

A2 - TRANSFORMADORES

ENSAYOS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (SFRA). INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS CONFIGURACIONES DE ENSAYO

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

E. CALO
IITREE-FI-UNLP
Argentina

L. CATALANO
IITREE-FI-UNLP
Argentina

P. MORCELLE del VALLE
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Resumen – Uno de los principales desafíos en la gestión de vida de los transformadores es determinar cuáles ensayos son los óptimos para cada caso en particular y cuál es su frecuencia de ejecución. A excepción de la cromatografía en el aceite, la mayoría de los ensayos se orientan a parámetros o partes específicas del transformador. En este sentido, el ensayo de Análisis de Respuesta en Frecuencia (Sweep Frequency Response Analysis, SFRA) es uno de los selectos ensayos que permite una evaluación global del transformador: estructura del sistema de aislamiento, contactos (uniones, soldaduras, etc.) núcleo magnético, etc.

Esta prueba se caracteriza por determinar la condición mecánica del transformador a partir del ensayo de diferentes parámetros, con señales de baja energía y amplio espectro en frecuencia. Las normativas internacionales respecto a la prueba de SFRA están orientadas a establecer una guía normalizada para la ejecución e interpretación de resultados. Las normas IEC e IEEE proponen metodologías de pruebas indicando cuáles son las diferentes configuraciones de ensayo en los transformadores. A partir de ello, y con el fin optimizar el diagnóstico, resulta fundamental comprender qué parámetro se ensaya con cada una de estas configuraciones y cuál es la interpretación a frecuencia industrial en cada caso.

En el presente trabajo, se presenta una guía orientada a interpretar el significado físico de cada una de las configuraciones de ensayo indicadas en IEC e IEEE y cómo relacionarlas con otros ensayos eléctricos que se realizan a frecuencia industrial.

Palabras clave: Transformadores, SFRA, respuestas, configuraciones, frecuencia, diagnóstico, IEC, IEEE.

1 INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia conforman el grupo de los activos más significativos en los sistemas de potencia. Las salidas de servicio, particularmente imprevistas, implican elevados costos.

El mantenimiento de transformadores resulta cada vez más sustancial para conocer la condición y en un segundo orden la vida remanente. Con dicho objetivo, además de las pruebas tradicionales, 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, reubicación, fenómenos externos (movimientos sísmicos, inundaciones, etc). Con el SFRA, es posible determinar cambios en la estructura del sistema de aislamiento, contactos (uniones, soldaduras, conmutador, etc.) núcleo magnético, etc.

2 FUNDAMENTOS DEL SFRA

2.1 Función de transferencia

En la Fig. 1 se representa un esquema simplificado de un transformador (monofásico) para la frecuencia industrial (50/60 Hz), conformado por una impedancia serie (resistencia e inductancia) de cada devanado (primario y secundario) y los respectivos aislamientos interdevanado y a tierra (resistencia y capacitancia) de cada devanado (primario y secundario). Si la frecuencia de excitación se incrementa, aparecen nuevos acoplamientos por lo que resulta apropiado considerar un modelo distribuido como se representa

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

simplificadamente en la Fig. 2. En dicho modelo, la impedancia longitudinal y cada aislamiento se conforman por elementos RLC incrementales. El modelo resultará más preciso cuanto más elementos se consideren.

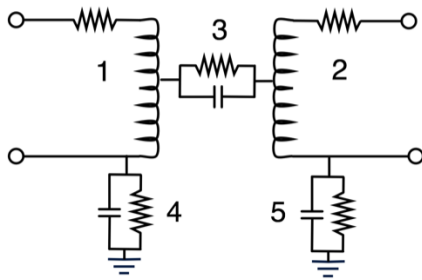


Fig. 1 - Modelo simplificado a frecuencia industrial
1: devanado primario, 2 devanado secundario, 3 aislamiento interdevanado, 4 aislamiento primario a tierra, 5 aislamiento secundario a tierra.

