



**UNIVERSIDAD MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE RESPUESTA A LA FRECUENCIA EN PRUEBAS
DE CAMPO A TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA
SANDRA CECILIA FLORES VALENCIA

ASESOR
M.C. JOSÉ ALBERTO AVALOS GONZÁLEZ

MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE DE 2010.



Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo	2
1.2. Justificación	3
1.3. Contenido de la Tesis	4
2. La Prueba de Barrido de la Frecuencia	5
2.1. Fundamentos de la prueba de barrido a la frecuencia	5
2.1.1. Ejemplo de un cambio de geometría al interior del transformador	6
2.1.2. Introducción a la prueba del barrido de la frecuencia	9
2.2. Descripción de la prueba de SFRA	9
2.2.1. Impedancia en el transformador	13
2.2.2. Técnicas para el diagnóstico a Transformadores	14
2.3. La prueba y sus conexiones	16
2.4. Respuestas típicas de un transformador	17
2.5. Diversidad de respuesta por variantes en el diseño de los devanados del transformador	19
2.6. Rangos de Frecuencia que activan (o excitan) los modos con falla al interior del Transformador	20
2.7. Comentarios Finales	22
3. Pseudofallas en transformadores	24
3.1. Remanencia	24
3.2. Remanencia provocada en el Laboratorio	25
3.3. Distintos errores entre puntas de prueba y boquillas del transformador	27
3.3.1. Malas conexiones	27
3.3.2. Presencia de pintura entre equipo de medición y boquillas	28
3.3.3. Daño en los cables de prueba	28
3.4. Error en la aplicación del cortocircuito en baja tensión	29
3.5. Nulo aterrizamiento del tanque o núcleo	29
3.6. Comentarios Finales	30
4. Pruebas	32
4.1. Una simulación de falla en transformador prototipo	33
4.1.1. Respuesta Transformador Prototipo antes de simular falla	33
4.1.2. Respuesta Simulada Cortocircuito entre espiras	34

4.1.3.	Error detectado durante la prueba al Transformador Prototipo . . .	36
4.1.4.	Desplazamiento individual de cada bobina	37
4.2.	Respuestas de transformadores sin falla, distintos tipos de conexiones . . .	38
4.2.1.	Respuesta de un Autotransformador	38
4.2.2.	Respuesta a cambios de posición del tap en el transformador . . .	39
4.2.3.	Respuesta al cambio de posición del tap cuyo diseño involucra el cambio del sentido del flujo	40
4.3.	Fallas en Transformadores	41
4.3.1.	Falla debida a un corto circuito	41
4.3.2.	Fallas debidas a desplazamientos entre bobinas	43
4.3.2.1.	Falla debida a un desplazamiento brusco e inapropiado de un transformador	43
4.3.2.2.	Falla debida a la pérdida de sujeción de los devanados causadas por altas corrientes	45
4.3.3.	Seguimiento a distintos transformadores	47
4.3.4.	Falla no detectada por las pruebas convencionales de rutina	57
4.3.5.	Respuesta Transformador recién reparado	58
4.4.	Respuesta Atípica de un Transformador	59
4.5.	Comentarios Finales	60
5.	Conclusiones	61
5.1.	Trabajo Futuro	64
	Bibliografía	65

Índice de figuras

2.1. Componentes RLC Transformador	6
2.2. Movimiento Axial y Radial en bobinas de transformador	7
2.3. Circuito RLC	10
2.4. Comportamiento inductivo-capacitivo en un rango de frecuencias	10
2.5. Abstracción del SFRA	11
2.6. Red de dos puertos	12
2.7. Diagrama de transformador $\Delta - Y$	16
2.8. Conexión Cables de Prueba al Transformador	17
2.9. Respuesta típica para una conexión $\Delta - Y$	18
2.10. Variante de respuesta típica para una Δ	20
2.11. Rangos de Frecuencia, detección de distintas fallas	21
3.1. Respuesta de presencia de magnetismo remanente en un transformador . .	25
3.2. Respuesta debida a remanencia provocada a transformador en Laboratorio	26
3.3. Respuesta debido a malas conexiones de las puntas de prueba a boquillas	27
3.4. Respuesta alterada por pintura entre cable de prueba y boquilla	28
3.5. Respuesta daño en uno de los cables de prueba	29
3.6. Respuesta Mala aplicación al cortocircuitar las puntas en el lado de baja tensión	30
3.7. Respuesta Nulo aterrizamiento del núcleo	31
4.1. Transformador Prototipo de Laboratorio	33
4.2. Respuesta Transformador Prototipo antes de simular falla	34
4.3. Respuesta Transformador Prototipo simulando un Cortocircuito	35
4.4. Respuesta Falso contacto en Zapata	36
4.5. Respuesta Falso contacto en Zapata	37
4.6. Respuesta Bobina Desplazada	37
4.7. Respuesta Autotransformador conexión Y-Y	38
4.8. Respuesta Diferentes posiciones del Tap del transformador	40
4.9. Respuesta Diferentes posiciones del Tap del transformador al invertir el sentido del flujo	40
4.10. Respuesta Transformador Sin Falla	41
4.11. Respuesta de corto circuito	42
4.12. Respuesta a Seguimiento del transformador 2005-2007	44
4.13. Respuesta a la Pérdida de presión en la sujeción de los devanados	45

4.14. Respuesta a la corrección en la sujeción de los devanados	46
4.15. Respuesta al seguimiento de un transformador con un año de diferencia .	48
4.16. Respuesta al seguimiento de un Transformador en el periodo 2005-2007 .	49
4.17. Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase C lado de alta	51
4.18. Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase A lado de alta	52
4.19. Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase B lado de alta	53
4.20. Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase B lado de alta	54
4.21. Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase C lado de alta	55
4.22. Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase A lado de alta	56
4.23. Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase B lado de alta	56
4.24. Transformador tipo horno con falla	57
4.25. Respuesta a un Transformador recién reparado	58
4.26. Respuesta atípica de un transformador	59

Capítulo 1

Introducción

La prueba de barrido a la frecuencia, Sweep frequency Response Analysis (SFRA, por sus siglas en inglés), esta basada en la inyección de un bajo voltaje(20 volts de pico a pico), variando la frecuencia para realizar un barrido en un rango de $20Hz$ hasta los $2MHz$, generando como respuesta una ganancia de voltajes puntuales para cada valor de frecuencia inyectada, ganancias que al hacer su análisis e interpretación, arroja resultados de si, el transformador presenta o no algún tipo de falla.

La prueba de barrido en la frecuencia a transformadores de potencia resulta, por su bajo nivel de tensión aplicado, una prueba no invasiva que garantiza la repetividad de la misma. Esto la hace robusta y confiable para la detección de movimientos y/o deformaciones en devanados y núcleo que involucren fallas incipientes así como cortocircuitos internos entre espiras, entre otras fallas, que reflejan la presencia de fallas francas al interior del equipo. Ambos tipos de fallas se ven reflejadas básicamente con un cambio en la geometría de los devanados y de la estructura magnética en su conjunto que incluye al núcleo. Esta prueba, realizada en forma periódica, permite garantizar la detección oportuna de fallas incipientes permitiendo su eficaz reparación minimizando así el riesgo de daño permanente de los transformadores. Así se evita el paro de producción que genera fuertes pérdidas económicas que se suman al costo en sí de la reparación del equipo.

Lo anterior finalmente se traduce en un mantenimiento correctivo eficiente que incluye reducir riesgos en posibles paros de producción.

El presente trabajo, muestra la experiencia que se ha obtenido en la realización de esta prueba a transformadores de potencia en campo cuyas capacidades van desde 5 MVA a 175 MVA, así como en pruebas de Laboratorio a transformadores de distribución y a un prototipo desarrollado ex profeso. En las pruebas a los transformadores en campo, se ha tenido la oportunidad de dar un seguimiento que ha permitido detectar fallas internas en algunos de ellos así como obtener la evidencia de los resultados logrados mediante la aplicación de las acciones correctivas oportunas en los mismos. En otros casos han sido detectadas variaciones que exigen un seguimiento más continuo del comportamiento del transformador mediante esta prueba pero que no justifican el paro en la producción ni la apertura del mismo.

La posibilidad de llevar a cabo pruebas de Laboratorio que permitan reproducir físicamente la gran gama de fallas posibles a presentarse en un transformador de potencia lo hace un procedimiento considerablemente costoso y algunas de ellas difíciles de reproducir. Adicionalmente la realización de pruebas en transformadores de baja capacidad reflejan en su respuesta comportamientos que no son completamente extrapolables a la respuesta que se obtiene en los transformadores de potencia, por lo que los resultados obtenidos poco podrían aportar a la comprensión de la prueba misma.

1.1. Objetivo

El objetivo de esta tesis es, el mostrar las fortalezas y debilidades de la prueba de SFRA basados en la experiencia obtenida en campo, a un número considerable de transformadores de potencia. A su vez mostrar la complejidad que representa la gran variedad de diseños aplicados por los fabricantes de transformadores para poder obtener un modelo generalizado de los mismos que permita una interpretación objetiva y sistemática de la prueba.

1.2. Justificación

La detección oportuna de fallas incipientes en los transformadores de potencia y distribución hace posible evitar el gasto excesivo que representa el sacar de servicio un transformador debido a una falla. Esto ha llevado al estudio de métodos eficaces para la detección de dichas fallas.

Esta tesis está enfocada al estudio de la prueba de barrido de frecuencia (SFRA), que por la simplicidad en las conexiones, manejo de su software e interpretación de los resultados hace de ella una prueba confiable y sencilla de realizar, sin provocar algún daño al transformador durante dicho periodo de prueba.

Haciendo una comparación de la prueba SFRA con la prueba de respuesta al impulso, SFRA no es una prueba invasiva debido al bajo nivel de tensión que aplica, mientras que la prueba de respuesta al impulso provoca un magnetismo remanente en el núcleo del transformador, que evidentemente modifica la propia respuesta al impulso si se realiza nuevamente. SFRA no modifica las condiciones iniciales del transformador, en cuanto al nivel de remanencia en el mismo. Se puede confiar en repetir la prueba si al momento de hacerla se detectó que hubo algún error en las conexiones. Además en los diferentes rangos de frecuencia, SFRA proporciona el tipo de falla que pudo haberse presentado.

La prueba al barrido de la frecuencia (SFRA), señala que tipo de falla se tiene, como son: movimiento, desplazamiento y/o deformación de los devanados ocasionada por los esfuerzos radiales y axiales a los cuales se ven sometidos al momento de ocurrir fallas o cambios bruscos de carga. A su vez, esta prueba permite también detectar cortocircuitos entre espiras, circuitos abiertos, movimientos en el núcleo, falsos contactos en los empalmes, entre otras.

En ocasiones, al presentarse algún problema al interior del transformador, las pruebas convencionales de rutina, no detectan el problema presentado mientras que SFRA lo logra. La prueba del barrido a la frecuencia viene a ser una prueba que, sumada a las

demás, complementa la detección para dar un diagnóstico más completo y confiable de fallas al interior del transformador.

1.3. Contenido de la Tesis

A continuación se proporciona una breve descripción del contenido de este trabajo. En el capítulo 1, se da una introducción a la prueba del barrido a la frecuencia (SFRA). A continuación, en el capítulo 2, se discuten los principios y fundamentos de la prueba al barrido a la frecuencia. Después, en el capítulo 3, se habla de la detección de errores durante la prueba que pueden ser confundidos con fallas en los transformadores. El capítulo 4 contiene la parte esencial de este trabajo, ya que se dan los fundamentos de esta prueba, mismas que servirán como base para la detección de fallas presentadas en el transformador así como para asegurar un buen diagnóstico. Finalmente, en el capítulo 5 se da un breve resumen de los resultados y análisis a los distintos transformadores que se estudiaron a lo largo de este trabajo, resaltando la ventaja que se tiene al aplicar esta prueba en la detección de fallas en transformadores.

Capítulo 2

La Prueba de Barrido de la Frecuencia

2.1. Fundamentos de la prueba de barrido a la frecuencia

Un transformador de potencia trifásico de núcleo común, representa en su estructura interna un conjunto de circuitos RLC multiacoplados, reflejando con ello fenómenos de acoplamiento inductivos y capacitivos tanto entre devanados como con la propia estructura del núcleo y tanque del transformador, tal como se muestra en la Figura 2.1

Lo anterior conlleva a la existencia de distintos modos de operación del transformador, los cuales responden a diferentes frecuencias de excitación. Estos modos, como se observa en la Figura 2.1, son un reflejo de la estructura geométrica del transformador en su conjunto. Esto se debe a que ésta depende fundamentalmente de la disposición física de los devanados tanto respecto al núcleo como a los demás devanados y al propio tanque del transformador.

Visto de esta manera, la presencia de una falla al interior del transformador que refleje primordialmente desplazamientos y/o deformaciones de los devanados y/o núcleo, provocados por esfuerzos mecánicos, originados ante la presencia de altas corrientes de

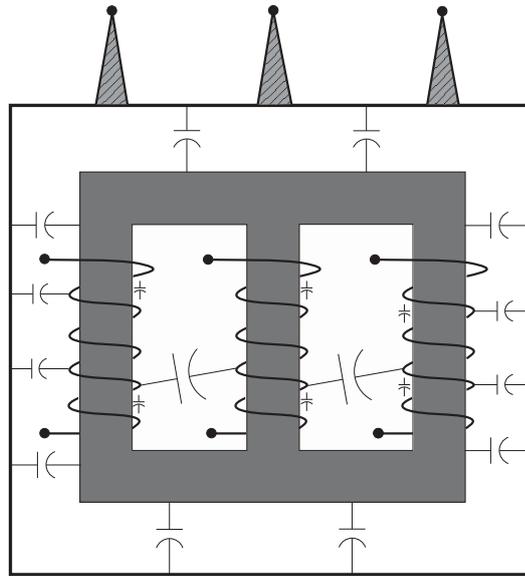


FIGURA 2.1: Componentes RLC Transformador

falla en los devanados del transformador, o bien por movimientos bruscos importantes ante el traslado o reubicación del mismo, impacta primordialmente en un cambio de la geometría del transformador. Lo anterior lleva a una alteración de los modos de operación del circuito eléctrico en sí, esto debido al cambio consecuente de las frecuencias de excitación de los mismos.

2.1.1. Ejemplo de un cambio de geometría al interior del transformador

Un ejemplo claro es el mostrado en la Figura 2.2, el cual evidencia la presencia de movimientos axiales y radiales del devanado que provocó una deformación de la bobina conocida normalmente como el telescopiado de la misma evidenciando con ello un gran cambio en la geometría del devanado.

Como se observa en la misma figura, el devanado fue sometido a esfuerzos mecánicos axiales y radiales debido a corrientes excesivas en el mismo, provocando una deformación evidente con el telescopiado del devanado.



FIGURA 2.2: Movimiento Axial y Radial en bobinas de transformador

La ausencia de una falla franca del devanado, debido a que no se presenta una ruptura de los aislamientos, requiere la aplicación de pruebas tanto convencionales como no convencionales que logren excitar las diferentes fallas para su detección sin necesidad de abrir el transformador [1].

Dentro del esquema de pruebas eléctricas convencionales se encuentran las siguientes:

- Corriente de excitación
- Relación de transformación (TTR) en baja tensión
- Factor de Potencia
- Prueba a boquillas

Existen otras pruebas alternativas de apoyo para la detección de fallas en el transformador, las cuales se denominarán no-convencionales y son las siguientes:

- Relación de transformación en alta tensión 10KV
- Reactancia de dispersión
- Barrido de frecuencia
- Resistencia de devanados

Analizando la falla en el devanado mostrada en la Figura 2.2, las pruebas como la corriente de excitación y TTR en alta y baja tensión no lograrán excitar este tipo de falla incipiente. Sin embargo, la prueba de Factor de Potencia deberá mostrar un cambio evidente en la capacitancia interdevanados y del devanado fallado respecto al tanque y/o núcleo del transformador. Ya sea que se cuente con pruebas previas o bien comparando estos valores contra los obtenidos en los devanados de las otras dos fases del transformador.

Tomar la decisión de apertura de un transformador ante la evidencia de la presencia de una falla incipiente, requiere de que más de una prueba del conjunto de pruebas convencionales y no convencionales muestren la evidencia clara de la presencia de la falla, ya que de lo contrario se corre el riesgo de que se realice la apertura del transformador y no exista falla alguna. En la realidad la mayoría de las empresas no lleva un control ordenado de las pruebas a los transformadores, como pueden ser la degradación gradual de los aislamientos o bien la detección de desplazamientos de devanados al interior del transformador (SFRA) entre otros. Lo anterior hace que los comparativos entre las pruebas sean poco efectivos para el análisis de las mismas.

Por su parte ante la detección de una falla franca es conveniente realizar el conjunto de pruebas como son: TTR en baja y alta tensión, corriente de excitación, reactancia de dispersión y factor de potencia con el fin de contar con el historial de las mismas e identificar cuales de éstas fueron capaces de excitar la falla involucrada.

