Tema

Un novedoso método de pruebas completas de los transformadores de desplazamiento de fase

Índice resumen

Los transformadores de desplazamiento de fase se utilizan para mejorar la capacidad de transmisión, la confiabilidad y la seguridad operativa en las redes de transmisión complejas. En este artículo se trata un método novedoso para verificar los parámetros de funcionamiento durante las pruebas de aceptación en fábrica y las pruebas de campo en sitio.

Resumen

El transformador de desplazamiento de fase se utiliza para controlar el flujo de potencia activa en una red de transmisión compleja, incluyendo la mejora de la capacidad de transmisión, la confiabilidad y la seguridad operativa de esta red. Es una herramienta eficiente y económica que permite aumentar la confiabilidad y eficiencia del control del flujo de potencia en la línea de transmisión sobrecargada en la que se haya instalado. Por lo tanto, la información sobre su estado técnico también es importante para garantizar un funcionamiento confiable. El artículo se centra en un método novedoso para realizar pruebas de diagnóstico en transformadores de desplazamiento de fase y presenta varios casos de medición que ponen que enfatizan la importancia de los estados de funcionamiento característicos del transformador de desplazamiento de fase.

Palabras clave: sistema eléctrico, regulación del flujo de potencia, transformador, desfasador, pruebas de amplificadores de cuadratura.

1. Introducción

Los sistemas eléctricos actuales no suelen limitarse a un país o región y a menudo comprenden múltiples redes interconectadas de diferentes países. Estas conexiones "transfronterizas" pueden o bien habilitar la operación sincrónica de múltiples redes o establecer un vínculo no sincrónico entre redes operadas independientemente. La ventaja de los sistemas eléctricos interconectados es su reserva mutua de energía eléctrica, lo que se ha vuelto cada vez más importante durante décadas debido al aumento de los recursos energéticos distribuidos (DER).

Los sistemas eléctricos interconectados también presentan desventajas, tales como los flujos circulares no planificados, que pueden producirse si no se puede controlar el flujo de potencia activa entre subsistemas. Estos flujos circulares ocupan parte de la interconexión, lo que reduce la capacidad de transferencia disponible de los sistemas y, por tanto, aumenta las pérdidas. En situaciones críticas, esto puede dar lugar a una reducción del suministro de energía a los consumidores. Una forma de controlar este tipo de fenómenos es la instalación de transformadores de desplazamiento de fase (PST) en conexiones síncronas. Así se puede controlar el flujo de potencia en el ramal en la que están instalados, afectando así al cambio de la distribución de potencia en el entorno de la red. Este artículo se centra en el principio de funcionamiento del PST y en algunas de las dificultades que se presentan durante las pruebas en sitio y de aceptación en fábrica de estos especiales tipos de transformadores.

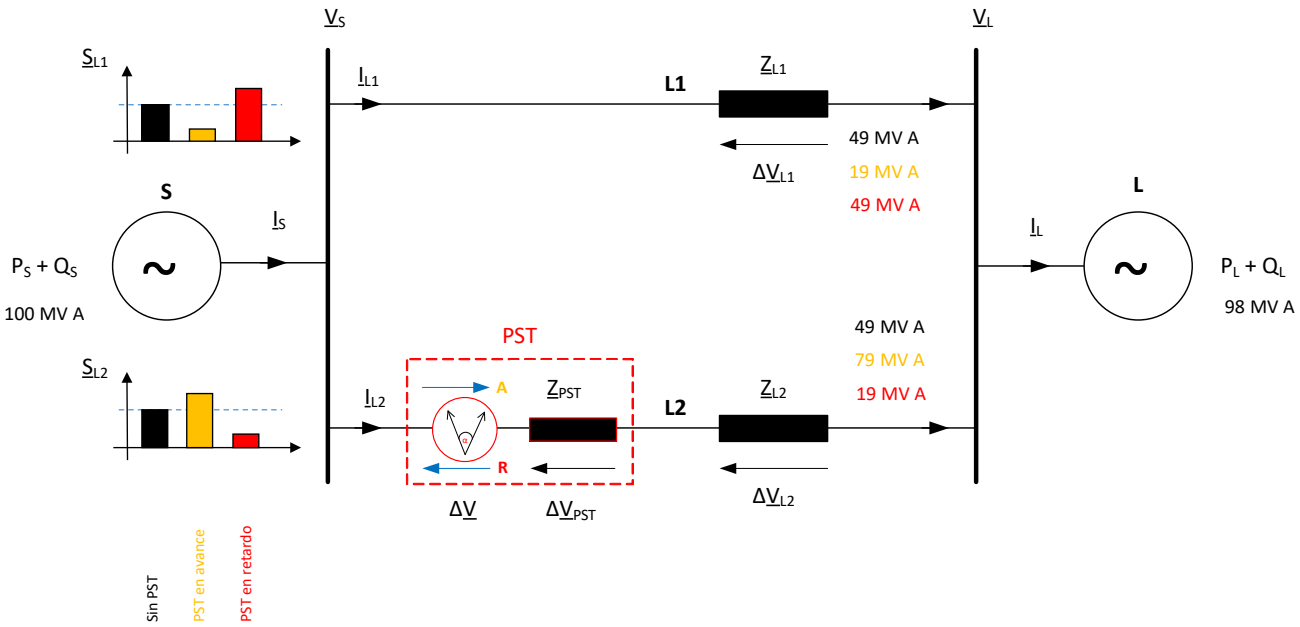


Figura 1. Alimentación doble del diagrama básico de la red de circuitos, incluido el control de potencia mediante PST