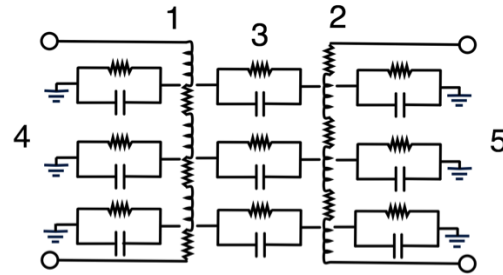


Fig. 2 - Modelo simplificado para alta frecuencia
1: devanado primario, 2 devanado secundario, 3 aislamiento interdevanado, 4 aislamiento distribuido primario a tierra, 5 aislamiento distribuido secundario a tierra

Resulta de interés obtener una respuesta en frecuencia del transformador, la que dependerá de los valores RLC para cada frecuencia en particular. Evidente que si cambia la condición mecánica del transformador, muy probablemente cambiarían ciertos valores RLC representados en la Fig. 2, y con ello la respuesta en frecuencia.

Para el análisis en frecuencia se considera al transformador como un circuito de dos puertos (entrada y salida) y se aplica la teoría de cuádrupolos, asumiendo que éste cumple con las siguientes condiciones:

- Pasividad: está conformado por resistencias, inductancias y capacitancias, sin fuentes dependientes, invariantes en el tiempo.*
- Bilateralidad: se puede excitar cada puerto indistintamente, sin que cambie la respuesta.*

A partir de estas consideraciones, se aplica una tensión de frecuencia variable en el puerto de entrada (U_1) y se mide la tensión en el puerto de salida (U_2) definiendo una función de transferencia T , Ec.(1), como la relación de dichas tensiones, es decir:

$$T_{(\omega)} = \frac{U_{2(\omega)}}{U_{1(\omega)}} \quad (1)$$

Como T resulta un número complejo, tiene un módulo y una fase que convenientemente se representan gráficamente con el diagrama de Bode. La Ec. (2) representa la magnitud y la Ec. (3) la fase:

$$|T_{(\omega)}|_{dB} = 20dB \log_{10} \left| \frac{U_{2(\omega)}}{U_{1(\omega)}} \right| \quad (2)$$

$$Fase T_{(\omega)} = \text{arccotg} \frac{U_{2(\omega)}}{U_{1(\omega)}} \quad (3)$$

2.2 Metodología

La prueba de SFRA consiste en obtener la respuesta en frecuencia del transformador bajo estudio y comparar el resultado obtenido con una referencia, ya sea una respuesta previa del mismo transformador (análisis basado en el tiempo), de una fase de éste (análisis basado en el diseño) o de un “transformador hermano” (análisis basado en la simetría constructiva) [1].

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 [2] [3]:

- *Circuito magnético*
- *Aislamiento del circuito magnético*
- *Geometría de devanados*
- *Aislamiento entre espiras*

El tipo de falla en un transformador puede ser determinado de acuerdo al rango de frecuencia en que la respuesta obtenida del ensayo difiere respecto a la respuesta de 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 [2].

Para la ejecución de SFRA, típicamente se aplica una tensión sinusoidal del orden de 10 V (pico - pico) en un rango de frecuencia de entre 10 Hz a 2 MHz.

Las configuraciones de ensayo posibles del SFRA son “Admitancia de Circuito Abierto”, “Admitancia de Cortocircuito”, “Interdevanado Capacitivo” e “Interdevanado Inductivo” [1] [2] [4]. En cada configuración, resulta de particular interés analizar la respuesta en la frecuencia industrial y su relación con pruebas conocidas.

2.3 Normalización

En la actualidad se dispone de tres normas internacionales:

- a) *DLT 911-2004 [5]: norma de la República Popular China, 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 [4]: norma de 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 [1]: norma 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.*

3 CONFIGURACIONES DE ENSAYO

3.1 Admitancia de Circuito Abierto, Y_0

La impedancia de magnetización del transformador es el principal parámetro que caracteriza la respuesta en bajas frecuencias (antes de la primera resonancia). Este ensayo es el más utilizado debido a su simplicidad y la posibilidad que ofrece de examinar los devanados por separado [2]. A partir de ello, resulta fundamental considerar que las respuestas de esta configuración pueden variar entre mediciones con diferentes estados de magnetización del núcleo, especialmente en el rango de bajas frecuencias.

Los ensayos de admitancia de circuito abierto pueden realizarse con la fuente (E) aplicada en el terminal de fase o en el neutro. Ambos caminos deberían proporcionar resultados similares, considerando los criterios asumidos en 2.1.

En la Fig. 3 se representa el esquema de conexión del ensayo de Y_0 para un transformador con grupo de conexión Dyn. Como se observa en las respuestas de la Fig. 4, en baja frecuencia (<2 kHz), para el caso de un transformador en delta se tienen dos respuestas similares (H1-H2 y H3-H1), con dos inflexiones (resonancias) en la respuesta, y una respuesta con una única inflexión. En el rango de frecuencias medias, donde gobierna la respuesta los devanados, las tres respuestas tienden a parecerse lo que resultaría indicativo de una adecuada simetría constructiva en los mismos.

