

**BOLETÍN DE GESTIÓN DE LA VIDA ÚTIL
DEL TRANSFORMADOR (TLM):****Medición de la resistencia de devanados
del transformador**

Se utiliza una prueba de resistencia de devanados para evaluar el estado de la ruta de paso de corriente entre los terminales de los pasatapas del transformador. Los problemas como conexiones flojas, defectuosas o incorrectas, espiras abiertas, parcialmente abiertas (es decir, con hilos rotos), o en corto circuito en los devanados, o una alta resistencia de contacto en los cambiadores de tomas darán como resultado un cambio en la resistencia y, por tanto, un resultado en esta prueba de una medición de resistencia inesperadamente alta, baja (en el caso de corto circuitos) o inestable.

Varias guías y normas internacionales describen el método de prueba de la resistencia de devanados, entre las que se incluyen IEEE C57.152-2013, IEC 60076-1 y CIGRE TB445. La seguridad, la efectividad y la eficiencia son aspectos importantes de una prueba de resistencia de devanados que se ven dramáticamente influenciados por los métodos y equipos utilizados para la prueba.

Seguridad:

La seguridad (del operador, el activo (el transformador) y el instrumento de prueba) es fundamental en todas las pruebas, pero se requiere una mención especial en lo que se refiere a las pruebas de resistencia de devanados. Al ejecutar la prueba, el personal de pruebas debe tener presente que el devanado de un transformador es un inductor. Si el circuito de un inductor se abre repentinamente, mientras la corriente continua fluye a través de este, el inductor opondrá la carga inicial de corriente creando una alta tensión en un intento por conservar la corriente.

La tensión en el devanado se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V = I \cdot R + L \cdot di/dt =$$



En la que L representa la inductancia del devanado, I es la corriente de CC de la prueba, R es la resistencia del devanado y di/dt = tasa del cambio de corriente. Si uno de los cables de prueba se desconecta por error (se desprende o se tira de él soltándolo de una terminal de pasatapas) durante la prueba, se desarrollará peligrosamente una alta tensión. Como ejemplo, pongamos que la inductancia de una muestra es de 100 H, la corriente de prueba es de 25 A, y $di/dt = 25/0.1$ (100 ms = tiempo de desconexión del cable de prueba y de cambio de corriente de 25 A a 0 A): ¡la tensión desarrollada excedería los 25.000 voltios!

El personal de pruebas también debe tener presente que el campo magnético del transformador puede almacenar una gran cantidad de energía, como sucede cuando una corriente de prueba de CC se inyecta en un devanado durante el tiempo que toma la prueba de resistencia de devanados. Esa energía tiene que disiparse antes de que puedan desconectarse los cables de prueba, lo que podría requerir de varios minutos en un transformador grande.

Para proteger (1) al personal que está cerca del pasatapas del transformador, (2) al transformador que se somete a la prueba (que podría dañarse a causa de una alta tensión no programada), y (3) al instrumento de prueba que debe tolerar una condición de fallo de alta tensión (de otro modo, las reparaciones en los instrumentos serían continuas, caras y darían lugar a la interrupción de las pruebas), el instrumento de prueba debe estar equipado con un circuito de seguridad que proporcione una "vía de escape" para la disipación de la energía. Esto se lleva a cabo, por lo general, utilizando cables de potencial y corriente que proporcionan una vía alterna para la descarga, en el caso de que los cables se desconecten accidentalmente. Entre otras características adicionales que se recomiendan en un instrumento de prueba de resistencia de devanados están: la protección o descarga automática cuando se pierde la fuente de alimentación, un interruptor de apagado de emergencia, un indicador de corriente de prueba que se mantenga incluso cuando el instrumento se quede sin corriente, y protección o descarga automática cuando el nivel de corriente de prueba se modifica accidentalmente antes de descargar la corriente de prueba presente.

Efectividad y eficiencia:

Un primer paso que es imperativo, pero que podría llevar mucho tiempo, para obtener resultados de una prueba de resistencia de devanados estables y representativos es la saturación del núcleo del transformador. Para poder realizar esto eficientemente, deben seleccionarse la tensión de cumplimiento y la corriente de prueba correctos. Las configuraciones de conexión alternas para la prueba, como las de los métodos "(SWM)/inyección dual", podrían ser de utilidad para reducir el tiempo total de la prueba y, en el caso de los transformadores trifásicos, la dirección de la corriente inyectada para la prueba es importante.

