

BOLETÍN DE GESTIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL TRANSFORMADOR (TLM): Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

I. INTRODUCCIÓN

II. ANTECEDENTES

UN SISTEMA DE AISLAMIENTO IDEAL (CAPACITANCIA)
CAPACITANCIA
CONDENSADORES Y ANALOGÍA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO
SISTEMAS DE AISLAMIENTO REALES
SISTEMA DE AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR
FACTOR DE POTENCIA/FACTOR DE DISIPACIÓN
NOMENCLATURA

III. PRUEBAS

REPRESENTACIÓN DIELECTRICA - Guía de pruebas
PREPARACIÓN DE LA PRUEBA
MODOS DE PRUEBA
TENSIÓN DE PRUEBA

IV. ANÁLISIS

CAPACITANCIA – VERIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN
FACTOR DE POTENCIA/FACTOR DE DISIPACIÓN
RESPUESTA DIELECTRICA EN FRECUENCIA (DFR)

I. INTRODUCCIÓN

Los materiales de aislamiento desempeñan como mínimo una función importante en todos los equipos eléctricos¹. Deben proporcionar aislamiento eléctrico de las partes energizadas de un aparato desde sus otras partes que operan a diferentes tensiones o que se mantienen en el potencial de tierra. No hacerlo tiene consecuencias nefastas, incluido el fallo del propio aparato. Los fallos dieléctricos (como se denominan estos fallos) son conocidos por su gravedad y para aparatos llenos de aceite, tales como transformadores, pueden provocar incendios, explosiones, daños y destrucción de equipos circundantes, así como el fin de la vida útil.

Hay varias pruebas eléctricas para equipos fuera de línea disponibles para evaluar la condición del aislamiento, incluidas: Prueba de resistencia de aislamiento CC; factor de potencia/factor de disipación (FP/FD) y capacitancia; y métodos de respuesta dieléctrica como respuesta a la frecuencia dieléctrica (DFR). Cada una de estas pruebas cumple una función única con respecto a las necesidades de prueba del transformador, de modo que es importante entenderlas todas. El tema de este boletín es la prueba de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia.

La industria de la energía eléctrica ha dependido del factor de potencia/factor de disipación y las pruebas de capacitancia durante casi un siglo como herramienta para evaluar el aislamiento eléctrico. Debido a la capacidad que presenta esta prueba para detectar defectos localizados en sistemas de aislamiento de capas múltiples, las pruebas de factor de potencia/factor de disipación y las pruebas de capacitancia surgieron y rápidamente ganaron popularidad a principios del siglo XX, en un momento en que los pasatapas tipo condensador², que son los principales ejemplos de sistemas de aislamiento de múltiples capas, estaban comenzando a usarse de modo generalizado. Los problemas de fabricación con este tipo de pasatapas no se identificaban coherentemente utilizando métodos de resistencia al aislamiento de CC y los fabricantes prefirieron las pruebas de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia como una alternativa.

(1) El factor de potencia/factor de disipación y (2) la capacitancia son parámetros de prueba eléctrica únicos "medidos" simultáneamente en una prueba de factor de potencia/ factor de disipación y capacitancia. Cada uno de ellos ofrece diferente información sobre el estado de un sistema de aislamiento. El mejor modo de exponer el tema es comenzando por explicar la capacitancia...

1 El aceite del transformador también (1) proporciona una refrigeración/transferencia de calor suficiente, (2) conserva el núcleo y el conjunto de la bobina llenando vacíos en la celulosa, y (3) minimiza el contacto del oxígeno con la celulosa y otros materiales que son sensibles a la oxidación. Mientras tanto, la celulosa cumple una función mecánica apoyando los devanados y una función térmica creando conductos de refrigeración.

2 Más conocidos como pasatapas de capacitancia graduada

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

II. ANTECEDENTES

UN SISTEMA DE AISLAMIENTO IDEAL (CAPACITANCIA)

Un sistema de aislamiento (eléctrico) ideal almacenaría el 100 % de la energía eléctrica que pasa a través de él (es decir, sin pérdidas). Este comportamiento está modelado a través de un condensador. Cuando se aplica una tensión CC constante a través de un condensador, una vez que sus placas están totalmente cargadas, el condensador no permite que la corriente pase a través de él. En otras palabras, un condensador bloquea el flujo de corriente CC (en fase, real, resistivo). El flujo de corriente real, I_R , se asocia con pérdidas, indicadas por:

$$\text{Vatios} = V \cdot I_R \quad (1)$$

donde V es la tensión. Las pérdidas, indicadas en Vatios, en la ecuación 1 anterior cuantifican la cantidad de energía eléctrica aplicada que se pierde en calor. Si la corriente resistiva, I_R , es cero, las pérdidas son iguales a cero, y toda la energía aplicada se almacena.

Cuando se aplica una tensión de CA a través de un condensador, hay flujo de corriente a través del condensador como indica la ecuación 2, pero es capacitiva y representa la energía almacenada en cada medio ciclo.

$$I_C = C \cdot (dV/dt) \quad (2)$$

Por lo tanto, un condensador crea el comportamiento ideal de un sistema de aislamiento, que es almacenar toda la energía eléctrica presente.

CAPACITANCIA

Cuando se aplica tensión a través de los electrodos espaciados razonablemente³ de un condensador (Figura 1), la carga (Q) se acumula en los electrodos del condensador, según:

$$Q = V \cdot C \quad (3)$$

donde V es la tensión y C es la capacitancia. Si la superficie (área) A , de los electrodos de un condensador (p. ej., placas) aumenta o la distancia, d , entre las placas disminuye, se acumula más carga en los electrodos y la capacitancia aumenta.

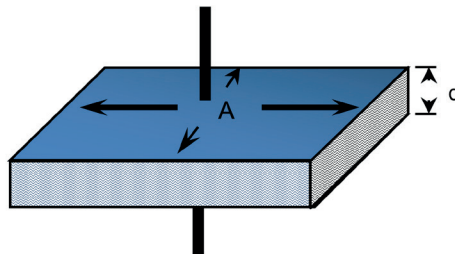


Figura 1: Condensador de placas paralelas

Si los electrodos del condensador están separados por vacío, la capacitancia depende solo de la forma o la geometría. Esto se denomina capacitancia geométrica y se calcula así:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (4)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del vacío o la permitividad del espacio libre ($\approx 8854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$), A es el área de las placas y d es la distancia entre las placas.

El vacío que llena el espacio entre los electrodos del condensador se denomina dieléctrico y, como aislante eléctrico, evita el movimiento de la carga de un electrodo al otro. Cada vez más a menudo se utilizan dieléctricos que no son de vacío para rellenar el espacio entre los electrodos de un condensador, e incluyen ciertos líquidos, gases y materiales sólidos. El origen de la carga almacenada en los electrodos de un condensador es la fuente de tensión aplicada a través del condensador y no una contribución del dieléctrico. Sin embargo, según el dieléctrico que llena el espacio, puede mejorarse la cantidad de carga que se acumula en las placas. La propiedad de este material se conoce como permitividad relativa del material o constante dieléctrica, y es la medida de la capacitancia del material relativa a la capacitancia si el material se reemplaza con un vacío⁴. La constante dieléctrica ϵ es una propiedad intrínseca del material descubierta por Michael Faraday en 1836.

³ No infinitamente separados

⁴ Un vacío no mejora la acumulación de carga, que es el estándar con el que se comparan todos los materiales.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

Todos los parámetros anteriores, es decir, el área de los electrodos del condensador (A), la distancia entre los electrodos del condensador (d), y la constante dieléctrica del material(o materiales) entre los electrodos (ϵ), son todos los marcadores físicos y contribuyen al valor de capacitancia dada según la ecuación 4.

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (4)$$

donde C es la capacitancia, ϵ_r es la permitividad estática relativa del material entre las placas, ϵ_0 es la permitividad del espacio libre ($\approx 8854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$), A es el área de las placas, y d es la distancia entre las placas.

CONDENSADORES Y LA ANALOGÍA CON EL SISTEMA DE AISLAMIENTO

Un sistema de aislamiento debe aislar eléctricamente cada uno de los componentes de un aparato de otros con distintas tensiones cuando el aparato está energizado. Algunos ejemplos de componentes que operan en tensiones únicas en un transformador energizado pueden ser cada devanado del transformador y el núcleo y cuba de un transformador conectado a tierra. Estos componentes son análogos a los electrodos de un condensador, mientras que el material aislante del aparato es análogo al dieléctrico de un condensador.

Para poder acceder al dieléctrico del condensador o al sistema de aislamiento análogo para la prueba, los electrodos del condensador (p. ej., los componentes del aparato, como un devanado), deben ser accesibles para aplicarles tensión. Algunos devanados, por ejemplo un terciario de estabilización en un transformador, pueden no tener terminales externos en el tanque del transformador y, en esos casos, no están disponibles como electrodo o punto de conexión de prueba.

En el caso del devanado de un transformador, los bornes de las bobinas se deben cortocircuitar para que, de modo similar al de los electrodos de un condensador, la tensión sea la misma en cualquier punto a lo largo del devanado cuando se energiza⁵. Si el componente es muy grande, al igual que en los electrodos de un condensador, se puede acumular más carga y la capacitancia es grande.