Es importante mencionar que el tipo de falla incipiente mostrado en la Figura 2.2 pudo haberse detectado en pruebas de diagnóstico rutinarias o bien ante la posible operación de alguna de las protecciones que operan ante la presencia de fallas al interior del transformador. Estas pueden ser: sobrepresión, presencia de gases (Buchholz), diferencial de transformador, sobretensión, etc., factores que eventualmente exigirán la realización de pruebas de diagnóstico al transformador [Myers].

2.1.2. Introducción a la prueba del barrido de la frecuencia

Es evidente en la falla mostrada en el devanado, que la geometría del mismo cambió drásticamente por lo que los modos de operación del circuito RCL multiacoplados se desviaron de su condición original. Este es un ejemplo claro de cambios en la geometría del transformador y que debe ser aprovechado por la prueba de barrido en la frecuencia para detectar estas variaciones. Esta prueba inyecta una señal senoidal de baja amplitud (20 Vpico) a diferentes frecuencias que van desde 20 Hz a 2 MHz, logrando con ello excitar los nuevos modos de operación del transformador. Es de vital importancia contar con una prueba base o de referencia previa que permita mediante comparación directa, detectar la presencia del cambio en los modos de operación del transformador que permita establecer la presencia de una falla al interior del mismo.

2.2. Descripción de la prueba de SFRA

Cuando se requiere analizar los componentes de los dispositivos de conversión de energía eléctrica, magnética y mecánica tales como, transformadores, motores, generadores, éstos son modelados como una impedancia compleja, tal como se muestra en la Figura 2.3, debido a la interacción de los diferentes componentes de estos dispositivos (núcleos, espiras, devanados, etc.). Esta impedancia compleja es el resultado de la conjunción de un gran número de pequeños componentes RLC's, la predominancia de los cuales es evidente para diferentes frecuencias de excitación dando como resultado diferentes valores de impedancia para cada frecuencia inyectada. Lo anterior fue aprovechado para la implementación de la prueba de barrido en la frecuencia para diagnóstico de transformadores de potencia cuya base es la siguiente.

La dependencia de la frecuencia de la reactancia inductiva esta dada por la ecuación 2.1 y la de reactancia capacitiva esta dada por la ecuación 2.2

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.1)$$

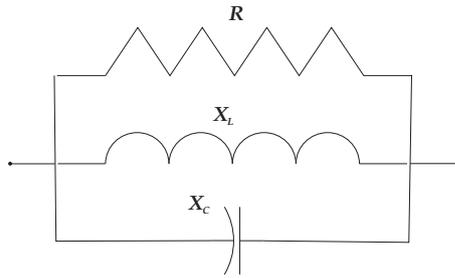


FIGURA 2.3: Circuito RLC

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \tag{2.2}$$

Donde $2\pi f$ es la frecuencia angular en radianes por segundo, X_L y X_C reactancias en ohms del inductor L y capacitor C a la frecuencia f en hertz.

Se tiene que para altas frecuencias el capacitor se comporta como un corto circuito y a bajas frecuencias como un circuito abierto. Lo contrario ocurre con la reactancia inductiva en donde a bajas frecuencias esta disminuye, comportándose como un cortocircuito y para altas frecuencias como un circuito abierto. En la gráfica de la Figura 2.4 se muestra este comportamiento inductivo, capacitivo a diferentes frecuencias.

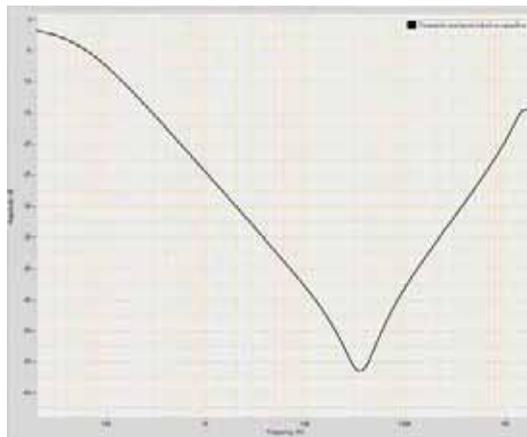


FIGURA 2.4: Comportamiento inductivo-capacitivo en un rango de frecuencias

Los valores de impedancia obtenidos para cada frecuencia reflejan la impedancia equivalente del conjunto RLC excitado, el punto donde se igualan los efectos inductivos y capacitivos reflejan el punto de resonancia del circuito analizado.

Los transformadores de potencia son operados a frecuencia constante (60 Hz) siguiendo una forma de onda senoidal hablando de un transformador ideal. Resulta práctico agrupar todos los elementos RLC y modelarlos para una sólo frecuencia y su solución es más simple que cuando en el sistema a modelar intervienen un significativo intervalo de frecuencias como basa su análisis SFRA [9].

El modelo del transformador en un amplio rango de frecuencias implica la consideración de todas y cada uno de los elementos de acoplamientos inductivos y capacitivos al interior del transformador, los cuales se verán reflejados predominantemente en frecuencias bajas, medias o altas. Es claro que no es posible una representación precisa en forma del circuito del transformador, ya que son múltiples los acoplamientos de los distintos circuitos RLC que están involucrados y que se verán reflejados sus efectos a diferentes frecuencias.

De aquí que el circuito puede analizarse a grozo modo como una caja negra con una relación entrada-salida, como se muestra en la Figura 2.5

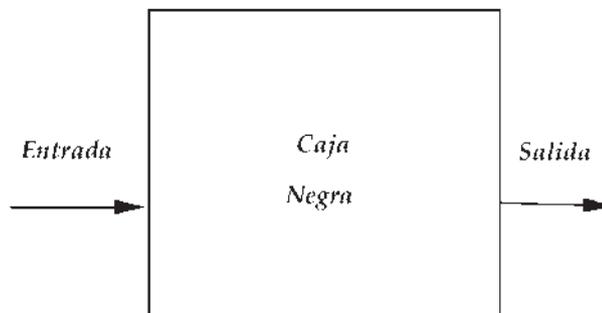


FIGURA 2.5: Abstracción del SFRA

La prueba SFRA, basa su análisis en la inyección de una señal de voltaje en un extremo del devanado a analizar y mide el voltaje en el otro extremo del mismo, obteniendo así una relación de ganancias entrada-salida dada por la ecuación 2.3, en un rango de frecuencias especificado [3].

$$H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.3)$$

En este contexto la representación de la impedancia, como esta relación de ganancias en forma de decibeles, resulta más apropiada para el análisis de los resultados de esta prueba.

Visto de esta manera, la predominancia del efecto inductivo se verá reflejada con una pendiente negativa que precisa la atenuación de la señal de salida respecto a la señal de entrada. Por otro lado el predominio del efecto capacitivo reflejará una pendiente positiva con la correspondiente ganancia de la señal de salida respecto a la señal de entrada como ya lo habíamos visto en la Figura 2.4. Adicionalmente debe enfatizarse que el valor de impedancia obtenida será un reflejo de la frecuencia a la cual se excita el modo de operación respectivo.

Aplicando esta metodología al análisis de transformadores de potencia, es evidente como se ha mencionado que éstos representan circuitos RLC multiacoplados los cuales tienen una relación directa con la geometría propia de los devanados y núcleo, como un reflejo de la disposición física de los mismos.

SFRA hace una representación más general del transformador y para el análisis de la prueba, visualiza al transformador como una red de dos puertos con cuatro terminales como se muestra en la Figura 2.6 [8].

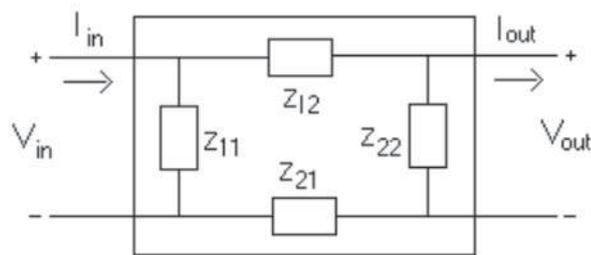


FIGURA 2.6: Red de dos puertos

En donde se tiene la señal de entrada V_{int} , referida a tierra y la señal de salida V_{sal} también referida a tierra.

Esta red de dos puertos es descrita por las ecuaciones 2.4 y 2.5

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (2.4)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad (2.5)$$

Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} y Z_{22} son los parámetros de impedancia de circuito abierto,

V_{int} , I_{int} , V_{sal} y I_{sal} están dados por V_1 , V_2 , I_1 e I_2 en las ecuaciones 2.4 y 2.5

2.2.1. Impedancia en el transformador

El comportamiento de la red compleja del transformador al inyectar una señal de voltaje en un rango de frecuencias de 20 Hz a 2 MHz, se puede entender mediante un modelado en donde existe una relación directa entre la impedancia y la frecuencia. Lo anterior da como resultado una función de transferencia de la red RLC en el dominio de la frecuencia. Esta función de transferencia para cada frecuencia es una medida efectiva de dicha impedancia que refleja la excitación de los distintos modos de operación de los circuitos internos del transformador. Esta prueba al aplicarse a transformadores de potencia trifásicos deberá realizarse excitando por separado cada uno de los 6 devanados, teniendo en cuenta la impedancia propia de los cables de prueba utilizados para su discriminación. En particular el equipo de prueba utilizado en este trabajo, emplea un cable que presenta una impedancia de 50 Omhs prácticamente constante para frecuencias por debajo de 1 MHz.

De esta forma la impedancia del cable y la impedancia propia del transformador $Z(j\omega)$ estarán directamente incorporadas a la función de transferencia $H(j\omega)$ de la forma mostrada en 2.6 [4]

$$H(j\omega) = \frac{50}{Z(j\omega) + 50} \quad (2.6)$$

EL método SFRA refleja la respuesta de impedancia como una relación de ganancias en decibeles que representa la magnitud, ecuación 2.7 y fase, ecuación 2.8 de la función de transferencia respectiva [3].

$$A(dB) = 20 \log_{10}(H(j\omega)) \quad (2.7)$$

$$A(\theta) = \tan(H(j\omega)) \quad (2.8)$$

De manera que, SFRA inyecta un voltaje alterno de 20 Volts de pico a pico en un rango de frecuencias de 20 Hz a 2 Mhz y va identificando para cada punto la respuesta de impedancia y los cambios de resonancia que se presentan en cada rango de frecuencias. Esto permite identificar la geometría interna del transformador que reflejará las características propias de diseño del mismo.

2.2.2. Técnicas para el diagnóstico a Transformadores

La interpretación de los resultados obtenidos por esta prueba se basará en tres posibles métodos [2].

1. El primero partirá del hecho de que el transformador cuenta con una prueba realizada en planta al fabricar el transformador, la cual se denominará huella digital. Esto garantiza que la prueba se realiza en las condiciones óptimas, para las cuales la geometría del transformador esta integra y no existen factores que alteren esta condición tales como la remanencia en el núcleo que como se verá más adelante puede afectar seriamente la respuesta obtenida.

A su vez, se contará con una prueba en sitio al momento de instalar el transformador prueba que deberá ser prácticamente idéntica a la huella digital. Partiendo de este hecho, los fabricantes de este equipo de prueba recomiendan repetir esta

prueba cada dos años o en su defecto cuando el transformador presente indicios de alguna falla interna en el mismo, lo cual se verá reflejado normalmente ante la operación de alguna de las protecciones que ven hacia el interior del transformador. La respuesta obtenida en esta prueba se comparará con la huella digital del transformador, comparando cada uno de las respuestas obtenidas para cada devanado de manera individual. Se debe de cuidar que variaciones mayores a 3 dB entre ellas, serán indicativo claro de un problema al interior del transformador. Sin embargo deberá discriminarse en bajas frecuencias la posible presencia de magnetismo residual en el núcleo, ya que éste puede presentar variaciones mayores a los 3dB, mismas que se han detectado en campo y que han llegado hasta los 10dB.

2. El segundo método de análisis de los resultados obtenidos partirá del hecho de que no se cuenta con una prueba previa del transformador. Hablando de manera particular de los transformadores de tipo núcleo de tres columnas, será necesario el comparar primeramente las respuestas de las fases laterales del transformador, entendiéndose que las trayectorias magnéticas de ambas fases son constructivamente idénticas por lo que ambas respuestas deben ser muy similares. La fase central por su parte presentará un incremento en la impedancia obtenida debido al cambio en las trayectorias magnéticas respecto a las fases laterales pero con una respuesta muy semejante al presentado por estas últimas.
3. Un tercer método, al no contar con la huella digital del transformador y encontrar una sospecha de anomalía en la respuesta obtenida al seguir el segundo método, es necesario tener disponibles transformadores que representan unidades gemelas al transformador bajo prueba. Se deben realizar pruebas a la unidad gemela y comparar la respuesta fase a fase entre ambas unidades, lo anterior entendiéndose, que la unidad gemela esté en condiciones favorables.

Como puede observarse en los fundamentos propios de la prueba de SFRA, ésta permite identificar principalmente fallas debido a que se reflejan en un cambio en la geometría propia del transformador. SFRA señala que tipo de falla se tiene, como son: movimiento

del núcleo, desplazamiento y/o deformación de los devanados ocasionada por los esfuerzos radiales y/o axiales a los cuales se ven sometidos al momento de ocurrir fallas o cambios bruscos de carga, pérdidas de sujeción de los devanados, cortocircuitos entre espiras, circuitos abiertos, falsos contactos en los empalmes, entre otras. La prueba detecta estos distintos tipos de falla y localiza cada una de ellas en un rango de frecuencias específicos, de lo cual se estará hablando más adelante.

2.3. La prueba y sus conexiones

Antes de pasar al análisis de las gráficas de respuestas de los transformadores, se ejemplifica la conexión de la prueba SFRA. Esta es la forma en como la prueba identifica o nombra cada una de las fases del transformador tanto para el lado de alta tensión como para el de baja.

La Figura 2.7 muestra el diagrama de un transformador $\Delta - Y$. Esta es una de las conexiones más comunes que se encontrarán al hacer pruebas a transformadores de potencia en campo. El diagrama indica que las fases son referidas como $H1, H2, H3$ para el lado de alta tensión y $X0, X1, X2, X3$ para el lado de baja.

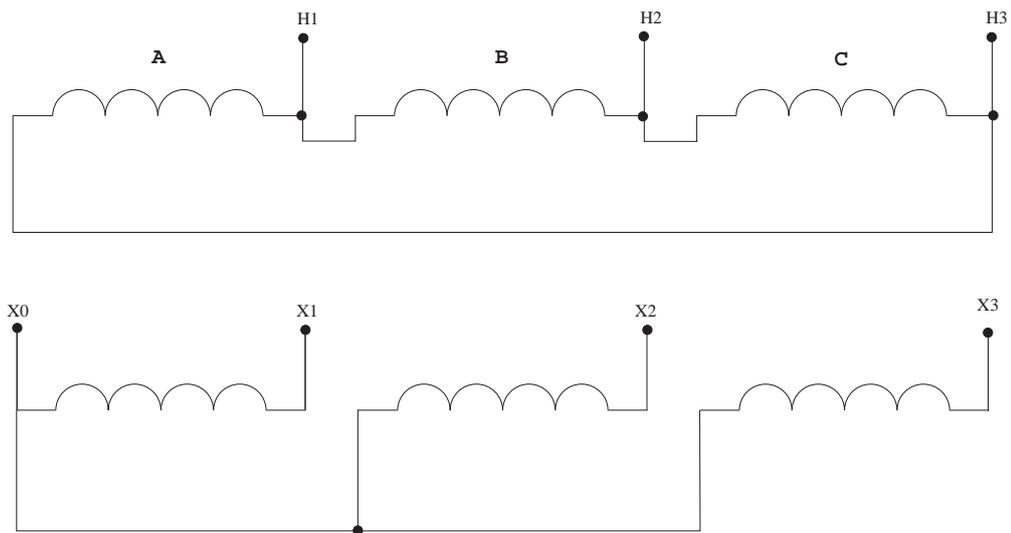


FIGURA 2.7: Diagrama de transformador $\Delta - Y$

La Figura 2.8 muestra la conexión del equipo de prueba SFRA al transformador [4]. En esta figura se pone como ejemplo sólo una fase conectada de la prueba al transformador. La punta de prueba roja se conecta a la boquilla $H1$ y la punta de prueba negra se conecta a la boquilla $H2$. De esta manera se está obteniendo la respuesta de una de las fases del transformador. Esta conexión se hace a cada una de las fases. Obteniéndose así seis respuestas, tres de las cuales corresponden a las mediciones del lado de alta tensión y las otras tres a las de baja.