2. Principio de la regulación de potencia

El principio básico de la regulación de potencia mediante PST puede explicarse mediante una red simplificada. Considere una fuente (S) de 100 MVA conectada a la carga (L) mediante dos líneas eléctricas paralelas (L1 y L2) con sus respectivas impedancias de línea (Z_{L1} y Z_{L2}). Las pérdidas a lo largo de la línea están determinadas por los parámetros de la línea y dan lugar a un desplazamiento de fase entre las tensiones de los lados de la fuente y de la carga. Dado que Z_{L1} y Z_{L2} son iguales, la potencia transmitida a través de ambas líneas de potencia se distribuirá uniformemente. En un sistema de este tipo, la potencia siempre se distribuirá de acuerdo con los parámetros de la línea y no puede regularse. Por lo tanto, los PST se utilizan para introducir un desplazamiento de fase adicional entre la carga y la fuente, con el fin de regular el flujo de potencia por ambas líneas.

En general, en función del tipo de PST, es posible regular el flujo de potencia activa y reactiva (en función de la construcción del PST):

$$S = \frac{|U_S| \cdot |U_L|}{X_L} \cdot \left[\sin(\alpha) + j\cos(\alpha) - \frac{|U_L|}{|U_S|} \right], \quad (1)$$

Dependencia de la potencia activa y reactiva transmitida (1) teniendo en cuenta el PST:

$$S_{PST} = \frac{|U_S| \cdot |U_L|}{X_L + X_{PST}} \cdot \left[\sin(\alpha + \varphi) + j\cos(\alpha + \varphi) - \frac{|U_L|}{|U_S|} \right], \quad (2)$$

Donde: U_S - tensión del lado de la fuente "S"; U_L - tensión del lado de la carga "L"; X_L - reactancia de la línea (circuito) en la que se instaló el PST; X_{PF} - reactancia interna del PST; α - ángulo de fase entre sistemas.

En el ejemplo dado, se introduce un desplazamiento de fase negativo en la rama en la que se instala el desfasador colocando el PST en la posición de retardo, lo que disminuye la potencia transmitida en esta rama. Debido a que la suma de la potencia transmitida por ambas líneas sigue siendo la misma, la potencia en la otra rama aumenta. Al colocar el PST en la posición de avance e introducir un desplazamiento de fase positivo, la distribución de potencia es completamente opuesta a la del caso anterior. Esta vez, aumenta la potencia que fluye en la rama donde se encuentra el PST, mientras se reduce la potencia en la rama sin el PST.

Hasta ahora, en el ejemplo sólo se ha hablado de la regulación de potencia activa mediante el ajuste del ángulo de fase, que suele denominarse regulación simétrica. También es posible regular el flujo de potencia reactiva mediante la intervención en la relación entre la tensión de la fuente y de la carga. Los PST que regulan tanto la potencia activa como la reactiva se denominan transformadores de desplazamiento de fase asimétricos. El objeto de este artículo se limitará al PST simétrico.

3. Principio de funcionamiento del PST simétrico

El concepto básico del ajuste del ángulo de fase se basa en añadir una tensión adicional a la tensión presente en la ruta principal con un desplazamiento de fase de 90° (tensión de cuadratura, $\Delta\underline{U}$). En función de la magnitud y polaridad de la tensión inducida, puede ajustarse el ángulo de fase, figura 3. Para ello se utilizan

PST, que suelen estar formados por dos transformadores: Una unidad enserie y una unidad de excitación, interconectadas de tal manera que permiten el ajuste de fase entre los lados de la fuente y de la carga. El ejemplo de construcción en la versión simétrica de una sola escalera se describe en la figura 2.

