

A2 - TRANSFORMADORES

EFFECTOS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES VERIFICADOS CON EL ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

R. E. ALVAREZ*
IITREE-FI-UNLP
Argentina

SANTIAGO RODRIGUEZ GRIFFITHS
YPF
Argentina

Resumen – En el presente trabajo, se expone un caso de estudio de pruebas de SFRA en un transformador de distribución previo y posterior a un ensayo de cortocircuito de laboratorio. Los resultados y conclusiones verifican la importancia que reviste la prueba de SFRA para determinar (diagnóstico) cambios en la condición mecánica al cabo de un evento de cortocircuito.

Palabras clave: Transformadores, ensayos, SFRA, condición, mecánica, respuestas, cortocircuito

1 INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia conforman el grupo de los activos más significativos en los sistemas de potencia. Las salidas de servicio, particularmente intempestivas, implican elevados costos. Esto tiene mayor impacto cuando al cabo de la falla debe reemplazarse el transformador: costo de reposición, penalidades y lucro cesante ante la imposibilidad de abastecer consumos.

En la actualidad, el mantenimiento de transformadores resulta cada vez más sustancial para conocer la condición y en un segundo orden la vida remanente. Con dicho objetivo, incipientes técnicas y ensayos de mantenimiento han surgido en los últimos años entre las que se destaca el Ensayo de Análisis de Respuesta en Frecuencia (Sweep Frequency Response Analysis, SFRA).

El ensayo de SFRA está orientado a determinar cambios en la condición mecánica del transformador, que pueden ocurrir en el transporte, condiciones de operación y especialmente al cabo de cortocircuitos. Con el SFRA, es posible determinar cambios en la estructura del sistema de aislamiento, contactos (uniones, soldaduras, conmutador, etc.) núcleo magnético, etc.

2 SFRA BACKGROUND

La prueba de SFRA consiste en obtener la respuesta en frecuencia del transformador bajo estudio (comúnmente al resultado de esta prueba se le llama “huella digital” del transformador, debido a que es una respuesta única y propia de cada transformador [1]), y comparar el resultado obtenido con una referencia, ya sea una respuesta previa del mismo transformador, de una fase de este o de un “transformador hermano” [2].

Cualquier variación de la respuesta obtenida en el ensayo frente a la de referencia, considerada como la representativa del estado sano del transformador, indica un cambio en la estructura mecánica de éste. Entonces, el SFRA es una técnica de diagnóstico cuyo principal objetivo es detectar cambios en la condición mecánica del transformador debidas, por ejemplo, a [3]:

- *Deformaciones en los bobinados del transformador, como consecuencia de esfuerzos electrodinámicos producidos por corrientes de cortocircuito.*
- *Fallas en el conmutador bajo carga.*
- *Fallas de puesta a tierra.*
- *Desplazamientos del núcleo del transformador, durante el transporte, emplazamiento, etc.*

El tipo de falla en un transformador puede ser determinado de acuerdo al rango de frecuencia en que la respuesta obtenida en el ensayo difiere de la tomada como referencia (el gráfico de la respuesta en frecuencia puede ser dividida en cuatro zonas), y la gravedad de la falla podría ser indicativo de acuerdo a cuanto difiere la respuesta obtenida respecto a la de referencia [3].

* R. Alvarez, IITREE-FI-UNLP, calle 48 y 116, B1900AMF, La Plata, Argentina – rea@iitree-unlp.org.ar

Las configuraciones de ensayo posibles en el SFRA son “Admitancia de Circuito Abierto”, “Admitancia de Cortocircuito”, “Interdevanado Capacitivo” e “Interdevanado Inductivo”. Para la presente publicación, se ha considerado exclusivamente la configuración de “Admitancia de Cortocircuito”.

3 ANTECEDENTES

El SFRA surge como método de diagnóstico de transformadores a partir del desarrollo del método de impulso de baja tensión propuesto por W. Lech y L. Tyminski en Polonia en el año 1966 [4]. Por entonces el objetivo era detectar deformaciones en devanados de transformadores al cabo de las pruebas de corto circuito de laboratorio. En 1978 E.P. Dick y C.C. Erven proponen el método de FRA como una técnica de diagnóstico de transformadores [5], y ese mismo año en Ontario Hydro, Canadá se realiza la primer prueba de FRA en el servicio.