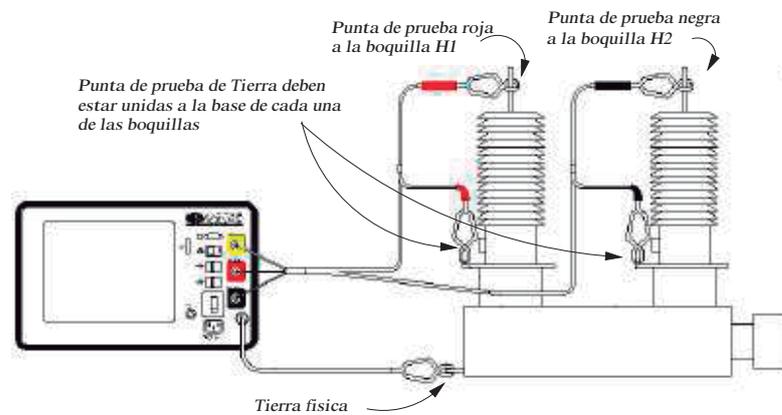


FIGURA 2.8: Conexión Cables de Prueba al Transformador

En el siguiente apartado se describen las respuestas típicas obtenidas para las conexiones más comunes de un transformador, así como los aspectos que dificultan una interpretación completamente objetiva de esta prueba.

2.4. Respuestas típicas de un transformador

La Figura 2.9 muestra la respuesta típica de un transformador con conexión $\Delta-Y$, ambas respuestas muestran el comportamiento presentado en el lado de alta tensión como el de baja ante la prueba a circuito abierto así como la respuesta presentada ante la prueba de cortocircuito.

Se observa en la figura que para la conexión delta, la respuesta de las dos fases laterales son idénticas mientras que la fase central presenta una respuesta con un incremento en la impedancia como se espera debido al cambio en la trayectoria del flujo magnético en la

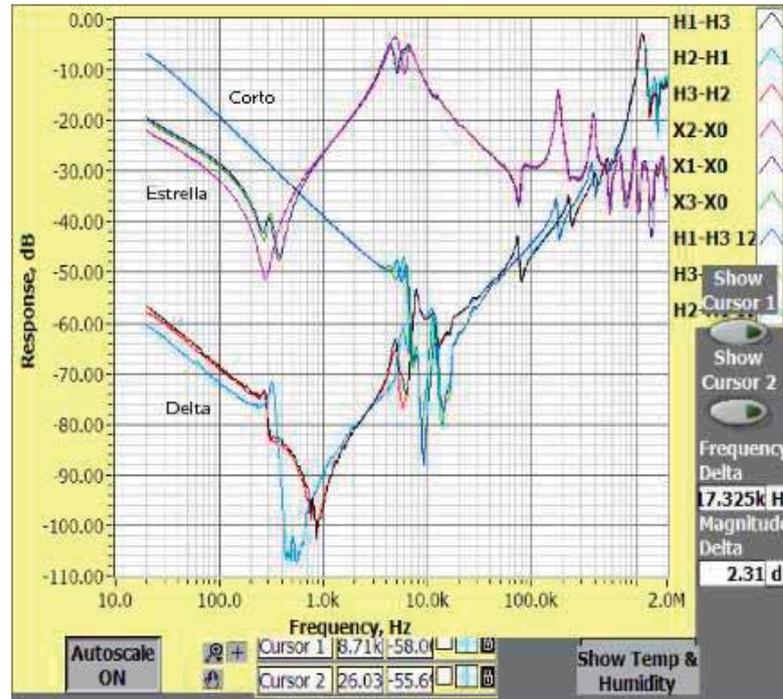


FIGURA 2.9: Respuesta típica para una conexión $\Delta - Y$

estructura magnética del transformador. Se observa entonces, en el rango de frecuencias de 200 Hz a 2 KHz una caída más pronunciada de la respuesta de la fase central con referencia a las fases laterales.

Para la conexión estrella se observa que ambas fases laterales presentan una respuesta muy similar, presentando una doble resonancia en el rango de 200 Hz a 400 Hz. Por otro lado en la fase central se presenta solamente un punto de resonancia en el mismo rango y un incremento en la impedancia al igual que para la conexión delta, debido al mismo factor de cambio en la trayectoria de flujo magnético.

Analizando por su parte la prueba de cortocircuito se observa una respuesta idéntica para las tres fases en bajas frecuencias en el rango de 20 Hz a 4 KHz, además una reducción considerable de la impedancia hasta casi alcanzar los 0dB. Esto debido a que se trata de la prueba de cortocircuito por lo que desaparece el efecto del núcleo, ya que en el transformador, es el que aporta el mayor grado de impedancia. Se observa también que después de cierto rango existe una tendencia de la respuesta de las tres fases a asemejarse a la respuesta de circuito abierto [3].

Estas son, las pruebas típicas convencionales que SFRA refiere para el diagnóstico del transformador. En adelante cuando se haga referencia a pruebas convencionales, se estará hablando de las pruebas de circuito abierto tanto para el lado de alta como el de baja tensión y la prueba de cortocircuito inyectando en el lado de alta pero cortocircuitando el lado de baja.

Existen transformadores que se fabrican con tres unidades monofásicas montadas en un mismo tanque, que igual pueden conectarse en delta o estrella. En estos casos la respuesta de las tres unidades debe ser idéntica ya que los núcleos y la construcción de los devanados es muy semejante.

2.5. Diversidad de respuesta por variantes en el diseño de los devanados del transformador

Tomando como referencia la respuesta típica del transformador de la Figura 2.9, es que se detecta si el transformador a tenido o no alguna falla. Sin embargo y dependiendo de la capacidad y del diseño implementado por el fabricante del transformador pueden existir variantes en la respuesta que se esperaba como típica. Esto se muestra en la figura 2.10, para una conexión Delta, donde se observa una variación importante en el tipo de respuesta obtenida en frecuencias de 200 Hz a 2 MHz. Estas respuestas corresponden a la fase *H1-H3* del lado de alta de cuatro transformadores distintos.

La variante entre estas respuestas hace que el análisis de resultados no pueda realizarse como una regla general de comparación entre distintos transformadores, hablese de distinta capacidad y/o distinto fabricante. Debido a esto se debe realizar el análisis de forma individualizada o bien comparando resultados con unidades gemelas.

Se observa entonces que, a excepción de unidades gemelas, ningún transformador va a presentar el mismo comportamiento, ya que cada uno presenta peculiaridades en su geometría que lo diferencian. El que se logre detectar si se trata de una falla o es la geometría propia del transformador, lo determinará, la comparación del resultado con la

FIGURA 2.10: Variante de respuesta típica para una Δ

huella digital del transformador, la comparación con unidades gemelas, la comparación entre las fases del transformador, así como la experiencia que se ha logrado a lo largo de aplicar SFRA a distintos transformadores.

2.6. Rangos de Frecuencia que activan (o excitan) los modos con falla al interior del Transformador

La prueba de SFRA permite enmarcar los distintos tipos de fallas que se presentan en el transformador en tres rangos de frecuencia, lo cual se muestra en la Figura 2.11. Ahí se evidencia los cambios en la geometría de devanados y/o núcleo y (de los que se han venido hablando) y se ven reflejados en variaciones en la respuesta para distintos rangos de frecuencia [5]

Estas variaciones en la respuesta para los diferentes rangos de frecuencia son:

- 20Hz-2KHz: Deformación en el núcleo, circuitos abiertos, espiras en corto y magnetismo residual. Es decir fallas que involucran al núcleo.

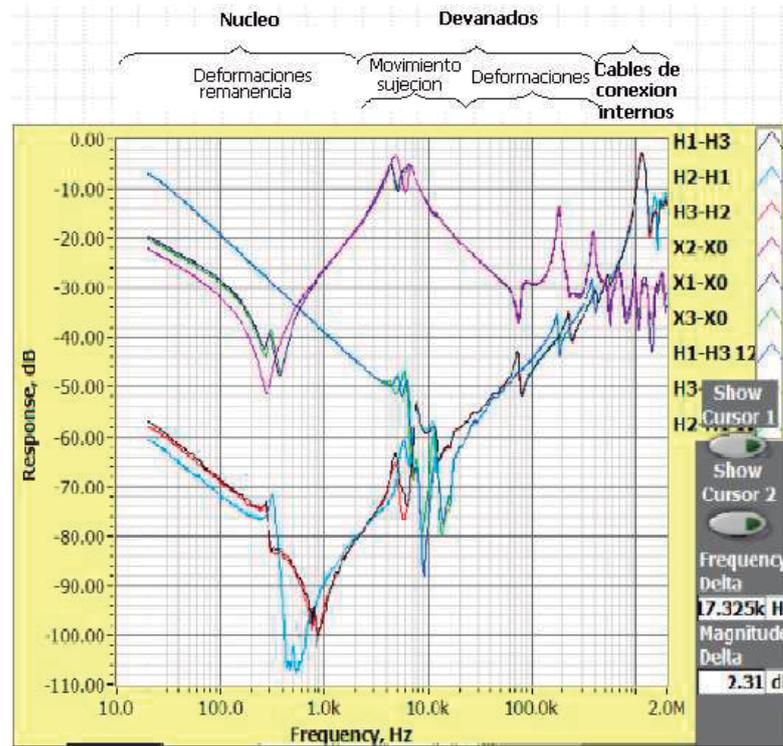


FIGURA 2.11: Rangos de Frecuencia, detección de distintas fallas

- 2KHz-400KHz: Movimientos de devanados en relación a cada uno, pérdida en la sujeción de devanados.
- 400KHz-2MHz: Entran en juego problemas en las conexiones internas del transformador tanto entre devanados como en la sujeción a las propias boquillas. Es decir movimiento de los cables de conexión (devanados y cambiadores).

De forma general, podemos clasificar las fallas en :

- Bajas frecuencias: parámetros involucrados con devanados y núcleo [7], en los cuales su geometría se verá alterada por esfuerzos mecánicos debidos al transporte o a corrientes de corto circuito que pueden provocar movimientos en el núcleo y en devanados.
- Medias frecuencias: Entran los parámetros que existen en bajas frecuencias, además de la capacitancia a tierra del devanado primario, así como la capacitancia a tierra

del devanado secundario [7]. La geometría reflejada puede ser provocada por la pérdida de sujeción de los devanados debidos a daños mecánicos provocados por esfuerzos por sobre corrientes de corto circuito.

- Altas frecuencias, el modelo se hace mucho mas complejo, ya que los parámetros involucrados aumentan, como son, capacitancias entre vueltas del devanado primario, capacitancias entre vueltas del devanado secundario, capacitancias entre devanados [7].

Recordemos que a altas frecuencias los parametros inductivos de devanados y núcleo que intervienen en el circuito magnético actuarán como un circuito abierto. Es por eso que para altas frecuencias el barrido de frecuencias estará reflejando el efecto solo de los parámetros capacitivos que se estén excitando o que estén alterando la geometría del transformador, como puede ser problemas por daño en las conexiones entre otros. Sin embargo, es necesario recalcar que estos rangos son relativos ya que dependen del diseño propio del devanado y del tipo de transformador e.g. alta impedancia, devanados con transposiciones, etc.

2.7. Comentarios Finales

A continuación se resúmen los aspectos principales de este capítulo. En este capítulo se han mencionado los fundamentos de la prueba del barrido a la frecuencia. Primeramente, se estableció que la geometría interna del transformador es reflejada en los distintos modos de operación del transformador, los cuales son excitados a diferentes frecuencias. Después, se realizó el análisis de la geometría de un transformador con una respuesta típica, es decir en condiciones normales sin falla. Esta respuesta sirve como base para el diagnóstico a los futuros transformadores. Sin embargo, es importante mencionar el análisis que se hizo a los cuatro transformadores que presentaron diferentes respuestas debido a las variaciones que se tiene por sus diseños. Se infiere que no siempre se debe

esperar obtener una respuesta típica en las pruebas a transformadores. A pesar de esta variación, en los transformadores que presenten comportamientos no típicos su respuesta será diagnosticada en base a las técnicas para el diagnóstico aplicables a transformadores cuya respuesta es normal.

Capítulo 3

Pseudofallas en transformadores

Existen factores internos y externos que alteran los resultados de las pruebas y que pueden ser confundidas con fallas si no se tiene experiencia con la prueba. A continuación se presentan varios de ellos.

3.1. Remanencia

La presencia de un magnetismo remanente en el núcleo del transformador generado por pruebas como la resistencia óhmica de devanados (aplica corriente directa) así como la propia corriente de excitación en condiciones peculiares (reflejada por el ciclo de histéresis) es un ejemplo de un factor interno que altera el resultado de la prueba. El reflejo de esta remanencia en las pruebas será evidente en una disminución de la respuesta de impedancia que puede llevar a sacar conclusiones erróneas al respecto, tal como se muestra en la figura 3.1

Esta gráfica corresponde a un transformador de potencia nuevo, cuyas características son: $3\Phi, 20MVA, 115/13,8KV, \Delta - Y$, al que se le dio seguimiento desde antes del embarque, hasta su puesta en servicio. La gráfica muestra la respuesta antes del embarque (huella digital), con la realización de la prueba de SFRA en planta y la respuesta después de desmagnetizar el núcleo al transformador.

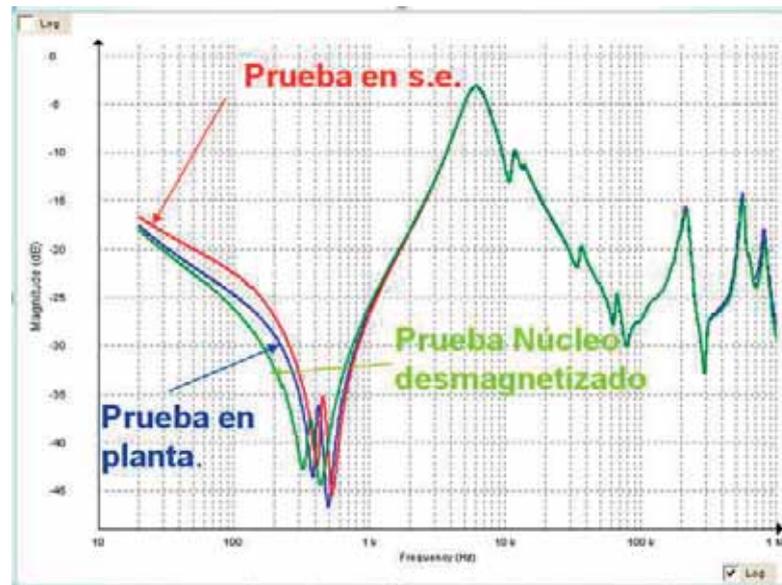


FIGURA 3.1: Respuesta de presencia de magnetismo remanente en un transformador

Se realizó la prueba en la fase A al devanado de baja tensión, se observa en la gráfica la variación que existe entre la respuesta de la huella digital proporcionada por el fabricante y la prueba que se hace al transformador al momento de llegar al sitio. Estas diferencias, muestran evidencia clara de la presencia de un magnetismo remanente en el núcleo por la disminución sostenida de la impedancia en el rango de frecuencias de 20 Hz a 1 KHz. Esto da la pauta para llevar a cabo un proceso de desmagnetización del transformador y repetir la prueba verificando como se muestra en la Figura 3.1, la eliminación de la remanencia. Se dejan como huella digital del transformador estas pruebas y así evitar de esta manera posibles interpretaciones erróneas al hacer pruebas al mismo en el futuro.

3.2. Remanencia provocada en el Laboratorio

Para esta prueba se utilizó un transformador de distribución $3\Phi, 150, 13,8/0,22\text{KVA}$, $\Delta - Y$, localizado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Durante las pruebas de laboratorio se logró provocar diferentes grados de remanencia en el núcleo del transformador, para

lo cual solo se trabajó sobre una fase. Se inyectó corriente directa al devanado, correspondiente al lado de alta tensión, debe recalcar que al estar el primario conectado en delta los otros dos devanados ven una corriente por mitad de la que circula por el devanado de interés. Derivado de esta prueba, como se observa en la Figura 3.2, se obtuvo una variación gradual de la impedancia conforme se incrementa el grado de remanencia, hasta llegar a un punto de saturación máxima que lleva a una variación de hasta 10 dB en la respuesta de SFRA.



FIGURA 3.2: Respuesta debida a remanencia provocada a transformador en Laboratorio

Los resultados obtenidos al simular distintos grados de saturación en el transformador, son los esperados, dado que al aumentar la remanencia en el núcleo la permeabilidad del mismo disminuye y por tanto se reduce la impedancia del transformador, fenómeno que se observa en la gráfica.

Se comprueba entonces que una diferencia gradual de la impedancia entre las fases del transformador a prueba, debido al magnetismo residual, pudiera ser confundida con una falla en el transformador. Esto ocurriría principalmente en casos en los cuales no se cuenta con la prueba de planta del mismo o bien como se mostró en la prueba anterior, cuando en planta no se aseguró de la ausencia de remanencia en el núcleo.

3.3. Distintos errores entre puntas de prueba y boquillas del transformador

En los siguientes apartados se verá que un falso contacto, o bien la presencia de óxido o pintura en los puntos de conexión del equipo de medición a las boquillas, o a las bridas de las mismas, así como una ruptura en uno de los cables de prueba alterará la respuesta de la prueba.

3.3.1. Malas conexiones

Cuando se tienen malas conexiones, se generan falsos contactos entre las boquillas del transformador y las puntas de prueba. Esto reflejará el efecto capacitivo durante la respuesta en altas frecuencias, aspecto que es fácilmente identificable, tal como se muestra en la Figura 3.3. Se observa que arriba de los 50 KHz se presenta un comportamiento irregular respecto a la respuesta esperada. Este comportamiento peculiar de la prueba permite identificar el problema al momento de realizar ésta, permitiendo corregir el problema y obtener la respuesta correcta para su análisis.