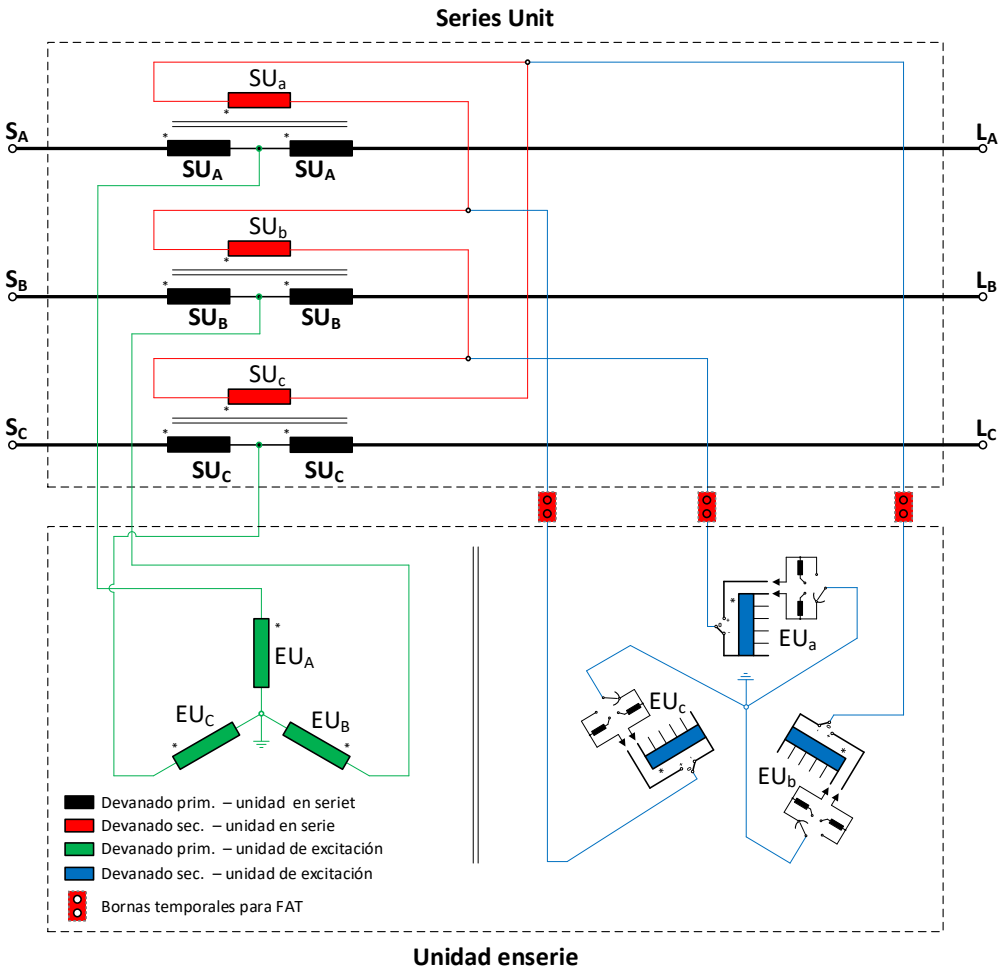


Figura 2. El sistema de cableado de los devanados de los desfasadores simétricos

3.1 Unidad en serie

La unidad en serie (US) es el elemento principal del PST, cuyo devanado primario está conectado en serie a la línea eléctrica entre la fuente "S" y la carga "L". En la versión simétrica de un PST, la US del devanado primario consta de dos partes divididas simétricamente entre los lados "S" y "L". Entre las dos partes separadas del devanado primario, la US está conectada al devanado primario de la unidad de excitación (UE), figura 2. El devanado secundario de la US se conecta en delta con el devanado secundario de la UE para introducir una tensión desplazada en 90° respecto a la tensión de alimentación.

3.2 Unidad de excitación

La finalidad de la unidad de excitación (UE) es transformar la tensión derivada del devanado primario de la US en amplitud y ángulo de fase, de modo que pueda ser reinducida por el devanado secundario de la US. Por lo tanto, el devanado primario de la UE está conectado entre las bobinas separadas simétricamente de la US del devanado primario (figura 2). Esta conexión permite el ajuste de fase entre "S" - "L" sin cambiar la

amplitud de la tensión del lado de carga UL. Para regular la magnitud de la tensión de cuadratura y, por lo tanto, el ángulo de fase entre el lado de la fuente y el de la carga del PST, el devanado secundario está equipado con un cambiador de tomas en carga (OLTC).

Para ilustrar el principio de la introducción de la tensión de cuadratura, la figura 4 presenta una serie de diagramas vectoriales en diferentes etapas operativas de la transformación. Los valores de tensión mostrados son para PST simétricos con una tensión nominal de 400 kV y un ángulo de ajuste de ± 20˚ [1]. Los colores de los devanados (figura 2) son los mismos que los colores de los vectores. Figura 3.