Entre 1980 y 1990 en Europa grupos de estudio de CIGRE realizaron varios ensayos en transformadores de diferentes usuarios. Entre 1990 y 2000 se realizaron innumerables trabajos para desarrollar directrices, herramientas y modelos para interpretar los resultados. En 2004 aparece la primera normativa para la prueba [6]. En la actualidad, el SFRA es considerado uno de los ensayos avanzados para el diagnóstico de transformadores de potencia [7].

En la actualidad se dispone de tres normas internacionales:

- a) *DLT 911-2004 [6]: pertenece a la República Popular China, y fue promulgada en 2004. Además de establecer criterios normalizados para la ejecución del ensayo, se presenta un algoritmo de análisis de los resultados (“Análisis de correlación”).*
- b) *IEC 60076-18-2012 [8]: pertenece a la Comisión Electrotécnica Internacional promulgada en julio de 2012. Se establece una guía para la ejecución de los ensayos. Está orientada a la estandarización de la ejecución del ensayo por lo que no se establecen criterios de aceptación ni de análisis de los resultados.*
- c) *IEEE C57.149-2013 [9]: pertenece a la IEEE, en la cual se desarrolla el marco teórico de la prueba, y se emiten recomendaciones para su ejecución y la documentación de los ensayos. Se desarrolla una guía para la interpretación de los resultados obtenidos denominada “Modos de fallos”; a partir de la cual es posible diagnosticar la condición del transformador.*

4 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Los transformadores deben ser diseñados y construidos para soportar sin sufrir daño los efectos térmicos y dinámicos de cortocircuitos externos bajo las condiciones especificadas [10]. En ese sentido, el ensayo de cortocircuito en transformadores tiene como objetivo verificar si los mismos son capaces de soportar los efectos de las sobreintensidades originadas por cortocircuitos externos sin sufrir daños.

En este tipo de ensayos se aplica la corriente de falla apropiada para cada caso, en la configuración de prueba correspondiente. Una de las metodologías para determinar si el transformador pasa o no la prueba, es mediante la evaluación y comparación de la impedancia de cortocircuito del transformador; antes y después del ensayo de cortocircuito [10].

Para los transformadores trifásicos, la impedancia medida debe ser evaluada en valores “por fase”, bien sea por una medida directa de la reactancia entre fase y neutro en el caso de un arrollamiento en estrella, o bien deducida de una configuración en triángulo por un método apropiado [10].

La norma IEC 60076-5 [10] establece que el resultado del ensayo es satisfactorio si al cabo del cortocircuito se verifica, entre otras condiciones, que la impedancia de cortocircuito varía entre 1 a 7,5% dependiendo de las características y del tipo constructivo del transformador. Si no se cumple esta condición (o alguna de las demás condiciones requeridas), el transformador debe ser desmontado (“descubado”), tanto como sea necesario, para establecer la causa de la desviación [10].

Se destaca que la norma IEC 60076-5 indica que el análisis de respuesta en frecuencia se puede utilizar como método adicional de evaluación para juzgar el resultado del ensayo.

5 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO Y SFRA

Se procedió a realizar las pruebas de SFRA a un transformador trifásico 100 kVA, 24/0,4 kV, de grupo de conexión Dyn5.

Las respuestas obtenidas en las pruebas se adoptaron como de referencia (estado inicial del transformador) para compararlas posteriormente con las obtenidas luego de realizar un ensayo de cortocircuito. El ensayo de cortocircuito se realizó aplicando una corriente de cortocircuito trifásica de 3,9 kA durante aproximadamente 400 ms.

Luego de haber finalizado el ensayo de cortocircuito se procedió a realizar el SFRA, y posteriormente la comparación con las respuestas obtenidas antes (estado inicial del transformador), con el fin de verificar cambios en la condición mecánica del transformador y poder anticipar un diagnóstico luego del cortocircuito.

Como se indicó precedentemente, la configuración de ensayo considerada para el desarrollo el análisis es la de “Admitancia de Cortocircuito”, por ser la que mayor relación tiene con la impedancia de cortocircuito del transformador, parámetro especialmente solicitado con la prueba en cuestión.