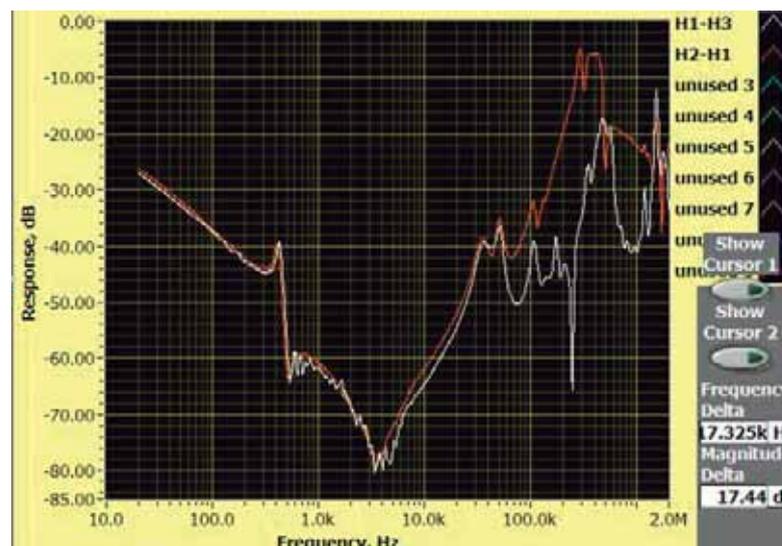


FIGURA 3.3: Respuesta debido a malas conexiones de las puntas de prueba a boquillas

3.3.2. Presencia de pintura entre equipo de medición y boquillas

La presencia de pintura entre una de las puntas de prueba y la boquilla alteró la respuesta de la fase como se muestra en la Figura 3.4. Se observa en la gráfica una respuesta con un alto grado de impedancia en rangos bajos y medios. Esto debido a que entre la boquilla y la punta de prueba por la falta de contacto se genera una alta impedancia, misma que es fácilmente detectable por la prueba. La gráfica muestra también la respuesta natural de la misma fase después de corregir el problema.

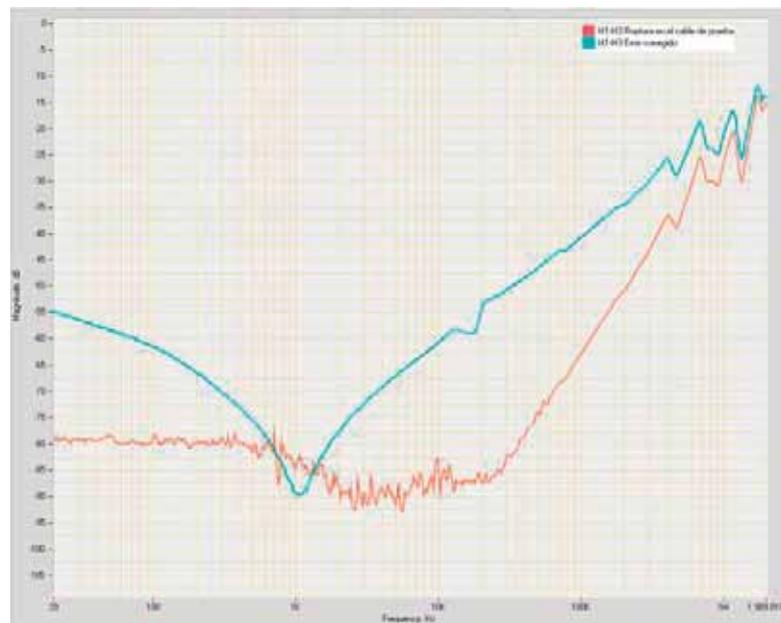


FIGURA 3.4: Respuesta alterada por pintura entre cable de prueba y boquilla

3.3.3. Daño en los cables de prueba

También se tiene que una ruptura de uno de los cables de prueba se verá reflejada como una respuesta de alta impedancia debida al circuito abierto que esto refleja, tal como se muestra en la Figura 3.5.

3.4. Error en la aplicación del cortocircuito en baja tensión

Una mala aplicación del cortocircuito en las terminales de baja tensión al realizar la prueba de cortocircuito resulta en mediciones erróneas que conllevan a la posible toma de decisiones equivocadas. Incluso la teoría marca que una variación mayor a 0.2 dB en la respuesta de esta prueba es suficiente para establecer la presencia de un daño al interior del transformador. Lo anterior en el rango menor a 4 KHz, rango que nuevamente resulta relativo como se observa en la Figura 3.6 ya que en ésta se corre hasta los 11 KHz.

3.5. Nulo aterrizamiento del tanque o núcleo

Un aspecto que se puede presentar al hacer la instalación de transformadores nuevos, o bien en la reubicación de algún transformador ya usado, es el probar el transformador sin que el tanque del mismo este sólidamente aterrizado, no de manera intencional sino por olvido. Otra causa puede ser que el punto de aterrizamiento del núcleo se degrade provocando un efecto similar.



FIGURA 3.5: Respuesta daño en uno de los cables de prueba

La figura 3.7 muestra un caso obtenido en campo, en donde se tuvo un nulo aterrizamiento del tanque del transformador. La respuesta en azul es la respuesta del transformador con aterrizamiento sólido del tanque mientras que la respuesta en gris se realizó con la falta de aterrizamiento del transformador. Se observa en el rango de frecuencias de 200 Hz a 7 KHz una caída más pronunciada para la prueba con nulo aterrizamiento manteniéndose prácticamente los puntos de resonancia pero variando el valor de impedancia en el rango de 400 Hz a 300 KHz con respecto a la condición normal. Esto se debe a que la respuesta a la frecuencia ha detectado el aumento del efecto capacitivo que se da entre la tierra y el tanque.

3.6. Comentarios Finales

A continuación se resumen los aspectos principales de este capítulo. Con las pruebas anteriores, se muestra evidencia de los factores que alteran la prueba de SFRA y que no son debidos a alguna falla si no a errores del personal como son malas conexiones en los cables de prueba, mal aterrizamiento del tanque o núcleo y/o factores que afectan la

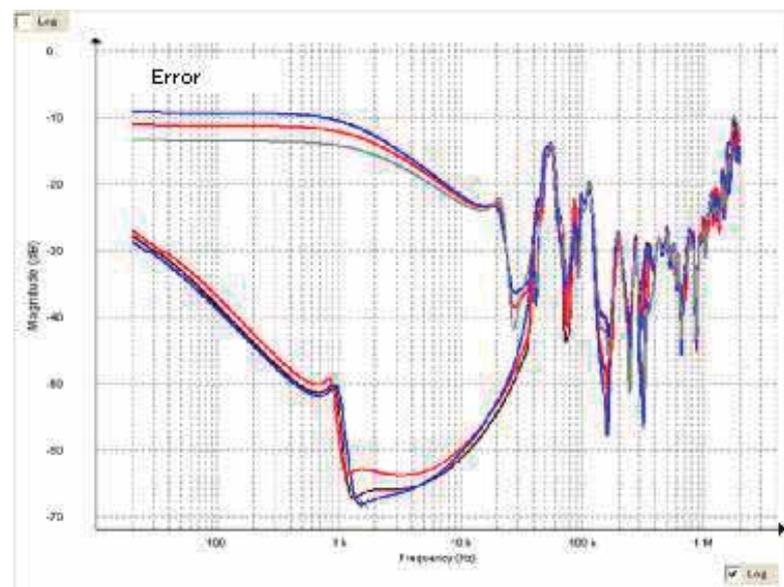


FIGURA 3.6: Respuesta Mala aplicación al cortocircuitar las puntas en el lado de baja tensión

misma debido a condiciones internas del transformador, como puede ser la remanencia en el mismo.

Resulta importante la aplicación periódica de esta prueba, ya que permitirá detectar a tiempo las variaciones en la respuesta a la frecuencia debidas a cambios en la estructura interna del transformador ocasionadas por esfuerzos mecánicos provocados por la circulación de altas corrientes en los devanados como se mencionó anteriormente.

Estos cambios pueden ser originados ya sea por fallas en la red eléctrica o por fallas incipientes o francas en el propio transformador, mismas que veremos en el capítulo siguiente. Ambas condiciones alteran la disposición física de las componentes RLC al interior del transformador, modificando así la geometría interna del transformador y por tanto la respuesta a la frecuencia obtenida. No olvidar que al tener esta respuesta se deberá comparar con la respuesta obtenida principalmente en planta al fabricar el transformador. Si existen variantes entre las respuestas, la comparación permitirá la detección de fallas incipientes o francas al interior del transformador para una reparación oportuna.



FIGURA 3.7: Respuesta Nulo aterrizamiento del núcleo

Capítulo 4

Pruebas

Gracias a la efectividad de la prueba SFRA, que junto con la experiencia que se ha logrado obtener en la aplicación de la misma a decenas de transformadores en más de 5 años, se ha logrado un gran impacto en el diagnóstico de los mismos. Esto debido a la detección oportuna de fallas incipientes al interior del mismo, lo cual permite la toma de acciones correctivas que implican costos mínimos. Lo anterior previene la presencia de una falla franca que eventualmente dañará uno o varios devanados con los consecuentes costos tanto de reparación como operativos que esto implica.

En este capítulo se presentan resultados diversos de fallas detectadas al realizar la prueba de barrido a la frecuencia a transformadores de potencia en campo, así como a un transformador de distribución en laboratorio y también resultados de fallas simuladas en un transformador prototipo.

Se dará una breve descripción en cada una de las pruebas para los distintos transformadores, así como el diagnóstico de la falla, tomando como base los fundamentos de la respuesta a la frecuencia, visto en el capítulo anterior.

4.1. Una simulación de falla en transformador prototipo

El transformador que se muestra en la Figura 4.1, es un transformador prototipo de distribución trifásico tipo seco de 10 KVA, 220/127 Volts, conexión $Y - Y$. Este se diseñó con múltiples derivaciones para simular corto circuitos entre espiras así como un mecanismo que permite un desplazamiento axial de las bobinas con un rango de variación de 0 a 2.5 cm que representa una variación máxima del 7.5 %, independiente para cada fase, esto con la finalidad de simular fallas de desplazamientos axiales de la bobina.

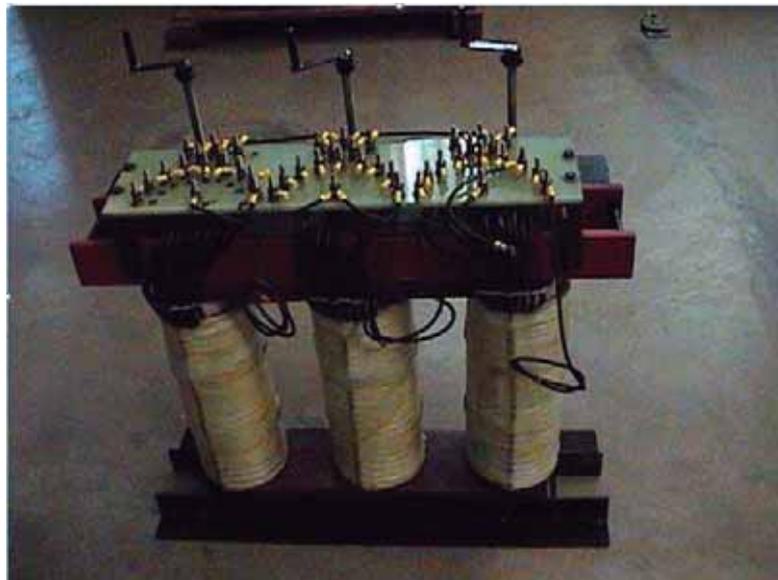


FIGURA 4.1: Transformador Prototipo de Laboratorio

4.1.1. Respuesta Transformador Prototipo antes de simular falla

La Figura 4.2 muestra la respuesta del transformador prototipo antes de simular alguna falla. El diseño, el nivel de tensión, la capacidad y tipo de conexión, dan la geometría propia de este transformador.

Se observa que la respuesta a la frecuencia obtenida no es la típica esperada, debido a que en su diseño se emplearon pocas vueltas y adicionalmente no se cuenta con un tanque

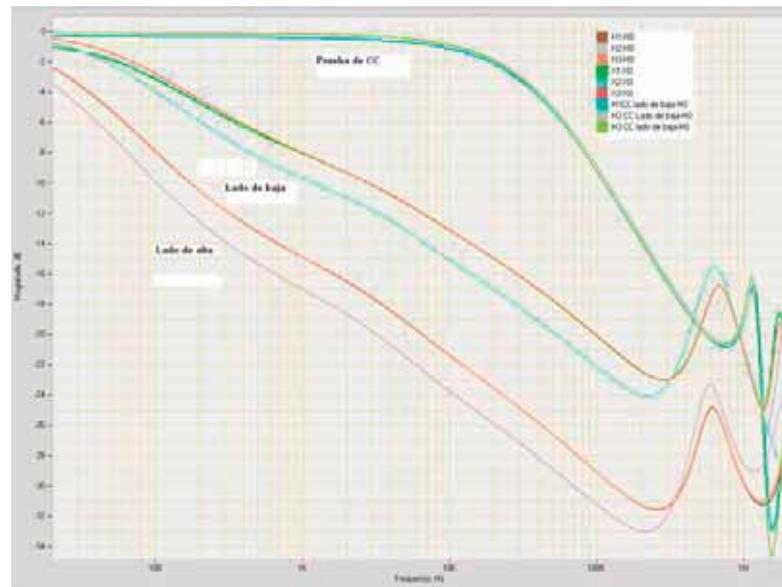


FIGURA 4.2: Respuesta Transformador Prototipo antes de simular falla

para sumergirlo en aceite, lo anterior refleja en la respuesta un dispositivo con considerablemente bajos efectos capacitivos y un bajo valor de impedancia predominantemente inductivo a bajas frecuencias, de manera que se comprueba lo dicho anteriormente, que el diseño propio de cada transformador representa una geometría propia.

Lo que se observa en la gráfica de la Figura 4.2 son las respuestas naturales de las pruebas convencionales sin falla como son: prueba de circuito abierto tanto en el lado de alta y baja tensión así como la prueba de cortocircuito. Como se observa las respuestas aunque atípicas por el diseño propio del transformador, muestran una respuesta esperada en donde las fases laterales presentan un comportamiento muy semejante y la fase central muestra sólo un incremento en su impedancia tanto para el lado de baja tensión como para el de alta. A su vez la de cortocircuito muestra las tres fases sobrepuestas.

4.1.2. Respuesta Simulada Cortocircuito entre espiras

La Figura 4.3 muestra la respuesta simulada al transformador prototipo ante un cortocircuito entre espiras. En la gráfica se observa:

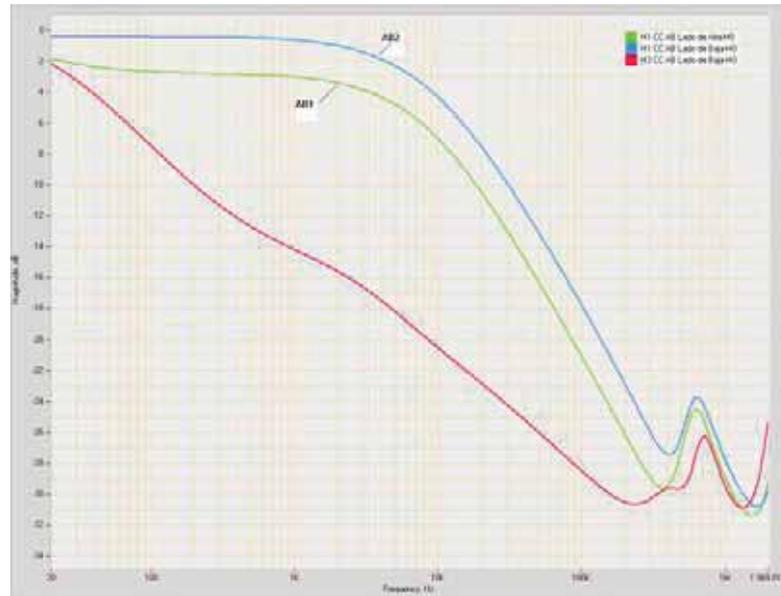


FIGURA 4.3: Respuesta Transformador Prototipo simulando un Cortocircuito

- La respuesta a un corto circuito simulado entre espiras señalado en la Figura 4.3 como AB , en la fase $H1-H0$ del lado de alta tensión, alimentando esa misma fase.
- La respuesta al corto circuito entre espiras simulado en la fase $X1-X0$ también señalado como AB pero del lado de baja tensión, alimentando la fase $H1-H0$ del lado de alta.
- La respuesta dejando el corto circuito en la fase $X1-X0$ pero ahora alimentando la fase $H3-H0$ del lado de alta tensión.

Como se observa en las respuestas a la frecuencia, tratándose de un corto circuito, la respuesta es efectivamente una respuesta típica de un corto circuito con una impedancia baja que llega a alcanzar un valor de 0 dB.