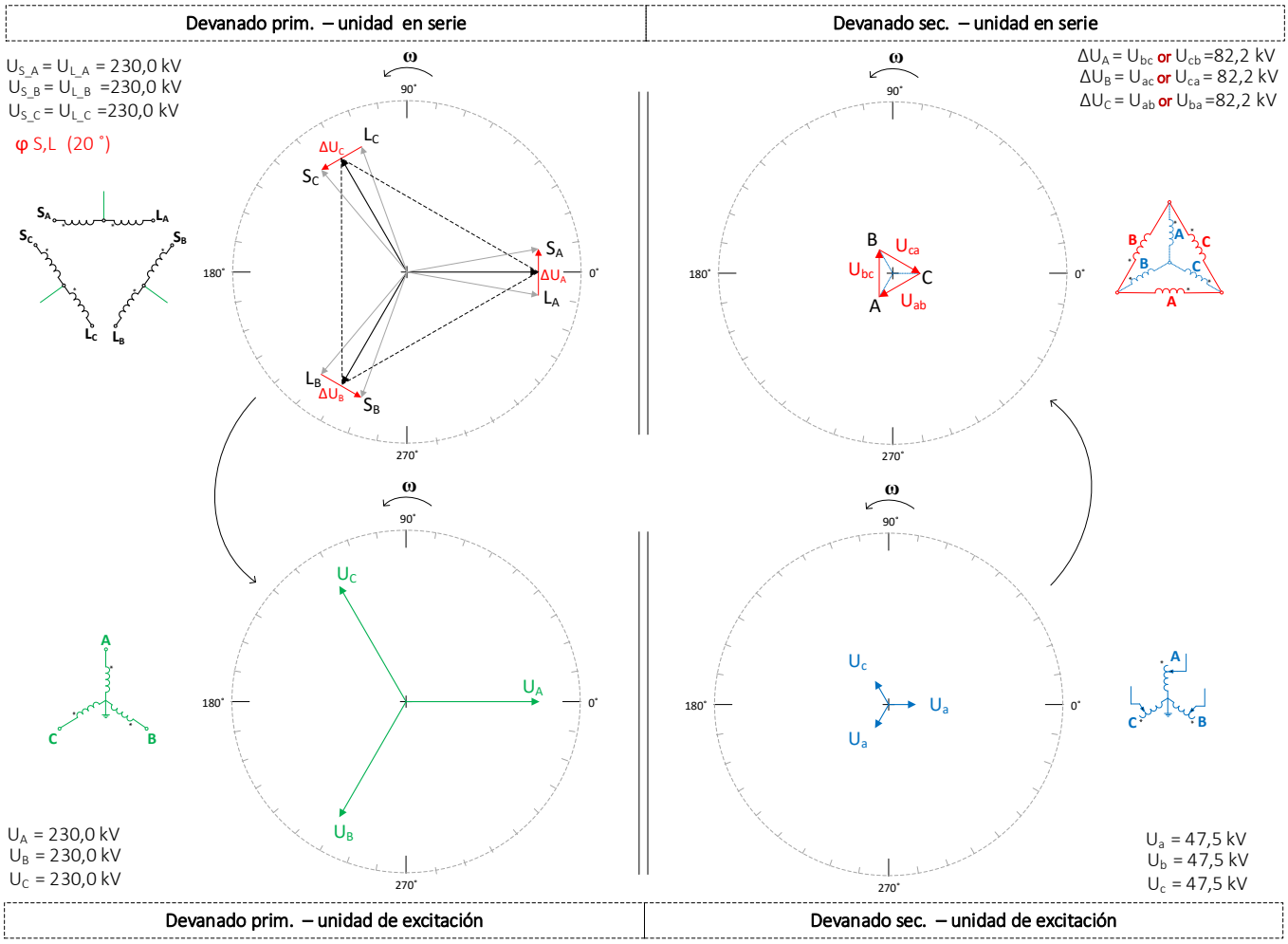


Figura 3. Diagrama vectorial de las tensiones en cada fase de transformación con el PST en el estado sin carga

El estándar [2] distingue entre dos tipos de desplazadores de fase, dependiendo de si la unidad en serie y la de excitación se alojan en dos cubas o en una sola. Independientemente del diseño seleccionado, la idea de funcionamiento es siempre la misma: la diferencia está en la implementación de la tensión ΔU, así como en las ventajas y desventajas de la solución. A la hora de elegir el tipo de estructura del PST, se tienen en cuenta muchos aspectos, pero el parámetro más determinista suele ser es la potencia transitiva.

4. Pruebas de los transformadores de desplazamiento de fase

Cuando se instalan PST en el campo, los terminales de la UE no suelen ser accesibles. Aunque es común instalar bornas temporales con el fin de realizar pruebas durante la aceptación en fábrica, esta opción rara

vez existe durante las pruebas de campo en sitio. Por lo tanto, las pruebas individuales de la UE sólo son posibles en fábrica. La tabla 1 enumera varias pruebas eléctricas que forman parte de las pruebas de aceptación estándar de las unidades en serie y de excitación. Cabe señalar que en la tabla 1 se enumeran las pruebas que se han elegido en el contexto del presente artículo porque son adecuadas para mostrar el comportamiento característico de los PST y suelen formar parte de todo procedimiento de aceptación en fábrica o de pruebas en sitio. Sin embargo, no representan la lista completa de las pruebas que se pueden realizar. En nuestro caso, el equipo en prueba es un transformador de 500 MVA, 230 kV, simétrico IIId / YNyn0, con un rango de desplazamiento de fase de -10° a +10°. Esto significa que el devanado primario de la unidad en serie está conectado en serie (III) y el devanado secundario está conectado en delta (d) sin desplazamiento de fase. Los lados primario y secundario de la unidad de excitación están conectados en estrella con conexión neutra (YNyn) y un desplazamiento de fase de 0 grados entre los dos lados. El desplazamiento de fase de -10° a +10° entre los terminales del lado de la fuente y de la carga sólo se consigue mediante la introducción de la tensión de cuadratura. °.