Para la ejecución de los ensayos de SFRA se consideraron las recomendaciones y lineamientos establecidos en IEC [8] e IEEE [9].

5.1 Admitancia de Cortocircuito

Al comparar las tres respuestas obtenidas mediante la prueba de Admitancia de Cortocircuito para cada una de las fases antes del ensayo de cortocircuito (Fig. 1) se observa que entre éstas no hay mayores diferencias en bajas y medias frecuencias, lo cual era esperable ya que la reactancia de dispersión debe ser similar en las tres fases cuando el transformador se encuentra en buen estado.

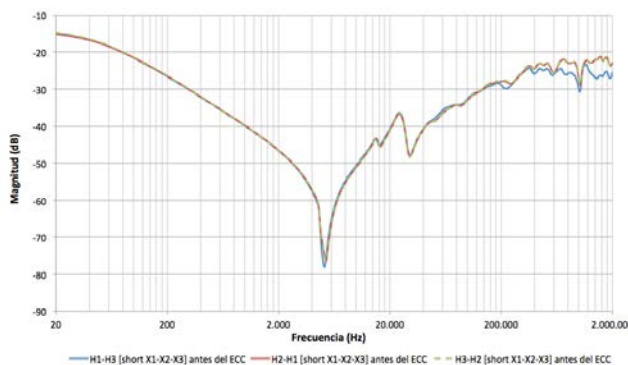


Fig. 1. Prueba de admitancia de cortocircuito antes del ensayo de cortocircuito

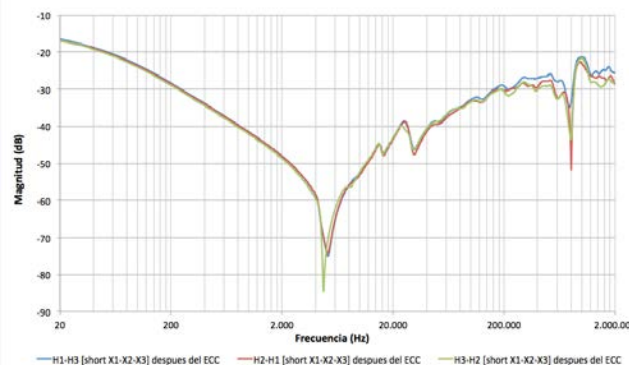


Fig. 2. Prueba de admitancia de cortocircuito después del ensayo de cortocircuito

En el rango de altas frecuencias se observan diferencias que son típicas debido a la geometría constructiva del transformador, como por ejemplo la diferencia de longitud de conductores que conectan cada una de las bobinas al conmutador.

Al realizar la comparación entre las tres respuestas obtenidas luego del ensayo de cortocircuito (Fig. 2), se observa que entre estas no hay mayores diferencias apreciables en bajas y medias frecuencias para las tres fases, lo cual no significa que no haya habido cambios en la reactancia de dispersión (es posible que el cambio sea similar en todas las fases). En altas frecuencias se aprecia un cambio bien marcado entre fases.

Al analizar las Fig. 1 y Fig. 2 en conjunto se puede observar que claramente la amplitud de las respuestas cambian luego del ensayo de cortocircuito, lo cual indica un cambio en la condición mecánica del transformador.

Es posible, a partir de la baja impedancia de medición, calcular la impedancia de dispersión mediante la respuesta de la prueba de admitancia de cortocircuito a bajas frecuencias. La relación entre la respuesta compleja del SFRA (utilizando una impedancia de medición de 50 Ω) y la impedancia a bajas frecuencias del transformador es [3]:

$$\frac{U_2}{U_1} \angle \theta = \frac{50\Omega}{50\Omega + Z} \quad (1)$$

Donde la impedancia Z , está conformada por una resistencia en serie con una inductancia ($Z=R+j\omega L$).

Cabe destacar que los valores de reactancia de dispersión obtenidos mediante el ensayo de SFRA son indicativos, y no necesariamente coincidirán con los valores medidos en fábrica durante el ensayo de calentamiento, puesto que en este último caso las mediciones se hacen en condiciones de corriente nominal.