En altas frecuencias, donde el comportamiento se encuentra básicamente gobernado por el estado de las conexiones, uniones, etc. pueden aparecer asimetrías más significativas entre las tres respuestas.

Las respuestas de la Fig. 4 corresponden a un comportamiento típico para un ensayo de SFRA de Y_0 . En esta configuración, hasta la primeras frecuencias de resonancia (en esta caso en el orden de los 850 kHz) en la respuesta tiene preponderancia el conjunto magnético del transformador. En este sentido, resulta interesante observar que la respuesta (magnitud, en dB) varía unos 45 dB hasta la frecuencia de resonancia. Es por ello que ésta configuración resulta de especial interés para verificar la condición mecánica del sistema magnético del transformador.

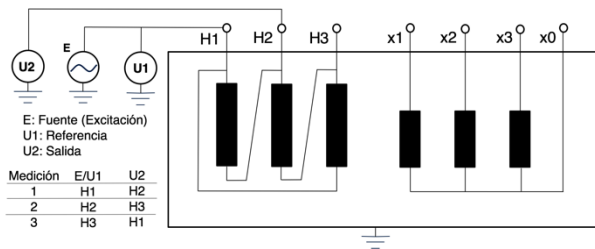


Fig. 3 - Esquema de ensayo Y_0 para un transformador Dyn

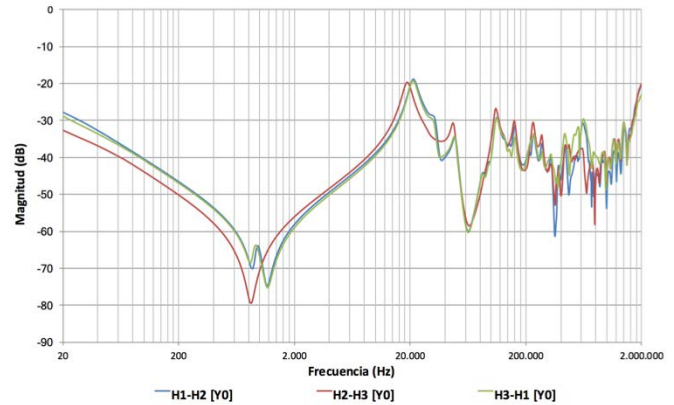


Fig. 4 - Respuestas típicas para la configuración Y_0 de un transformador Dyn

En la Fig. 3 se puede observar que la configuración de ensayo es igual a la del ensayo de corriente de excitación monofásico. En otras palabras, el ensayo de Y_0 es equivalente a una prueba de corriente de excitación, con baja tensión y con frecuencia variable.

La configuración Y_0 está fuertemente influenciada por las propiedades del núcleo en y alrededor de la frecuencia fundamental de 50/60 Hz, resultando crítico asegurar la correcta desmagnetización del transformador previo al ensayo. Aunque el comportamiento del núcleo depende del nivel de tensión aplicado, se espera que los resultados de SFRA produzcan un patrón similar al ensayo de corrientes de excitación monofásica. Cuando se examinan los gráficos de magnitud en la región de baja frecuencia, sus niveles de dB deben imitar el patrón exhibido por la prueba de corriente de excitación monofásica a 50/60 Hz.

3.2 Admitancia de Cortocircuito, Y_{CC}

El ensayo de Y_{CC} presenta una respuesta sin la influencia del núcleo en bajas frecuencias. Es decir que se remueve la influencia del núcleo por debajo de 10 a 20 kHz, debido a que la respuesta a bajas frecuencias está principalmente caracterizada por la inductancia de dispersión en lugar de la inductancia de magnetización [1] [2]. Esta prueba es útil cuando hay interés en obtener información relacionada con la impedancia de dispersión a bajas frecuencias o para eliminar la incertidumbre relacionada con la influencia del núcleo cuando éste posee magnetismo residual [2].

En la Fig. 5 se representa el esquema de conexión del ensayo de Y_{CC} para un transformador Dyn, donde los devanados secundarios están cortocircuitados. Como se observa en las respuestas de la Fig. 6 se obtienen respuestas similares en los tres casos (H1-H2, H2-H3 y H3-H1) ya que la reactancia de dispersión debe ser similar en las tres fases cuando el transformador se encuentra en buen estado. 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.