Tabla 1. Pruebas eléctricas elegidas en PST para pruebas de aceptación en fábrica (FAT) y pruebas en sitio

Medición	Unidad en serie	Unidad de ex citación
Relación de tr ansformación de tensión	FAT / en sitio	FAT
Corriente de ex citación	FAT / en sitio	FAT
Desfase	FAT / en sitio	FAT
Resistencia del devanado de CC	FAT / en sitio	FAT
Resistencia dinámica del devanado de CC (escaneo del OLTC)	FAT / en sitio	FAT

4.1 Medición de unidad en serie

De forma análoga a la medición de la relación de tensión en diferentes posiciones de toma de un transformador de red común, es importante verificar el rango del desplazamiento de fase especificado entre los terminales de línea de los lados "S" y "L" del PST.

Figura 4. Conexión única del sistema de prueba de transformadores trifásicos para realizar todas las pruebas eléctricas de acuerdo con la tabla 1.

En este caso, se utiliza un sistema portátil de prueba de transformadores trifásicos, figura 4, para realizar una medición simultánea del desplazamiento de fase, figura 5, de la relación de transformación de tensión, figura 6 y de la corriente de excitación de las tres fases. Los resultados confirman el rango de funcionamiento comprendido entre +10° y -10° con un ancho de paso de 0,87 ° en condiciones sin carga.

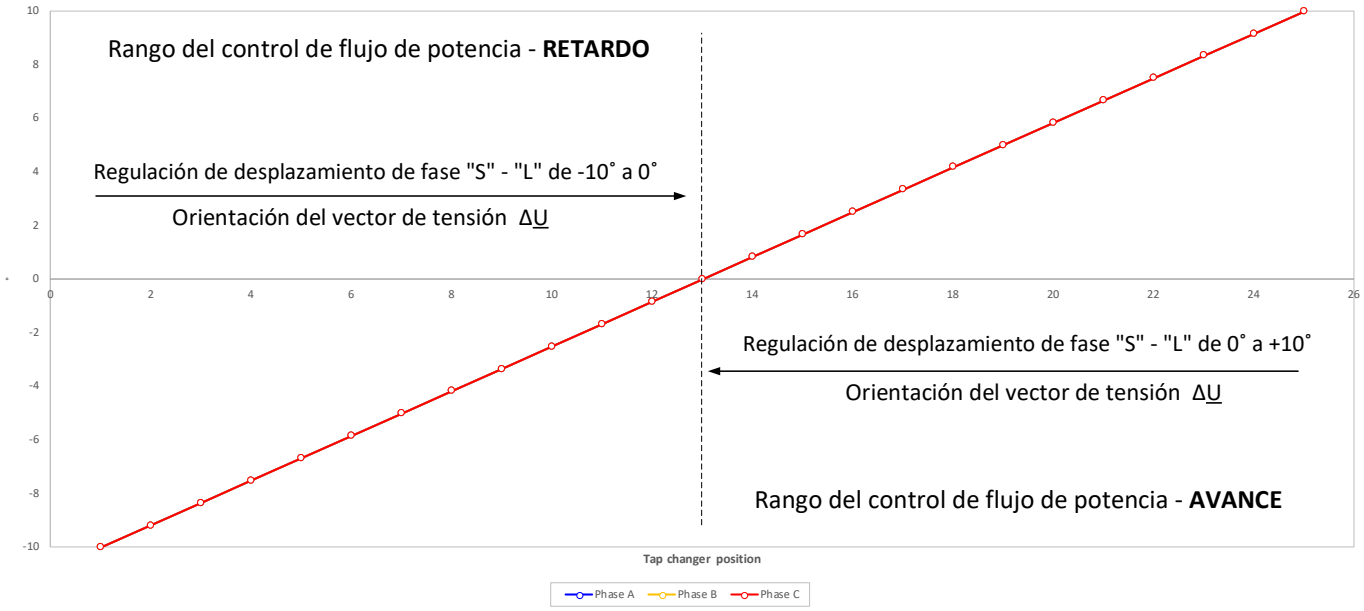
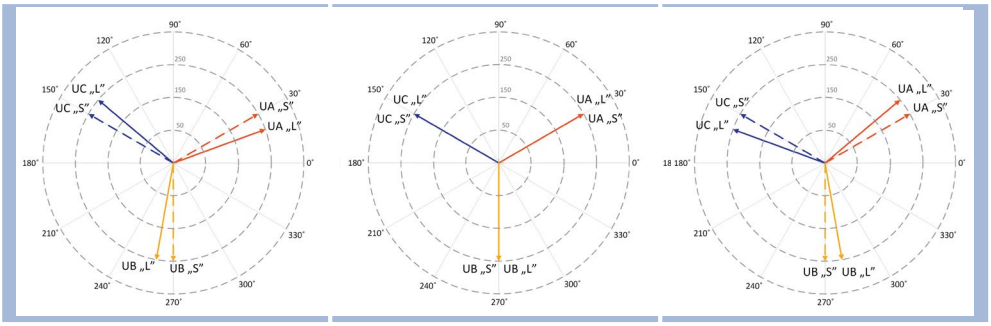


Figura 5. Los resultados de las mediciones de desplazamiento de fase "S" - "L" en función de la posición del OLTC de la unidad de excitación

Una gran dificultad para los técnicos de pruebas, especialmente durante las pruebas de puesta en servicio en sitio, es determinar si el PST está operando en posición de avance o retardo, es decir, si el PST está aumentando o bloqueando el flujo de potencia en la rama correspondiente, figura 1. Esto es necesario para

definir los terminales de los lados de la fuente y de la carga. Mediante una medición trifásica, la relación de fase de las tensiones y corrientes de los lados de fuente y carga se puede mostrar cómodamente en un diagrama vectorial para determinar el estado del control. En la tabla 2 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en diferentes posiciones de toma.