Si la distancia que separa los componentes del aparato (por ejemplo, devanados) disminuye, la carga acumulada en los componentes y, por lo tanto, la capacitancia, aumenta. Este es el principio por el cual la capacitancia puede utilizarse como medio para detectar deformaciones de devanado en un transformador⁶. Por ejemplo, si la distancia entre los devanados de AT y BT aumenta (debido al pandeo forzado o libre del devanado interior concéntrico - normalmente el devanado BT), la capacitancia del sistema de aislamiento entre devanados, C_{HL} , disminuirá.

Si el promedio de la constante dieléctrica del material (o materiales) presente en el sistema de aislamiento (p. ej., el dieléctrico) cambia, la cantidad de carga acumulada y, con ello, la capacitancia, cambiarán. Por ejemplo, si un pasatapas lleno de aceite desarrolla una fuga y pierde una cantidad considerable de aceite que posteriormente se sustituye por aire, la capacitancia cambiaría notablemente indicando que algo anda mal. Por otro lado, no obstante, si el material de aislamiento es papel impregnado en aceite, por ejemplo, y este se contamina con una cantidad relativamente pequeña de humedad, aunque el agua tiene una constante dieléctrica significativamente mayor que el papel impregnado en aceite, el promedio de la constante dieléctrica no se verá particularmente afectado en la mayoría de transformadores de potencia, por lo que no se espera que la capacitancia refleje la contaminación.

En resumen, la capacitancia refleja los atributos físicos del aislante que se están poniendo a prueba. Un cambio en la capacitancia entre las pruebas sugiere que el sistema físico no es el mismo que se puso a prueba previamente o que se ha producido un cambio físico en el sistema desde la última vez que fue probado.

⁵ De otro modo, se introduce un componente inductivo en la medición que puede distorsionar los resultados; referencia, Figura 10

⁶ La capacitancia no es especialmente sensible a la deformación del devanado, por lo que no es el método preferido para tomar una decisión final si existe deformación del devanado. Se trata de un diagnóstico cómodo, ya que está disponible siempre que se realice una prueba de factor de potencia/factor de disipación de manera adecuada como herramienta exploratoria de primer nivel. La sospecha de que un devanado se ha movido debe ser investigada con un análisis de la respuesta por barrido de frecuencia (SFRA) o prueba de reactancia de dispersión.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

SISTEMAS DE AISLAMIENTO REALES

A diferencia de un condensador ideal, los sistemas de aislamiento asociados con la mayoría de aparatos eléctricos tienen pérdidas, incluso cuando son nuevos. Normalmente siguen siendo muy eficientes, pero no almacenan el 100 % de la energía eléctrica a través de ellos.

Cuando pasa una tensión de CA a través de un sistema de aislamiento típico, mientras que la mayor parte de la corriente que fluye a través del aislamiento es capacitiva (representa la energía almacenada por el aislamiento), también se produce corriente resistiva. Este componente resistivo, I_R , que está en fase con la tensión de CA, se asocia con pérdidas. La corriente resultante total que fluye a través del aislamiento cuando se aplica tensión a través de ella, I_T , es la suma vectorial de la corriente capacitiva, I_C , y la corriente resistiva, I_R , como en la Figura 2.

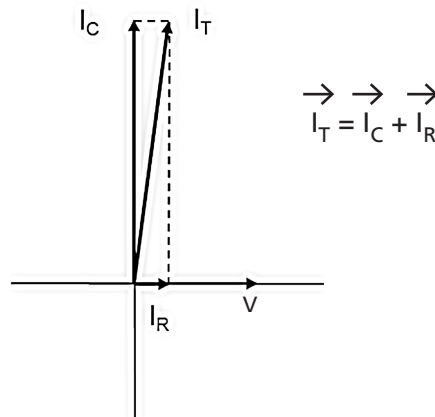


Figura 2: Corriente total en un sistema de aislamiento real

La pérdida dieléctrica es la energía perdida/liberada en forma de calor cuando hay un campo electrostático a través de un sistema de aislamiento. Las pérdidas se pueden clasificar en general como pérdidas conductivas, derivadas de la corriente de fuga o pérdidas de polarización⁷. Las pérdidas totales ($I_R \cdot V$) en un dieléctrico son iguales a la suma de las pérdidas de polarización y las pérdidas conductivas presentes⁸. Es especialmente aconsejable identificar los cambios en las pérdidas, que suelen indicar el deterioro del estado del dieléctrico. En general, un problema localizado suscita mucha más preocupación que la degradación generalizada, porque un problema localizado aumenta significativamente el riesgo de fallo del dieléctrico.

Los dieléctricos funcionan mejor cuando están limpios, secos, relativamente libres de vacíos, y se utilizan dentro de un determinado rango de temperatura. Los enemigos de una buena salud constante del dieléctrico son el calor, la humedad y el oxígeno.

Un dieléctrico falla cuando las tensiones entre los materiales alcanzan o superan las capacidades de resistencia del dieléctrico del sistema de aislamiento, que se deterioran con la edad y el mal estado del dieléctrico. Las pruebas y el mantenimiento son un medio por el cual el propietario de un aparato puede influir en la capacidad de resistencia de un sistema de aislamiento; por ejemplo, determinar cuándo un transformador está húmedo y secarlo, reacondicionar el aceite, reparar fugas de las juntas, etc. El propietario de un aparato puede influir también en las tensiones presentes; por ejemplo, reduciendo la carga en un transformador y, por lo tanto, su temperatura de funcionamiento. Esto es especialmente prudente en el caso de un transformador húmedo, por ejemplo, si el transformador no puede restaurarse primero a un mejor estado [1].

⁷ Las pérdidas conductivas y de polarización se describen en el boletín de TLM "DFR - Aplicación de banda corta" de Megger

⁸ La capacidad de detectar pérdidas conductivas aumenta a medida que la frecuencia de la prueba se reduce (hacia CC) desde la frecuencia de línea (50/60 Hz). Las pérdidas debidas a los procesos de polarización que ocurren en el sistema de aislamiento varían dependiendo de la frecuencia de prueba.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

SISTEMA DE AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

El sistema de aislamiento de los transformadores de potencia consta de aceite y celulosa. La celulosa es un aislante sólido (papel y cartón prensado) que normalmente se procesa utilizando el método Kraft. Estos son materiales orgánicos, por lo que es inevitable que se deterioren y lleguen al final de su vida útil.

Desde una perspectiva funcional y de fabricación, los componentes de aislamiento de un transformador suelen clasificarse como partes del aislamiento principales y secundarias. La estructura de aislamiento principal de un transformador de potencia está destinada a las ranuras de aceite y varias

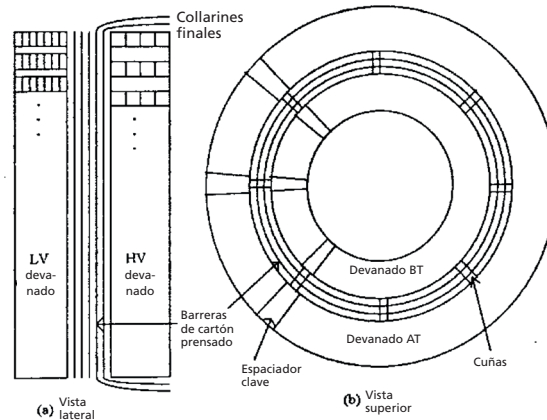


Figura 3: Estructura de aislamiento principal en un transformador de potencia [2]

barreras de cartón prensado entre los devanados, conceptualmente ilustrados en la Figura 3.

"La estructura de aislamiento secundaria (Figura 4) se compone de las pequeñas ranuras de aceite que separan los discos y se apoya en los separadores principales que son aislantes estrechos, generalmente de cartón prensado, espaciados radialmente alrededor de la circunferencia del disco. Además, el aislamiento entre espiras, generalmente de papel, puede ser considerado como parte de la estructura de aislamiento secundaria". [2]

Desde la perspectiva de la prueba dieléctrica, el aislamiento se considera a menudo como un sistema que puede agruparse y aislarse para la prueba;

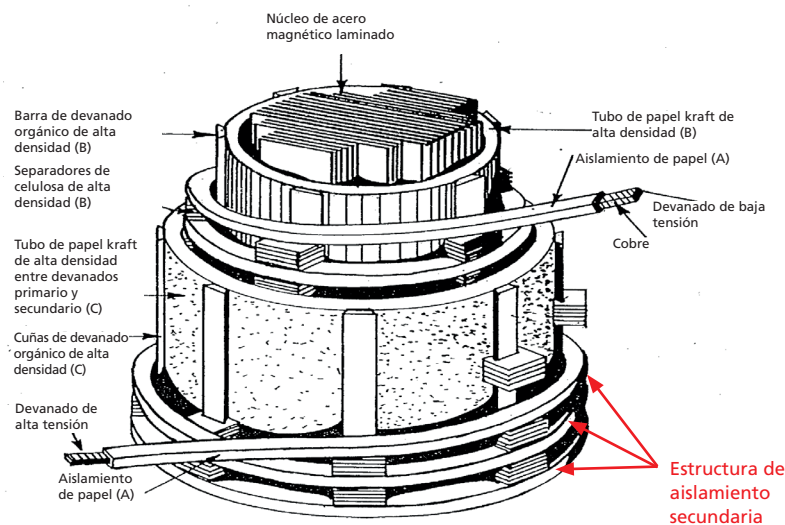


Figura 4: Estructura de aislamiento secundaria [3]

por ejemplo, los componentes del aislamiento entre espiras del devanado (probado en una prueba de corriente de excitación, prueba de relación de transformación, etc.), y C_{H^*} , C_L y C_{HL} en un transformador de dos devanados, descrito en la sección de representación dieléctrica en la página 8.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

FACTOR DE POTENCIA/FACTOR DE DISIPACIÓN

El factor de potencia/factor de disipación es un índice (lo que significa que no tiene unidades de medida) que proporciona un sentido de la pérdida relativa de un sistema de aislamiento. En el caso del factor de potencia, las pérdidas relativas son la cantidad de energía perdida en forma de calor en comparación con la cantidad total de energía eléctrica presente a través del aislamiento, según la fórmula I_R/I_T . El factor de potencia está determinado por la relación de ángulo de fase de las ondas de CA de la tensión presente en el aislamiento y la corriente resultante que fluye a través del aislamiento, como se ilustra en la Figura 5.