Esta configuración es similar a una prueba de impedancia de cortocircuito monofásico. En otras palabras, la configuración de Y_{CC} es equivalente a la de un ensayo de reactancia de dispersión, con baja corriente y con frecuencia variable.

A partir de la baja impedancia de medición, es posible calcular la impedancia de dispersión mediante la respuesta de la prueba de admitancia de cortocircuito a bajas frecuencias. En este caso la función de transferencia T , (utilizando una impedancia de medición de 50Ω) es [2]:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{50\Omega}{50\Omega + Z} \quad (4)$$

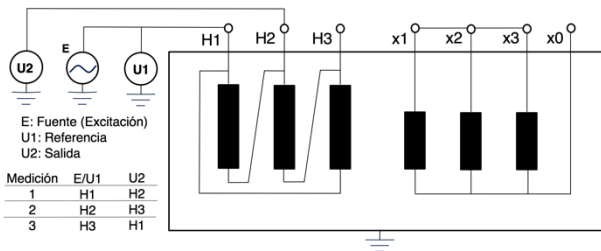


Fig. 5 - Esquema de ensayo Y_{CC} para un transformador Dyn

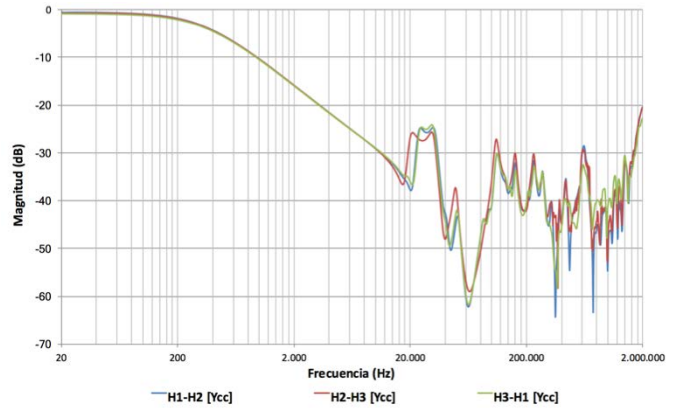


Fig. 6 - Respuestas típicas para la configuración Y_{CC} de un transformador Dyn

La impedancia Z , está conformada por una resistencia en serie con una inductancia ($Z=R+j\omega L$). Luego para Y_{CC} se tiene que la impedancia de cortocircuito Z_{CC} es:

$$Z_{CC} = R_{CC} + jX_{CC} = \frac{50\Omega}{\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}} - 50\Omega \quad (5)$$

De los ensayos de Y_{cc} pueden extraerse los valores correspondiente a la fase y al módulo para la frecuencia industrial y aplicar (5). De esta forma, se obtendrían los valores de X_{CC} que corresponderán a las mediciones trifásicas equivalentes de la reactancia de dispersión, en la cual cada fase se prueba por separado, pero los resultados se sumarán a un conjunto completo de datos [6]. Estos valores no necesariamente coincidirán con el valor de placa del transformador, puesto que estos últimos están dados generalmente a una temperatura de 75°C y son medidos con corrientes del orden de la nominal.

Es de particular interés verificar que las respuestas Y_{CC} , en condiciones normales, son idénticas a las obtenidas en Y_0 de la misma fase a excepción de la región de baja frecuencia (Fig. 7). Como se indicó, en bajas frecuencias en la configuración Y_{CC} se elimina la impedancia asociada con la reluctancia del núcleo, lo que da como resultado un aumento global de la magnitud en esta región, así como un ángulo de fase más inductivo [1].

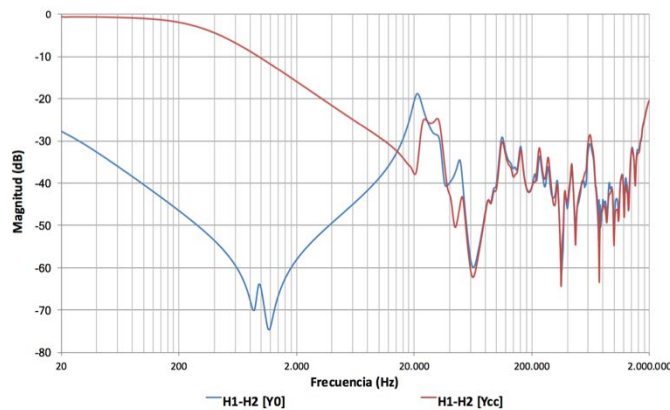


Fig. 7 - Respuestas típicas para la configuración Y_0 e Y_{CC} de un transformador Dyn

3.3 Interdevanado Capacitivo, IC

La señal se aplica en el extremo de un devanado y la respuesta se mide en el extremo del otro devanado de la misma fase (no conectado al primero). No se puede aplicar ésta configuración entre los devanados en serie y comunes (por ejemplo, autotransformadores) [2] [4].