Hay que observar que las respuestas de ambos cortos circuitos simulados son las mismas, sólo existe un desplazamiento ligero entre ellas. La respuesta al cortocircuito simulado en el lado de alta tensión $AB1$ es mayor a la respuesta del cortocircuito simulado en el lado de baja $AB2$, debido a que el lado de alta tensión tiene un mayor número de vueltas, por lo que es de esperarse una mayor impedancia.

Comparando las tres respuestas al cortocircuito, se observa que el cortocircuito simulado en la misma pierna ya sea del lado de alta tensión o de baja tensión con la alimentación en la misma pierna, produce la respuesta esperada. Esto es una reducción considerable de la impedancia que tiende a alcanzar el valor de $0dB$. No ocurre lo mismo cuando se deja el cortocircuito en el lado de baja y se alimenta el extremo contrario de la pierna del transformador. Ahi se observa una respuesta semejante a la prueba normal sin falla, solo con un pequeño decremento en la impedancia provocada por el cortocircuito.

4.1.3. Error detectado durante la prueba al Transformador Prototipo

Regresando un poco, durante la prueba al transformador en condiciones normales se observó un comportamiento anormal arriba de los $480KHz$ en la fase $H1$, en la respuesta a altas frecuencias como lo muestra la Figura 4.4,

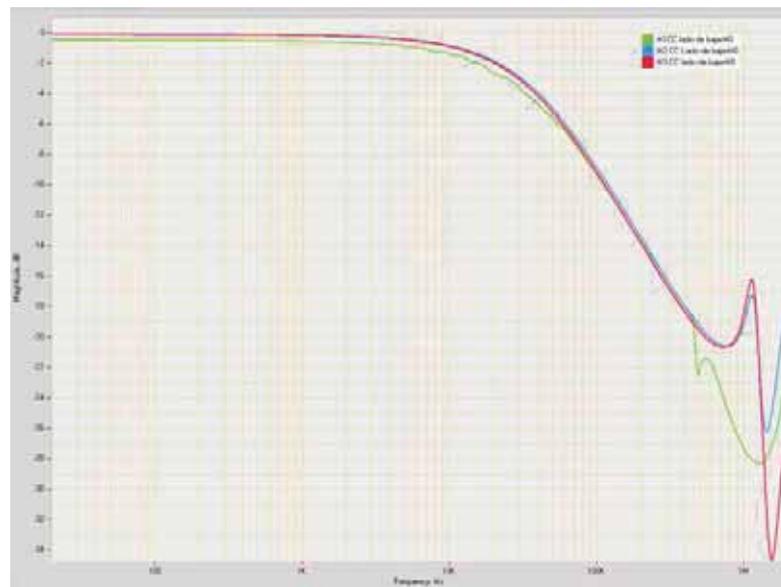


FIGURA 4.4: Respuesta Falso contacto en Zapata

Esta respuesta pudo haber sido confundido con una falla, dada la experiencia y el saber que es necesario checar que no haya errores en conexiones se procedió a revisar las mismas y se encontró que esta alteración en la respuesta la originó un falso contacto en una de las zapatas conectadas a una de las bobinas del transformador, se corrigió el problema y se tiene la nueva respuesta como se muestra en la Figura 4.5

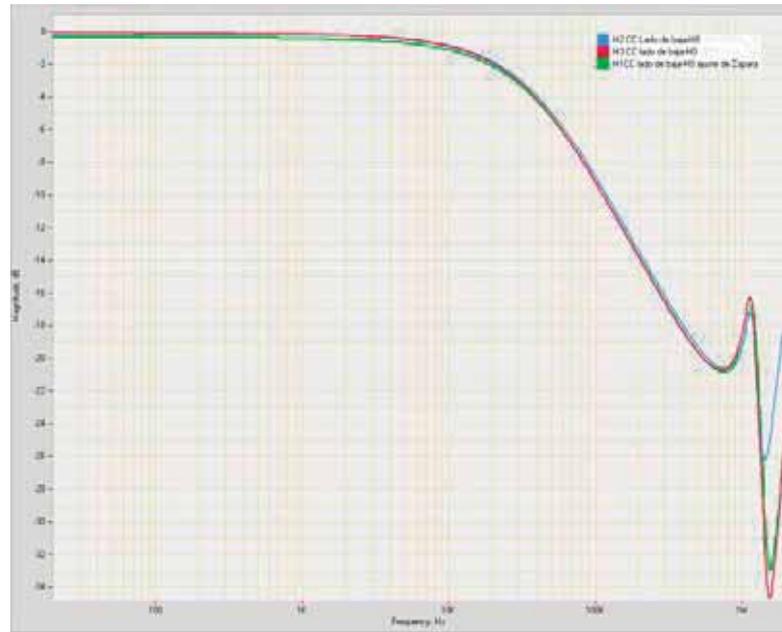


FIGURA 4.5: Respuesta Falso contacto en Zapata

4.1.4. Desplazamiento individual de cada bobina

La Figura 4.6 muestra la falla simulada con el transformador prototipo al desplazar una de las bobinas.

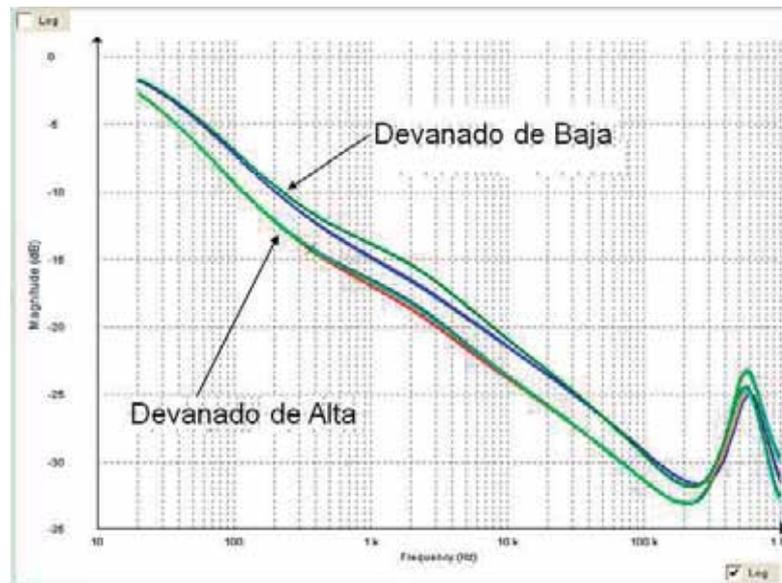


FIGURA 4.6: Respuesta Bobina Desplazada

Se observa la misma respuesta en ambas pruebas, pero hay un desplazamiento importante entre ellas dado que al desplazar las bobinas hay una variación del acoplamiento magnético de los devanados, que provoca una disminución de la impedancia en el rango de 200Hz a los 20KHz .

4.2. Respuestas de transformadores sin falla, distintos tipos de conexiones

4.2.1. Respuesta de un Autotransformador

La Figura 4.7 muestra la respuesta de un autotransformador. Para este caso se empleó un autotransformador 3Φ , $5/6,25\text{MVA}$, $66/33\text{KV}$, $Y - Y$, marca IEM [6]

La respuesta a la frecuencia de un autotransformador tiene un comportamiento peculiar como lo muestra la Figura 4.7.

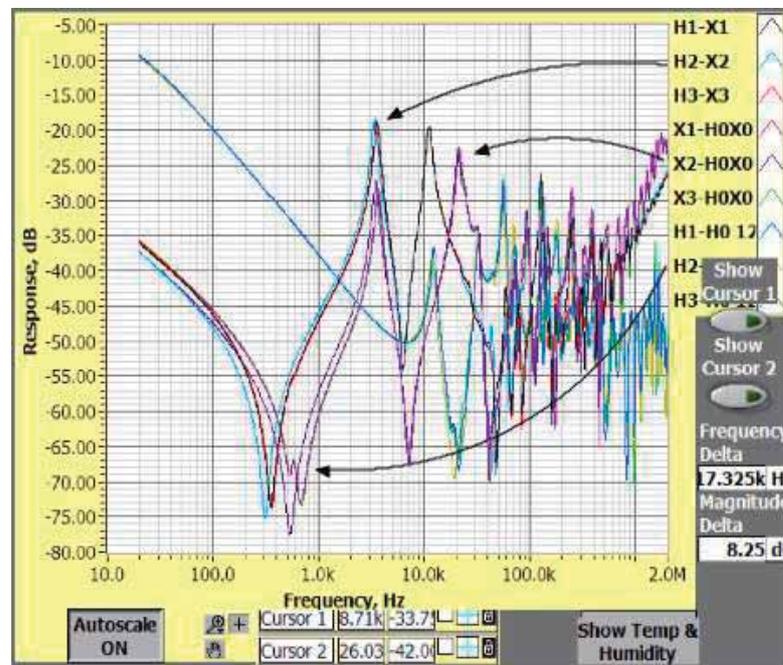


FIGURA 4.7: Respuesta Autotransformador conexión Y-Y

Las tres primeras gráficas muestran la prueba de circuito abierto de lado de alta y las siguientes tres la de lado de baja. Finalmente las tres últimas representan la prueba de cortocircuito en el lado de baja. Las pruebas muestran una condición normal del transformador, las fases laterales superpuestas, la central un poco desplazada, y la de corto circuito con las tres fases superpuestas y con una ganancia muy cercana a 0dB. Sin embargo, es importante notar que en la prueba de lado de alta, la respuesta de las fases laterales no presentan la doble resonancia en el rango de 300 Hz a 400 Hz que se esperarían como en el caso del lado de baja y que es lo esperado para una conexión estrella.

Es interesante también observar como en el rango de 20 Hz a 100 Hz el valor de la impedancia está dominado considerablemente por el núcleo, aspecto que responde a fundamentos teóricos bien establecidos. Esto se debe a que la respuesta en este rango es muy similar para los devanados de alta y de baja de las fases laterales entre sí y para las correspondientes a la fase central en ambos lados de tensión.

4.2.2. Respuesta a cambios de posición del tap en el transformador

En la Figura 4.8 se muestra el efecto del cambiador del tap de un transformador cuyas características son 3Φ , 130/173MVA, 230/34,5KV, Y – Y, el cual cuenta con devanado terciario de 66KV conectado en Δ [6]

Este transformador cuenta con un cambiador de tap automático de 15 posiciones. En la Figura 4.8 se observa la variación de la respuesta para los diferentes taps, donde puede verse un ligero incremento en la impedancia conforme aumenta la posición del tap, esto debido a la inserción de pequeñas porciones de devanado involucrado en cada tap. Estas variaciones son suaves y se observa que el tipo de respuesta es similar en cada una de las diferentes posiciones del tap. Esto es visible en el rango de bajas frecuencias ya que a mayores frecuencias no se presenta un cambio significativo en la respuesta.

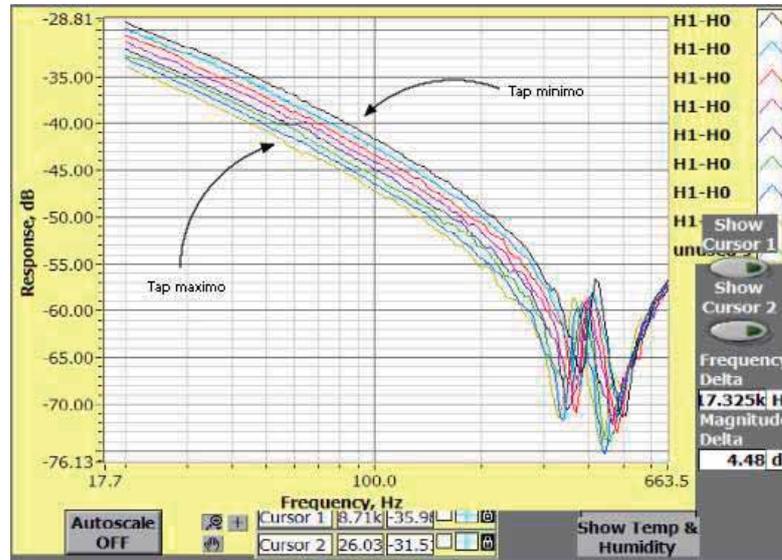


FIGURA 4.8: Respuesta Diferentes posiciones del Tap del transformador

4.2.3. Respuesta al cambio de posición del tap cuyo diseño involucra el cambio del sentido del flujo

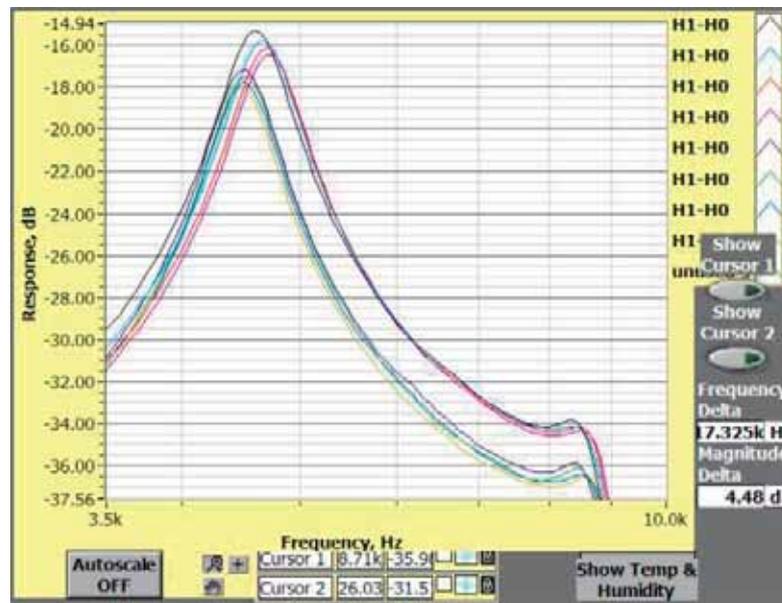


FIGURA 4.9: Respuesta Diferentes posiciones del Tap del transformador al invertir el sentido del flujo

En la Figura 4.9 se muestra la respuesta de el mismo transformador. Se observa la respuesta cuando en algunos cambiadores de tap se inserta una porción de devanado y adicionalmente se invierte el sentido de flujo en una porción del mismo. Esto lleva

a respuestas como la mostrada en las gráficas respectivas, donde las primeras cuatro representan taps arriba del nominal y las otras cuatro taps abajo del nominal. Se observa también un tipo de respuesta similar entre las fases, con suaves desplazamientos entre ellas [6]

4.3. Fallas en Transformadores

4.3.1. Falla debida a un corto circuito

La Figura 4.10 muestra la respuesta del transformador a analizar pero en condiciones normales sin falla, las características de este transformador son: trifásico, $\Delta - \Delta$, 69/0.96 KV y 155 MVA. Como puede observarse la respuesta del lado de alta tensión es la respuesta típica de una conexión delta. Sin embargo el lado de baja tensión presenta un comportamiento prácticamente de impedancia cero debido a que éste cuenta solo con una vuelta o espira en el devanado, con una resonancia en el rango de 1 KHz a 3 KHz.

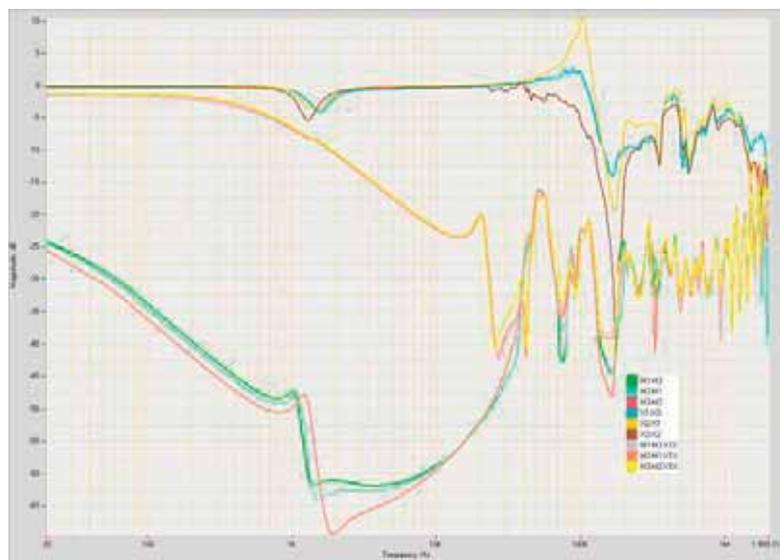


FIGURA 4.10: Respuesta Transformador Sin Falla

La Figura 4.11 muestra la respuesta del mismo transformador ante una falla franca. Esto se debe a un cortocircuito en uno de los devanados. Este tipo de falla es fácilmente

identificable por SFRA y se ve reflejada en una impedancia muy cercana a cero que es lo que caracteriza a un cortocircuito.

Como se observa en la respuesta de circuito abierto del lado de alta de las fases sin fallas presentan un comportamiento atípico ya que al estar enlazadas magnéticamente a la fase con falla, ven reflejada la falla en su comportamiento. Sin embargo la diferencia sustancial en la respuesta de estas dos fases en las cuales se tiene un valor de impedancia considerablemente superior a la de la otra fase permite identificar fácilmente la fase en falla.