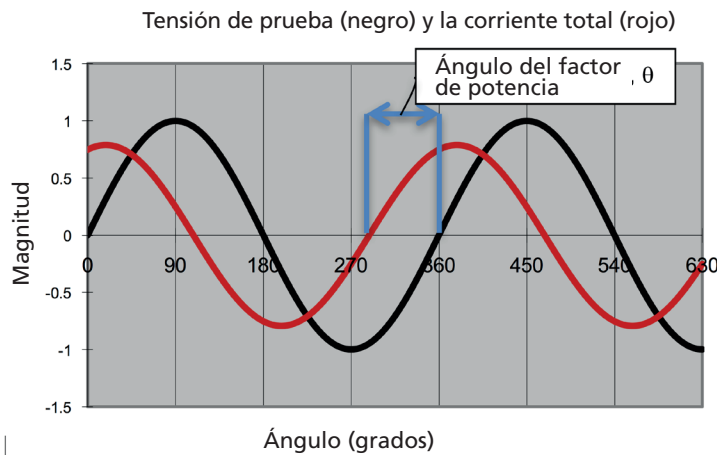


Figura 5: Determinación del ángulo de factor de potencia θ (también llamado ángulo de impedancia)

Para el factor de disipación, las pérdidas relativas son la cantidad de energía perdida en comparación con la cantidad de energía eléctrica almacenada por el aislamiento, según la fórmula I_R/I_C . El factor de disipación está determinado por la relación de ángulo de fase de las ondas de CA de la corriente capacitiva (relacionada con la potencia reactiva/energía almacenada por el aislamiento) y el total de la corriente que fluye a través del aislamiento cuando la tensión está presente a través del aislamiento (Figura 6). Este ángulo es conocido como ángulo de pérdida, δ . Es el ángulo complementario al ángulo de factor de potencia, θ .

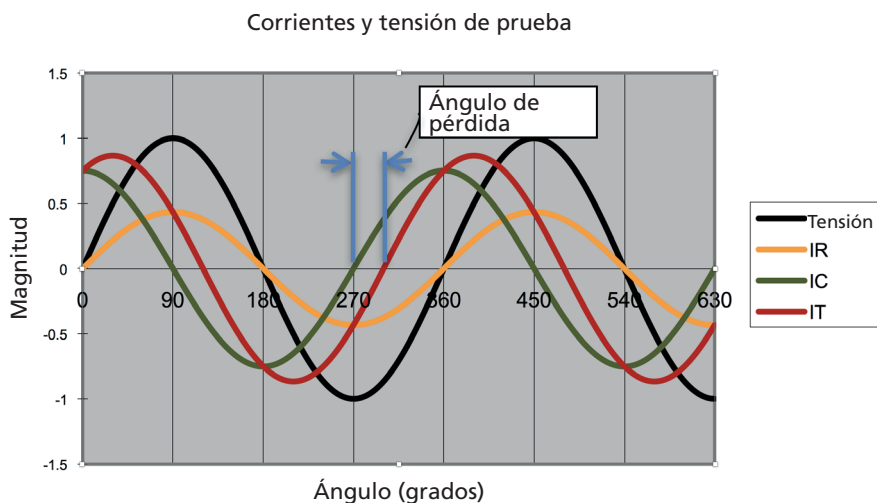


Figura 6: Determinación del ángulo de pérdida δ

Durante una prueba de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia, se aplica una tensión de prueba de CA a través del sistema de aislamiento. Esta señal de tensión es la forma de onda de referencia y se le asigna un ángulo de fase de 0° . Se evalúa el ángulo de fase de la corriente alterna resultante medido a través del aislamiento. Si la corriente resultante es totalmente capacitiva, lo que indica que no hay pérdidas, el ángulo del factor de potencia, θ , será de 90° y el ángulo de pérdida, δ , será de 0° . Sin embargo, dado que hay pérdidas inherentes en la mayoría de los sistemas de aislamiento, el ángulo del factor de potencia, θ , de la corriente total resultante a través del sistema de aislamiento será de menos de 90° , mientras que el ángulo de pérdida, δ , será superior a 0° . El factor de potencia es el coseno de θ (el ángulo complementario del "ángulo de pérdida") mientras que el factor de disipación es la tangente de δ , o el ángulo de pérdida (Figura 7).

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

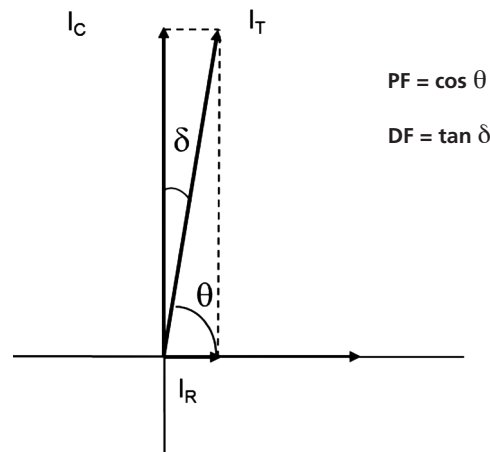


Figura 7: Factor de potencia y factor de disipación

El coseno de un ángulo (θ) cerca de 90° y la tangente de un ángulo (δ) cerca de 0° es un número muy pequeño, cercano a cero. Este es el motivo por el que el factor de potencia/factor de disipación se multiplica por 100 y se presenta como porcentaje. Incluso entonces, los valores típicos de factor de potencia/factor de disipación de transformadores llenos de aceite son menores a 1 %.

Las pérdidas, indicadas en unidades de vatios, normalmente también se incluyen entre los resultados de la prueba. Las pérdidas dependen del tamaño del aislamiento. Un sistema de aislamiento el doble de grande y en las mismas condiciones que otro sistema de aislamiento del mismo tipo tendrá el doble de las pérdidas que el comparativamente menor. Las pérdidas no se pueden comparar directamente entre el mismo tipo de sistemas de aislamiento de diferentes tamaños como medio para determinar qué sistema está en mejor estado a menos que se sepa el tamaño de cada uno para determinar las pérdidas relativas. Como no es práctico cuantificar el tamaño de los sistemas de aislamiento dentro de los aparatos eléctricos, normalmente no se comparan las pérdidas entre aparatos similares. Sin embargo, las pérdidas pueden compararse con los resultados de pruebas anteriores. La ventaja del factor de potencia/factor de disipación como un índice de pérdidas es que el tamaño del aislamiento (a través de su correlación directa con la capacitancia) y las pérdidas determinan el factor de potencia/ángulo de pérdida y se reflejan mediante el valor del factor de potencia/factor de disipación. El factor de potencia/factor de disipación indica las pérdidas relativas dieléctricas, lo cual es necesario para comparar sistemas de aislamiento del mismo tipo. Esta es una fortaleza del factor de potencia/factor de disipación. Por desgracia, a menudo se promociona hasta el punto de que se ignora un dato importante. El factor de potencia/factor de disipación es más revelador en un sistema de aislamiento pequeño que uno más grande. Por lo tanto, unos resultados de la prueba de factor de potencia/factor de disipación bajos o idénticos en un sistema de aislamiento grande y en un sistema de aislamiento pequeño podrían no tener el mismo significado y podrían no estar indicando que los sistemas de aislamiento se encuentren en idénticas condiciones. En tal caso, el factor de potencia/factor de disipación bajo o idéntico es más tranquilizador en el sistema de aislamiento pequeño.

- Es importante señalar que una prueba de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia se realiza a la frecuencia de línea o de red⁹. Los valores de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia son dependientes de la frecuencia. Los métodos de respuesta dieléctrica como la respuesta de frecuencia dieléctrica (DFR) implican realizar mediciones de factor de potencia/factor de disipación en varias frecuencias y considerar cómo el factor de potencia/factor de disipación y capacitancia cambian con la frecuencia. Todas las observaciones realizadas sobre el factor de potencia/factor de disipación en este boletín se refieren específicamente a la medición de frecuencia de línea del factor de potencia/factor de disipación.

NOMENCLATURA

El factor de potencia y el factor de disipación, aunque se determinan de forma diferente, son muy similares y tienen la misma finalidad. La ventaja es que ambos ofrecen indicaciones casi idénticas en el ámbito donde se pone a prueba la mayoría de los sistemas de aislamiento (hasta aproximadamente el 10 % de factor de potencia/factor de disipación), por lo que cuál usar es en gran medida una cuestión de preferencia.