5.2 Admitancia de Cortocircuito de la fase R

A partir de la respuesta en frecuencia obtenida para la fase R del transformador (H2-H1 [cc]) antes y después del cortocircuito, mostrada en la Fig. 3 (amplitud) y Fig. 4 (fase), aplicando (1) se realizó el cálculo de las reactancias de cortocircuito a 50 Hz.

a) Antes del ensayo de cortocircuito:

$$A = 20 \times \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{-17,6/20} = 0,131$$

$$\frac{U_2}{U_1} \angle \theta = \frac{50\Omega}{50\Omega + Z} \Rightarrow Z = \frac{50\Omega}{0,131 \angle -40,7^\circ} - 50\Omega$$

$$\Rightarrow X_{cc} = j248,9\Omega$$

b) Después del ensayo de cortocircuito:

$$A = 20 \times \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{-19,9/20} = 0,101$$

$$\frac{U_2}{U_1} \angle \theta = \frac{50\Omega}{50\Omega + Z} \Rightarrow Z = \frac{50\Omega}{0,101 \angle -40,8^\circ} - 50\Omega$$

$$\Rightarrow X_{cc} = j323,5\Omega$$

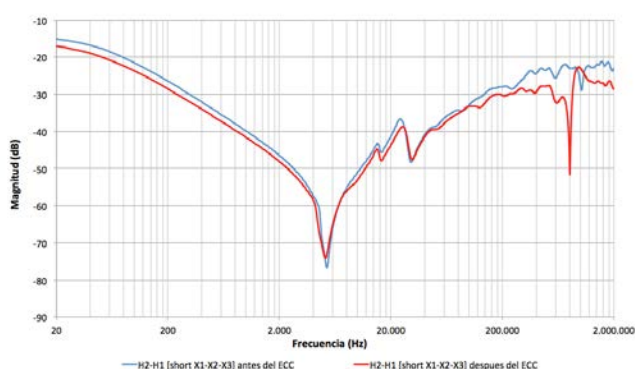


Fig. 3. Amplitud de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito - Fase R

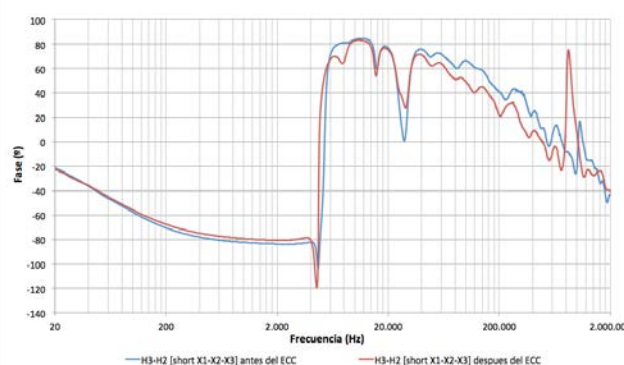


Fig. 4. Fase de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito - Fase R

De los valores obtenidos se puede determinar que la impedancia de cortocircuito se incrementó en un 29,9%.

5.3 Admitancia de Cortocircuito de la fase S

De la respuesta en frecuencia obtenida para la fase S del transformador (H3-H2 [cc]) antes y después del cortocircuito, presentada en la Fig. 5 (amplitud) y Fig. 6 (fase), aplicando (1) 50 Hz, se tiene que:

a) Antes del ensayo de cortocircuito:

$$A = 20 \times \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{-17,4/20} = 0,135$$

$$\frac{U_2}{U_1} \angle \theta = \frac{50\Omega}{50\Omega + Z} \Rightarrow Z = \frac{50\Omega}{0,135 \angle -41,9^\circ} - 50\Omega$$

$$\Rightarrow X_{cc} = j247,3\Omega$$

b) Después del ensayo de cortocircuito:

$$A = 20 \times \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{-20,2/20} = 0,098$$

$$\frac{U_2}{U_1} \angle \theta = \frac{50\Omega}{50\Omega + Z} \Rightarrow Z = \frac{50\Omega}{0,098 \angle -40,9^\circ} - 50\Omega$$