Selección de tensión y corriente:

Aunque comúnmente se considera que una corriente de prueba más alta acelera la saturación de los transformadores grandes, esto no es verdad en la mayoría de los casos. La tensión determina la tasa de saturación de la prueba, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$(\text{Flujo}) \Phi = \text{voltios} * t \text{ (segundos)}$$

Al seleccionar un instrumento de prueba, se prefieren tensiones de cumplimiento por encima de 40 V de CC. Una corriente de prueba más alta acelerará la velocidad de una prueba solo cuando la corriente nominal del devanado es alta. Como regla general, la corriente de prueba debe ser mayor que el 1% de la corriente nominal del devanado que se está probando (Fig. 1). La corriente de prueba máxima recomendada, sin embargo, es del 15% de la corriente nominal del devanado, establecida en IEEE C57.152, para evitar el calentamiento del devanado. De otra manera, la corriente de prueba podría causar un error incuantificable en los resultados, ya que la resistencia es una característica que depende de la temperatura. Además, una corriente más alta hace que se almacene en el devanado una energía más alta y que se produzca un estado de magnetización más elevado (y la necesidad de desmagnetizar).

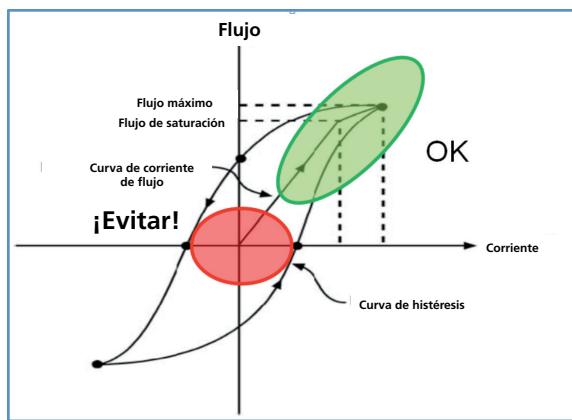


Fig. 1: Los devanados de corriente alta requieren corrientes de prueba más altas para la saturación del núcleo

Como ejemplo, si tenemos un transformador de 20 MVA, con una clasificación de 120 kV a 4,8 kV, la corriente nominal de AT es de 96 A y la clasificación de BT es de 2400 A. Una corriente de prueba de menos del 1 % de 2400 A, o 24 A, probablemente será deficiente para lograr una prueba exitosa de devanados de baja tensión. Para el devanado de AT, la corriente de prueba recomendada debería ser de al menos 1 A pero no más de 14,4 A. Una nota relacionada con el límite de la corriente se relaciona con una conexión alterna para prueba descrita a continuación, en la que tanto el devanado primario como el secundario se energizan al mismo tiempo. La cantidad adicional de espiras del devanado primario y la corriente de prueba en serie que pasa a través de los devanados primario y secundario ayudan a saturar el núcleo más rápido (que si solo se inyectara una corriente de prueba a través del devanado secundario) y ayuda a mantener el núcleo saturado mientras se obtienen los resultados secundarios. En esta situación, se requiere menos corriente de prueba secundaria de la que por lo general se necesitaría (consultar los métodos a continuación).

Medición de devanado individual (SWM)/método de inyección dual:

Para mejorar la saturación en los devanados del transformador cuando el tiempo de carga es lento, se recomienda conectar en serie el devanado primario con el secundario. Esto acelera la prueba al proporcionar más VOLTIOS - ESPIRAS de carga (Fig. 2). Este método es particularmente útil al probar transformadores trifásicos grandes (>100 MVA) en los que las pruebas de devanados en delta del lado de baja tensión requieren tiempos prolongados para alcanzar la estabilidad (sin corriente de prueba muy alta).

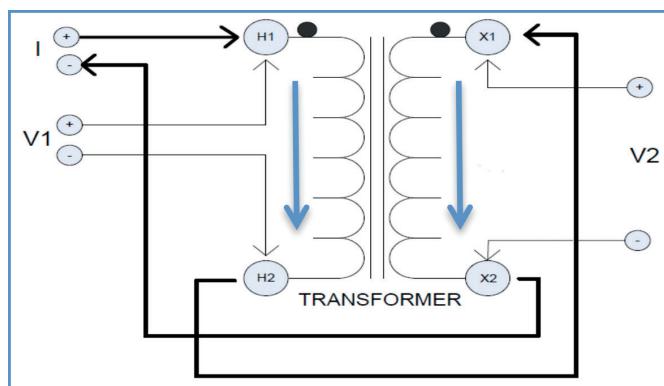


Fig. 2: Conexión de corriente de prueba en serie del primario y secundario, para acelerar la prueba

Dirección de la corriente de prueba:

Tomar en cuenta la dirección de la corriente de prueba al considerar con cuidado la colocación de las conexiones de la prueba podría ayudar a minimizar el tiempo de prueba de un 30 a un 50 %. Por el contrario, seguir de manera reflexiva el orden de la nomenclatura del devanado para colocar las conexiones de prueba, es decir, H1 a H0, H2 a H0 y luego H3 a H0, crea tiempos de prueba más largos porque estas conexiones requieren volver a magnetizar las columnas del núcleo en direcciones opuestas para la medición de cada fase (Fig 3), duplicando por consiguiente tiempo y energía. Al realizar la prueba de H1-H0, se crea un campo magnético en la dirección de H0-H2 y H0-H3. Por tanto, para poder mantener la misma dirección de flujo en el núcleo y reducir el tiempo de carga, H0-H2 o H0-H3 deberían probarse a continuación, y no H2-H0. Esta lógica está integrada en los instrumentos de prueba de resistencia de devanados trifásicos de Megger.

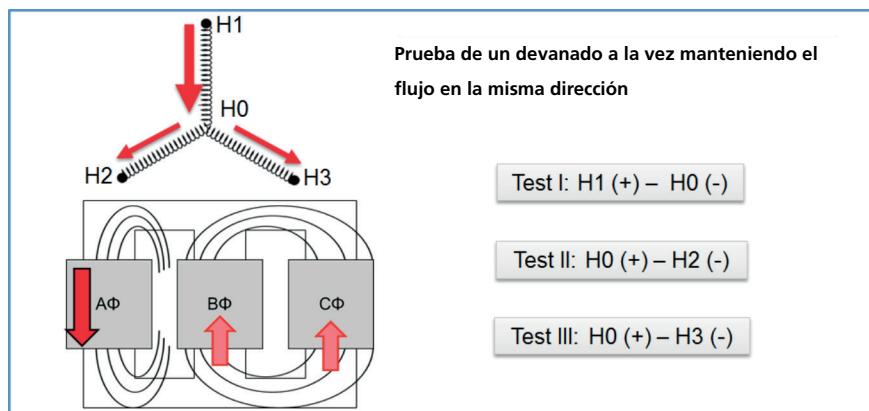


Figura 3: Dirección del flujo durante una prueba de resistencia de devanados en un transformador con tipo de núcleo de tres columnas, con un devanado en conexión estrella.

Desmagnetización eficiente

Se recomienda llevar a cabo una desmagnetización después de una medición de resistencia de devanados. Al poner el transformador en servicio efectivamente lo devuelve a un estado "normal" (núcleo no saturado), en el proceso de energizar el transformador pueden crearse picos de corriente altos si no se desmagnetiza el transformador. Estas corrientes entrantes tienen diversas implicaciones. En el sistema de potencia, los relevadores de protección no pueden distinguir entre las causas de una alta corriente (es decir, una falla en el transformador o un núcleo magnetizado) y se disparan hasta que la situación se corrija. Se dirige al lector al boletín "Desmagnetización del núcleo del transformador" de Megger para obtener más detalles acerca de la desmagnetización del núcleo.

Interpretación y análisis

Los valores típicos de resistencia de devanados del transformador van desde unos cuantos miliohmios a varios ohmios. Para un transformador trifásico, los resultados de la prueba de resistencia de devanados de CC se evalúan con más frecuencia sobre lo bien que se comparan entre las fases. Se espera que las diferencias entre los valores de las fases sean de menos de un 2 a 3 %. Aunque las mediciones de resistencia de devanados de CC dependen de la temperatura, las correcciones de temperatura por lo general no son necesarias cuando se comparan resultados individuales de fase, ya que se supone que la temperatura es esencialmente la misma para cada una de las tres mediciones.

Los resultados de la prueba de resistencia de devanados de CC también podrían compararse con una medición de referencia de fábrica o con otros resultados de pruebas anteriores, o con los resultados de un transformador similar. En estos casos debe considerarse la temperatura. Una vez que se compensa la temperatura de la prueba, los resultados no deberán diferir más que en un porcentaje mínimo, en comparación con las mediciones de referencia.

IEEE Std. C57.12.00 – 2006 establece la siguiente fórmula de conversión para calcular el resultado de la resistencia "equivalente a la temperatura de fábrica", o R_s , cuando se tiene una medición de resistencia de devanados de CC obtenida en el campo, R_m . Esta versión con temperatura compensada R_s del resultado de la prueba de medición de campo puede compararse entonces con las mediciones de referencia de fábrica originales.