El uso del factor de potencia abarca diversas aplicaciones en la industria y, de hecho, a menudo suele asociarse más con otros usos como caracterizar la eficiencia del alimentador de distribución y el desempeño en estudios del sistema de potencia de carga/generador, etc. Algunos piensan que su uso para describir la eficiencia de aislamiento causa confusión. Muchos empleados de las plantas de energía eléctrica, por ejemplo, se muestran poco entusiasmados con el uso del factor de potencia para la evaluación de un aislamiento. Mientras tanto, se puede argumentar que el factor de disipación es un nombre más descriptivo para lo que se está evaluando. Disipar significa usar algo derrochándolo. Por lo tanto, como índice de información relativa de la cantidad de energía que se pierde en forma de calor, el factor de disipación se impone prácticamente por sí solo gracias a su nombre.

Existen otros nombres para la prueba del factor de potencia/factor de disipación y capacitancia, como "tan δ " cuando en referencia a una medición del factor de disipación y "prueba doble" en referencia a una medición del factor de potencia.

⁹ Como medio para filtrar la interferencia electrostática, las mediciones se efectúan habitualmente a frecuencias justo por encima y por debajo de la frecuencia de línea y se promedian.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

Otro punto de aclaración son los términos "dieléctrico" y "aislamiento". Estos se utilizan a menudo indistintamente puesto que un dieléctrico es un aislante. El término dieléctrico transmite específicamente que el material (o materiales) soportará eficientemente un campo electrostático evitando la conducción. El aislamiento tiene muchas aplicaciones (eléctrico, térmico, acústico, etc.) y, cuando se usa sin contexto, puede referirse a cualquiera de ellos.

III. PRUEBAS

REPRESENTACIÓN DIELECTRICA - Guía de pruebas

Un aparato puede tener una gran cantidad de material(es) aislante(s). Para fines de diagnóstico, es imperativo que la cantidad de aislamiento evaluada en una única prueba de factor de potencia/factor de disipación y de capacitancia se lleve a cabo en la menor cantidad posible. De lo contrario, los problemas pueden ser difíciles, si no imposibles, de detectar. El técnico de pruebas no tiene control sobre en qué medida el sistema de aislamiento se puede segmentar para probar más allá de un punto. Una "representación dieléctrica" sirve como guía para el técnico de pruebas, mostrando cómo puede realizarse la segmentación.

Una representación dieléctrica es un diagrama que identifica cada (grupo de) componente(s) del aparato que existirá en una única tensión cuando el aparato esté energizado. Es responsabilidad del técnico de pruebas determinar si el componente es accesible o no, de modo que pueda conectarse un cable de prueba. El número de tensiones únicas/grupos de componentes presentes determinará el número de sistemas de aislamiento necesarios. Cualquier área donde exista una diferencia de potencial cuando el aparato está energizado requerirá aislamiento para almacenar la energía del campo eléctrico resultante que se creará. Por ejemplo, a través de cada vuelta del devanado de un transformador circulará una tensión y requerirá aislamiento entre cada vuelta. La diferencia de tensión entre el devanado de un transformador y el núcleo conectado a tierra o depósito conectado a tierra requerirá también aislamiento. Si un transformador tiene más de un devanado del transformador, será necesario un aislamiento entre los devanados del transformador para admitir la diferencia en las tensiones presentes en cada devanado¹⁰.

En una representación dieléctrica, el aislamiento entre componentes se representa mediante un solo condensador. Esto es correcto, puesto que una representación dieléctrica es simplemente una guía para las pruebas. Un modelo de dieléctrico, por otro lado, sirve para predecir el comportamiento eléctrico de un sistema de aislamiento, de modo que un solo condensador para este tipo de diagrama no sería adecuado.

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de representación dieléctrica para un transformador de dos devanados. Identifica tres (3) componentes del transformador que existirán en tensiones únicas cuando el transformador esté energizado: el devanado de alta tensión, el devanado de baja tensión y la cuba y el núcleo puestos a tierra.

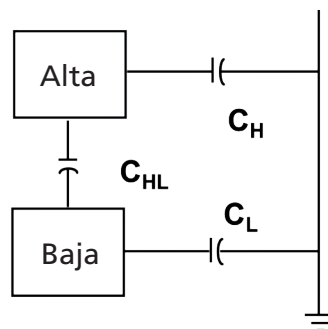


Figura 8: Representación dieléctrica de un transformador de dos devanados

Los sistemas de aislamiento se identifican como C_H , C_{HL} y C_L :

- C_H es el sistema de materiales que proporciona aislamiento eléctrico entre el devanado de alta tensión energizado y los componentes del transformador al potencial de puesta a tierra, como la cuba y el núcleo. C_H incluye el aislamiento activo de los pasatapas de alta tensión, el aislamiento de devanado de alta tensión, los componentes aislantes estructurales y el aceite.
- C_{HL} es el sistema de materiales que proporciona aislamiento eléctrico entre el devanado de alta tensión energizado y el devanado de baja tensión energizado; también llamado sistema de aislamiento interdevanado. C_{HL} incluye aislamiento de los devanados de alta y baja tensión, las barreras y el aceite (es decir, la estructura de aislamiento principal). C_{HL} está compuesto predominantemente por aislamiento de papel.
- C_L es el sistema de materiales que aísla el devanado de baja tensión energizado de los componentes potenciales puestos a tierra. Esto incluye el aislamiento activo de los pasatapas de baja tensión, el aislamiento del devanado de baja tensión, los elementos aislantes estructurales y el aceite.

¹⁰ Suponiendo que los devanados funcionen a diferentes tensiones, que suele ser el caso.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

Para determinar cómo comprobar un transformador, un enfoque útil es contar el número de devanados accesibles separables¹¹. Por ejemplo, pensemos en el caso de un transformador de 4 devanados con una configuración de devanado de Δ -Y-Y-Y, donde todos los terminales de un devanado son accesibles excepto los 3 terminales neutros secundarios, que están todos conectados y puestos a tierra internamente. Los devanados prácticamente separables son dos: (1) el devanado delta y (2) los tres devanados secundarios conectados Y, que serán tratados como un devanado/electrodo ya que no pueden separarse prácticamente. En cuanto a la accesibilidad, mientras que el devanado delta es totalmente accesible, los terminales neutros del grupo secundario (Y-Y-Y) no lo son, por lo que es poco práctico desconectarlos de tierra. En este caso, este transformador de 4 devanados se comprobará mediante un procedimiento de prueba de transformador de 2 devanados pero con la expectativa de que todos los resultados no van a ser totalmente significativos (referencia factor de potencia/factor de disipación negativos en la página 16).

PREPARACIÓN DE LA PRUEBA

Una preparación de la prueba incorrecta puede afectar a los resultados. Para maximizar la probabilidad de que los resultados sean representativos, deben realizarse los siguientes preparativos antes de efectuar una prueba de factor potencia/factor de disipación y capacitancia en un transformador.

1. *Verificar que la cuba del transformador está conectada a tierra correctamente.* En casos con resultados de la prueba verdaderamente desconcertantes, a menudo el culpable es un espécimen de prueba mal conectado a tierra. Si no está seguro, asegure una buena toma a tierra de la cuba y repita la prueba.
2. *Aísle físicamente y eléctricamente cada uno de los terminales del devanado (pasatapas).* La mejor práctica es no dejar nada físicamente conectado a los terminales del aislador. No confíe en las capas de goma para separarlos de un bus cercano; estas capas pasarían a formar parte del circuito de la prueba de aislamiento y pueden dar lugar a resultados no representativos. Si es realmente imposible desconectar el bus conectado a los terminales del devanado, las consecuencias son:
 - a. El sistema de aislamiento entre el devanado, que no está físicamente aislado, y la tierra no puede comprobarse de forma independiente. Suponiendo que el devanado al que nos referimos es el devanado de baja tensión del transformador, por ejemplo, el bus conectado al devanado de baja tensión introduce una capacitancia adicional, C_{bus} , en la medición. Esta capacitancia está en paralelo a la capacitancia C_L , de modo que los valores de capacitancia C_L y C_{bus} se suman, lo que da lugar a un resultado de capacitancia " C_L " más alto.
 - b. Los aislantes a lo largo del bastidor del bus conectado se incluirán en la medición. Como el factor de potencia/factor de disipación es una medición promedio, el estado del aislamiento entre el bus conectado y la puesta tierra pueden influir en el factor de potencia C_L (en este ejemplo) para mejor o para peor. En resumen, el factor de potencia/factor de disipación medido " C_L " no puede considerarse representativo del devanado de baja tensión solo para el aislamiento de puesta a tierra.
 - c. Dado que el aislamiento incluido en la medición C_L es mayor de lo que sería si los terminales se hubiesen aislado, el problema será más difícil de ver (recuerde que cuanto más pequeño = mejor).
 - d. Las mediciones de devanado a puesta a tierra ya pueden verse influidas por el exceso de fugas en la superficie en los terminales del aislador de ese devanado. Si una estructura de líneas y todo su soporte se incluyen también en la medición, la superficie "expuesta" de aislamiento incluida en la medición aumenta notablemente y las fugas de superficie pueden influir especialmente en la medición, de modo que los resultados eléctricos no sean representativos del estado del aislamiento.
3. *Cortocircuite cada devanado separable conectando juntos cada uno de los terminales/pasatapas del devanado.* Si un devanado tiene un terminal neutro, conéctelo también a los otros terminales del devanado (Figura 9). Si el terminal neutro normalmente está puesto a tierra durante el servicio, desconecte la puesta a tierra para la prueba. Una vez que se complete la prueba, la puesta a tierra del terminal neutro deberá reconectarse.