$$\Rightarrow X_{cc} = j334,1\Omega$$

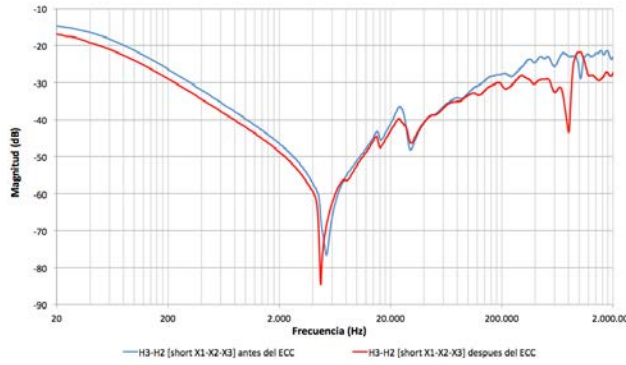


Fig. 5. Amplitud de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito - Fase S

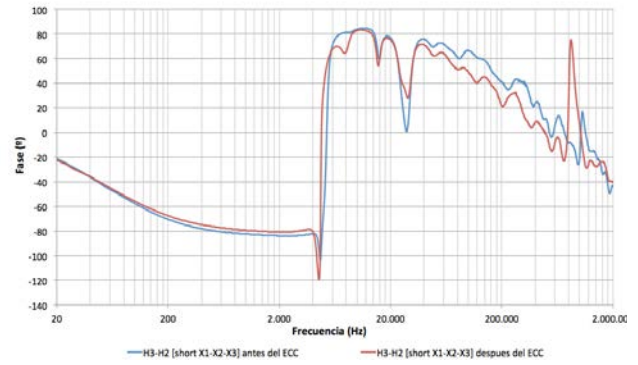


Fig. 6. Fase de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito - Fase S

De los valores obtenidos se puede determinar que la impedancia de cortocircuito se incrementó en un 35,1%.

5.4 Admitancia de Cortocircuito de la fase T

Finalmente, a partir de la respuesta en frecuencia obtenida para la fase T del transformador (H1-H3 [cc]) antes y después del cortocircuito, presentada en la Fig. 7 (amplitud) y Fig. 8 (fase), aplicando (1) 50 Hz, se tiene que:

a) Antes del ensayo de cortocircuito:

$$A = 20 \times \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{-17,6/20} = 0,132$$

$$\frac{U_2}{U_1} \angle \theta = \frac{50\Omega}{50\Omega + Z} \Rightarrow Z = \frac{50\Omega}{0,132 \angle -41,2^\circ} = 50\Omega$$

$$\Rightarrow X_{cc} = j249,5\Omega$$

b) Después del ensayo de cortocircuito:

$$A = 20 \times \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{-19,7/20} = 0,104$$

$$\frac{U_2}{U_1} \angle \theta = \frac{50\Omega}{50\Omega + Z} \Rightarrow Z = \frac{50\Omega}{0,104 \angle -41,3^\circ} = 50\Omega$$

$$\Rightarrow X_{cc} = j317,3\Omega$$

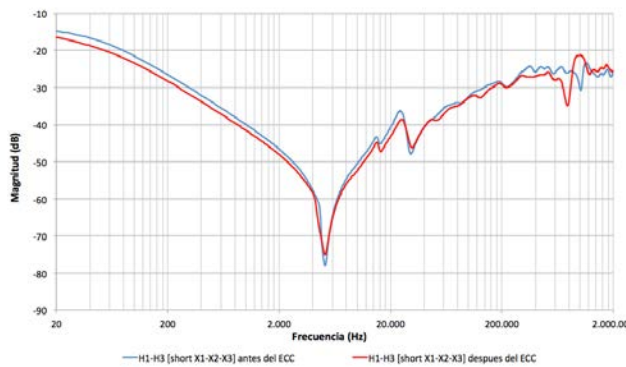


Fig. 7. Amplitud de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito - Fase T

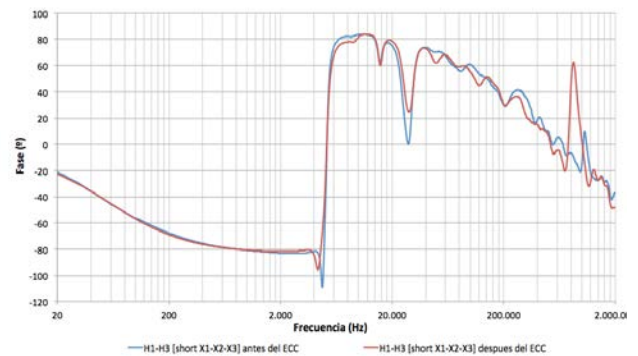


Fig. 8. Fase de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito - Fase T

De los valores obtenidos se puede determinar que la impedancia de cortocircuito se incrementó en un 27,1%.