Medición de la resistencia de devanados del transformador

Megger[®]
Power on

$$R_s = R_m [(T_s + T_k) / (T_m + T_k)]$$

R_s : resultado de la prueba de resistencia de devanados de CC con compensación de temperatura

R_m : resultado de la prueba de resistencia de devanados de CC medida

T_s : temperatura de referencia de fábrica, o deseada (°C)

T_m : temperatura de devanados durante la prueba de resistencia de devanados de CC

T_k : constante para el material de devanados (234,5 °C para cobre; 225 °C para aluminio)

Técnicas de prueba avanzadas

Para transformadores con cambiadores de tomas bajo carga, la prueba de resistencia de devanados es una herramienta de diagnóstico excepcional con la que puede evaluarse la condición mecánica del OLTC (cambiador de tomas bajo carga), un componente susceptible a sufrir problemas mecánicos, ya que es una de las pocas partes móviles de un transformador. Las mediciones de resistencia de devanados se realizan en cada posición de toma y un gráfico de "resistencia por toma" (Fig. 4) permite la validación de una resistencia de contacto adecuada en cada posición del cambiador de tomas OLTC. Las lecturas de resistencia son incluso lo bastante sensibles como para confirmar que el compartimiento del OLTC está colocado más cerca de la fase A (U) en el transformador en este ejemplo (Fig. 4). Esta proximidad se nota por los bajos valores de resistencia de tomas en la fase A (U).

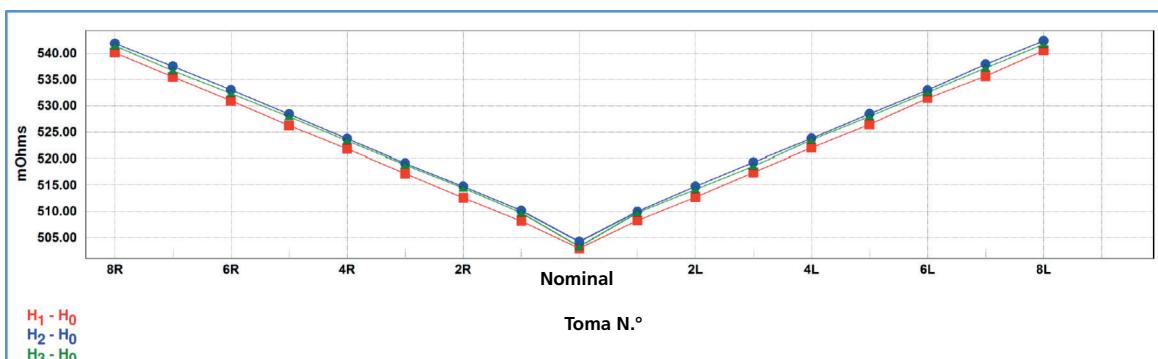


Fig. 4: Resultados OLTC aceptables (Cambiador de tomas bajo carga), resistencia por posición de la toma

También es importante confirmar que el OLTC está "cerrando antes de ruptura" durante la secuencia de operación. La corriente de prueba se mantiene mientras se pasa de una posición de toma OLTC a otra y, con circuitos sumamente sensibles, se supervisa en busca de caídas inesperadas durante cada transición de toma y de cualquier desviación del tiempo esperado de transición (Fig. 5).

		Resistencia de devanados de baja tensión								
		Resistencia medida			Units: mOhms					
TOMA	Corriente (amperio)	Tensión en la placa de características	X ₁ - X ₀	X ₂ - X ₀	X ₃ - X ₀	% de estabilidad de la lectura	% de diferencia de devanados	Cierre/ruptura		
R16 (1)	9.771	15,180	30.56	30.44	30.57	99.95	0.415	80 ms	Pass	Pass
R15 (2)	9.757	15,094	30.12	29.99	30.14	99.98	0.508	80 ms	Pass	Pass
R14 (3)	9.760	15,007	20.10	20.00	20.10	99.99	0.407	100 ms	Pass	Pass

Fig. 5: Ejemplo de un criterio de aprobación y falla de cierre/ruptura para la transición OLTC entre tomas

Un método de diagnóstico relacionado que proporciona muchos más datos, que evalúa la transición de OLTC y que es particularmente útil para los OLTC de tipo resistivo, es la medición de resistencia dinámica. En esta prueba, se grafican la resistencia calculada, la tensión y la corriente como funciones de tiempo durante la operación de conmutación. La resistencia [por ejemplo de devanados + resistencias del conmutador] se calcula utilizando una técnica de patente pendiente de Megger. Este método puede mostrar problemas de alineación de contactos y fallos de operación y/o ausencia de componentes vitales, como resistencias de transición. Otros parámetros, como las características de corriente del motor del cambiador de tomas, pueden registrarse para encontrar problemas durante las transiciones. Se dirige al lector al boletín "Mediciones dinámicas de cambiadores de tomas bajo carga" de Megger para obtener más detalles acerca de este método.