A bajas frecuencias, la respuesta de la función de transferencia es altamente capacitiva, lo que se traduce en un valor absoluto significativo de la función de transferencia, comparado a las demás configuraciones de

ensayo. Esta prueba es particularmente sensible al aislamiento interdevanado (Fig. 2) de la misma fase, ya que la señal U_2 es debida fundamentalmente al acoplamiento capacitivo de dichas capas interdevanados.

En la Fig. 8 se representa el esquema de conexión del ensayo de IC para un transformador Dyn. Como se observa en la Fig. 9 se obtienen respuestas similares en los tres casos (H1-X2, H2-X2 y H3-X3) ya que aislamiento interdevanado tiene similar condición mecánica en las tres fases cuando el transformador se encuentra en buen estado.

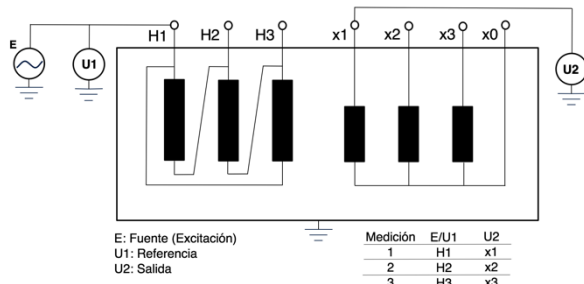


Fig. 8 - Esquema de ensayo IC para un transformador Dyn

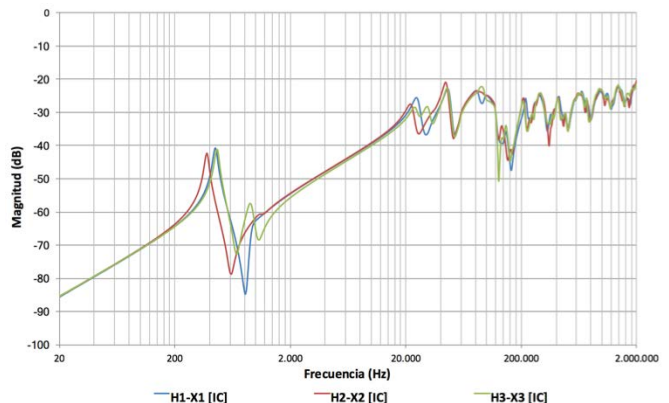


Fig. 9 - Respuestas típicas para la configuración IC de un transformador Dyn

Si se considera nuevamente la relación (4) para esta configuración, la impedancia Z está conformada por una resistencia en paralelo con una capacitancia. Si se prescinde del valor de la resistencia (asumiendo que tiene un elevado valor), resulta que en este caso $Z=1/j\omega C$. A partir de ello, aplicando la transformada de Laplace, se puede llegar a expresar la función de transferencia T como:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{S}{S + \frac{1}{50 \Omega C}} \quad (6)$$

En dicha relación, C es la capacitancia, y S el operador complejo. Como se puede observar, esta expresión representa la función de transferencia de un filtro pasa alto. A partir de ello se tiene que en bajas frecuencias (frecuencia industrial) el valor de la capacitancia pesa mayormente, con lo cual la función de transferencia es pequeña en valor absoluto. Luego, el logaritmo decimal resultará grande (en valor absoluto) y negativo.

A medida que la frecuencia aumenta, comienza a pesar menos el efecto capacitivo, con lo cual la función de transferencia aumenta y con ello disminuye el valor del logaritmo decimal, con lo cual la respuesta tiende a decrecer gradualmente en valor absoluto.

El comportamiento descrito resultaría el esperable para una respuesta típica de la configuración IC.

3.4 Interdevanado Inductivo, II

La señal es aplicada a un terminal del lado de alta tensión y la respuesta es medida en el terminal correspondiente de baja tensión, con los otros extremos de los devanados conectados a tierra [2] [4].