5.5 Comparación de resultados. Análisis de acuerdo a IEC [10]

En la Tabla I se resumen los valores determinados en la prueba de admitancia de cortocircuito de SFRA, antes y después del ensayo de cortocircuito.

Tabla I - Reactancia de cc determinada con SFRA (1)

Bornes	Xcc inicial [Ω]	Xcc final [Ω]	Diferencia [%]
H1-H3	248,9	323,5	29,9
H3-H2	247,3	334,1	35,1
H2-H1	249,5	317,3	27,1

Los valores de reactancia, tanto antes como después del cortocircuito, calculados mediante el método del voltímetro, amperímetro y vatímetro, realizando las respectivas correcciones por corriente y temperatura, medidos para el análisis del ensayo de cortocircuito, se indican en la Tabla II.

Tabla II - Reactancia de cc medida para el ensayo de cortocircuito

Bornes	Xcc inicial [Ω]	Xcc final [Ω]	Diferencia [%]
H1-H3	250,4	319,6	27,6
H3-H2	252,3	336,9	33,5
H2-H1	248,6	327,3	31,6

Se destaca que todos los valores obtenidos en las Tabla I y II son indicativos, y diferirán del valor de placa debido a que como se indicó precedentemente, en éste último caso están dados generalmente a una temperatura de 75 °C y medidos con corrientes del orden de la nominal.

Como se observa en la Tabla I y Tabla II, se tienen que:

- Para el caso analizado, la prueba de SFRA indica la necesidad del desmontado del transformador de acuerdo a la norma IEC [10].
- Los valores de impedancia de cortocircuito en cada fase medidos a partir del SFRA y con voltímetro; amperímetro y vatímetro, antes y después del ensayo de cortocircuito resultan similares.

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL SFRA

Analizando las respuestas de las Fig. 3 a Fig. 8 se puede concluir que las tres fases han tenido un cambio similar respecto a la respuesta que representa el estado previo al ensayo de cortocircuito. Esto indica que las tres fases han sufrido los similares tipos de desplazamientos y cambios en su estructura mecánica.

Como se pudo demostrar en la sección anterior, con el ensayo de SFRA se pudo arribar fácilmente a las mismas conclusiones que se arribaron con la metodología tradicional. Sin embargo, y como se demostrará a continuación, a partir de los resultados del SFRA es posible determinar cuáles han sido los cambios en la condición mecánica del transformador ensayado.

Para el análisis, se consideraron dos herramientas de análisis normalizadas:

- Análisis de correlación, propuesto por el estándar de China [6]
- Modos de falla, propuesto por IEEE [9]

6.1 Análisis de correlación [6]

Aplicando el análisis de correlación del estándar chino, para las pruebas de SFRA antes y después del ensayo de CC, se obtienen los resultados de la Tabla III.

Tabla III - análisis de correlación DL/T 911

Bornes	Coeficientes R			Diagnóstico de los devanados
	R _{LF}	R _{MF}	R _{HF}	
H1-H3	2,10	1,36	-0,17	No consigna (*)
H3-H2	1,48	0,67	-0,14	Deformación leve
H2-H1	2,07	0,90	-0,10	Deformación leve

(*) El coeficiente R_{HF} se encuentra por encima del límite, y R_{LF} y R_{MF} resultan normales

Es decir, que de acuerdo a [6] se puede diagnosticar “deformación leve” de los devanados H3-H2 y H2-H1.

6.2 Análisis mediante modos de falla [9]

Se presentan las respuestas (antes y después del cortocircuito) para los diferentes rangos de análisis establecidos por [9] para la fase S (las fases R y T presentan respuestas muy similares, y aplica el mismo análisis). Realizando el análisis de modos de fallas establecidos en IEEE [9], para las tres fases se han comprobado los modos:

- Deformación radial: Aparecen nuevas resonancias (Fig. 10 y Fig. 11).*
- Deformación axial: Aparecen nuevas resonancias (Fig. 10 y Fig. 11).*
- Espiras en cortocircuito: Respuestas diferentes, con desplazamientos. (Fig. 9). Aparecen nuevas resonancias (Fig. 10 y Fig. 11). Cambió la forma de la respuesta, con nuevas resonancias (Fig. 12).*

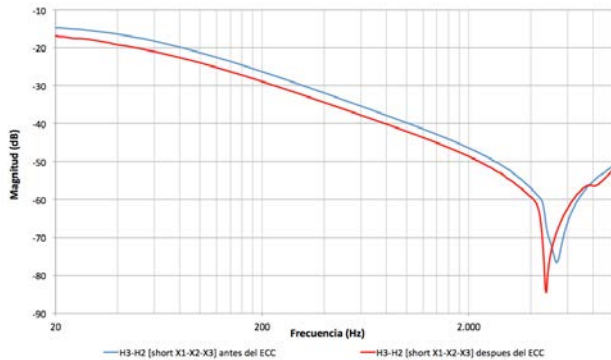


Fig. 9. Amplitud de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito Fase S (Rango 20 Hz - 10 kHz)

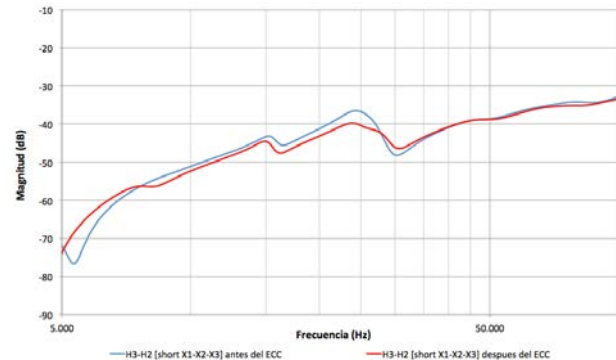


Fig. 10. Amplitud de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito Fase S (Rango 5 kHz - 100 kHz)

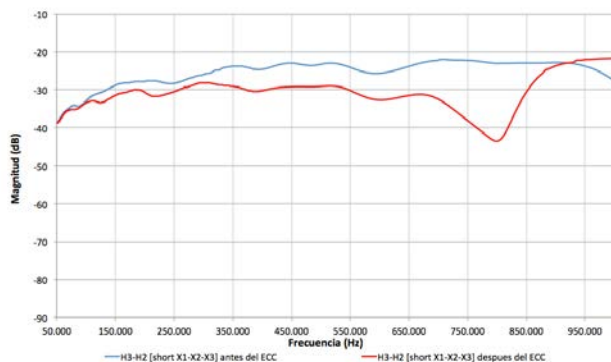


Fig. 11. Amplitud de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito Fase S (Rango 50 kHz - 1 MHz)

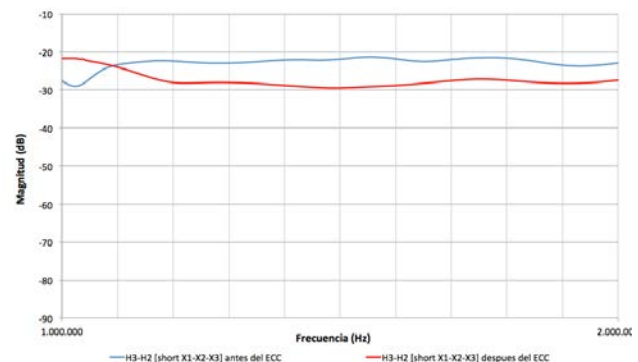


Fig. 12. Amplitud de la admitancia de cortocircuito antes y después del ensayo de cortocircuito Fase S (Rango 1 MHz - 2 MHz)

6.3 Desmontado del transformador

A partir de los resultados obtenidos en términos de la reactancia de cortocircuito, y de acuerdo a [10] se procedió a desmontar el transformador para establecer la causa de la desviación.