Tabla 2. Los resultados de las mediciones de desplazamiento de fase "S" - "L" para tres posiciones características

Canal	Desfase 10°		Desfase 0°		Desfase -10°	
	Valor	Fase	Valor	Fase	Valor	Fase
UA "S"	250 V	30°	250 V	30°	250 V	30°
UB "S"	250 V	-90°	250 V	-90°	250 V	-90°
UC "S"	250 V	150°	250 V	150°	250 V	150°
UA "L"	250 V	20°	250 V	30°	250 V	40°
UB "L"	250 V	-100°	250 V	-190°	250 V	-80°
UC "L"	250 V	140	250 V	150°	250 V	160°
						

La interpretación vectorial de los resultados de la medición de la dirección de control del desplazamiento de fase da una indicación inequívoca de qué vector de tensión del lado "S" o "L" está retrasado o por delante del otro. Gracias a esta visualización de los resultados de medición, no es necesario un registro adicional de osciloscopio, que requeriría equipos adicionales y aumentaría el tiempo de prueba.

Es posible determinar los valores matemáticos de la tensión adicional ΔU que debe introducirse entre los vectores de tensión US - UL para obtener el desplazamiento de fase deseado [3]:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot U_{LL}}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right), \qquad (3)$$

Donde: U_{LL} - Tensión de fase a fase del PST, φ - desplazamiento de fase previsto entre "S" y "L".

El valor de tensión | ΔU | se calculará para el PST analizado, así como los dos puntos de control de ejemplo de las fases de 5˚ y 10˚:

$$\Delta U_{5^\circ} = \frac{2 \cdot 220}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\frac{5}{2}\right) = 11.08 \text{ kV},$$

$$\Delta U_{10^\circ} = \frac{2 \cdot 220}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\frac{10}{2}\right) = 22.14 \text{ kV},$$

Al medir la relación entre el lado "S" y el lado "L" de la US, es posible identificar el tipo de PST en prueba. Una relación de tensión constante en todo el rango de desplazamiento de fase, figura 6, es indicativa de un PST simétrico. Esto se debe a que la tensión ΔU, figura 3, se introduce entre las bobinas divididas simétricamente del devanado principal, figura 2. Un cambio en el ángulo de fase y la relación indicaría una regulación asimétrica, es decir, el ajuste tanto de la potencia activa como reactiva.

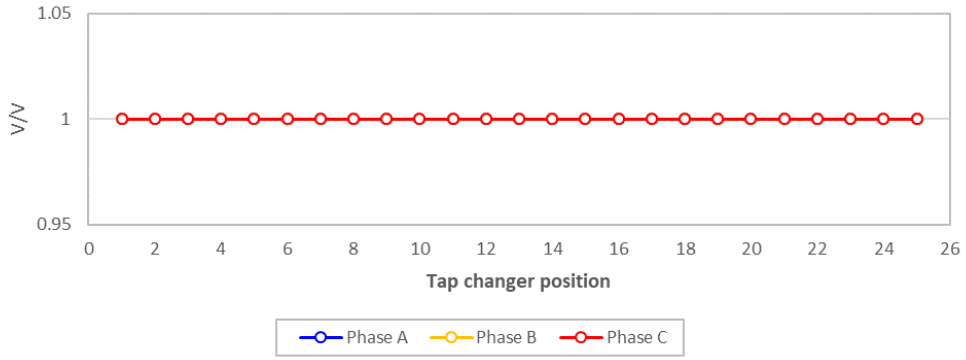


Figura 6. Resultados de la medición de la relación de tensión "S" - "L" de la unidad en serie en función de la posición del OLTC de la unidad de excitación

4.2 Medición de la unidad de excitación

La primera medición de la UE es comprobar la relación de tensión de todas las posiciones del cambiador de tomas. Cambiando la relación de tensión de la UE, se puede ajustar la magnitud de la tensión de cuadratura y, por lo tanto, el desplazamiento de fase entre los lados de la fuente y de la carga. La figura 7 muestra el cambio de relación entre 4,52 y 54,19 para las posiciones 1 a 12 y viceversa para las posiciones 12 a 25. Las posiciones 13A a 13B son las posiciones del selector de conmutación para cambiar la polaridad del devanado de regulación, figura 8.