De la misma forma ocurre para la respuesta del lado de baja tensión en donde claramente se observa en el rango de 1 KHz a 3 KHz la pérdida de la resonancia presentando una respuesta de 0dB para la fase en falla a diferencia de las dos fases sin falla.

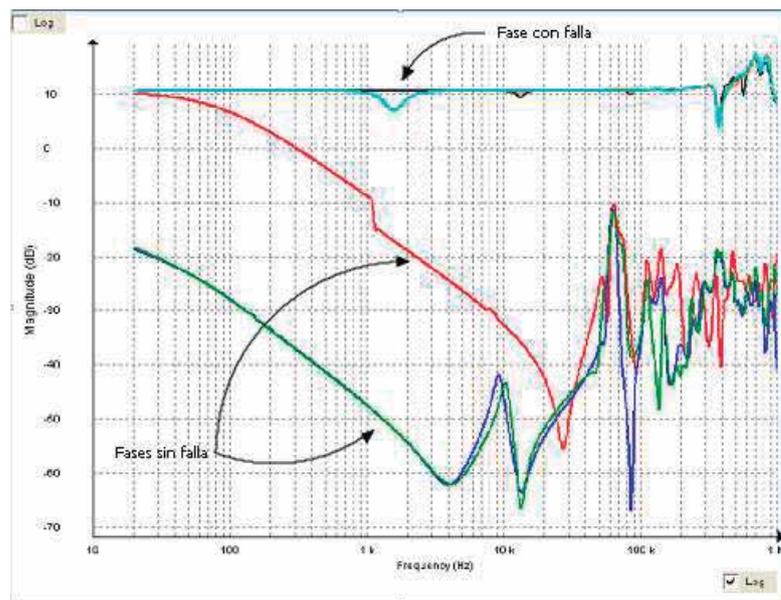


FIGURA 4.11: Respuesta de corto circuito

Como puede verse este tipo de fallas francas es plenamente identificable por la prueba de barrido en la frecuencia, sin embargo es importante mencionar que pruebas rutinarias como TTR y corriente de excitación también detectan de forma exitosa estas fallas por la naturaleza de las mismas.

Bajo este contexto es importante recalcar como se se estará mostrando en este trabajo, que la mayor potencialidad de la prueba de barrido en la frecuencia estriba en la detección de fallas incipientes que involucran desplazamientos mecánicos de bobinas y/o núcleo. Estos desplazamientos alteran la geometría de los mismos pero no necesariamente producen una falla franca al interior del transformador. Este tipo de fenómenos no son fácilmente detectable por el conjunto de pruebas convencionales que se conocen y aplican de manera rutinaria.

Sin embargo la industria eléctrica no esta en la posición de, basados solamente en la respuesta obtenida por esta prueba (SFRA), tomar una determinación para la posible apertura de un transformador. Consideran necesario que al menos una prueba adicional verifique o compruebe la presencia de la falla para poder tomar esta decisión. La desconfianza proviene básicamente en la subjetividad que representa la interpretación de resultados y que en el mundo ha costado millones de dolares interpretaciones realizadas incluso por los propios fabricantes de los equipos de pruebas.

4.3.2. Fallas debidas a desplazamientos entre bobinas

Los desplazamientos entre bobinas son fallas causadas por distintos factores que alteran la geometria del transformador. En los siguientes parrafos se analizan dos tipos de esta clase.

4.3.2.1. Falla debida a un desplazamiento brusco e inapropiado de un transformador

La Figura 4.12 muestra el comportamiento de un transformador que ha sufrido variaciones importantes en su respuesta ante una reubicación del mismo, ya que en su desplazamiento sufrio movimientos bruscos importantes. Esto es, se desplazó de una manera inapropiada. En este caso se empleó un transformador de $5/6,25MVA$, $66/13,8KV$, $\Delta - Y$ marca IEM. Físicamente el transformador fue desplazado un tramo de 5 a 6

metros de manera manual para dar lugar a la puesta de una nueva unidad dentro de la misma subestación [6].

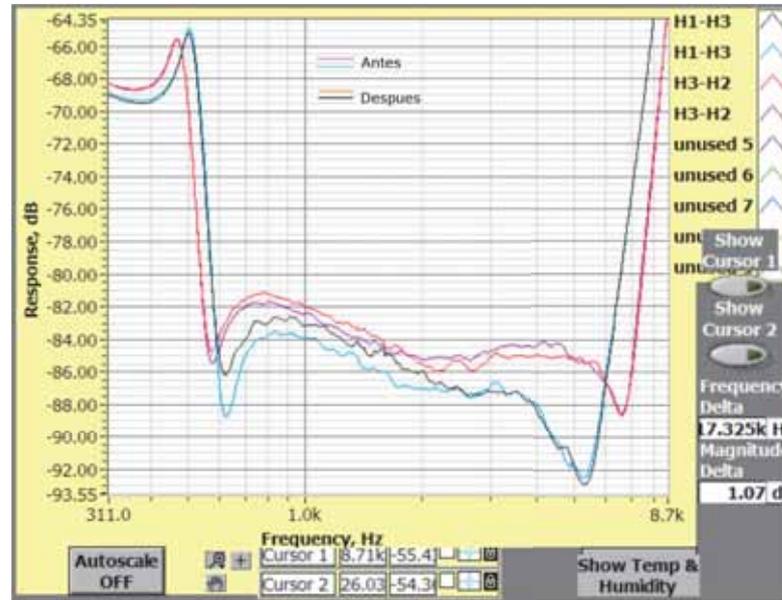


FIGURA 4.12: Respuesta a Seguimiento del transformador 2005-2007

Se realizó la prueba de barrido de frecuencia al transformador antes y después de su reubicación, para verificar si el traslado del mismo, que se realizaría de una manera no convencional y no recomendada, provocaba movimientos de algún tipo en la estructura geométrica de los devanados y/o núcleo ocasionados por los movimientos bruscos a los que sería sometido el transformador.

En las pruebas se encontraron pequeñas variaciones en una de las fases laterales y la fase central en el rango de frecuencias de 600Hz a los 6kHz tal como se muestra en la Figura 4.12. Estas variaciones aún y que no son de amplitud importante ponen en evidencia la importancia que representa un adecuado desplazamiento del transformador aún en maniobras que aparentan no tener riesgo alguno para el equipo, pero que sin embargo alteran la respuesta como se observa en la Figura.

4.3.2.2. Falla debida a la pérdida de sujeción de los devanados causadas por altas corrientes

Gracias al seguimiento que se dió a diversos transformadores y a la experiencia que con ello se ha logrado, se ha tenido la oportunidad de detectar en campo distintos tipos de fallas. Entre ellas, una falla incipiente muy usual que es la pérdida de presión en los soportes de sujeción de los devanados del transformador. Esta falla eventualmente resultará en la ruptura de los aislamientos en los devanados provocada por los movimientos axiales y radiales de los mismos. Lo anterior ocasiona el roce entre el papel y eventualmente entre el esmalte que lo protege terminando eventualmente en un cortocircuito franco entre espiras. La detección oportuna de esta falla incipiente permitirá evitar la pérdida de aislamiento y por ende la evolución a una falla franca, ante esta evidencia la apertura del transformador es una decisión impostergable.



FIGURA 4.13: Respuesta a la Pérdida de presión en la sujeción de los devanados

Al realizar un mantenimiento preventivo de rutina a un transformador correspondiente a una unidad gemela del mostrado en la Figura 4.10, se aplicaron las pruebas tradicionales de TTR, corriente de excitación y factor de potencia al transformador. Los resultados mostraron solamente impurezas en el aceite por lo que se realizó reciclado del mismo con

el fin de eliminar las impurezas y humedad que se encontraran presentes. Sin embargo al realizar la prueba de barrido en la frecuencia se obtuvieron las respuestas mostradas en la Figura 4.13.

Como puede verse en la Figura 4.13 se presenta una caída muy pronunciada de las tres fases en el rango de frecuencias de 2 KHz a 10 KHz, la respuesta obtenida en su unidad gemela mostrada en la Figura 4.10. Lo anterior es una señal de un problema al interior del transformador. Bajo esta evidencia se procedio a la apertura del transformador encontrándose que la presión en la sujeción de los devanados se habia perdido. A continuación se reajustaron los soportes a la presión nominal de sujeción y se reensambló el transformador, repitiendose la prueba de SFRA y obteniéndose la corrección en la respuesta mostrada en la Figura 4.14.



FIGURA 4.14: Respuesta a la corrección en la sujeción de los devanados

El origen de esta falla estriba en la presencia de altas corrientes de falla y vibraciones que provocan el movimiento de las tuercas de sujeción de los devanados que eventualmente provocará la pérdida total de la sujeción. Como consecuencia se obtienen respuestas como la mostrada en la Figura 4.13. Este tipo de falla eventualmente producirá esfuerzos

mecánicos de origen eléctrico que originarán movimientos axiales y/o radiales de los devanados que llevarán a la ruptura de los aislamientos.

Es complicado poder visualizar que un devanado, que esta formado por cientos de kilos de cobre, pueda moverse y presentar una pérdida de su posición de las espiras ya que el propio peso de las mismas deberían de manera natural reposicionarse a su condición normal. Sin embargo las pruebas mostradas en la Figura 4.14 reflejan que realmente se genera un cambio en la posición de las espiras de las bobinas ante la pérdida de la sujeción de los devanados.

Basado en la falla obtenida y con el fin de comprobar el fenómeno anterior, se aprovechó la reparación de una unidad gemela al transformador anterior. Se buscó reproducir la falla presentada por la pérdida de sujeción de los soportes de los devanados, para lo cual se realizó la prueba de barrido en la frecuencia ante distintos niveles de presión aplicados para la sujeción de los devanados. Se esperaba como resultado observar un cambio gradual en la respuesta, sin embargo no se presentó cambio alguno en la misma. Es importante mencionar que empresas como Prolec-GE han realizado éste mismo intento de reproducir la falla no encontrando al igual que nosotros cambio alguno en la respuesta. Esto dificulta visualizar o imaginarse como se puede presentar físicamente esta falla debido a este tipo de movimiento en los devanados.

4.3.3. Seguimiento a distintos transformadores

El dar un seguimiento a los transformadores, es decir el repetir la prueba en distintos periodos de tiempo, principalmente despues de que el transformador ha sido sometido a grandes esfuerzos debido a fallas o bien como indica la teoria cada 2 años, permite detectar fallas incipientes y repararlas, evitando así la evolución de la misma. Hay que ser conscientes que sacar de operación un transformador para la realización de pruebas es costoso, además de verse sujeto a esfuerzos eléctricos importantes ante su reenergización. En los siguientes párrafos se verá el seguimiento que se dió a distintos transformadores y su diagnóstico.

La Figura 4.15 muestra el seguimiento de la respuesta de un transformador que sufrió cambios en el periodo del 2004 al 2005. Es un transformador fabricado en 1982 y cuyas características son, 7,5/9,375MVA, 110/13,8KV [6]

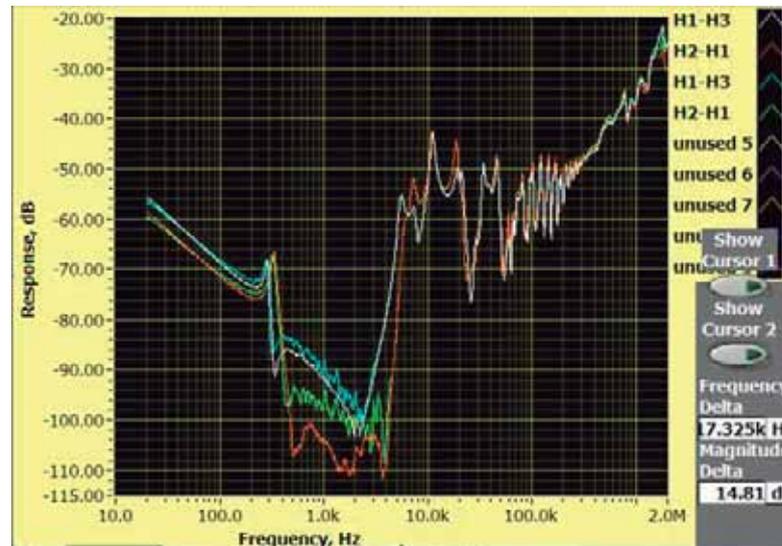


FIGURA 4.15: Respuesta al seguimiento de un transformador con un año de diferencia

En la prueba se observan las respuestas que corresponden a una de las fases laterales (H1-H3) y a la fase central (H2-H1) en distintos periodos ya que son las que presentan cambios más sustanciales. Se esperaba encontrar que las respuestas tanto entre las fases laterales como entre las fases centrales fueran iguales entre ellas, en los distintos periodos. Sin embargo ambas fases presentan desplazamientos importantes en la respuesta. Las fases laterales conservan el mismo tipo de respuesta pero hay desplazamientos entre ellas, lo mismo ocurre con la central observándose que, en esta, la variación es considerablemente más pronunciada.

Este cambio en la respuesta hace pensar en que se ha estado perdiendo soporte en la sujeción de los devanados. Sin embargo la empresa eléctrica no considera que el nivel de variación sea riesgoso y aunado al costo que implicaría tanto la reparación del transformador como las cuestiones operativas de su salida de operación por un tiempo determinado, hace inviable su reparación. Dadas estas circunstancias se aconseja dar un seguimiento periodico para detectar cualquier variación importante en la respuesta.

Continuando con las respuestas a seguimientos de transformadores, en la Figura 4.16 se tiene un transformador cuyas características son 115/175MVA, 66/0,96KV, conexión $Y - Y$, 3Φ [6]

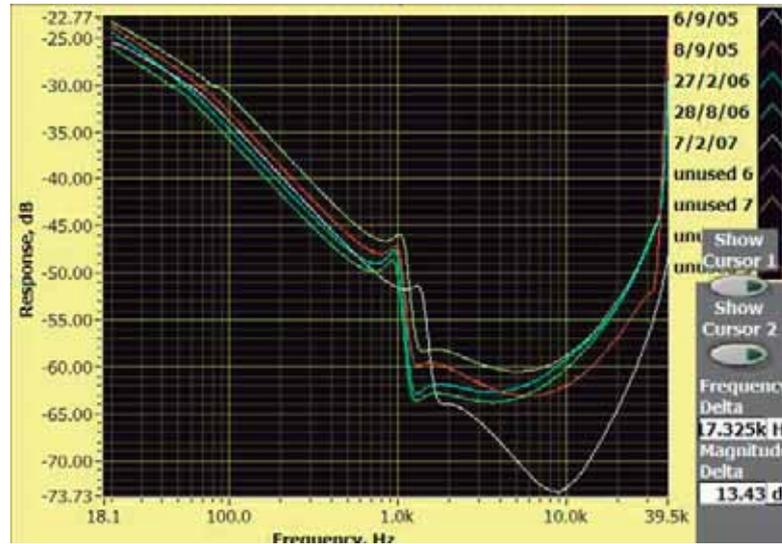


FIGURA 4.16: Respuesta al seguimiento de un Transformador en el periodo 2005-2007

Las respuestas a la frecuencia obtenida corresponde a la de una sola fase durante el periodo del 2005 al 2007. La primera prueba obtenida, que corresponde al 6 de Septiembre del 2005, muestra una caída muy pronunciada en el rango de medias frecuencias, que es lo que da la pauta a abrir el transformador y encontrarse con los soportes de los devanados sueltos, problema ya detectado en transformadores vistos en párrafos anteriores. Se corrige al problema y se obtiene la respuesta a la frecuencia que corresponde al 8 de Septiembre del 2005.

El seguimiento que se da en Febrero del 2006 a Agosto del 2007, muestra una respuesta con una variación mayor a los 4 dB en bajas frecuencias dando origen a establecer la presencia de un magnetismo remanente. Aquí es importante recalcar que este transformador no cuenta con interruptor en el lado de baja tensión debido a la alta corriente que se maneja y que es de $50KA$. Esto implica que la energización y desenergización del mismo se realiza mediante el interruptor de lado de alta tensión. Adicionalmente debido a el tipo de carga que alimenta diariamente, se energiza y desenergiza de 13 a 15 veces diarias.

Esta característica operativa provoca grandes esfuerzos mecánicos de origen eléctrico a los devanados y al núcleo debida principalmente al efecto de la corriente inrush provocando las alteraciones de remanencia aleatoria que se observan en la Figura 4.16. A modo de comparación, un transformador de potencia normal para operación en redes de distribución se desenergiza máximo una vez al año por lo que los esfuerzos en el transformador debidos a la corriente inrush son muy esporádicos aunque no de poca magnitud.

Para terminar con las respuestas a seguimientos a transformadores, se muestran los resultados de dos transformadores distintos tipo horno, a los que se detectó desplazamientos en sus bobinas, así como una remanencia en ellos. En estas pruebas se mostrará el seguimiento que se tuvo en cada una de las fases por separado, es decir se estarán analizando en distintas gráficas cada fase, esto con la finalidad de tener una descripción e interpretación más completa del problema que se presentó.