En la Fig. 13 se presenta una imagen del desmontado del transformador, donde se evidencia claramente el desplazamiento axial de la fase R (similar en las fases S y T).

En la inspección visual no fue posible determinar deformación radial.

En la inspección visual también se verificaron desplazamientos entre espiras (Fig. 13), que habrían modificado el aislamiento inter espiras con la consecuente modificación en la relación de transformación.



Fig. 13. Desplazamiento axial: 1: arrollamiento de baja tensión (hacia arriba); 2: arrollamiento de alta tensión (hacia abajo)

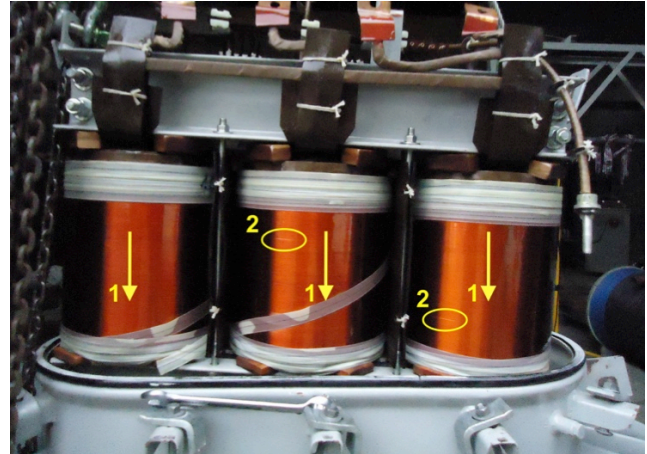


Fig. 14. Desplazamiento axial: 1: arrollamiento de baja tensión (hacia arriba); 2: arrollamiento de alta tensión (hacia abajo)

7 CONCLUSIONES

Durante las condiciones de funcionamiento los transformadores están expuestos a cortocircuitos externos que pueden cambiar la condición mecánica del mismo. Resulta imprescindible por lo tanto, verificar el estado del transformador al cabo de tales eventos.

La medición de la reactancia de dispersión es un parámetro muy sensible a defectos provocados por cortocircuitos. Cambios en la reactancia son indicativos de desplazamientos mecánicos estructurales en lo arrollamientos [7].

En el caso desarrollado en el presente trabajo, se ha podido demostrar que con el ensayo de SFRA además de obtener valores de la reactancia de dispersión similares a los medidos a 50 Hz con métodos convencionales, se ha podido determinar cuáles fueron los cambios en la condición mecánica del transformador luego de un cortocircuito.

Si bien para la interpretación de los resultados del ensayo de SFRA la experiencia juega un rol importante, empleando las herramientas de análisis provistas por la estandarización de la prueba [6] [9], es posible arribar a resultados precisos en el diagnóstico del transformador.

8 REFERENCIAS

- [1] G. Aponte, W. Herrera, C. Gonzales, J. Pleite: “Implementación de un Modelo de un Transformador Eléctrico Para el Análisis de su Respuesta en Frecuencia” Información Tecnológica Vol. 22 N° 4 - 2011. Madrid-España.
- [2] J Hormatollah Firoozi, M. Kharezi, H. Rahimpour, M. Shams: “Transformer Fault Diagnosis using Frequency Response Analysis-Practical Studies” 978-1-4244-6255-1/11 IEEE 2011.
- [3] CIGRÉ Technical Brochure N° 342 “Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)” April 2008.
- [4] W. Lech, L. Tyminski, “Detecting transformer winding damage with low voltage impulse method. Electr. Rev. 179 768–72. 1966.
- [5] E. P. Dick; C. C. Erven “Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1978, Volume: PAS-97, Issue: 6. Pages: 2144 - 2153.
- [6] DL/T 911 - 2004, “Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers”. The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China.
- [7] CIGRÉ Technical Brochure N° 445 “Guide for Transformers Maintenance”. February 2011.
- [8] IEC 60076-18 - 2012, “Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response”.
- [9] IEEE C57.149 - 2012, “IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers”.
- [10] IEC 60076-5 - 2006 “Ability to withstand short-circuit”.