Esta configuración de ensayo es similar a una prueba de relación de transformación monofásica. En la Fig. 10 se representa el esquema de conexión del ensayo de II para un transformador Dyn. Como se observa en la Fig. 11 se obtienen respuestas similares en los tres casos (H1-X2, H2-X2 y H3-X3) ya que ésta configuración se corresponde con la relación de espiras de cada devanado las que deben ser muy similares en las tres fases cuando el transformador se encuentra en buen estado.

Las respuestas de II se caracterizan por presentar un comportamiento constante (para la amplitud y la fase) en bajas y medias frecuencias. En las frecuencias más altas, se forman una serie de resonancias que generalmente no se examinan, ya que no es el objetivo principal de esta prueba [1] [2].

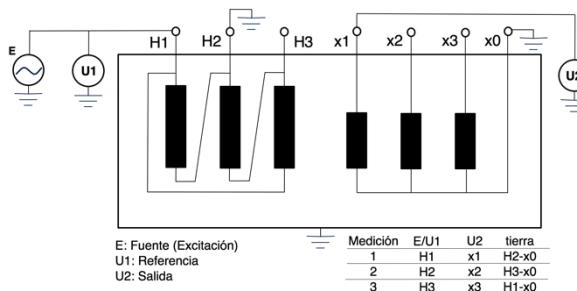


Fig. 10 - Esquema de ensayo IC para un transformador Dyn

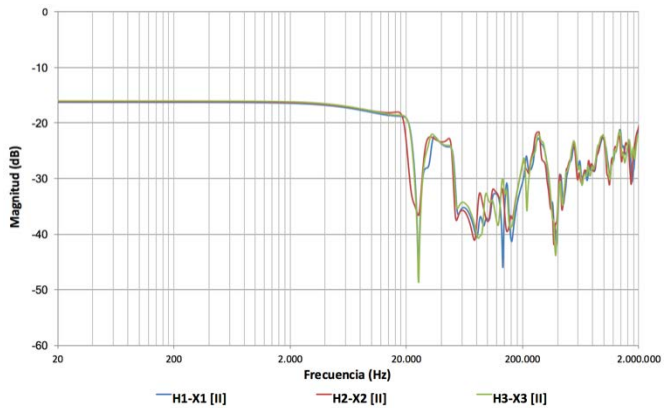


Fig. 11 - Respuestas típicas para la configuración IC de un transformador Dyn

Considerando la ecuación (2), el valor de la función de transferencia a frecuencia industrial, FI (50/60 Hz) es:

$$|T_{(FI)}|_{dB} = 20dB \log_{10} \left| \frac{U_{2(FI)}}{U_{1(FI)}} \right| \quad (7)$$

Luego se tiene que el módulo la relación de transformación, RT, a frecuencia industrial es:

$$RT = \left| \frac{U_{2(FI)}}{U_{1(FI)}} \right| = 10^{\frac{|T_{(FI)}|}{20}} \quad (8)$$

Es decir que (8) debiera corresponderse con la relación de transformación monofásica indicada en la placa característica del transformador, y diferir de acuerdo a [3] [6] en no más de $\pm 0,5\%$. La fase de la función de transferencia a la frecuencia industrial debiera ser próxima a 0° , ya que el devanado primario debiera estar en fase con el devanado secundario. En otras palabras, el desplazamiento angular entre el primario y el secundario debe ser 0° en condiciones normales.

4 RELACIÓN DE SFRA CON OTROS ENSAYOS

El ensayo de SFRA está clasificado como un ensayo eléctrico avanzado y entre ese grupo, es la prueba que mayor cantidad de defectos permite detectar en el diagnóstico de transformadores [3]. Resulta interesante establecer la relación que tiene cada una de las configuraciones de SFRA con los denominados ensayos eléctricos básicos [3] realizados a frecuencia industrial. En la Fig. 12 se indica una correspondencia.