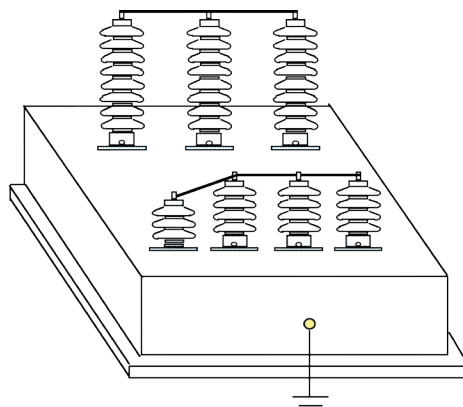


Figura 9: Transformador preparado adecuadamente para una prueba de factor de potencia/factor de disipación

¹¹ Separables desde una perspectiva práctica: un técnico de pruebas no debe drenar aceite para hacer preparativos de prueba para mediciones de rutina

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

No cortocircuitar cada devanado puede o no afectar notablemente a los resultados de la prueba, dependiendo del transformador. Esto es lo que sucede:

Un devanado es un inductor. Si no se cortocircuita durante la prueba, un componente inductivo de corriente será introducido en la medición. La corriente inductiva, I_L , está 180° fuera de fase con la corriente capacitiva, I_C , y cancelará una parte indeterminada de I_C de manera que parece que el aislamiento está almacenando menos energía eléctrica de la que está almacenando en realidad. I_R no se ve afectada en este escenario. El efecto neto es que el ángulo de pérdida, δ , aumenta a δ' (y el ángulo del factor de potencia disminuye), con lo que se obtiene un resultado mayor del factor de disipación/factor de potencia: la medida en que se usa esta influencia es ampliamente variable. La Figura 10 ilustra esta influencia.

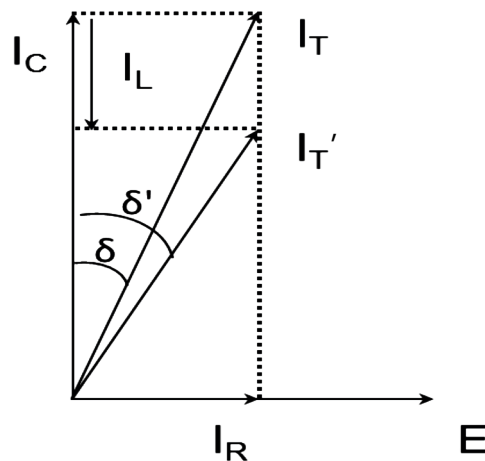


Figura 10: Influencia inductiva cuando los devanados del transformador no se han colocado en cortocircuito durante la preparación para una prueba de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia

- Los puentes de cortocircuito usados para cortocircuitar los terminales de devanado deben tener suficiente holgura respecto a las superficies puestas a tierra. De lo contrario, puede producirse un acoplamiento a tierra e introducir un error en la medición. En estos casos, irónicamente, los esfuerzos realizados (cortocircuitar los devanados) para minimizar la posibilidad de una medición no representativa hacen que los resultados sean todavía menos representativos. Hay algunos casos donde cortocircuitar el devanado de baja tensión, en particular, es difícil; por ejemplo, cuando las carcasas metálicas¹² separan los terminales del devanado. Aquí, un técnico de pruebas puede creer que es mejor no cortocircuitar el devanado. Es aconsejable en una situación de este tipo efectuar la comprobación utilizando ambas configuraciones (devanado cortocircuitado y sin cortocircuitar) para comprender mejor la influencia en los resultados de la prueba en cada caso.
- Para los puentes de cortocircuitado solo deben utilizarse alambres de cobre y aluminio desnudos. No se recomiendan los conductores aislados.
- **Tenga en cuenta** que, puesto que los devanados se cortocircuitan en preparación para una prueba de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia, el aislamiento entre espiras del devanado no se somete a tensión ni se evalúa en esta prueba. El aislamiento entre espiras se evalúa en otras pruebas eléctricas fuera de línea como la corriente de excitación y el índice de vueltas del transformador

¹² En ocasiones se denomina "caseta de acoplamiento"

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

MODOS DE PRUEBA

Cuando se energiza el devanado, se crea un campo eléctrico y se carga el aislamiento a su alrededor. Los modos de prueba proporcionan al usuario un medio para segmentar el aislamiento cargado y probar los componentes más pequeños posibles del aislamiento.

La característica necesaria del instrumento de prueba de un factor de potencia/factor de disipación que admite modos de prueba es lo que se denomina un "circuito de guarda". El punto de guarda está situado entre la fuente de tensión CA del instrumento de prueba y su medidor de corriente (Figura 11). Toda la corriente resultante de la aplicación de la tensión de prueba del instrumento intentará volver al punto de guarda. Las vías de retorno del instrumento de prueba del factor de potencia/factor de disipación suelen ser hasta tres (3) cables de medición: un cable "puesto a tierra" y dos (2) cables de baja tensión que están conectados entre el instrumento y el aparato que se está comprobando.

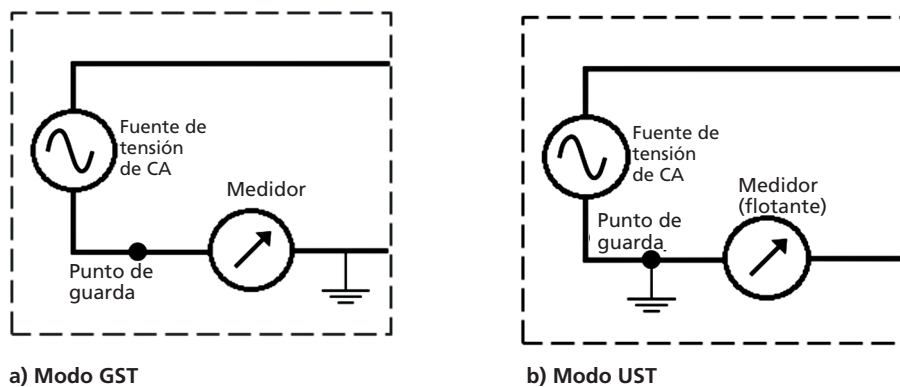


Figura 11: Instrumento para la prueba del factor de potencia/factor de disipación: Configuración del circuito de prueba interno

Los modos de prueba incluyen:

- GST - Tierra
- GST - Guarda
- UST

GST es un acrónimo de "grounded specimen test" (ejemplar de prueba puesto a tierra). En estas pruebas, el medidor está puesto a tierra, como se muestra en la Figura 11(a). La palabra "tierra" o "guarda" a su lado indica si el instrumento de prueba conectará internamente el cable (o cables) de baja tensión a tierra o al "punto de guarda" (suponiendo que el cable de baja tensión, cuyo uso es opcional, esté conectado en el panel de instrumentos de prueba). En GST: modo de puesta a tierra, el cable (o cables) de baja tensión es un cable de medición. En GST: modo de guarda, el cable (o cables) de baja tensión desvía el flujo de corriente en torno al medidor.

UST es un acrónimo de "ungrounded specimen test" (ejemplar de prueba no puesto a tierra). En modo UST, el punto de guarda está puesto a tierra y el medidor "flota" tal como se ilustra en la Figura 11(b). El flujo de corriente en el cable (o cables) de baja tensión pasará a través del medidor flotante para volver al punto de guarda y se medirá.

El cable de conexión a tierra siempre se utiliza en una prueba de factor de potencia/factor de disipación y está conectado entre el instrumento de prueba y la puesta a tierra del aparato sometido a la prueba. Aunque se denomina cable de puesta a tierra porque se conecta a la puesta a tierra del ejemplar de prueba y sirve para comparar el ejemplar puesto a tierra con la alimentación de tensión puesta a tierra, es también un cable conductor de corriente utilizado para medir o guardar. Cuando el medidor está puesto a tierra en el modo GST (Figura 11a), todo el flujo de corriente del cable de tierra pasa a través del medidor para volver al punto de guarda y se incluirá en la medición. En modo UST (Figura 11b), el punto de guarda está conectado a tierra, y todo el flujo de corriente del cable puesto a tierra se desvía del medidor para volver al punto de guarda (puesta a tierra). En modo UST, el cable de puesta a tierra sirve como mecanismo de protección para desviar la corriente y que no se mida.

Comprendiendo a la perfección los modos de prueba y con una representación dieléctrica de un aparato en sus manos, un técnico de pruebas debe ser capaz de determinar cómo realizar pruebas de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia en casi cualquier aparato (aunque los procedimientos de prueba de la mayoría de los aparatos eléctricos están disponibles a través de software y documentación; consulte el software y las guías de prueba de Megger).