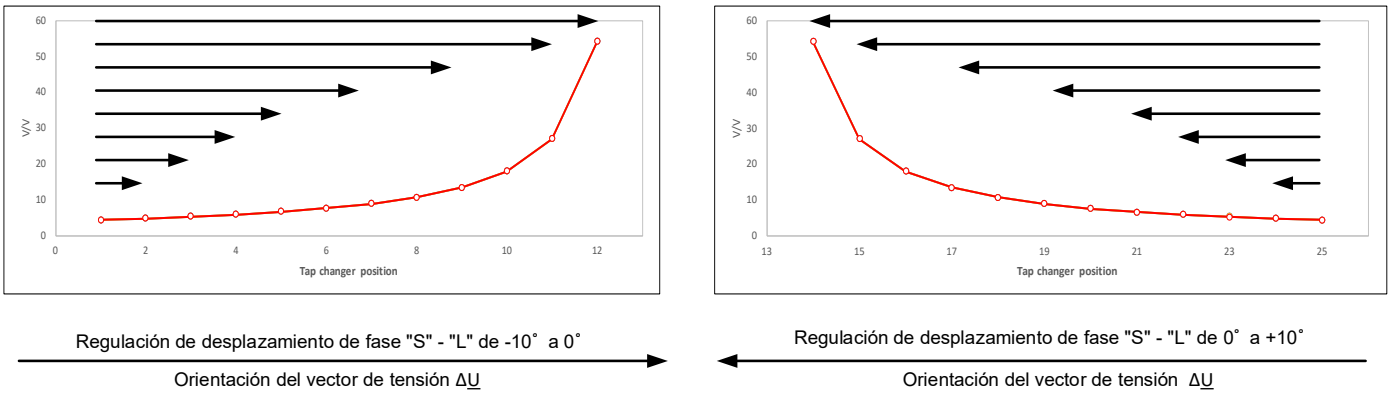


Figura 7. Resultados de la medición del convertidor de tensión de la unidad de excitación en función de la posición del OLTC

Aunque, según la placa de características, el desplazamiento de fase de la UE se indica con 0 - 0˚, el cambio de polaridad es claramente visible cuando se mide el desplazamiento de fase entre los dos devanados del grupo vectorial 6 - 180°, figura 8. Este cambio de polaridad es necesario para operar el PST en posición de avance o de retardo.

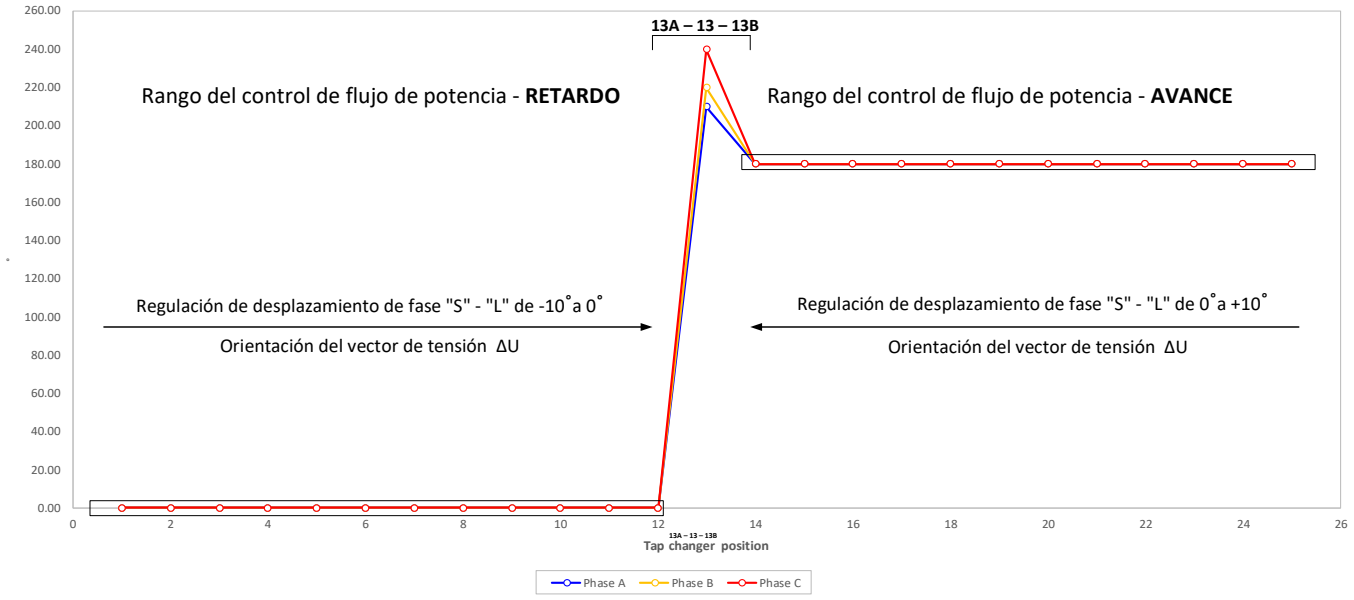


Figura 8. Resultados de las mediciones de desplazamiento de fase de la unidad de excitación en función de la posición del OLTC

Conclusión

Los transformadores de desplazamiento de fase (PST) son una parte importante de las redes de potencia síncrona actuales. Debido a la cambiante infraestructura de generación, es probable que desempeñen un papel aún más importante para garantizar la confiabilidad de las redes eléctricas en el futuro. Como los PST suelen instalarse en nodos críticos de la red, el tiempo de mantenimiento fuera de línea es muy valioso. Los resultados han demostrado que el uso de un sistema de pruebas de los transformadores trifásicos es un método muy rápido y eficaz para verificar los parámetros de funcionamiento de un PST durante la puesta en servicio y el mantenimiento en el campo. Al estudiar el ejemplo de un PST simétrico, hemos demostrado que el principio de funcionamiento puede ser una combinación de unidades en serie y de excitación que puede verificarse fácilmente durante las pruebas de aceptación en fábrica. El mismo método puede utilizarse asimismo con los PST asimétricos.