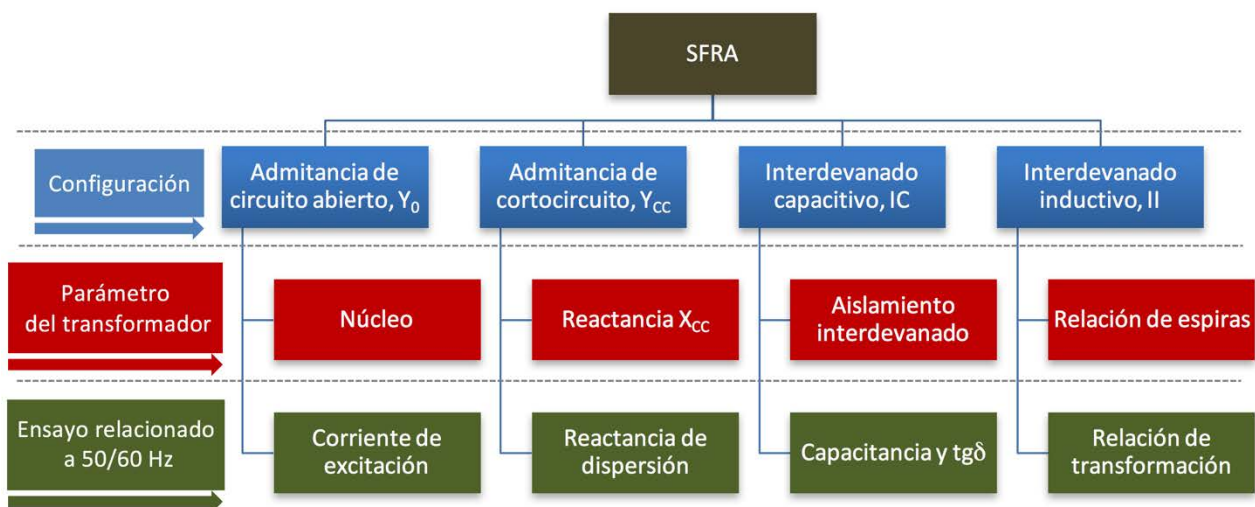


Fig. 12 - Correspondencia de configuraciones de SFRA con ensayos eléctricos básicos

Si del análisis de los barridos obtenidos en un ensayo de SFRA se detecta alguna anomalía, ya sea porque la respuesta no es típica o bien porque del análisis basado en el tiempo entre dos barridos es diferente, significa que la condición mecánica del transformador ha cambiado, y resultaría importante confirmar el diagnóstico con la prueba básica correspondiente.

5 CONCLUSIONES

El ensayo de SFRA es una de las herramientas de diagnóstico que mayor información puede aportar. Este ensayo se caracteriza por una gran sensibilidad a cambios estructurales en el transformador que se traducen en cambios en la respuesta de la función de transferencia.

Para un diagnóstico adecuado, es recomendable realizar las cuatro configuraciones de prueba establecidas por las normas IEC e IEEE. Como se ha desarrollado, cada una de las configuraciones tienen respuestas típicas asociadas a un comportamiento físico determinado. Esto permite que con una única prueba, y sin ensayos de referencia como para aplicar un análisis basado en el tiempo, sea posible establecer un buen diagnóstico a partir de las respuestas típicas esperables para cada configuración.

Por otra parte, cada una de las configuraciones de ensayo tiene un ensayo eléctrico básico equivalente que puede confirmar el diagnóstico encontrado con la prueba de SFRA. Esta es una de las características de mayor relevancia del ensayo de SFRA, puesto que es el ensayo eléctrico que mayor interrelación tiene con otros ensayos eléctricos básicos.

A partir de lo expuesto, asegurando la correcta desmagnetización del transformador, realizar como primera prueba el ensayo de SFRA permite seleccionar una secuencia óptima de ensayos eléctricos básicos. Por ejemplo, si al finalizar el ensayo de SFRA se detectan respuestas atípicas en la configuración Y_0 o desviaciones considerables respecto a las respuestas de referencia, el primer ensayo eléctrico básico recomendado sería el de corriente de excitación.

Finalmente se destaca que en la actualidad el ensayo de SFRA se encuentra normalizado por estándares internacionales IEC e IEEE que entre otras pautas, establecen los lineamientos de ejecución y del instrumental. Si se asegura el cumplimiento de dichos lineamientos los ensayos serán independientes del instrumental y del personal.

6 REFERENCIAS

- [1] IEEE C57.149 - 2012, "IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers".
- [2] CIGRÉ Technical Brochure N° 342 "Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)" April 2008.
- [3] CIGRÉ Technical Brochure N° 445 "Guide for Transformers Maintenance". February 2011.
- [4] IEC 60076-18 - 2012, "Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response".
- [5] DL/T 911 - 2004, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers". The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China.
- [6] IEEE C.57.152 - 2013 "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors".