

## BOLETÍN DE GESTIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL TRANSFORMADOR (TLM):

### Corriente de excitación

#### Introducción:

Los transformadores son nodos importantes en un circuito eléctrico. Transforman la tensión hacia arriba y hacia abajo en función de las circunstancias (por ejemplo, hacia arriba para optimizar el transporte de energía en distancias largas y, finalmente, hacia abajo, hasta un nivel apto para el consumo). De hecho, un transformador es una ruptura física en un circuito eléctrico, como indica claramente el símbolo que se usa para representarlo en diagramas unifilares (Figura 1). No obstante, un transformador es un nodo prácticamente sin fisuras, es decir, casi toda la energía que entra, "pasa" por el transformador y sale de él con poca pérdida.

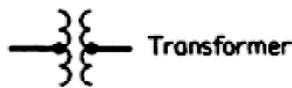
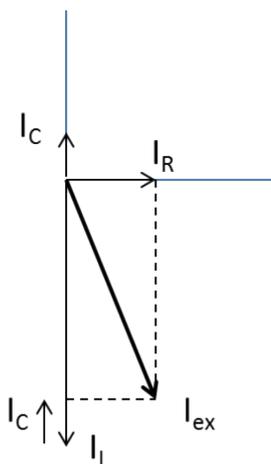


FIGURA 1: Símbolo del transformador en diagramas unifilares

La "acción del transformador", que puede resumirse como "el uso de un campo magnético creado por el flujo de corriente que pasa por un devanado para inducir tensión en otro devanado", es el fenómeno que permite la transferencia continua de potencia a través de estas rupturas físicas (los transformadores) en un circuito eléctrico. La diferencia en el número relativo de espiras entre cada uno de los devanados de un transformador hace posible la transformación en tensión de salida correspondiente con respecto a la tensión de entrada.

La corriente de excitación es una representación de la energía necesaria para crear y mantener la acción del transformador. Incluye la energía que se consume en pérdidas y la energía recuperable, es decir, eléctrica y magnética. Por lo tanto<sup>1</sup>, la acción del transformador es un proceso continuo y no algo que suceda una sola vez. Una definición formal y concreta de la corriente de excitación es la corriente RMS<sup>2</sup> que una fuente de energía suministra a un transformador con una frecuencia específica y que es necesaria para desarrollar una tensión determinada entre terminales determinados del transformador cuando no fluye corriente de carga hacia ningún devanado del transformador [1].

En un transformador ideal, no habría flujo de corriente en su circuito primario energizado si el transformador no está alimentando una carga o, dicho de otro modo, cuando no hay flujo de corriente en los circuitos secundarios del transformador, porque la corriente primaria emula a la secundaria. Sin embargo, en un transformador real, incluso sin conexiones a los terminales secundarios del transformador (p. ej., los devanados secundarios están abiertos y, por lo tanto, no hay corriente secundaria), se creará corriente a través de los devanados primarios cuando se energice el transformador. Esta es la corriente de excitación.



Cada transformador tiene una corriente de excitación exclusiva porque:

1. La energía necesaria para crear y mantener la acción de transformador es distinta para cada transformador.
2. La cantidad de pérdidas que se producen durante el proceso de establecimiento y mantenimiento de la acción de transformador es distinta.
3. La cantidad de energía necesaria para cargar eléctricamente el aislamiento entre las piezas que participan en el proceso (por ejemplo, el aislamiento entre espiras del devanado) es distinta para cada transformador.

Estos tres componentes se incluyen en una medición de la corriente de excitación,  $I_{ex}$  (Figura 2). Concretamente, el primer componente de la medición de una corriente de excitación es la corriente de magnetización, representada por  $I_L$ , que es necesaria para generar un campo magnético en el núcleo del transformador. Normalmente, constituye la parte predominante de la medición de una corriente de excitación.

El segundo componente es una corriente resistiva, o  $I_R$ . Es una medida de las pérdidas, es decir, la cantidad de energía que se consume en el proceso de establecer la acción del transformador, y que se pierde en forma de calor. Incluye las pérdidas del núcleo, tales como la histéresis y las pérdidas de corriente de Foucault, y en una medida mucho menor, las pérdidas del aislamiento entre espiras.

Por último, el tercer componente es la corriente capacitiva, o  $I_C$ , necesaria para generar el campo eléctrico en el aislamiento. La corriente capacitiva es insignificante en muchos casos<sup>3</sup>.

FIGURA 2: Componentes de la corriente de excitación

<sup>1</sup> Energía = Potencia x Tiempo

<sup>2</sup> La corriente de excitación no es sinusoidal y contiene armónicos impares, predominantemente la corriente de tercer armónico. La corriente de excitación se registra mediante un medidor de RMS que lee la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las corrientes armónicas.

<sup>3</sup> En transformadores de extra alta tensión, la corriente capacitiva puede ser del mismo orden de magnitud que la corriente de magnetización porque la calidad del acero del núcleo es notablemente buena, lo que reduce los requisitos de corriente de magnetización ( $I_L$ ). De hecho, unida a una mayor capacitancia entre espiras como medio para controlar la distribución de tensión de impulso, ya no son raros los transformadores cuya contribución de corriente capacitiva es mayor que la de inductiva.

## Corriente de excitación

### Prueba de fábrica:

La corriente de excitación se mide en fábrica, junto con las pérdidas del transformador en vacío. Esta prueba 2 en 1 se denomina "prueba de pérdidas en vacío y de corriente de excitación" y se utiliza para comprobar el rendimiento garantizado por el fabricante<sup>4</sup>. Si las pérdidas en vacío son mayores que los valores garantizados, las causas pueden ser errores o problemas de fabricación y esta prueba de fábrica proporciona a la vez una evaluación de diagnóstico concurrente.

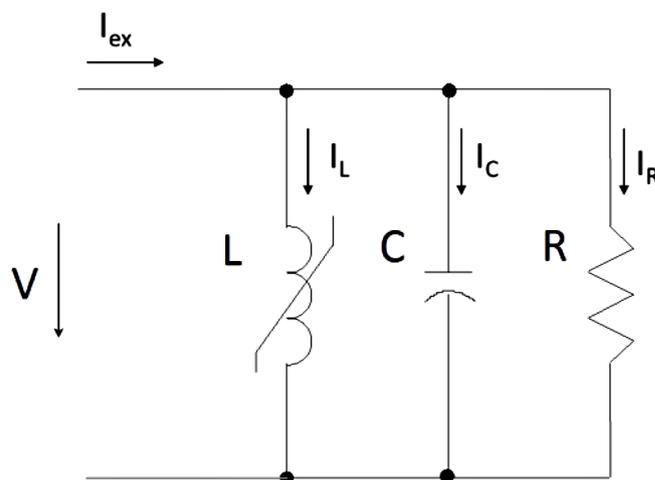
Para la prueba, el transformador se excita con tensión nominal trifásica a la frecuencia nominal. Los instrumentos de la prueba se suelen colocar en el devanado del lado de baja tensión del transformador, con los demás devanados abiertos. La corriente de excitación medida se expresa como un porcentaje de la corriente nominal del devanado.

### Prueba de campo:

En la década de 1960 surgió la idea de realizar mediciones de excitación en campo mediante un instrumento de prueba de factor de potencia tradicional. Los instrumentos de factor de potencia suministran tensión de CA y miden la corriente, de forma que cumplen un requisito fundamental para realizar esta prueba. Posteriormente, la prueba se convirtió en una prueba de campo habitual con un gran valor de diagnóstico.

La medición de campo de la corriente de excitación, como se denomina, se suele llevar a cabo en el devanado de mayor tensión de un transformador. El motivo es la limitada capacidad de salida de los instrumentos de pruebas de campo portátiles tradicionales<sup>5</sup>, que normalmente está por debajo de la necesaria para excitar correctamente un número significativo de transformadores/reguladores de tensión desde sus respectivos devanados de baja tensión (con la alta tensión de prueba deseada<sup>6</sup>). Explicado de forma sencilla, el devanado de alta tensión de un transformador tiene una mayor impedancia de circuito abierto,  $Z_m$ , que el devanado de baja tensión, por lo que un instrumento de prueba se carga menos al excitar el transformador desde el devanado de alta tensión. Durante la prueba se miden dos parámetros, la corriente de CA y la pérdida (que se indica en vatios). También se da una indicación sobre si el componente capacitivo o inductivo es dominante en el resultado de la prueba de corriente de excitación, que tiene importancia para realizar análisis.

La impedancia de circuito abierto o de magnetización,  $Z_m$ , de un transformador, formada por resistencia (relacionada con las pérdidas medidas en la prueba) y reactancia (incluida una inductancia no-lineal y un componente de capacitancia), representa la oposición total al flujo de corriente de excitación (Figura 3). Puesto que la impedancia de magnetización de un transformador no es lineal<sup>7</sup>, no se pueden comparar las mediciones hechas a diferentes tensiones. Así, las mediciones de "corriente de excitación y pérdida" realizadas en el terreno a 10 kV (y con excitación monofásica) no se pueden comparar con la medición de excitación de fábrica realizada con tensión nominal (y con excitación trifásica). Por este motivo, algunos clientes piden que se hagan pruebas de corriente de excitación monofásica con 10 kV en la fábrica<sup>8</sup>.



**FIGURA 3:** Impedancia de circuito abierto o de magnetización,  $Z_m$

4 Las pérdidas en vacío se usan también como parámetro en las pruebas de incremento de temperatura.

5 La mayoría de los instrumentos proporcionan una salida de corriente de hasta 300–500 mA con 10–12 kV.

6 Es así cuando se intenta excitar el devanado de BT con una tensión de prueba de 10–12 kV. Dependiendo del transformador o regulador de tensión, se puede superar con facilidad una corriente de excitación de 300 mA con esta tensión. Si se reduce la tensión de prueba se reduce la corriente de excitación del transformador/regulador de tensión que debe medirse.

7 Sus características cambian con la tensión que se aplica.

8 Se pueden utilizar en comparaciones con las primeras mediciones de corriente de excitación realizadas en el terreno.

## Corriente de excitación

### Capacidades de diagnóstico de una prueba de campo de corriente de excitación:

Una prueba de corriente de excitación tiene muchas capacidades de diagnóstico, que en conjunto proporcionan información sobre el estado dieléctrico, magnético/térmico y mecánico del transformador.

Una prueba de medición de corriente de excitación mediante un instrumento de prueba de factor de potencia, además de usarse como medición de campo, se puede usar como herramienta de evaluación dieléctrica, lo cual llena un importante vacío de las pruebas de factor de potencia/factor de disipación (FP/FD) y de capacitancia. Durante una prueba de FP/FD en un transformador, los devanados están en cortocircuito para crear electrodos de prueba equipotenciales. Si bien así se pueden realizar pruebas de aislamiento entre los electrodos de la prueba, con los devanados en cortocircuito, no se impone ningún campo sobre el aislamiento entre las espiras de los devanados, por lo que no se prueba el aislamiento entre espiras. Sin embargo, no sucede así con la prueba de corriente de excitación, que, por ser una prueba de circuito abierto, sí prueba el aislamiento entre espiras.

Los fallos dieléctricos que puede revelar una medición de la corriente de excitación son:

- Condiciones de cortocircuito entre espiras de los devanados
- Condiciones de cortocircuito parciales entre espiras
- Condiciones de cortocircuito de devanado a tierra
- Problemas de trazas conductivas en el aislamiento (por ejemplo, trazas conductivas que podrían aparecer en algún punto a lo largo de un devanado con respecto a tierra o trazas conductivas de un devanado de fase a otro adyacente)

Cabe señalar que una importante ventaja de la prueba de corriente de excitación sobre otras pruebas de diagnóstico también conocidas por sus capacidades para detectar condiciones de cortocircuito (es decir, relación de transformación, resistencia de devanado y análisis de respuesta de barrido de frecuencia) es su capacidad exclusiva para detectar condiciones de cortocircuito parciales entre espiras, algo que los demás métodos no "ven". Se trata de una condición por la que uno (o varios) de los hilos que forman el devanado conductor de una espira forma un cortocircuito con uno (o varios) de los hilos que forman el devanado conductor de una espira adyacente. Dicho de otro modo, se trata de un fallo que se está desarrollando pero no es todavía un fallo entre espiras en cortocircuito completo.

La prueba de corriente de excitación es una de las pocas pruebas de diagnóstico eléctrico que proporciona información sobre la integridad del circuito magnético de un transformador<sup>9</sup>. Puede detectar muchos problemas del núcleo, tales como:

- Daños en el aislamiento de laminación del núcleo
- Separaciones en las juntas del núcleo
- Cambios en las características del núcleo del transformador
- Corrientes anormales en circulación por el núcleo (que pueden deberse a conexiones a tierra accidentales<sup>10</sup>)
- Y problemas de construcción del núcleo por defectos de fabricación o mano de obra no calificada, en el caso de transformadores recientemente fabricados

Cabe señalar que algunos de los problemas mencionados pueden ir acompañados por el recalentamiento del transformador.

Desde el punto de vista del estado mecánico, el alcance del diagnóstico de una prueba de corriente de excitación con respecto a cambiadores de tomas, tanto desenergizados (DETC) como en carga (OLTC), es impresionante. Especialmente en el caso de los cambiadores de tomas bajo carga (OLTC) de tipo reactivo, la medición de la corriente de excitación y la pérdida es una prueba de diagnóstico muy eficaz. Esta prueba puede detectar y, en muchos casos, identificar problemas del cambiador de tomas tales como:

- Contactos con acumulación de coque y desgaste excesivo
- Contactos móviles sueltos
- Problemas de alineación
- Cableado incorrecto entre la toma del devanado y el OLTC
- Conexiones invertidas hacia el autotransformador preventivo (PA) en un OLTC

<sup>9</sup> Otras son la prueba de equilibrio magnético y el análisis de respuesta de frecuencia de barrido (SFRA).

<sup>10</sup> En general, las pruebas de corriente de excitación no son sistemáticamente un método efectivo para confirmar la existencia de conexiones a tierra accidentales, que una medición de corriente de excitación podrían no detectarse en absoluto. Con esta finalidad, es más aconsejable recurrir a una prueba de resistencia de aislamiento en CC en el núcleo.

## Corriente de excitación

- Pasador/tornillo de fijación roto en el varillaje que acciona el interruptor de reversa [2]
- Problemas en el autotransformador preventivo (PA), el autotransformador o el transformador en serie de un OLTC, como espiras en circuito abierto, espiras en cortocircuito o conexiones de alta resistencia

En relación con problemas de devanados en general, además de los cortocircuitos de devanado entre espiras ya mencionados, la prueba de corriente de excitación puede detectar algunas condiciones de circuito abierto, algo que depende en gran medida del devanado o la ubicación del circuito abierto. Sin embargo, las condiciones de circuito abierto se suelen diagnosticar de forma mucho más fiable mediante una prueba de CC de resistencia de devanados. Por ejemplo, un circuito abierto en el devanado secundario o en el devanado de las tomas, por lo general, no se detectará en una medición de corriente de excitación.

### ¿Cómo funciona?

Cuando se crea corriente de excitación en un transformador desde una fuente de alimentación, se acumula un flujo en el núcleo del transformador y se inducirá una tensión en cada espira de cada devanado que cruce, incluido el devanado energizado<sup>11</sup>. Como consecuencia de la uniformidad del flujo en el núcleo, se inducirá la misma tensión en cada espira. La suma de las tensiones inducidas en las espiras del devanado energizado se denomina fuerza contra-electromotriz (o FCEM<sup>12</sup>) y es prácticamente igual, en magnitud, a la tensión aplicada al devanado. El valor RMS de la FCEM (inducido en el primario) viene dado por:

$$V = 4,44 fN\Phi \quad [1]$$

Donde  $f$  es la frecuencia,  $N$  es el número de espiras del devanado energizado y  $\Phi$  es el flujo del núcleo.

La Ley de tensión de Kirchoff establece que la suma de todas las elevaciones de tensión en cualquier lazo en cualquier instante debe ser cero<sup>13</sup>. Por lo tanto, cuando se energizan los devanados primarios de un transformador, por ejemplo, la tensión aplicada más la FCEM (creada por autoinductancia) más la elevación de tensión creada por el flujo de corriente de excitación por la resistencia de los conductores del devanado energizado debe ser cero. Se generará un flujo hasta el punto en el que se alcance este equilibrio, es decir, hasta que la suma de las tensiones sea cero. El transformador toma de la fuente de alimentación la corriente de excitación necesaria para generar esta magnitud de flujo. Durante el uso, la amplitud de la tensión del primario de un transformador se regula y mantiene constante y, por lo tanto, la amplitud del flujo en el núcleo también debe permanecer constante.

### ¿Cómo funciona para detectar problemas?

La reluctancia de la ruta del flujo magnético<sup>14</sup> influye en la magnitud de la corriente de excitación necesaria para generar flujo en el núcleo. Durante una prueba de circuito abierto como la prueba de corriente de excitación y pérdida, la ruta del flujo magnético se encuentra principalmente en el núcleo del transformador. Ciertos factores influyen en la reluctancia del núcleo y hacen que aumente, por:

- Un acabado deficiente del núcleo, por ejemplo, un apilado poco preciso de las laminaciones del núcleo
- Uso de materiales de baja calidad, como acero de baja calidad en el núcleo
- Exceso de rebabas

Una mayor reluctancia en la ruta del flujo necesita más corriente de excitación para generar flujo en el núcleo. Por lo tanto, un problema en el núcleo se manifiesta como un resultado de la prueba de corriente de excitación superior al esperado. De hecho, todos los problemas que se detectan mediante una prueba de corriente de excitación se suelen manifestar como resultados de mediciones más altas.

Es esencial entender cómo se ajusta la corriente primaria en un transformador cuando está proporcionando una carga o en cortocircuito para entender cómo ciertos problemas del devanado aumentan los resultados de la medición de la prueba de corriente de excitación.

## Ajuste de la corriente primaria cuando el transformador está proporcionando una carga o en cortocircuito:

Como hemos visto en la sección anterior, por medio de la inductancia mutua, existe tensión entre los terminales secundarios en circuito abierto de un transformador energizado desde su lado primario. Cuando estos terminales se ponen en cortocircuito o se aplica carga a los devanados secundarios, se crea un circuito secundario con una diferencia de tensión para admitir el flujo de corriente secundaria.

11 La inductancia mutua hace referencia al fenómeno por el cual se induce tensión en los devanados secundarios no energizados, "acoplados". Es autoinductancia cuando se induce tensión en el devanado energizado

12  $V = -L(dI/dt)$

13 Hay excepciones, por ejemplo, las líneas de transmisión, en las cuales se pueden acumular cargas, son un tipo de red que no cumple esta ley.

14 Similar a la resistencia en un circuito eléctrico

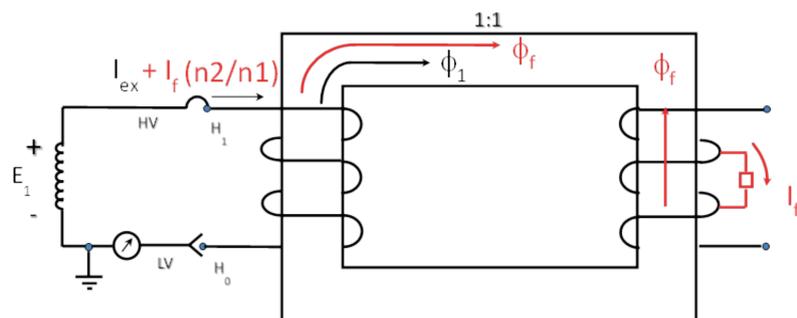
## Corriente de excitación

(Carga o cortocircuito). La corriente del devanado secundario creará una fuerza de magnetización que generará flujo en dirección opuesta a la del flujo de magnetización original creado por la corriente de excitación<sup>15</sup>. Este flujo opuesto atraviesa los devanados, inclusive el primario, e induce tensión en cada uno de ellos. Esto, a su vez, se traduce en un aumento de tensión en el circuito primario, lo que afecta a su equilibrio de forma que la suma de todos los aumentos de tensión en el lazo ya no es cero. Pero, puesto que la suma de las tensiones debe ser cero en cualquier instante determinado según la Ley de tensión de Kirchoff, empieza a fluir corriente adicional por el devanado primario en la medida suficiente para crear un flujo igual y opuesto que compense la influencia del flujo creado por el flujo de corriente secundaria. En resumen, el flujo neto no debe cambiar en el núcleo. Todo flujo de corriente en el devanado secundario que perturbe este principio se compensará con un aumento proporcional del flujo de corriente primario (corregido por la relación de las espiras del devanado del transformador,  $n_2/n_1$ ).

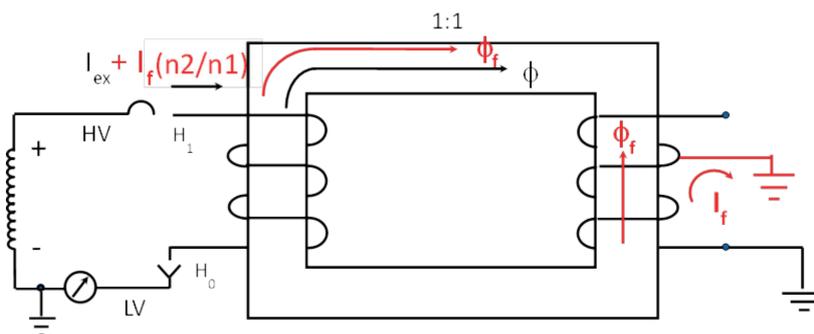
### Manifestación de un problema de devanado en el resultado de una prueba de corriente de excitación:

Los problemas de devanado, como espiras en cortocircuito, cortocircuitos parciales entre espiras o un cortocircuito de espira a tierra, se manifiestan como un aumento de la corriente medida en la prueba de corriente de excitación. Estos modos de fallo, como se ilustra en la Figura 4, se comportan de forma parecida a una carga presente en el devanado secundario.

Cuando se energizan los devanados primarios para la prueba de corriente de excitación, existe tensión entre los terminales secundarios en circuito abierto del transformador. Cuando existe un estado de fallo como un cortocircuito en 2 o más espiras de los devanados secundarios (Figura 4a), se crea un lazo de fallo cerrado con una diferencia de tensión para admitir un flujo de corriente de fallo.



(a) Fallo entre espiras



(B) Fallo de devanado a tierra en un devanado secundario con un neutro conectado a tierra

**FIGURA 4: Manifestación de los fallos de devanado en los resultados de las pruebas de corriente de excitación [3]**

Como ocurría con el flujo de corriente de carga en los devanados secundarios, la corriente de fallo del devanado secundario creará una fuerza de magnetización que generará flujo en dirección opuesta a la del flujo de magnetización original creado por la corriente de excitación. Este flujo opuesto atraviesa los devanados, inclusive el primario, e induce tensión en cada uno de ellos. Esto, a su vez, se traduce en un aumento de tensión en el circuito primario, lo que afecta a su equilibrio de forma que la suma de todos los aumentos de tensión en el lazo ya no es cero. Pero, puesto que la suma de las tensiones debe ser cero en cualquier instante determinado según la Ley de tensión de Kirchoff, empieza a fluir corriente adicional por el devanado primario en la medida suficiente para crear un flujo igual y opuesto que compense la influencia del flujo creado por el flujo de corriente de fallo. Por lo tanto, en lugar de medir solo la corriente de excitación ( $I_{ex}$ ), también se mide la corriente de fallo,  $I_f$ , ajustada a la relación de las espiras. Dicho de

<sup>15</sup> La Ley de Lenz establece que una fuerza electromotriz (FEM) inducida da lugar a una corriente cuyo campo magnético se opone al cambio de flujo magnético original.

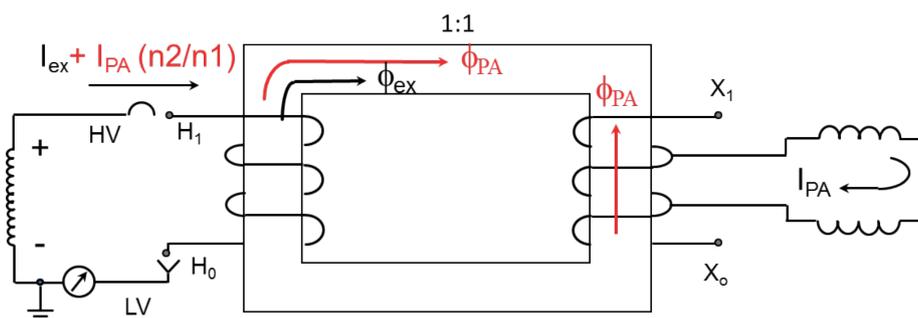
## Corriente de excitación

otro modo, la corriente que consume el transformador defectuoso cuando se energiza es igual a la corriente de excitación más la corriente de fallo secundaria ajustada a la relación,  $n_2/n_1$ . A menudo, la corriente de fallo que se introduce en la medición por cortocircuito entre espiras es bastante grande y el instrumento de prueba se dispara al tratar de satisfacer los requisitos de corriente de excitación del transformador.

Un fallo de devanado a tierra (Figura 4b) se comporta de manera parecida. Si el devanado secundario tiene un neutro con conexión a tierra y se produce un fallo en algún punto del devanado a tierra, se crea un lazo de fallo cerrado con una diferencia de tensión para admitir el flujo de corriente. Mediante el mismo mecanismo ya descrito, esto se traduce en un flujo opuesto (corriente de fallo creada) que perturba el flujo neto del núcleo. En consecuencia, se toma más corriente de excitación de la fuente de alimentación para compensar este flujo adicional y restablecer el equilibrio.

## ¿Cómo influye la presencia de un cambiador de tomas bajo carga (OLTC) en los resultados de la prueba de corriente de excitación?

Al realizar pruebas en un transformador con cambiador de tomas bajo carga, las pruebas de corriente de excitación se realizan mientras el OLTC (y DETC) se encuentra estático en cada una de las diferentes posiciones de las tomas seleccionadas. A diferencia de los OLTC de tipo resistivo, un OLTC de tipo reactivo utiliza la posición de puente<sup>16</sup> como posición de servicio. Por lo tanto, cuando se realiza una medición en una posición de toma impar (por ejemplo, 5L, 3L, 1L, 1R, 3R, 5R, etc.) de un OLTC de tipo reactivo, los componentes de puente tales como el autotransformador preventivo (PA) del cambiador de tomas, se incluyen en el circuito de prueba y se pueden evaluar. En las posiciones de puente, el PA actúa como una carga entre algunas espiras del devanado secundario (Figura 5) y crea una necesidad de más corriente de excitación aparente para energizar el transformador. Lo que realmente se extrae de la fuente de alimentación es una corriente de excitación esperada más la corriente que circula por el PA (ajustada la relación de las espiras).



**FIGURA 5:** Influencia de la presencia de un OLTC de autotransformador preventivo en los resultados de la prueba de corriente de excitación [3]

## Tensión de prueba

Para realizar una prueba de corriente de excitación, se aplica una tensión de prueba de CA al devanado de mayor tensión nominal de un transformador. Es conveniente aplicar la mayor magnitud de tensión posible<sup>17</sup>, dentro de la capacidad de salida del instrumento de prueba y sin superar la tensión nominal del devanado. El objetivo es aprovechar al máximo la capacidad de la prueba para detectar cortocircuitos parciales entre espiras, es decir, cortocircuitos en desarrollo y que, en muchos casos, solo se detectarán si existe el esfuerzo suficiente.

No importa qué tensión de prueba se seleccione, pero debe ser la misma tensión de prueba seleccionada para una prueba anterior si se van a comparar los resultados de la prueba de corriente de excitación con los resultados de pruebas anteriores. Si no se hace así, la comparación no es válida porque el componente de magnetización de la medición de la corriente de excitación no varía linealmente con la tensión, mientras que el componente capacitivo sí lo hace. Ninguna operación matemática general preverá con precisión un resultado equivalente de la prueba de corriente de excitación. A diferencia de las mediciones de factor de potencia/factor de disipación en las que se puede aplicar una pequeña tensión de prueba, por ejemplo de 2 kV, y extrapolar con precisión una corriente equivalente de 10 kV y el resultado en vatios, esto no es posible en la medición de corriente de excitación.

<sup>16</sup> Una posición de puente es aquella en la que se seleccionan dos tomas consecutivas al mismo tiempo y hay presente cierta forma de impedancia, resistiva o reactiva, para limitar la corriente resultante en circulación.

<sup>17</sup> Si el instrumento de prueba se desactiva porque el transformador o el regulador de tensión requieren más corriente de excitación de la que proporciona el instrumento de prueba a su mayor tensión de salida, reduzca la tensión de prueba y vuelva a intentarlo. Esto no es infrecuente con transformadores y reguladores de tensión de tamaño de distribución, que suelen requerir bastante más corriente de excitación que un transformador de potencia. La excitación típica para los reguladores de tensión, por ejemplo, puede ser posible solo con 1 kV de tensión de prueba aproximadamente.

## Corriente de excitación

Al probar un transformador con un OLTC de tipo reactivo, los requisitos de excitación suelen ser mayores en las posiciones de toma de puente que si se prueba el transformador con el OLTC en una posición que no sea de puente. Un instrumento de prueba podría no satisfacer el requisito de excitación adicional de una posición de puente al aplicar 10 kV, lo que podría dar lugar a la desconexión del instrumento. En las posiciones que no son de puente (por ejemplo, 6L, 4L, 2L, N, 2R, 4R, etc.) sucede lo contrario, ya que, sin la influencia de los componentes de puente, la prueba tiene más posibilidades de llevarse a cabo con 10 kV. En los casos en los que la prueba con 10 kV solo se realiza correctamente en las posiciones de tomas pares del OLTC, debe prevalecer el sentido común. Por ejemplo, si el transformador solo puede excitarse con 8 kV en las posiciones de tomas de puente del OLTC, es recomendable realizar todas las mediciones de corriente de excitación (en posiciones de puente y que no son de puente) con 8 kV. Sin embargo, si el transformador solo puede excitarse con 5 kV en las posiciones de tomas de puente del OLTC, se debe continuar realizando mediciones de corriente de excitación con 10 kV en las posiciones de tomas que no son de puente y reducir la tensión de prueba a 5 kV para probar las posiciones de tomas de puente.

## Preparación de la prueba

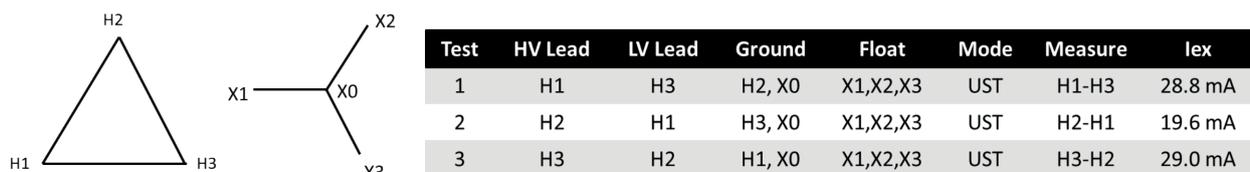
Una prueba de corriente de excitación es una prueba en vacío. Todos los terminales de devanado deben "flotar", con excepción de los terminales neutros de los devanados no energizados, que normalmente tienen conexión a tierra cuando están en funcionamiento y deben seguir conectados a tierra. Esta referencia a la conexión a tierra es importante para detectar de forma eficaz un fallo de devanado a tierra en el devanado en estrella o zigzag del transformador. Por otro lado, si el devanado energizado tiene un terminal neutro normalmente conectado a tierra, esta conexión a tierra se elimina durante la prueba. El neutro de este devanado se utilizará como punto de conexión del cable de retorno de medición de UST.

## Procedimiento de prueba

La prueba de corriente de excitación se realiza en modo de prueba UST, normalmente en el devanado de mayor tensión nominal de un transformador, como ya se ha explicado. En el modo de prueba UST, se mide la corriente al cable de prueba de baja tensión del instrumento de prueba de factor de potencia/factor de disipación mientras la corriente a tierra se elimina de la medición<sup>18</sup>. Este hecho tiene consecuencias en el componente capacitivo incluido en la medición de una corriente de excitación. La corriente capacitiva generalmente representa la energía necesaria para generar carga eléctrica en el aislamiento que rodea el devanado energizado y que incluye los componentes de inter-devanado (por ejemplo, devanados de alta a baja tensión), interfase, devanado-tierra y entre espiras. En el modo UST, todos estos componentes capacitivos energizados directamente por la fuente de alimentación se trasladan fuera del circuito de medición con la excepción del aislamiento entre espiras<sup>19</sup>, que es la fuente principal de contribución de corriente capacitiva al resultado de la prueba de corriente de excitación. El resto de la contribución (corriente capacitiva) tiene relación con el hecho de que la corriente capacitiva también representa la energía requerida para generar carga eléctrica en el aislamiento que rodea los devanados que se energizan por el acoplamiento mutuo. Los pasatapas<sup>20</sup>, por ejemplo, del devanado secundario, tendrán corriente por su cuerpo capacitivo, que debe fluir por el devanado secundario y, por lo tanto, que el acoplamiento mutuo refleja en la corriente de excitación medida en el devanado energizado.

En el caso de un transformador trifásico, las conexiones de prueba necesarias para llevar a cabo una prueba de corriente de excitación dependen de la configuración del devanado activado. En el caso de un devanado de AT con conexión delta, se conectan cables de prueba de alta y baja tensión a dos esquinas/terminales del delta y el tercer terminal se conecta a tierra (Figura 6). La conexión a tierra es necesaria para adquirir una medición de corriente de excitación monofásica, necesaria para realizar análisis.

La conexión a tierra del tercer terminal puede realizarse de dos maneras. Se puede usar el segundo cable de baja tensión (BT) de un instrumento de factor de potencia. En este caso, el primer cable de BT (por ejemplo, azul) se conectado al segundo terminal del devanado de AT con conexión delta y se usa para medir, mientras que el otro cable de BT (por ejemplo, rojo) se conecta al tercer terminal y especifica como "tierra" en el instrumento de prueba mediante la selección del modo de prueba (por ejemplo, UST-B, GND-R), donde la conexión a tierra, de hecho, es "guarda" en el modo de prueba UST. No obstante, este enfoque genera a veces confusión entre los cables de baja tensión rojo y azul cuando quien realiza las pruebas pasa de una a otra (por ejemplo, invierte las conexiones azul y roja) y da lugar a errores en las pruebas. Por lo tanto, es recomendable conectar a tierra el tercer terminal (pasatapas) por medio de un puente en la conexión a tierra del transformador, disponible en la cubierta del tanque.



**FIGURA 6:** Procedimiento de la prueba de corriente de excitación para un devanado con conexión delta

<sup>18</sup> El denominado punto de protección del instrumento de prueba de factor de potencia/factor de disipación tiene conexión a tierra en el modo de prueba UST. Consulte en el boletín TLM de Megger sobre el factor de potencia/factor de disipación y capacitancia la descripción completa de los modos de prueba y su funcionamiento.

<sup>19</sup> Cuando se energiza el devanado de una prueba de corriente de excitación, las corrientes (de carga) capacitiva resultantes que van de casi todos estos componentes a tierra están en guarda en el modo UST.

<sup>20</sup> Un pasatapas graduado capacitivo tiene un sistema de capas capacitivas con una referencia a tierra en la última, o casi última, capa capacitiva.

## Corriente de excitación

Las pruebas de corriente de excitación realizadas con el tercer terminal del devanado de AT con conexión delta flotando libremente se pueden utilizar, pero el análisis de sus resultados se llevará a cabo con otros criterios. Además, los problemas podrían no ser tan perceptibles y, si se detectan, no serán tan identificables como sería posible con mediciones monofásicas.

En el caso de un devanado de AT con conexión en estrella, el cable de prueba de alta tensión se conecta al terminal de fase de la fase correspondiente que se está probando y se traslada al terminal de la fase siguiente para cada una de las pruebas sucesivas, mientras que el cable de retorno de AT se conecta al terminal neutro (sin conexión a tierra), por ejemplo, H0, para las tres pruebas. En la Figura 7 se describen los detalles.



FIGURA 7: Procedimiento de la prueba de corriente de excitación para un devanado con conexión en estrella

En aquellos casos en los que un devanado de AT con conexión en estrella no tenga un terminal neutro, la prueba se realiza como si el devanado tuviera una conexión delta, con la importante excepción de que el tercer terminal no está conectado a tierra (Figura 8). El denominado patrón de fase generado por los resultados cambiará de H-L-H a L-L-H.

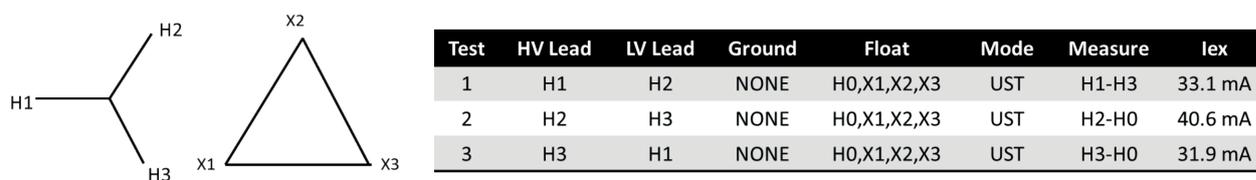


FIGURA 8: Procedimiento de la prueba de corriente de excitación para un devanado con conexión en estrella sin acceso a neutro

Especialmente en el caso de transformadores con OLTC de tipo reactivo, las pruebas de corriente de excitación deben realizarse en todas las posiciones de tomas del OLTC si la prueba se va a usar para evaluar por completo el estado del OLTC y todas las tomas de los devanados. De lo contrario, algunos problemas pueden no detectarse. La automatización de los instrumentos de prueba modernos, por ejemplo, el cambio de la posición de tomas de OLTC seleccionada entre una prueba y otra mediante un simple comando de software y la inclusión automática de los resultados de la prueba en una tabla, reduce la duración de esta tarea.

## Reglas de análisis

El análisis de los resultados de pruebas de corriente de excitación (y pérdida) en el caso de transformadores trifásicos se basa en gran medida en el reconocimiento de patrones, mientras que en el caso de los monofásicos el análisis se realiza principalmente mediante la comparación de los resultados de las pruebas con resultados anteriores.

En el caso de transformadores trifásicos, se evalúa el denominado "patrón de fase". Si el transformador trifásico es un transformador de cambiador de tomas en carga, el análisis también incluye la evaluación del "patrón del OLTC".

## Análisis del patrón de fase

El patrón de fase es el patrón que exhiben los resultados de las (3) pruebas de corriente de excitación (o pérdida) medidas para las tres fases de un transformador<sup>21</sup>. Por ejemplo, en la posición de toma 16R de la Figura 9, el patrón de fase es H-L-H, que se muestra tanto para la corriente como las pérdidas:

**lex:** 21,56 mA – 10,69 mA – 21,69 mA

**Pérdidas:** 145,6 W - 71,39 W - 146,9 W

La evaluación más a fondo de los resultados de las pruebas de la Figura 9 revela que el patrón de fase es el mismo (H-L-H) en todas las posiciones de toma, tanto de la corriente como de las pérdidas medidas. Esto es algo normal.

<sup>21</sup> Un patrón de fase se muestra en una única posición de toma de un transformador cambiador de tomas de carga.

## Corriente de excitación

Una vez que se identifica el patrón de fase de las pérdidas, las pérdidas registradas en todas las combinaciones de posiciones de tomas posibles (por ejemplo, DETC 3 OLTC 5R, DETC 4 OLTC 2L, etc.) deben mostrar el mismo patrón de fase. El mismo patrón de fase también debe observarse en las corrientes de excitación medidas en todas las combinaciones de posiciones de tomas posibles siempre que los valores de corriente de excitación estén dominados por su componente inductivo correspondiente. Dicho de otro modo, las directrices de análisis que se indican en este documento son válidas para evaluar los resultados de la prueba de corriente de excitación solo cuando la reactancia notificada asociada a las mediciones sea inductiva (+ jX). El ejemplo de la Figura 9 indica mediciones de corriente de excitación con predominancia inductiva.

Si, por el contrario, el componente capacitivo de la corriente de excitación domina la medición, el patrón de fase puede verse perturbado, pero esto no indica inmediatamente que haya un problema. En esos casos, las pérdidas son el punto de interés principal del análisis. Siempre que las pérdidas exhiban el comportamiento esperado, el patrón de fase perturbado que muestran las corrientes de excitación no se tiene en cuenta, porque es solo consecuencia de las mediciones de corriente de excitación con predominio capacitivo. Sin embargo, estos resultados de la prueba de corriente de excitación son una referencia útil para futuras comparaciones. Un valor de reactancia negativo (-jX) indica una medición de corriente de excitación con predominio capacitivo.

Posición de DETC	Posición de OLTC	Fase 1			Fase 2			Fase 3			Midiendo...
		mA	Vatios	Reactancia jX (kW)	mA	Vatios	Reactancia jX (kW)	mA	Vatios	Reactancia jX (kW)	
3	16R	21,56	145,6	628,89	10,69	71,39	1256,79	21,69	146,9	626,64	Solo corriente de excitación
3	15R	70,35	158,6	145,9	60,31	82,99	167,4	70,46	161,3	145,8	Corriente de excitación + PA
3	14R	21,56	145,6		10,69	71,4		21,7	146,9		Solo corriente de excitación
3	13R	70,39	158,6		60,33	83,1		70,49	161,6		Corriente de excitación + PA
3	12R	21,57	145,6		10,69	71,44		21,7	147		Solo corriente de excitación
3	11R	32,9	149,9		22,36	74,66		32,93	150,6		Corriente de excitación + PA
3	10R	21,56	145,7		10,73	71,46		21,7	146,9		Solo corriente de excitación
3	9R	70,39	159,9		60,31	84,61		70,51	161,6		Corriente de excitación + PA
3	8R	21,56	145,6		10,73	71,46		21,71	147		Solo corriente de excitación
3	7R	70,43	160,1		60,33	85,3		70,53	162,69		Corriente de excitación + PA
3	6R	21,57	145,6		10,76	71,36		21,69	147,6		Solo corriente de excitación
3	5R	70,43	161,6		60,31	85,6		70,53	161,9		Corriente de excitación + PA
3	4R	21,57	145,7		10,73	71,39		21,71	147,63		Solo corriente de excitación
3	3R	70,46	161,93		60,36	86,1		70,48	160,6		Corriente de excitación + PA
3	2R	21,57	145,6		10,73	71,3		21,66	147,3		Solo corriente de excitación
3	1R	70,4	159,9		60,3	83,9		70,45	161,3		Corriente de excitación + PA
3	N	21,66	145,6		10,96	71,66		21,72	146,9		Solo corriente de excitación
3	1L	69,6	161,9		59,3	86,3		69,9	162,6		Corriente de excitación + PA
3	2L										
3	3L										
3	4L										
3	5L										
3	6L										
3	7L										
3	8L										
3	9L										
3	10L										
3	11L										
3	12L										
3	13L										
3	14L										
3	15L										
3	16L										

Patrón de fase ← →

Patrón de LTC ↑ ↓

FIGURA 9: Resultados de la prueba de corriente de excitación y pérdida para un transformador trifásico con cambiador de tomas (bajo carga) de tipo reactivo (patrón 2 de OLTC)

El patrón de fase H-L-H es el más común. Sin embargo, existen cuatro patrones de fase posibles, como se indica en la Tabla 1:

## Corriente de excitación

<b>H-L-H</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Patrón de fase esperado en el caso de transformadores con núcleo de 3 columnas que se prueban mediante los procedimientos convencionales detallados anteriormente</li> <li>■ Patrón de fase esperado en el caso de transformadores con núcleo de 5 columnas o con núcleo acorazado y devanado con conexión delta</li> <li>■ Los 2 valores "altos" se consideran iguales si la diferencia entre ellos es de menos del 10 % (para corrientes <math>\leq 50</math> mA) o del 5 % (para corrientes <math>&gt; 50</math> mA)</li> <li>■ La lectura más baja se obtiene en la fase que se encuentra en la columna central del núcleo como consecuencia de la menor reluctancia que observa la fuente al energizar el transformador desde el devanado central</li> </ul>
<b>L-H-L</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Patrón de fase esperado en el caso de transformadores con núcleo de 4 columnas (por ejemplo, hay un fabricante estadounidense que fabrica habitualmente autotransformadores con núcleo de 4 columnas)</li> <li>■ No se espera, pero puede obtenerse en el caso de transformadores con núcleo de 3 columnas si no se siguen los protocolos de pruebas convencionales por error o por necesidad (por ejemplo, en el caso de un devanado con conexión delta si el terminal de la tercera fase no está conectado a tierra O de un devanado con conexión en estrella sin un neutro accesible, Figura 8)</li> </ul>
<b>H-H-H</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Un patrón de fase de 3 lecturas iguales es característico de los transformadores con núcleo de 5 columnas o núcleo acorazado con devanados secundarios que no tienen conexión en delta</li> </ul>
<b>H-M-L</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ En casos en los que en la corriente de excitación no hay predominancia del componente inductivo, como suele suceder, es decir, en la corriente de excitación hay predominancia del componente capacitivo*. En estos casos, se debe evaluar el patrón de fase exhibido por las pérdidas** y, si es aceptable, no es necesaria emprender ninguna acción</li> <li>■ En los casos en los que existe excesiva magnetización residual del núcleo</li> <li>■ Indica la existencia de problemas en los devanados, el núcleo o el cambiador de tomas</li> </ul>

\*Una corriente de excitación dominada por su componente capacitivo no siempre perturba el patrón de fase esperado. Además, puede existir una situación en la que la corriente de excitación de la fase 1 esté dominada por su componente capacitivo, mientras que las corrientes de excitación de las otras 2 fases estén dominadas por sus respectivos componentes inductivos. Algunos transformadores con OLTC pueden tener resultados de corriente de excitación inductiva en las posiciones de tomas de puente, pero resultados de corriente de excitación capacitiva en las posiciones de tomas que no son de puente [2]. Y, en raras ocasiones, un transformador con OLTC puede tener corriente inductiva medida en varias posiciones de tomas secuenciales y corriente capacitiva medida en las demás posiciones.

\*\*Las pérdidas mostrarán siempre un patrón de fase definido por las reglas anteriores, independientemente de que la corriente medida esté dominada por su componente capacitivo o inductivo, a menos que haya algún problema o magnetismo residual. Por este motivo, las pérdidas son un parámetro fiable y fácil de evaluar.

El magnetismo residual de un transformador, mencionado en la tabla 1 como una de las razones por las que el patrón de fase de los resultados de la prueba de corriente de excitación y pérdida pueden mostrar 3 valores distintos, se debe a la conservación de la polaridad magnética del acero del núcleo magnético por la tendencia de todo material magnético a almacenar energía. La interrupción de la excitación de CA normal, la prueba de resistencia de devanado de CC, la desconexión del transformador y los fenómenos geomagnéticos pueden ser fuentes de magnetismo residual [4]. En el boletín TLM de Megger sobre la desmagnetización de núcleos de transformadores se dan detalles acerca de las consecuencias para un sistema de alimentación y el propio transformador si el núcleo está saturado magnéticamente. En el caso de las pruebas en vacío realizadas en el transformador, por ejemplo, la prueba de corriente de excitación y pérdida, la consecuencia de un núcleo magnetizado excesivamente es el cambio de los resultados de la prueba (valores de corriente de excitación y de pérdida), que se pueden interpretar como un problema real o, también, ocultarlo.

Aunque casi siempre hay algo de magnetismo residual en el núcleo, en la mayoría de los casos no tiene ningún efecto significativo en los resultados de la prueba de corriente de excitación. Sin embargo, si se sospecha que el magnetismo residual es la causa de un patrón de fase con 3 valores diferentes, esta hipótesis debe confirmarse puesto que la causa podría ser un problema real. Por lo tanto, es necesario desmagnetizar el núcleo y repetir las pruebas de corriente de excitación. Si los resultados de pruebas posteriores no tienen los valores esperados, la desmagnetización no fue correcta <sup>22</sup> y debe repetirse o hay un problema real en el transformador.

<sup>22</sup> Los transformadores de potencia de gran tamaño pueden llegar a estar "obstinadamente magnetizados" y necesitar varios intentos de desmagnetización del núcleo.

## Corriente de excitación

Como se indicó anteriormente, un problema se suele manifestar causando un aumento de los valores medidos de la prueba de corriente de excitación y pérdida. Es probable que las fases con la corriente de excitación de mayor magnitud sean la causa. Una comparación con los resultados de pruebas anteriores (si se mide con la misma tensión de prueba) resulta útil para comprobar que no se están midiendo las magnitudes esperadas de corriente de excitación y pérdida. Cabe señalar que, al comparar con resultados anteriores, las magnitudes pueden variar simplemente por la diferencia en los respectivos niveles de magnetismo residual en el momento de la prueba. Estos distintos niveles, aunque no sean suficientes para cambiar los patrones de fase, podrían hacer que las magnitudes de corriente de excitación y la pérdida sean distintas en las pruebas. Siempre que el cambio entre las pruebas sea igual en las fases, el cambio observado respecto a los resultados de pruebas anteriores no debe tomarse como indicación definitiva de un problema.

Si el patrón de fase de corriente de excitación y pérdida de la posición de neutro es normal (por ejemplo, H-L-H) y la modificación del patrón de fase tiene lugar en otras posiciones del OLTC, se puede sospechar que los resultados anómalos no se deben al núcleo ni al devanado principal. En general, independientemente del tipo y diseño del OLTC, la posición de neutro del cambiador de tomas refleja solo el núcleo y los devanados principales.

## Análisis del patrón de OLTC

El patrón de OLTC es el patrón que muestra el resultado de la prueba de corriente de excitación (o pérdida) medido dentro de una sola fase mientras el cambiador de tomas en carga (OLTC) avanza por cada una de sus posiciones. Por ejemplo, el patrón de OLTC que muestran las mediciones de la corriente de excitación en la Fase 1 de la Figura 9 es el patrón 2 de OLTC, según el cual los resultados de la prueba de todas las posiciones de toma que no son de puente son iguales (p. ej., unos 21,56 mA) y los resultados de la prueba de todas las posiciones de puente son iguales (p. ej., unos 70,4 mA) con la excepción de una o varias posición. En este ejemplo, la medición "única" tiene lugar en la posición 11R del OLTC (32,9 mA), resaltada en gris en la Figura 9. Esto indica que el autotransformador preventivo del OLTC puentea menos espiras (por diseño) en esta posición que en las demás posiciones de puente.

Puesto que las mediciones de la corriente de excitación en la fase 1 de la Figura 9 muestran el patrón 2 de OLTC, las mediciones de la corriente de excitación en las fases 2 y 3 también deben presentar el patrón 2 de OLTC. Además, las pérdidas medidas en la fase 1 deben mostrar el patrón 2 de OLTC, lo mismo que las medidas en las fases 2 y 3. Una rápida evaluación revela que, de hecho, es así.

Hay 12 patrones de OLTC posibles, en función del diseño del OLTC [2]. Once de estos patrones representan variaciones normales que pueden observarse en los resultados de las pruebas con OLTC del tipo reactivo. Un OLTC de tipo reactivo, el más utilizado en Norteamérica, emplea un reactor (p. ej., un autotransformador preventivo (PA) y/o un transformador/autotransformador de series) como la impedancia para limitar la corriente circulante cuando se activa el cambiador de tomas, por ejemplo, en una posición de toma de puente<sup>23</sup> (es decir, impar). En los OLTC de tipo reactivo, las posiciones de puente son posiciones "operativas"<sup>24</sup>. Un patrón de OLTC común de los OLTC de tipo reactivo se ilustra en la Figura 10. Los resultados de la prueba de corriente y pérdida de todas las posiciones de toma que no son de puente (es decir, pares) son iguales y el actual y los resultados de todas las posiciones de toma de puente son iguales.

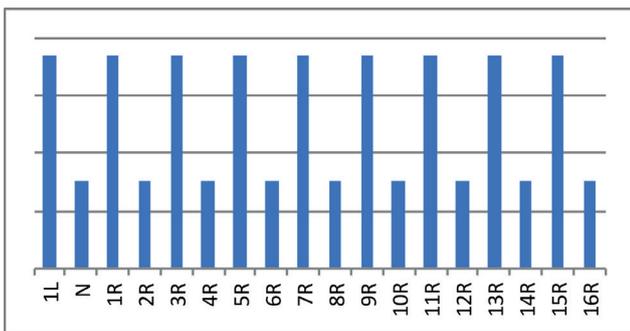


FIGURA 10: Patrón 1 de OLTC

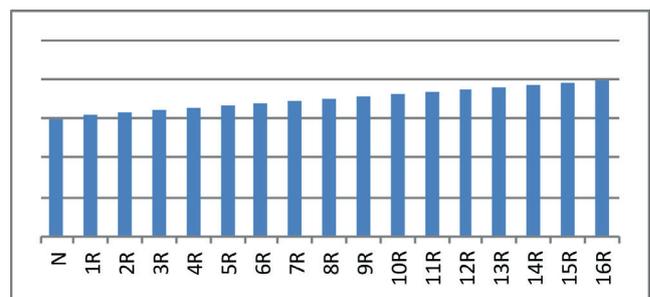


FIGURA 11: Patrón 7 de OLTC

En los OLTC de tipo resistivo, los más utilizados en todo el mundo, no hay posiciones de puente "operativas". Un OLTC de tipo resistivo nunca pasa más de aproximadamente 40-60 ms en un estado de puente, por lo que, al realizar una medición estática como en las pruebas de corriente de excitación y pérdida, los componentes de puente, como las resistencias del conmutador, no se incluyen en el circuito de prueba<sup>25</sup>. En la Figura 11 se ilustra un patrón de OLTC típico de un OLTC de tipo resistivo.

<sup>23</sup> Una posición de puente es aquella en la que se seleccionan dos tomas consecutivas al mismo tiempo y hay presente cierta forma de impedancia, resistiva o reactiva, para limitar la corriente resultante en circulación.

<sup>24</sup> Una posición operativa deduce que el transformador puede permanecer en servicio en esta posición de toma indefinidamente, si se desea.

<sup>25</sup> Por este motivo, es muy recomendable realizar mediciones de la resistencia dinámica en OLTC de tipo resistivo, que prueban sus componentes de puente.

## Corriente de excitación

### Transformador monofásico

---

Los resultados de la prueba de corriente de excitación de un transformador monofásico deben compararse con los resultados de pruebas anteriores. La tensión de prueba debe ser la misma para que la comparación sea válida. Si no se dispone de resultados de pruebas anteriores, los resultados de la prueba de corriente de excitación también pueden compararse con los de un transformador equivalente. Los resultados deben compararse con mucha atención.

### Conclusiones

---

La prueba de corriente de excitación es una prueba de campo rutinaria muy recomendable, porque tiene la capacidad de identificar problemas emergentes como cortocircuitos parciales entre espiras y muchos problemas en el cambiador de tomas. Una prueba de corriente de excitación es una prueba de puesta en servicio importante. En algunos casos, esta prueba ha identificado problemas de montaje o fabricación del núcleo en transformadores nuevos que se iban a empezar a utilizar. Esta prueba también es recomendable antes y después de realizar el mantenimiento de cambiadores de tomas. Además de comprobar la integridad del trabajo realizado, la prueba ha demostrado ser útil para garantizar que el cambiador de tomas se ha vuelto a conectar correctamente.

Hay varias pruebas de diagnóstico de campo alternativas cuyas capacidades coinciden en parte con las de la prueba de corriente de excitación, pero ninguna es un equivalente completo. Si observamos, a continuación, estas pruebas complementarias o alternativas, vemos las grandes capacidades de diagnóstico de una prueba de corriente de excitación y pérdida:

- **Prueba de equilibrio magnético:** proporciona una evaluación del circuito magnético
- **Relación de transformación (TTR):** detecta problemas de los devanados principales y sus tomas
- **Análisis de respuesta de barrido de frecuencia (SFRA):** indica problemas de núcleos y de devanados
- **Prueba de resistencia de devanados de CC:** revela problemas de devanados y es la prueba habitual para comprobar condiciones de circuito abierto, además de una buena herramienta para diagnosticar problemas en el cambiador de tomas
- **(OLTC) Mediciones dinámicas (resistencia):** detectan problemas observados durante el funcionamiento de un cambiador de tomas OLTC y, por consiguiente, incluye una evaluación de los componentes de puentes de los OLTC de tipo resistivo, algo que no proporciona las pruebas de corriente de excitación, TTR ni de resistencia de devanado de CC
- **Análisis de gases disueltos (DGA):** algunos problemas de devanado y de núcleo generan gases en el aceite del transformador. DGA en muestras de OLTC se usa también como herramienta de diagnóstico para el cambiador de tomas

## Corriente de excitación

### Referencias

---

- [1] Poulin, B. "Exciting Current of Power Transformers," Actas de la 63<sup>a</sup> Conferencia Anual Internacional de Clientes de Doble, 1996, Sec. 8-9.
- [2] Duplessis, J. "A Further Study of Exciting Current Patterns," Actas de la 69<sup>a</sup> Conferencia Anual Internacional de Clientes de Doble, 2002.
- [3] Duplessis, J. "Assessing the Magnetic Circuit of a Transformer," presentación de PowerPoint, 2003.
- [4] Boletín de gestión de la vida útil del transformador (TLM) de Megger, "Desmagnetización del núcleo del transformador", marzo de 2017.