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

TENSIÓN DE PRUEBA

Una prueba de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia, ejecutada adecuadamente, es una prueba no destructiva. La tensión de prueba monofásica de línea a tierra (L-G) suministrada por el instrumento no debe sobrepasar la tensión nominal línea a línea (L-L) del devanado energizado. Se aconseja precaución adicional cuando se prueba un transformador de distribución con devanado y puesta a tierra o un transformador de distribución monofásico con un terminal neutro. Estos transformadores pueden tener un sistema de aislamiento graduado¹³, de forma que la tensión de prueba debe mantenerse por debajo de la tensión nominal del terminal neutro.

Las tensiones de prueba estándar de la industria recomendadas generalmente se incluyen automáticamente en el software de prueba una vez que el técnico de pruebas indica la configuración y los factores de devanado del transformador que se va a poner a prueba.

En sistemas de aislamiento de papel-aceite ideales, se espera que las pruebas de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia realizadas a todas las tensiones de prueba inferiores al máximo recomendado indiquen el mismo factor de potencia/factor de disipación. Una dependencia de tensión inesperada (es decir, cuando el factor de potencia/factor de disipación cambia con la tensión de prueba) a menudo indica que el aislamiento es deficiente o puede indicar un problema en el circuito de prueba. Se recomienda una prueba a distintas tensiones (tensión por pasos) para la investigación de la dependencia de la tensión del factor de potencia/factor de disipación en los materiales de aislamiento.

Tradicionalmente, a fin de determinar si existe una dependencia de la tensión, se realiza una medición adicional del factor de potencia/factor de disipación con una tensión de prueba diferente y se comparan los resultados del factor de potencia/factor de disipación. Los instrumentos de prueba de factor de potencia/factor de disipación de Megger están equipados con detección de dependencia de la tensión automática exclusiva de Megger, lo que elimina la necesidad de pruebas adicionales. La característica se basa en una correlación detectada de un aparato con un problema de dependencia de tensión y los armónicos generados en su respuesta dieléctrica. VDD estima el contenido armónico en la respuesta medida y determina los armónicos creados por el ejemplar de prueba. Si el contenido armónico es demasiado alto, se avisa al técnico de pruebas para que realice pruebas de control a diferentes tensiones para confirmar que hay un problema de sensibilidad a la tensión.

Se han realizado pruebas de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia en transformadores (de aceite) en ausencia de líquidos aislantes como método para evaluar la humedad y el éxito de un secado. Esto requiere tensiones de prueba significativamente reducidas. A causa de la relativa insensibilidad del factor de potencia/factor de disipación (de frecuencia de línea) a la humedad a niveles bajos (consulte la Figura 12) y los peligros inherentes a la realización de pruebas de factor de potencia/factor de disipación tradicionales en los transformadores en ausencia de fluido aislante, esta práctica no es recomendable. Se remite al lector al Boletín TLM de Megger que describe el uso de la tecnología Megger IDAX - DFR para supervisar el proceso de secado de un transformador.

IV. ANÁLISIS

CAPACITANCIA – VERIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN

A menudo, los técnicos de pruebas buscan inmediatamente el resultado del factor de potencia/factor de disipación tras la finalización de una prueba de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia y comienzan a sacar conclusiones sobre el estado del aislamiento, olvidando enteramente la capacitancia. Tras la finalización de una prueba de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia, lo mejor es evaluar primero la capacitancia/corriente total. La evaluación de la capacitancia/corriente requiere que el sistema de aislamiento haya sido comprobado previamente y los resultados de capacitancia/corriente de las pruebas en fábrica o pruebas de campo anteriores estén disponibles (por ejemplo, a través de un informe, un archivo o, como en el caso de los pasatapas, impresa en la placa de características).

Sin un valor de referencia con el que comparar, la capacitancia generalmente no puede evaluarse en gran medida. Un técnico de pruebas, sin embargo, debe estar atento a resultados de prueba de capacitancia/corriente demasiado bajos¹⁴, como 1 - 2 mA o menos (aproximadamente 365 pF - 700 pF, o menos), lo cual sería particularmente inusual para sistemas de aislamiento devanado-tierra de un transformador de potencia C_H o C_L . Esa corriente/capacitancia baja podría ser la causa de una mala conexión a tierra, conexiones de prueba deficientes o un modo de prueba designado incorrectamente. Sin embargo, si esa corriente/capacitancia baja se ha detectado en el sistema de aislamiento de interdevanado de un transformador tales como C_{HL} o C_{HT} , aunque atípico, esto puede no ser motivo de preocupación inmediata. Más bien, la medición de corriente/capacitancia C_{HL} baja puede estar indicando la presencia de un apantallado puesto a tierra entre los devanados de alta y baja tensión, en cuyo caso se espera un resultado de corriente/capacitancia bajo. De modo similar, en algunos transformadores multidevanado, un devanado puede parecer un apantallado puesto a tierra para el circuito de prueba (por ejemplo, el devanado de baja tensión (BT) se intercala entre el devanado de alta tensión (AT) y el de tensión terciaria (TV)) y resultar en una medición de corriente/capacitancia baja (p. ej., para C_{HT}).

Cuando es posible la comparación, la medición de capacitancia/corriente total no debe cambiar respecto a los resultados anteriores. La confirmación de que este es el caso valida que, en realidad, se está poniendo a prueba lo que se cree que se está poniendo a prueba (ni más ni menos) y que los atributos físicos generales del sistema de aislamiento no han cambiado en gran medida¹⁵.

En un transformador de potencia, la capacitancia/corriente total no debe diferir en más de ± 1 % respecto a la medición anterior¹⁶. Si se produce un cambio mayor, debería investigarse la causa antes de concentrarse en la evaluación del factor de potencia/factor de disipación.

13 Menos aislamiento alrededor del extremo neutro del devanado

14 Como regla general para cualquier aparato eléctrico, si el total de la corriente medida es inferior a 300 μ A, (10 kV o el equivalente a 10 kV, frecuencia de línea) el factor de potencia/factor de disipación se omite porque, en estos casos, el factor de potencia/factor de disipación fluctúa notablemente con pequeños e insignificantes cambios de corriente.

15 La capacitancia no es especialmente sensible a la deformación del devanado. Existen casos donde se ha movido un devanado y la capacitancia no ha cambiado.

16 A lo largo de la vida útil de un transformador, no es atípico que la capacitancia cambie, pero esto no debería superar el 2 % a lo largo de, por ejemplo, más de 40 años.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

En la tabla 1 se enumeran las razones por las que la capacitancia puede cambiar respecto a los valores esperados en los sistemas de aislamiento C_H , C_{HL} y C_L de un transformador de dos devanados.

C_H		<ul style="list-style-type: none"> ■ Las líneas de AT no han sido desconectadas ■ Deformación del devanado de AT ■ Se han cambiado los pasatapas de AT ■ Cuba / Tanque no puesto a tierra ■ Modo de prueba incorrecto ■ Cuba drenada con respecto a una llena de aceite
C_{HL}		<ul style="list-style-type: none"> ■ Deformación de devanado de AT o BT ■ Cuba drenada con respecto a una llena de aceite ■ Modo de prueba incorrecto ■ Normalmente el apantallado puesto a tierra entre los devanados de AT o BT, si está presente (poco común), se desconecta de tierra ■ Cuba / Tanque no puesto a tierra
C_L		<ul style="list-style-type: none"> ■ Líneas de BT no desconectadas ■ Deformación del devanado de BT ■ La puesta a tierra del núcleo es incorrecta, lo que da lugar a una disminución de la capacitancia ■ Se han cambiado los pasatapas de BT ■ Cuba / Tanque no puesto a tierra ■ Modo de prueba incorrecto ■ Cuba drenada con respecto a una llena de aceite

TABLA 1: Motivos por los que la capacitancia puede cambiar respecto a la anterior

- Como se observa en la Tabla 1, una de las razones de la disminución en la capacitancia C_L puede ser un cambio en la integridad de la conexión a tierra del núcleo. Un núcleo de transformador está aislado de tierra (con un sistema de aislamiento que puede ser etiquetado, C_{core}) y, a continuación, el fabricante proporciona una referencia de tierra para el núcleo en, por lo menos, una ubicación del núcleo (cortocircuitando efectivamente $C_{\text{núcleo}}$). Si la puesta a tierra del núcleo se pierde o se ve seriamente comprometida (por ejemplo, casi se quema y se abre), la capacitancia C_L en un transformador en forma de núcleo disminuirá notablemente. Esta es la razón:

El devanado de baja tensión en un transformador de dos devanados es típicamente el devanado concéntrico más interno, más cercano a la pierna del núcleo. Una prueba de C_L incluye el aislamiento entre el devanado de baja tensión y los ponentes de potencial a tierra, tales como el núcleo del transformador. Si se elimina la puesta a tierra del núcleo, C_L se coloca en serie con el aislamiento $C_{\text{núcleo}}$ en el circuito de prueba y no pueden aislarse para la medición.

Se sabe que la capacitancia equivalente de dos condensadores en serie es menor que cualquiera de los dos valores de capacitancia individuales (por ejemplo, C_L o $C_{\text{núcleo}}$). Por lo tanto, si se conoce la capacitancia C_L de una prueba anterior, aunque la capacitancia de $C_{\text{núcleo}}$ presumiblemente es desconocida, se reconoce que la capacitancia de C_L aparente (C_L') seguirá siendo inferior a C_L .