Bibliografía

[1]. T.Bednarczyk, M.Szablicki, A.Halinka, P.Rzepka: Structure of the Automatic Protection of a 2-tank Symmetric Phase Shifting Transformer (Estructura de la protección automática de un transformador de desplazamiento de fase simétrico de 2 cubas). Acta Energetica 32/2018

[2]. IEC 60076-52-1202:2017. Transformadores de potencia - Parte 57-1202: Transformadores de desplazamiento de fase sumergidos en líquido

[3]. M.A.Ibrahim, F.P.Stacom: Phase Angle Regulating Transformer Protection (Protección de los transformadores de regulación del ángulo de fase). IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No. 1, enero de 1994

[4]. Manual del usuario de TESTRANO 600. OMICRON electronics GmbH 2018

Destacados

El concepto básico del ajuste del ángulo de fase se basa en añadir una tensión adicional a la tensión presente en la ruta principal con un desplazamiento de fase de 90°, en función de la magnitud y polaridad de la tensión inducida, para ajustar el ángulo de fase

A la hora de elegir el tipo de estructura del PST, se tienen en cuenta muchos aspectos, pero el parámetro más determinista suele ser es la potencia transitiva

Por lo tanto, las pruebas individuales de la unidad de excitación sólo son posibles en fábrica

En este caso, se utiliza un sistema portátil de prueba de transformadores trifásicos para realizar una medición simultánea del desplazamiento de fase, de la relación de transformación de tensión y de la corriente de excitación de las tres fases

Una gran dificultad para los técnicos de pruebas, especialmente durante las pruebas de puesta en servicio en sitio, es determinar si los PST están operando en posición de avance o retardo, que es necesario para definir los terminales de los lados de fuente y carga

Un cambio en el ángulo de fase y la relación indicaría una regulación asimétrica, es decir, el ajuste tanto de la potencia activa como reactiva

Biografía

Cornelius Plath se graduó en Ingeniería Eléctrica y Administración de Empresas en la Universidad Técnica de Aquisgrán, Alemania. Durante sus estudios, participó en varios proyectos de investigación financiados por compañías del sector para la evaluación del estado de las aparatos eléctricas en el Instituto de tecnología de alta tensión. Se unió a OMICRON en 2010 como ingeniero de aplicación y en la actualidad ocupa el cargo de gerente de producto. Tiene una amplia experiencia aplicaciones internacionales y especializándose en el diagnóstico eléctrico de interruptores de potencia y transformadores.

Tomasz Bednarczyk se graduó en el Departamento de Electricidad de la Universidad Tecnológica de Silesia (2015). Actualmente es estudiante de doctorado en el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Control de Sistemas. enfoque son las actividades de investigación relacionadas con el análisis del estado de funcionamiento de los desfasadores en condiciones de funcionamiento normales y perturbadoras con el fin de probar el correcto funcionamiento del sistema de protección eléctrica. Lleva muchos años asociado profesionalmente con el tema de la medición de equipos primarios y secundarios en subestaciones. Desde 2017 trabaja para OMICRON electronics GmbH como ingeniero de aplicaciones.

Adam Jaros se graduó en Ingeniería Eléctrica (Facultad: Motores y transformadores eléctricos) de la Universidad Técnica de Lodz en 2003. Desde el comienzo de su carrera profesional (en 2002) estuvo asociado a la planta de transformadores de potencia de ABB en Lodz como ingeniero en el campo de pruebas. A partir de 2009, dirigió el Campo de Pruebas en la División de Transformadores de Potencia de ABB.

OMICRON es una compañía internacional que presta servicio a la industria de la energía eléctrica con innovadoras soluciones de prueba y diagnóstico. La aplicación de los productos de OMICRON brinda a los usuarios el más alto nivel de confianza en la evaluación de las condiciones de los equipos primarios y secundarios de sus sistemas. Los servicios ofrecidos en el área de asesoramiento, puesta en servicio, prueba, diagnóstico y formación hacen que la nuestra sea una gama de productos completa.

Nuestros clientes de más de 160 países confían en la capacidad de la compañía para brindar tecnología de punta de excelente calidad. Los Service Centers en todos los continentes proporcionan una amplia base de conocimientos y un extraordinario servicio al cliente. Todo esto, unido a nuestra sólida red de distribuidores y representantes, es lo que ha hecho de nuestra empresa un líder del mercado en la industria eléctrica.

Para obtener más información, documentación adicional e información de contacto detallada de nuestras oficinas en todo el mundo visite nuestro sitio web.

www.omicronenergy.com

© OMICRON