Para el caso de estudio de este transformador se cuenta con una referencia previa. Por lo tanto esta prueba previa servirá como base para comparar los resultados de las nuevas pruebas que se harán a cada una de las fases, durante el seguimiento que se dió a cada una de ellas.

La Figura 4.17 muestra la respuesta de un transformador tipo horno con las mismas características al mostrado en la Figura 4.10. La respuesta a la frecuencia corresponde a la Fase C. Se observa en la Figura 4.17 la respuesta del seguimiento al transformador en el periodo del 9 de Abril al 19 de Diciembre del 2007. Las respuestas al 9 de Abril y al 19 de Septiembre, presentan un resultado muy similar a lo largo del rango de bajas y medias frecuencias notando que para este último rango, el desplazamiento entre ellas es un poco más pronunciado. Las otras dos respuestas que corresponden al 13 de Abril y 19 de Septiembre básicamente tienen la misma respuesta a lo largo de todo el rango de frecuencias.

Es importante observar que, entre estos dos grupos de pruebas se observan variaciones entre ellas que se dan arriba de los 3 dB en el rango de 20 a 10KHz. Este valor,

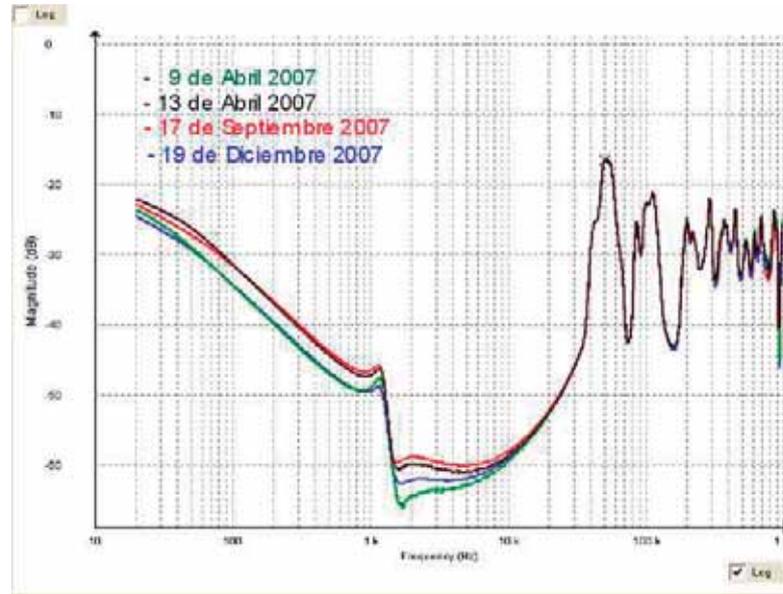


FIGURA 4.17: Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase C lado de alta

como ya se había mencionado, establece la teoría como indicativo de problemas serios al interior del transformador. Sin embargo por las experiencias que se tienen y en base a la comparación de las fases A y B que más adelante se analizaran, podemos concluir para esta fase C, que la variación que se encontró entre estos dos grupos de pruebas se debe a un magnetismo remanente en el núcleo del transformador con distintos niveles que van fluctuando en cada prueba, factor que ha sido la causa de daños en los devanados del transformador, provocando fallas francas en los mismos. Esto fue ocasionado como ya se había mencionado, por el tipo de operación al que este tipo de transformador se ve sometido.

La Figura 4.18, muestra la respuesta de la Fase A. Se observa en la grafica, que la respuesta a los distintos periodos en el rango de bajas frecuencias no presentan variaciones considerables. Sin embargo en el rango de medias frecuencias, entre 1KHz y 6KHz se observa una variación entre ellas, mismas que se deben a desplazamientos que se dieron en las bobinas debido a las altas corrientes que se dan en este tipo de transformador. Con lo anterior se corrobora que el tipo de operación al que se somete este tipo de transformadores provoca cambios continuos en su respuesta.

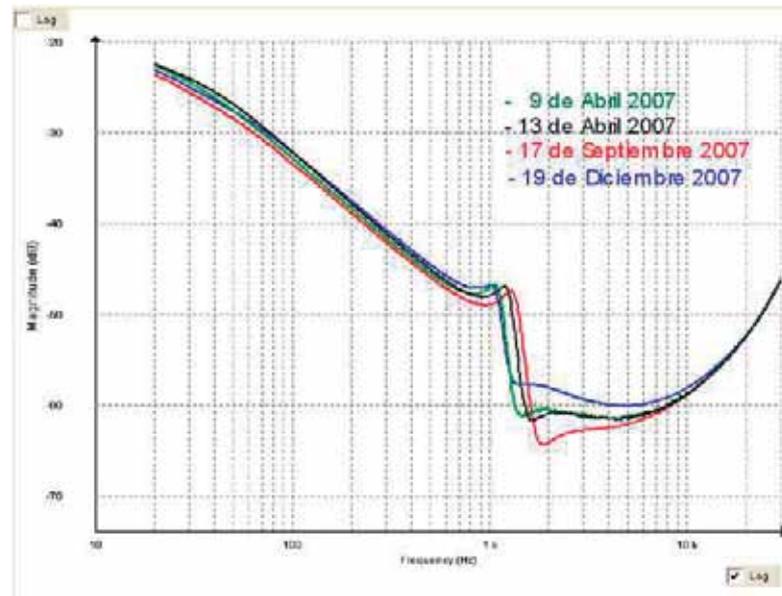


FIGURA 4.18: Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase A lado de alta

La Figura 4.19, muestra la respuesta a la frecuencia de la fase B. Se observa en la Figura que los cambios considerables en los distintos periodos se dieron en los rangos de media frecuencia, a excepción de la del 19 de Diciembre que muestra una variación desde el rango de bajas frecuencias hasta el de medias. Estos cambios en medias frecuencias, se pueden también atribuir a desplazamientos entre las bobinas originados por las altas corrientes a las que se ve sometido este tipo de transformadores o a los cambios en la fabricación de las bobinas, mismos que se han dado al transformador, como ya se había mencionado.

Como se ha señalado, la base teórica de la prueba de barrido en la frecuencia establece el obtener en planta al fabricar el transformador o bien ante una reparación completa del mismo, el conjunto de pruebas de circuito abierto y cortocircuito que representen la huella digital o bien las pruebas de referencia para comparativos posteriores. Sin embargo, como puede observarse en este conjunto de pruebas aplicadas a transformadores de horno de arco eléctrico, sus ciclos de operación propios someten a los devanados y al núcleo a esfuerzos mecánicos extremos de origen eléctrico que provocan principalmente fuertes efectos de remanencia cambiantes. Estos provocan constantemente la operación

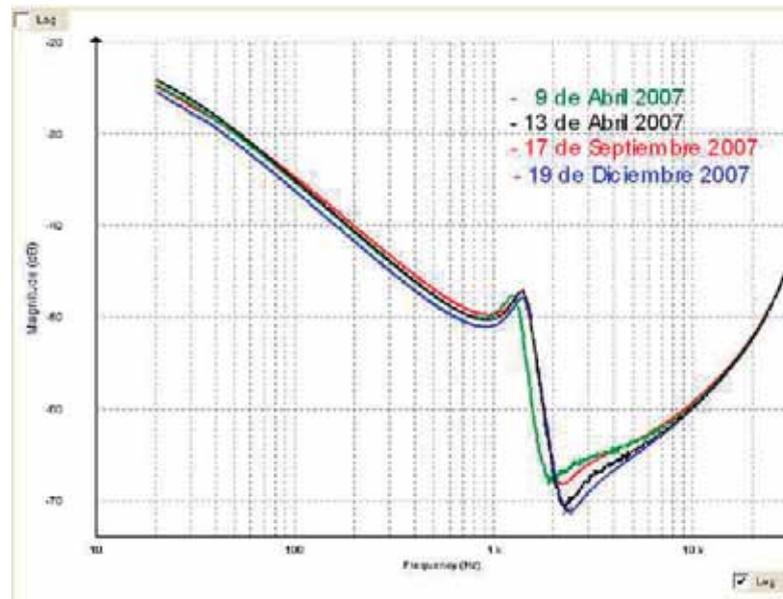


FIGURA 4.19: Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase B lado de alta

de los apartarrayos que protegen al transformador así como fallas francas al interior del mismo.

Lo anterior no implica que la teoría del método de SFRA no aplique para este tipo de transformadores sino que debe tenerse sumo cuidado en la interpretación de los resultados. Una solución que se ha dado a el problema del daño de los transformadores, ha consistido en controlar el disparo monopolar del interruptor con un dispositivo que garantice que la apertura de cada polo provocará la mínima remanencia posible. Lo anterior ha reducido considerablemente la operación de los apartarrayos y el daño a los transformadores.

La Figura 4.20, muestra la respuesta a la frecuencia entre las fases laterales A y C del transformador anterior. Se observa una diferencia gradual entre las fases a lo largo de las frecuencias bajas y medias. Esto es de esperarse, ya que el análisis que se hizo a las fases por separado venían presentando variaciones en las respuestas. Las variaciones entre las fases A y C están relacionadas fuertemente con lo explicado en los párrafos anteriores.

Una solución a la posible presencia de remanencia al efectuar la prueba de SFRA consistiría en minimizar su efecto mediante la realización de un proceso de desmagnetización

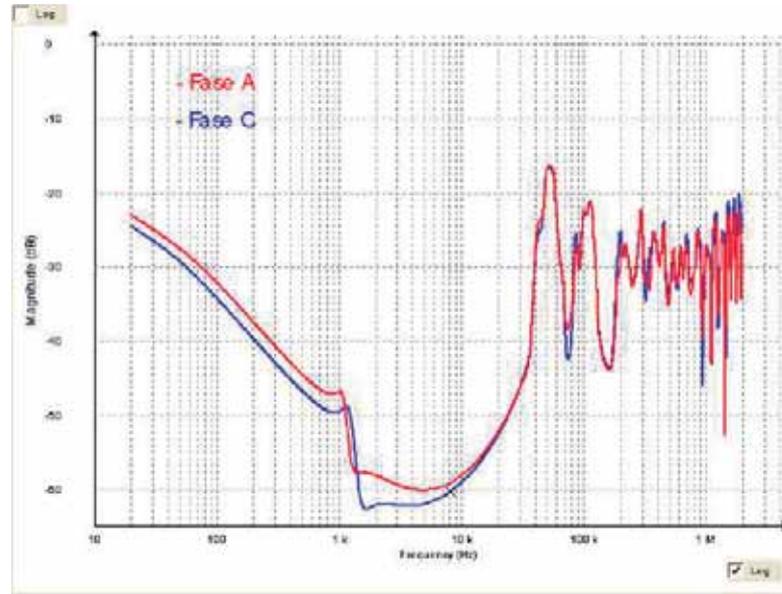


FIGURA 4.20: Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase B lado de alta

el cual no es 100 % fiable pero que al menos reduce de manera importante este fenómeno.

Las respuestas que veremos a continuación pertenecen a un transformador diferente también tipo horno, por el cual circulan corrientes muy elevadas debido a las características propias de este tipo de transformador y a su uso.

Al igual que el transformador anterior, ya se contaba con pruebas anteriores, sirviendo como base para la interpretación y diagnóstico de los nuevos resultados. La Figura 4.21, muestra la respuesta de la fase C, del seguimiento que se dio al transformador.

Tomando la respuesta base que se tenía del transformador, que corresponde al 30 de Marzo del 2007, se observa las variaciones que se tienen obtenidas posteriores a esta prueba. Se tiene que, las respuestas al 5 de Abril y 17 de Septiembre presentan variaciones arriba de los 2.3 dB. Estas variaciones se mantienen en el rango de bajas frecuencias, pero al llegar al rango de medias frecuencias la respuesta al 5 de Abril sufre una variación aun mayor con respecto a la prueba base. La respuesta correspondiente al 5 de Agosto del 2007 presenta variaciones mayores a 4 dB, en el rango de frecuencias bajas y medias. Se puede deducir que esta fase presenta algún problema sin embargo sería necesario llevar

acabo un proceso previo de desmagnetización para verificar o descartar la presencia de una falla.

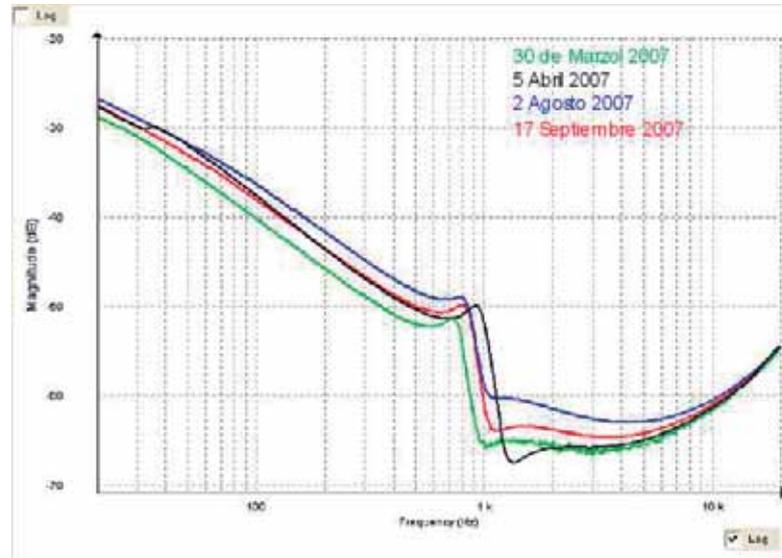


FIGURA 4.21: Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase C lado de alta

La Figura 4.22, muestra la respuesta del seguimiento a la Fase A. La máxima variación que se tiene con respecto a la base se da arriba de 3dB y corresponde al 5 de Abril del 2007 en los rangos de frecuencia bajos y medios. Las variaciones que se dan del 2 de Agosto al 17 de Septiembre son arriba de 1 dB respecto a la respuesta base. Ambas variaciones se conservan muy semejantes a lo largo de bajas y medias frecuencias.

La Figura 4.23, muestra el seguimiento a la Fase B. Se observan variaciones arriba de los 3 dB, en la respuesta que corresponde al 5 de Abril respecto a la respuesta base y variaciones arriba de los 2 dB en las respuestas al 2 de Agosto y 17 de Septiembre con respecto a la base.

Haciendo el análisis de las tres gráficas, se observa que existen variaciones significativas en los rangos bajos y medios, principalmente en la Fase C, que es en donde se presenta una mayor variación. Esto requiere de un análisis que permita descartar la posibilidad de que el transformador presenta problemas. También se observa que hay incrementos y decrementos en la impedancia entre cada respuesta en las distintas pruebas. Es necesario, al igual que en el transformador anterior, desmagnetizar el núcleo del transformador para

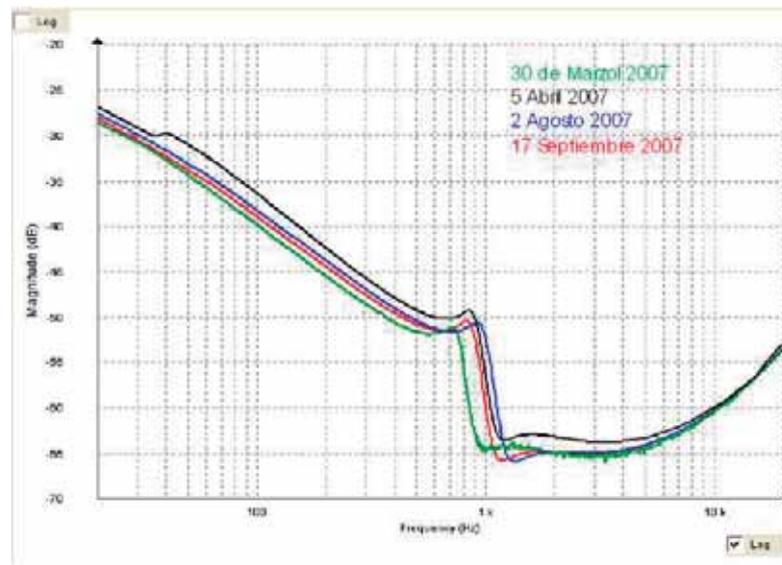


FIGURA 4.22: Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase A lado de alta

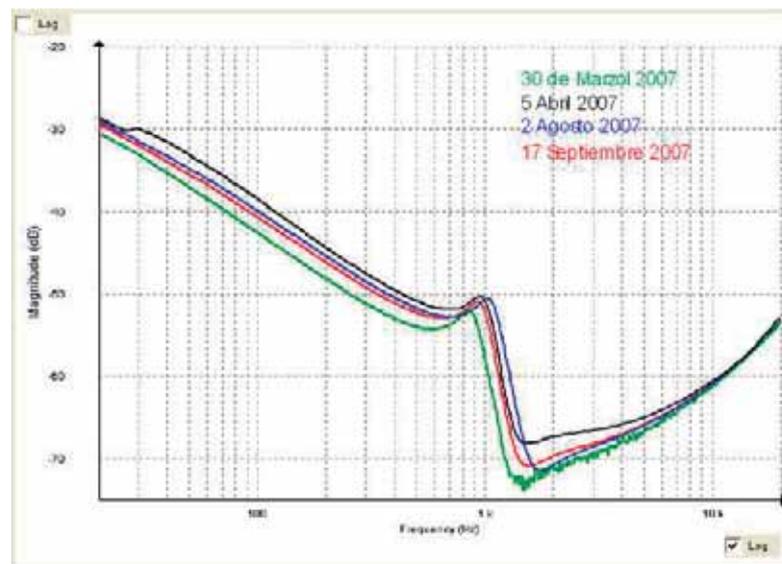


FIGURA 4.23: Respuesta a Prueba de circuito abierto Fase B lado de alta

descartar que el problema sea por la remanencia y quedarse solo con el problema de los movimientos en los devanados si es que estos persisten.