FACTOR DE POTENCIA/FACTOR DE DISIPACIÓN

El factor de potencia/factor de disipación generalmente refleja con qué eficacia el sistema de aislamiento está cumpliendo su propósito de mantener el aislamiento eléctrico entre puntos de potencial diferente dentro de un aparato eléctrico energizado. Con pocas excepciones¹⁷, un factor de potencia/factor de disipación del 0 % indica un sistema con cero pérdidas y un resultado inferior en la prueba de factor de potencia/factor de disipación indica un sistema de aislamiento en mejor estado que uno con un factor de potencia/factor de disipación superior.

Los sistemas de aislamiento normalmente tienen pérdidas, incluso cuando están nuevos. A menudo, a medida que pasa el tiempo o que un aislamiento se contamina, el factor de potencia/factor de disipación aumenta. Pero aquí se debe tener cuidado por las siguientes razones:

- El factor de potencia/factor de disipación representa el estado promedio¹⁸ del sistema de aislamiento total sometido a prueba. Si el sistema es lo suficientemente grande, cierta contaminación localizada puede ser imposible de ver. Eche un

¹⁷ Ver extracto sobre factor de potencia/factor de disipación negativos

¹⁸ Eche un vistazo a cualquier índice promedio: cuanto menor sea el tamaño de la muestra (o conjunto), mayor será la influencia que un cambio en un elemento ejerza en el conjunto. Si el conjunto es muy grande, los cambios en un elemento pueden incluso no ser perceptibles.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

vistazo a las dimensiones del ejemplar que está probando. Esto debería ayudar a dar forma a sus expectativas acerca de la capacidad de diagnóstico de esta prueba. Un ejemplo es un autotransformador monofásico de gran tamaño con un terciario inaccesible con una fuerte mantenimiento de diferencia de frecuencia constante en el collarín alrededor del aislante inferior de uno de los pasatapas. Solo puede realizarse una (1) medición del factor de potencia/factor de disipación y la capacitancia en un transformador así (todos los terminales de las bobinas se conectan y se energizan juntos para una medición de aislamiento de bobina a tierra). La contaminación localizada no dio lugar a ningún cambio en el factor de potencia/factor de disipación (antes y después).

- El aumento de los niveles de algunos contaminantes, en particular la humedad, no se traduce en cambios notables en el factor de potencia/factor de disipación hasta que la contaminación alcanza un nivel determinado. La figura 12 ilustra este punto. Aquí se traza el factor de disipación ($\tan \delta$) a 50 Hz (en una escala logarítmica) para un transformador nuevo y un transformador que se ha usado ya durante algún tiempo a medida que se contaminan cada vez más con humedad. Las curvas de ambas respuestas son relativamente planas a bajos niveles de humedad; en esta región, el factor de disipación/factor de potencia no aumenta notablemente a medida que aumenta la humedad, de manera que alguien que confíe en estos valores como indicador no será consciente de que la contaminación por humedad está presente y expresa una tendencia al alza. Solo cuando la humedad del papel es de al menos 2,5 %, las curvas se incrementan marginalmente, y con un 3,5 % de humedad, las curvas aumentan notablemente, momento en el cual podría decirse que el factor de disipación/factor de potencia tiene una elevada sensibilidad a la humedad. A pesar de su sensibilidad a la humedad, que se presenta en algún lugar, en general alrededor del 3 %, ¡el factor de disipación todavía es solo del 0,5 % cuando el contenido de humedad llega al 3 %! En perspectiva, los operarios se dan cuenta cuando el porcentaje de contenido de agua supera el 1,7 %, y al 2,5 % normalmente programan una unidad de procesamiento con el fin de secar el transformador.

Además debe tenerse en cuenta la divergencia o la separación de las dos curvas a bajos niveles de humedad, que indica que un único valor de factor de disipación puede representar una amplia gama de niveles de contaminación por humedad, que depende en gran medida de la edad del sistema de aislamiento. Por ejemplo, se obtiene un factor de disipación ($\tan \delta$) del 0,3 % para contenidos de humedad entre el 0,5 % (para el transformador con cierta antigüedad) y el 2 % (para el transformador nuevo). Esto presenta un desafío, ya que no es una tarea sencilla cuantificar el envejecimiento de un transformador. La vida útil (años de servicio) no es un indicador fiable de cómo ha envejecido un sistema de aislamiento, puesto que las variables medioambientales y del sistema, mantenimiento y otros factores influyen en la forma en que envejece el aislamiento.

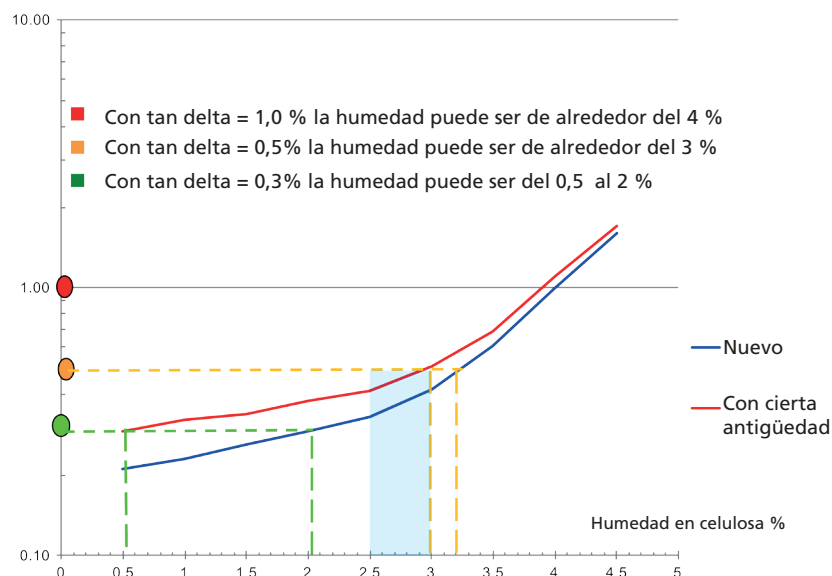


FIGURA 12 Sensibilidad del factor de disipación (de frecuencia de línea) ($\tan \delta$) a la humedad cambiante en transformadores [4]

Valorar la importancia de un cambio en el factor de potencia/factor de disipación es complicado. Esto también se debe al hecho de que el factor de potencia/factor de disipación es una representación promedio. Cuando el factor de potencia/factor de disipación cambia, es imposible saber si esto es debido a la contaminación generalizada o al envejecimiento, o debido a un problema localizado, todos los cuales se enfocan de manera diferente. Para subrayar este punto, pensemos en un caso donde el promedio de una clase en un examen es de un 75 y hay 2 estudiantes en la clase; es imposible saber a partir de este índice de promedio si ambos estudiantes obtuvieron un 75 o si un alumno obtuvo un 100, mientras que el otro logró un 50, o alguna variación entre ellos.

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

Un problema localizado aumenta significativamente el riesgo de fallo dieléctrico, por lo que es de suma importancia identificar estos problemas. No solo es imposible caracterizar la naturaleza de unas pérdidas crecientes y determinar cuándo existe un problema localizado solo a partir del factor de potencia/factor de disipación; cuando hay un problema localizado, el factor de potencia/factor de disipación podría no cambiar considerablemente debido a la influencia promedio del aislamiento circundante en buen estado, que ocultaría la gravedad del problema existente. Un aumento muy pequeño en el factor de potencia/factor de disipación podría ser la manifestación de un problema muy grave. Mientras tanto, si un cambio en el factor de potencia/factor de disipación se debe al envejecimiento, esto es algo esperado, en cuyo caso, un procedimiento apropiado puede ser incrementar la vigilancia a través de pruebas más frecuentes, en contraste con un problema localizado que requiere atención inmediata. Un pequeño cambio en el factor de potencia/factor de disipación debido al envejecimiento podría exigir nada más que tomar nota y repetir la prueba otra vez dentro de varios años. La contaminación generalizada que provoca un cambio podría requerir una solución, pero puede no ser inmediata o urgente; al contrario, podría ser completamente razonable programarla en un período de mantenimiento próximo más adecuado. Por otro lado, si el contaminante es la humedad, para cuando su presencia provoca un cambio en el factor de potencia/factor de disipación, se podría haber superado el momento en que habría sido más prudente programar el procesamiento/secado del transformador. Si fuera posible determinar la causa de un cambio en el factor de potencia/factor de disipación, podrían desarrollarse más directrices prácticas.

