changer_damage_detection
- [6] N. F. M. Yasid, *et al*. "Interpretation of sweep frequency response analysis traces on inter-turn short circuit fault," International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2020, vol. 11, n. 1, p. 309–316. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/20477>
- [7] A. A. Alawady, M. F. M. Yousofand M. A. Talib, "Frequency response analysis technique for induction motor short circuit faults detection". International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). September 2020, vol. 11, n. 3, p. 1653-1659. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1653-1659. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/20811>
- [8] N. F. M. Yasid, *et al*, "The Effect of short circuit fault in three-phase core-typed transformer". International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). March 2020, vol. 11, n. 1, p. 409-416. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp409-416. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/b7ff/df9f0f553440158062fd4d26b92f7a6c144d.pdf>
- [9] S. Al-Ameri, *et al*, "Application of Frequency Response Analysis Technique to Detect Transformer Tap Changer Faults". Appl. Sci. 2021, vol. 11, n. 7, e3128. DOI <https://doi.org/10.3390/app11073128>. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3128>
- [10] Alvarez, R. E., *et al*, "Ensayos de respuesta en frecuencia (SFRA). Interpretación y análisis de las configuraciones de ensayo". En XVII ERIAC Décimo Séptimo Encuentro Regional Ibero-americano de CIGRE. A2 – TRANSFORMADORES, Ciudad del Este, Paraguay, 21 a 23 de mayo de 2017, p. 8. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/64628>
- [11] Zorrilla J. D., *et al*, "Técnicas para el diagnóstico de transformadores de potencia: Una revisión crítica". Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 2020, vol. 28, n. 2, p. 184-203. ISSN 0718-3305. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052020000200184
- [12] Ryder S., "Methods for comparing frequency response analysis measurements," Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.02CH37316), Boston, MA, USA, 2002, p. 187-190, doi: 10.1109/ELINSL.2002.995909. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/995909>
- [13] Ryder S., "Diagnosing transformer faults using frequency response analysis," in IEEE Electrical Insulation Magazine, March-April 2003, vol. 19, n. 2, p. 16-22, DOI 10.1109/MEI.2003.1192032. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1192032>
- [14] Behjat V., Mahvi M., "Statistical approach for interpretation of power transformers frequency response analysis results". IET Science, Measurement & Technology. May 2015, vol. 9, n. 3, p. 367 - 375. ISSN 1751-8822. doi:10.1049/iet-smt.2014.0097. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-smt.2014.0097>
- [15] Samimi M.H. and Tenbohlen S. "FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art". International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2017, vol. 89, p. 115-125. ISSN: 0142-0615. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061516316994>
- [16] Kornatowski E. and Banaszak S., "Frequency response quality index for assessing the mechanical condition of transformer windings". Energies 2020, vol. 13, n. 1; DOI 10.3390/en13010029. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/1/29>
- [17] Zhenhua L., *et al*, "Fault Diagnosis of Transformer Windings Based on Decision Tree and Fully Connected Neural Network". Energies 2021, vol. 14, e1531. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/6/1531>
- [18] Elahi O., *et al*. "Diagnosing disk-space variation in distribution power transformer windings using group method of Data Handling Artificial Neural Networks". Energies 2022, vol. 15, n. 23, e8885. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8885>
- [19] Peñafiel, S., *et al*. "Diagnóstico del Estado de Transformadores de Distribución Mediante el Ensayo de Análisis de Respuesta en Frecuencia". Revista Técnica Energía, 2023, vol. 20, n. 1, p. 26–32. ISSN 2602-8492. [Consultado 2 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/581/869>
- [20] Pleite G., *et al*. "Obtención de la respuesta en frecuencia en transformadores estando en servicio". Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 2017, v. 25, n. 1, p. 59-69. ISSN 0718-3305. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052017000100059
- [21] Hernández Areu, O., *et al*. "Casos de estudio de diagnóstico por SFRA a dos transformadores de potencia de tres devanados". Revista Ingeniería Energética, 2022, vol. 43, n. 2, e0706, mayo/agosto, ISSN 1815-5901. [Consultado 21 de enero de 2023]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000200119

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Ramón Pérez Hernández: <https://orcid.org/0009-0002-7722-5059>

Diseño de la investigación. Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Orestes Hernández Areu: <https://orcid.org/0000-0002-2672-239X>

Diseño de la investigación. Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.