Es importante recalcar aquí que, bajo estas condiciones es difícil parar el proceso de producción, sacar de operación el transformador al no existir una evidencia clara de una falla. La simple duda de que la variación encontrada sea debida a una remanencia

impide incluso el llevar a cabo el proceso de desmagnetización para probar nuevamente el transformador.

4.3.4. Falla no detectada por las pruebas convencionales de rutina

La siguiente prueba corresponde a un transformador de horno eléctrico con las características presentadas en apartados anteriores. Posterior al disparo del interruptor de alta por la protección buchholz en primera y segunda etapa, se realizaron las pruebas convencionales de rutina. No se encontraron anomalías en las mismas. Posterior a ello se realizó la prueba de barrido en la frecuencia encontrándose para las fases laterales la respuesta mostrada en la Figura 4.24.



FIGURA 4.24: Transformador tipo horno con falla

Como se observa en la figura las fases laterales indican la presencia de una falla al interior del transformador. Sin embargo, al no mostrar anomalías las pruebas convencionales se solicitó realizar un conjunto de pruebas complementarias no-convencionales postergando la realización de las mismas el equipo de producción de la empresa. Cuatro días después el transformador sufrió una falla franca y se dañó con el evidente costo en su reparación y el retraso inminente en el proceso de producción.

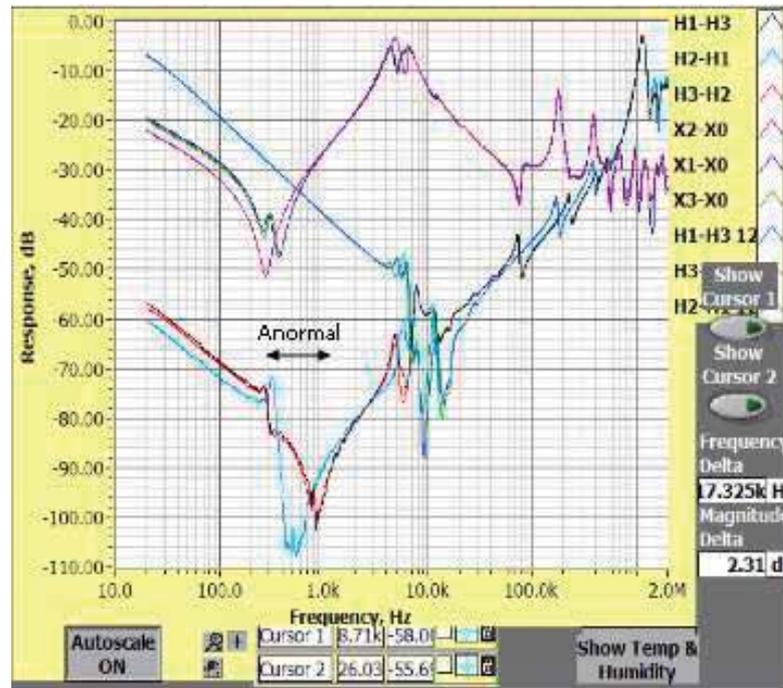


FIGURA 4.25: Respuesta a un Transformador recién reparado

Lo anterior es una muestra evidente de que las pruebas convencionales no siempre son capaces de excitar todo tipo de falla al interior del transformador. Esto hace evidente que la prueba de SFRA presenta ventajas importantes en este aspecto al tener la peculiaridad de lograr excitar los modos de operación de este tipo de fallas.

4.3.5. Respuesta Transformador recién reparado

La siguiente Figura 4.25 muestra la respuesta de un transformador que había sido reparado en el 2006, cuyas características son, 7,5MVA,115/13,8KV, Δ -Y. Cuando llega el transformador a la subestación, se detecta los soportes de los devanados flojos. Una vez ya ajustados, se realiza la prueba y la figura muestra el resultado. El problema que se tiene con transformadores de edad avanzada, es que no se cuenta con una referencia ni unidades gemelas que pudiesen coadyuvar a identificar algún problema en el transformador.

En la Figura 4.25 se observa que aún después de corregido el problema, la fase central presenta una pendiente muy pronunciada en el rango de 300 a 800 Hz, dejando una duda razonable sobre las condiciones internas del transformador.

4.4. Respuesta Atípica de un Transformador

La Figura 4.26 muestra la respuesta de un transformador $\Delta - Y$ cuya capacidad es 12/16/20 MVA, 110/13,8 kV, fabricado en 1982.

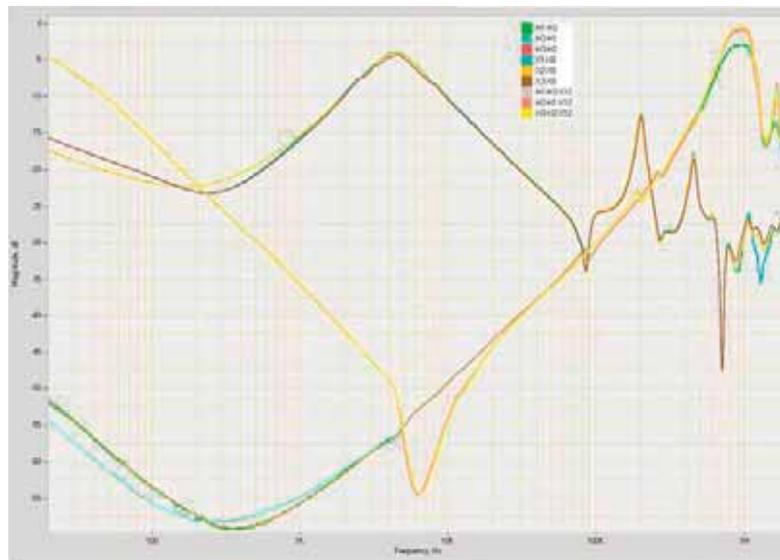


FIGURA 4.26: Respuesta atípica de un transformador

Este transformador había sufrido daños en una de las boquillas por descarga eléctrica. Después de realizarse la reparación para la puesta en servicio, se realiza la prueba y se obtiene la respuesta que vemos en la Figura 4.26.

La respuesta obtenida no corresponde a un comportamiento típico para esta prueba. Las pruebas convencionales solo mostraron un alto grado de remanencia deducido por presentar una corriente de excitación igual para las tres fases pero con un valor razonable. Este transformador presenta una respuesta completamente atípica que no permite

realizar una interpretación física de la misma, razón por la cual será necesario una inspección interna del mismo para verificar la condición de los devanados. No fue posible darle seguimiento al transformador pero se realizó inspección interna.

4.5. Comentarios Finales

A continuación se resúmen los aspectos principales de este capítulo. Para el análisis del transformador prototipo, diseñado para simular fallas, se obtuvieron las respuestas naturales sin falla. Estas reflejan: fases laterales sobrepuestas, fase central ligeramente desplazada, y prueba de corto circuito con una ganancia muy cercana a $0dB$. Estas pruebas mostraron un comportamiento atípico debido al diseño de este transformador. Se comprobó, como se mencionó al inicio de este trabajo, que el reflejo de la geometría interna del transformador durante el barrido a la frecuencia, depende de cada diseño y no es indicativo de falla alguna. Por otro lado, en la falla simulada de un cortocircuito a distintas bobinas del lado de alta y baja tensión al transformador prototipo, se muestra el fenómeno que se presenta ante un cortocircuito, como es una reducción de la ganancia que tiende a $0dB$. La falla simulada al provocar un desplazamiento de bobinas, muestra una disminución de la impedancia entre las fases. Este fenómeno se da debido a la variación del acoplamiento magnético de los devanados. Adicionalmente hemos comprobado, una vez más, que un error detectado en altas frecuencias, y que pudo haber sido confundido con un falla, provocado por un falso contacto durante la prueba al transformador prototipo, muestra la experiencia que se ha logrado en la aplicación de la prueba. Es menester mencionar que las fallas reales analizadas en este capítulo, coinciden con las predicciones que se obtuvieron al realizar la simulación de las mismas. Finalmente es importante resaltar, la ventaja de esta prueba, al haber detectado una falla que no fue posible detectar con las pruebas convencionales de rutina.

Capítulo 5

Conclusiones

La prueba de barrido a la frecuencia, es una herramienta que ha demostrado considerables avances en la detección oportuna de fallas incipientes en transformadores de potencia que involucren básicamente desplazamientos o movimientos mecánicos de devanados y/o núcleo que modifiquen la geometría interna de los mismos. La característica no invasiva de esta prueba garantiza su repetibilidad, factor que garantiza la robustez de la prueba. Sin embargo, es importante recalcar que existe una gran subjetividad en la interpretación de resultados para la toma de decisiones.

Al ser una prueba no invasiva no modifica los parámetros de la estructura magnética del transformador, debido a que el voltaje aplicado, *20Volts* de pico a pico, es un voltaje pequeño comparado con el voltaje al que estos transformadores han sido diseñados para su operación. Como consecuencia la corriente que circula por los devanados en el transformador no modifica sus parámetros y regresa una respuesta en donde se observa la geometría interna del transformador. Esto representa el comportamiento físico de cada uno de los parámetros o modos de operación (circuito RLC multiacoplado) que están siendo excitados por las distintas frecuencias que excitan al transformador.

Cuando se tiene una falla al interior del transformador originada por altas corrientes que circulan por los devanados, estos parámetros si se modifican y por lo tanto alteran

la geometría del transformador cambiando así los modos de operación del circuito RLC que representa el transformador. Al aplicar la prueba SFRA si no se tiene una falla, la respuesta a la frecuencia es la de un comportamiento normal del transformador. Esto se mostró en varios transformadores, en donde se observa un comportamiento normal sin falla, visto en los capítulos anteriores.

Una de las grandes ventajas de la aplicación de la prueba SFRA es la que se tiene, para la detección oportuna de fallas incipientes, mismas que involucran desplazamientos mecánicos de bobinas y que no son detectadas por el conjunto de pruebas convencionales aplicadas de manera rutinaria. De aquí la importancia de esta prueba para evitar que el transformador llegue a tener una falla franca, así como pagar los altos costos tanto de reparación como operativos que esto implica. Estos desplazamientos mecánicos en las bobinas, fueron detectados en algunos transformadores al dar un seguimiento al transformador, en otros ya se presentaba el problema. De aquí la importancia de este seguimiento a transformadores y con la cual se ha podido identificar dichas fallas incipientes. Esto se evidenció en el caso del transformador al que se le detectó una pérdida de sujeción de los devanados que logró corregirse y que evitó llegar a una falla franca.

Se tiene que para un diagnóstico confiable es necesario saber interpretar los cambios en la geometría de devanados y/o núcleos. Estos se ven reflejados en variaciones en la respuesta en los distintos rangos de frecuencia que la prueba permite como son en bajas, medias y altas frecuencias, ya que cada uno de ellos se tiene identificada la posible causa de falla, errores en las conexiones o caso de remanencia.

No menos importante para el diagnóstico es, la comparación de las variaciones en la respuesta con los tres métodos que se tienen y que son la huella digital, la comparación de las tres fases del transformador particularmente en los transformadores tipo núcleo de tres columnas y finalmente la comparación entre unidades gemelas. El seguir esta metodología habla de la confiabilidad en el uso de la prueba para la detección de fallas en transformadores.

Sin embargo, la diversidad en el diseño de los transformadores hace difícil uniformizar la interpretación de los resultados. Muestra clara de esto son los transformadores en donde se encontraron respuestas atípicas a las que se espera tenga un transformador sin falla. Esto lo evidencia el caso del transformador prototipo en el que la respuesta es completamente distinta a la respuesta esperada debido pues al diseño propio de este transformador así como el transformador de la Figura 4.26 del capítulo anterior.

Basados en los fundamentos de la prueba SFRA, se tiene un resumen de la experiencia lograda en la realización de la prueba por un periodo mayor a 5 años, tiempo en el cual se tuvo la fortuna de lograr captar fallas al interior de los transformadores y la reparación de las mismas.

Se logró la detección de problemas en transformadores como fueron: cortocircuitos, magnetismo residual. Estos fueron detectados en bajas frecuencias que es donde la teoría marca que se da este tipo de problemas. Se analizaron transformadores que presentaron problemas de desplazamientos, localizados en medias frecuencias, debido a la falla dada por corrientes de cortocircuitos. Un problema de mala conexión, que se dio por un falso contacto que se tuvo al momento de la conexión del equipo de medición a las boquillas, se reflejó en altas frecuencias.

Se comprobó que no todos los problemas presentados en los distintos rangos de frecuencia son debidos a fallas, sino a posibles errores en las mediciones, falsos contactos en las boquillas, nulos aterrizamientos, remanencia causada por posibles pruebas hechas con anterioridad al transformador y que por ser pruebas invasivas dejaron una remanencia en el núcleo como fue uno de los casos vistos.

Se detectó remanencia en un transformador nuevo en el momento de realizar las pruebas de puesta en servicio y compararlas con las pruebas de planta entregadas por el fabricante y puesto en servicio, llegando a la conclusión de que, aún que se trate de un transformador nuevo, se tiene que hacer la prueba del barrido a la frecuencia y compararla con la huella digital que da el fabricante. Esto se hace con la finalidad de descartar

que existiera un problema de remanencia, si este fuera el caso, será necesario llevar a cabo un procedimiento de desmagnetización, hacer nuevamente la prueba y así garantizar que esta prueba, representará la huella digital del transformador para pruebas futuras al mismo.

Se comprobó la importancia que se tiene el dar un seguimiento al transformador para la detección oportuna de fallas incipientes en él y así evitar daños más severos y el alto costo que implica desde sacar de operación al transformador hasta su reparación misma. Con este seguimiento se logró la detección de fallas en los mismos, debidos a desplazamientos que sufrieron sus devanados ya sea por las altas corrientes, como fue el caso del transformador tipo horno, o por traslados inapropiados del transformador como fue uno de los casos también vistos.

Aunque se habla de la subjetividad en la interpretación de los resultados, SFRA es una prueba que; combinada con la experiencia que se tenga en la aplicación de ella, el objetivo y aplicación efectiva de la misma; teniendo el cuidado de no cometer errores de conexión durante la prueba y la detección de la remanencia, se puede dar diagnósticos con un alto grado de confiabilidad de fallas en transformadores de potencia.

5.1. Trabajo Futuro

La diversidad en cuanto a los diseños de los propios transformadores complica el desarrollar una metodología objetiva para lograr un mayor impacto con la aplicación de esta prueba, sin embargo, se está en posibilidades de emplear transformadores de pequeña capacidad con la finalidad de reproducir diferentes tipos de fallas para tipificar sus efectos sobre la respuesta a la frecuencia.

Adicionalmente, aunque no sea posible generalizar un modelo matemático, es necesario obtener el modelo para un transformador al menos con el fin de poder encontrar algunas peculiaridades que pudiesen llevar a desarrollar una metodología de análisis menos subjetiva.

Bibliografía

- [1] Alberto Avalos. Tipos de pruebas a transformadores. In *2º Foro Academico Nacional de Ingenierias y Arquitectura*, 2006.
- [2] Alberto Avalos and Carlos Perez. Detección de fallas en transformadores de potencia mediante la prueba de barrido en la frecuencia. In *IEEE 5º Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico*, Cuernavaca, Mexico, Octubre 2007.
- [3] doble. Sweep frequency response analyzer (sfra) user guide 72a-2570-01. Watertown, Massachusetts, USA, June 2008.
- [4] doble. Sweep frequency response analyzer (sfra) quick start guide 72a-2499-01. Watertown, Massachusetts, USA, Julio 2008.
- [5] doble. Casos de estudio de la interpretación errónea de la aplicación de la técnica de sfra para transformadores. In *IX Conferencia Latinoamericana de Clientes Doble*, Febrero 2008.
- [6] Carlos Perez Rojas Jose Albero Avalos Gonzalez and Servando Sanchez Ruis. Experiencias en pruebas de campo y laboratorio de barrido en la frecuencia de transformadores. In *Conferencia Doble - México*, 2008.
- [7] L. Magallanes, Isaí Gallardo, and F. Zazueta. Análisis de respuesta a la frecuencia en transformadores de potencia "sobre el significado físico" parte- 1. Technical report, CFE-LAPEM.
- [8] Tony McGrail. Sfra basic analysis. Manual 2, doble, August 2003.

- [9] George McPherson and Robert D. Laramore. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1990.