C_H		<ul style="list-style-type: none"> ■ Las líneas de AT no han sido desconectadas ■ Uno o más pasatapas de AT están en mal estado o en un estado cambiante ■ Fuga excesiva de la superficie en los pasatapas de AT (lluvia, nieve, sal, polvo, etc.). ■ Uso de capas de goma para lograr holguras eléctricas ■ Cuba / Tanque no puesto a tierra (factor de potencia negativo) ■ Temperatura (si no se usa un factor de corrección preciso) ■ Humedad u otro contaminante ■ Envejecimiento ■ Descarga parcial ■ Mantenimiento de diferencia de frecuencia constante interno o ruta resistiva a tierra no intencionada
C_{HL}		<ul style="list-style-type: none"> ■ Pantalla de interdevanado puesta a tierra (factor de potencia negativo) ■ Cuba / Tanque no puesto a tierra (factor de potencia negativo) ■ Temperatura (si no se usa un factor de corrección preciso) ■ Humedad u otro contaminante ■ Envejecimiento ■ Descarga parcial ■ Mantenimiento de diferencia de frecuencia constante interno o ruta resistiva a tierra no intencionada
C_L		<ul style="list-style-type: none"> ■ Líneas de BT no desconectadas ■ Uno o más pasatapas de BT están en mal estado o en un estado cambiante ■ Fuga excesiva de la superficie en los pasatapas de BT (lluvia, nieve, sal, polvo, etc.). ■ Uso de capas de goma para lograr holguras eléctricas ■ Cuba / Tanque no puesto a tierra (factor de potencia negativo) ■ Temperatura (si no se usa un factor de corrección preciso) ■ Humedad u otro contaminante ■ Envejecimiento ■ Descarga parcial ■ Mantenimiento de diferencia de frecuencia constante interno o ruta resistiva a tierra no intencionada

TABLA 2: Motivos por el que el factor de potencia/factor de disipación puede cambiar respecto a los anteriores

Dadas estas incertidumbres, cuando se compara con los resultados de pruebas anteriores, cualquier cambio observado en el factor de potencia/factor de disipación merece atención. La tabla 2 enumera las razones por las que el factor de potencia/factor de disipación puede diferir respecto a los resultados anteriores para sistemas de aislamiento de un transformador de dos devanados C_H , C_{HL} y C_L .

Tabla 2, notas:

- El aislamiento activo de los pasatapas de tensión alta/baja/terciaria está incluido en la medición de C_H / C_L / C_T , respectivamente. Como se observa en la Tabla 2, es posible que el estado de los pasatapas de un devanado esté influyendo en las respectivas mediciones, para mejor o para peor, pero en cualquier caso, de modo que el factor de potencia/factor de disipación no es representativo del estado real de los materiales de aislamiento de C_H / C_L / C_T en el interior de

Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia

la cuba del transformador. También existe la posibilidad de que el sistema de aislamiento del aislador colectivo de un devanado constituya sólo un pequeño porcentaje del aislamiento total incluido en la medición de $C_H/C_L/C_T$ y, por tanto, no cause ningún cambio notable en el factor de potencia/factor de disipación $C_H/C_L/C_T$ cuando el estado del sistema de aislamiento de aislador cambie. Es útil saber si y cómo los pasatapas del devanado influyen en la medición de $C_H/C_L/C_T$ de modo que, si los pasatapas tienen potencial o tocan los electrodos, el aislamiento activo de los pasatapas debe comprobarse por separado mediante pruebas de C1 para facilitar un cálculo que reste correctamente su contribución de la medición $C_H/C_L/C_T$.

- También se hace referencia en la Tabla 2 a que el factor de potencia/factor de disipación es sensible a la temperatura. Por ejemplo, a medida que un transformador se enfría tras haberse retirado del servicio para su puesta a prueba, el resultado de la prueba de factor de potencia/factor de disipación cambiará si la prueba se repite simplemente a diferentes temperaturas de aislamiento. Por lo tanto, para establecer una comparación significativa entre pruebas, todos los resultados de las pruebas de factor de potencia/factor de disipación deben ser normalizados (o corregido) a valores de factor de potencia/factor de disipación equivalentes a 20°C para ajustar la influencia de la temperatura. El problema aquí es que no hay una única curva de corrección de temperatura que se adapte a todos los casos, porque la respuesta térmica dieléctrica no es una curva única para todos los estados; el envejecimiento, la humedad y la contaminación también influyen. Las curvas de corrección de temperatura que se han utilizado durante décadas no son válidas y pueden introducir errores que luego complican el análisis. De hecho, algunas normas recomiendan dejar de usar estas tablas/curvas de corrección [5]. Una solución más completa y una mejor práctica de pruebas de transformadores es aplicar el algoritmo de DFR para la corrección individual de temperatura; esto proporciona una corrección fiable y coherente para un valor normalizado de factor de potencia/factor de disipación que pueda compararse entre fechas de prueba. Se remite al lector al boletín TLM "Corrección de temperatura individual (CCI)" de Megger para obtener más información.
- **Factor de potencia/factor de disipación negativo:** Como se indica en la Tabla 2, es posible, aunque no es común, obtener un factor de potencia/factor de disipación negativo al realizar las pruebas de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia en un transformador. Puede obtenerse un factor de potencia/factor de disipación C_{HL} negativo si hay un apantallado puesto a tierra entre los devanados, lo cual redundaría en la correspondiente medición inusualmente baja de la corriente/capacitancia. Siempre que el factor de potencia/factor de disipación no cambie respecto a los resultados de pruebas anteriores, esto no es motivo de preocupación. Asimismo, un factor de potencia/factor de disipación C_{HT} negativo puede obtenerse en un transformador multidevanado donde el devanado de baja tensión se intercala entre los devanados de tensión terciaria y de alta tensión y, por lo tanto, se presenta como un apantallado puesto a tierra para el circuito de prueba. Otra causa de valor negativo en una prueba de factor de potencia/factor de disipación en un sistema de aislamiento interdevanado, como C_{HL} , es si el terminal neutro de un devanado de baja tensión conectado en Y se deja conectado a tierra, ya sea por error o porque está puesto a tierra internamente y no es prácticamente accesible. No se esperan resultados negativos en la prueba de factor de potencia/factor de disipación bajo ningún concepto en un sistema de aislamiento de devanado a tierra, como la C_H , C_L o C_T . En tales casos, debe comprobarse la puesta a tierra del transformador o de las conexiones de prueba.

Si se dispone de más de un conjunto de resultados anteriores de la prueba de factor de potencia/factor de disipación, pueden calcularse las tendencias. La tendencia es el mejor criterio de evaluación. Cuando hay muchos puntos de prueba disponibles, es posible filtrar los valores atípicos/puntos de datos erróneos que reflejen una mala preparación de la prueba, una compensación incorrecta de las influencias de la temperatura en el factor de potencia/factor de disipación, o condiciones de prueba no deseables.

Si no hay resultados de pruebas anteriores con los que comparar, existen directrices generales para indicar aproximadamente cuál debería ser el factor de potencia/factor de disipación adecuado de un aparato (Tabla 3). Un transformador construido con materiales de pérdida relativamente baja y que se haya manipulado con cuidado durante el proceso de fabricación y ensamblaje en el campo debe cumplir con estos límites. Sin embargo, más allá de su uso para estos fines, no se recomienda comparar con los límites o con transformadores análogos/de estructura similar como herramienta para analizar los resultados de factor de potencia/factor de disipación a lo largo de la vida útil de un transformador. Más bien, los valores de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia deben compararse con resultados anteriores.

Líquido aislante	kV nominal	Nominal/nuevo límite de FP	Límite en aparatos con cierta antigüedad
Aceite mineral	< 230 kV	0,5 %	1,0 %
Aceite mineral	≥ 230 kV	0,4 %	1,0 %
Éster natural ¹⁹	Todos	1,0 %	1,0 %

TABLA 3: Límites de factor de potencia recomendados para transformadores de potencia según IEEE C57.152-2013

RESPUESTA DIELECTRICA EN FRECUENCIA (DFR)

Las pruebas de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia son una herramienta de comprobación del aislamiento muy utilizada, pero por supuesto no es infalible y, en particular en cuanto a detección de humedad, no siempre conduce a las mejores decisiones para contribuir a la longevidad de los aparatos. La prueba se popularizó gracias a sus éxitos con pasatapas de capacitancia graduada, y su uso se propagó. Las pruebas de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia también se fomentaron por su capacidad para la detección temprana de la contaminación por agua. Ahora se sabe que las pruebas de factor de potencia/factor de disipación y capacitancia (realizadas en frecuencia de línea) no son tan sensibles a niveles bajos (aunque factibles) de contaminación del agua como se pensaba. El potencial mucho mayor de la medición se debe a la información que el factor de potencia/factor de disipación (y capacitancia) proporciona al tener en cuenta su comportamiento a través de una gama de frecuencias, prueba que se conoce como DFR, o frecuencia de respuesta dieléctrica. Se remite al lector a los boletines TLM DFR TLM de Megger para una mayor comprensión.

19 "Los números que se muestran aquí para ésteres naturales sólo son provisionales, ya que todavía no hay curvas de corrección establecidas por la industria".

REFERENCIAS

- [1] J. Duplessis, M. Öhlén, M. Hellquist,
"Insulation Diagnostic Methods: Achieving a More Effective
Test Program", SEEEI Convention, diciembre 2015, Eilat, Israel.
- [2] R. Del Vecchio, B. Poulin, P. Feghali, D. Shah, R. Ahuja,
"Transformer Design Principles: with Applications to Core-
Form Power Transformers", capítulo 1.7, CRC Press, 2002.
- [3] J. Duplessis, "Transformer Fundamentals, Materials &
Design", presentación en PowerPoint, 2003.
- [4] M. Öhlén, A. Dawood,
"Moisture in Power Transformers; - How to Estimate and
What to Do?", GCC CIGRE 2013, Abu Dhabi.
- [5] Boletín de gestión de la vida útil del transformador (TLM) de
Megger: Corrección de temperatura individual, dic. 2016.