

# Experiencias en las pruebas y puesta en servicio de la protección diferencial de los transformadores de desplazamiento de fase

T. Hensler, F. Fink\*, H. Mitter†

\*OMICRON electronics GmbH, Austria, thomas.hensler@omicronenergy.com, †Vorarlberger Energienetze GmbH, Austria

**Palabras clave:** Transformadores de desplazamiento de fase, protección diferencial de transformadores, pruebas de protección.

## Resumen

Debido a la creciente demanda para controlar el flujo de potencia en nuestras redes actuales, se instalan más transformadores de desplazamiento de fase (amplificadores de cuadratura). El principio de protección más importante de los transformadores es la protección diferencial. La protección diferencial tiene que tener en cuenta un desplazamiento de fase adicional para cumplir los requisitos de selectividad. Especialmente en el caso de las fallas bifásicas fuera del transformador, un desplazamiento de fase adicional introducirá una corriente diferencial en la fase sin falla. El relé de protección tiene que afrontar esta situación y esto tiene que verificarse durante la puesta en servicio. Los diferentes fabricantes de relés utilizan diferentes métodos para que los relés garanticen la estabilidad de los transformadores de desplazamiento de fase. En función del desplazamiento de fase real, que suele indicarse al relé usando entradas binarias, tiene que adaptarse la protección diferencial. Se emplean diferentes métodos para los diferentes tipos de transformadores de desplazamiento de fase (p. ej., versiones de uno y dos núcleos). Para la puesta en servicio de un relé para un transformador de desplazamiento de fase es necesario verificar el correcto comportamiento de la protección. Usando un software de pruebas basado en la simulación con la capacidad de simular el comportamiento detallado de los desplazamientos de fase en cada una de las posiciones de toma del transformador, pueden realizarse pruebas detalladas y de manera práctica.

## 1 Introducción

La transición energética ha provocado notables cambios en nuestra red eléctrica durante los últimos años. La integración de muchas fuentes de energía renovables ha cambiado el flujo de potencia considerablemente. Anteriormente, la mayor parte de la potencia se transfería desde los niveles de tensión más altos a los más bajos. Sin embargo, en la actualidad las redes de distribución alimentan también los sistemas de transporte. Además, el entorno del mercado del comercio energético ha cambiado en muchos países, por ejemplo, en todos los países de la Unión Europea, lo que provoca una dinámica aún mayor en el flujo de energía eléctrica.

Tanto los operadores de los sistemas de transporte (TSO) como los operadores de los sistemas de distribución (DSO) quieren controlar el flujo de potencia tanto como sea posible. Mediante el uso de un transformador de desplazamiento de fase es posible controlar el flujo de potencia activa al alterar el ángulo de fase de las corrientes. Aunque un transformador de desplazamiento de fase constituye una importante inversión para una compañía eléctrica, se amortizará en un par de años debido a la dinámica del mercado de la electricidad.

Para explicar el principio de un transformador de desplazamiento de fase, repasaremos aquí los principios básicos de la transferencia de potencia activa en las líneas de transmisión. En un modelo simplificado de la línea, en el que se ignoran las pérdidas resistivas, el flujo de potencia activa  $P$  sobre una línea eléctrica se ve afectado por la reactancia de la línea  $X$  y la diferencia de ángulo de fase  $\varphi_1 - \varphi_2$  entre los dos extremos de la línea, según la siguiente ecuación (1):

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

Mediante la introducción de un desplazamiento de fase adicional  $\delta$  el valor se puede modificar como sigue (2):

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\varphi_1 - \varphi_2 + \delta) \quad (2)$$

El principio de protección más importante de los transformadores de potencia es la protección diferencial. La protección diferencial evalúa la diferencia de las corrientes en ambos lados del transformador. La introducción de un desplazamiento de fase variable en la corriente afectará el valor de la diferencia que tiene que tener en cuenta la protección, de modo que se cumplan los requisitos en cuanto a selectividad y estabilidad. La situación más exigente para el relé de protección se produce en el caso de una falla bifásica externa en la que la protección diferencial debe permanecer estable. El desplazamiento de fase del transformador provocará una corriente diferencial también en la fase sin falla. Pero la corriente de estabilización de esa fase es bastante baja, por lo que esto puede causar un disparo erróneo del relé.

Los diferentes fabricantes de relés utilizan diferentes métodos para hacer frente a este problema y garantizar la estabilidad de la protección. El elemento de protección diferencial tiene que adaptarse en función del desplazamiento de fase variable del transformador. Por lo general, el desplazamiento de fase de la corriente se indica al relé de protección usando los contactos binarios del cambiador de tomas.

## 2 Principio de los transformadores de desplazamiento de fase

El principio de los transformadores de desplazamiento de fase se basa en la introducción de un desplazamiento de fase variable con el fin de controlar el flujo de potencia real por una ruta específica de la red. En Estados Unidos los transformadores de desplazamiento de fase se suelen llamar transformadores reguladores de ángulo de fase (PAR), mientras que en Reino Unido se conocen como amplificadores de cuadratura. En este documento seguiremos usando el término desplazamiento de fase.

El desplazamiento de fase variable se logra mediante la introducción de componentes de tensión desplazados  $90^\circ$  (de ahí, el nombre de cuadratura) a partir de un devanado conectado en triángulo, mientras que la magnitud se altera mediante diferentes tomas móviles. El principio de un simple desfaseador se muestra en un circuito trifásico en la figura 1.

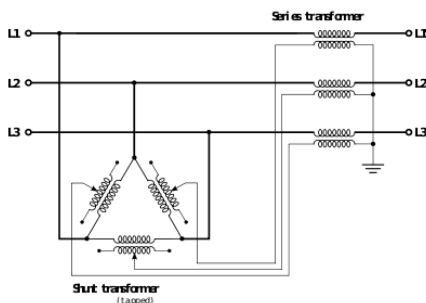


Figura 1: Principio de un transformador de desplazamiento de fase

Usando el transformador de derivación conectado en triángulo, se consiguen componentes de tensión desplazados  $90^\circ$  con respecto a cada fase. La salida del transformador de derivación se añade entonces a las tensiones de fase utilizando un transformador en serie que crea la suma vectorial de la tensión de fase y los componentes más pequeños a  $90^\circ$ . Las conexiones de toma del transformador de derivación permiten controlar las magnitudes de los componentes de  $90^\circ$  y por lo tanto, la magnitud del desplazamiento de fase. Son posibles desplazamientos de fase tanto en dirección positiva como negativa. Las dos unidades de transformadores se construyen, por lo general, como unidades independientes en sus tanques independientes. Pero hay otros tipos de construcción, en los que todos los devanados están en el mismo núcleo (mononúcleo), ya que un solo tanque es más económico.

Otra solución técnica común es la integración de un transformador de desplazamiento de fase en un transformador de potencia para transformar de un nivel de tensión a otro. Los transformadores de potencia entre diferentes niveles de tensión por lo general ya tienen múltiples tomas con relaciones de transformación ligeramente diferentes para la regulación de la tensión. Por lo tanto, se construyen también en el mismo transformador tomas adicionales para el desplazamiento de fase. Dado que las tomas para la regulación de la tensión pueden estar disponibles tanto en el lado de baja tensión como de alta tensión, las tomas de desplazamiento de fase se realizan

principalmente en el lado opuesto de las tomas reguladoras de tensión.

Se muestra un ejemplo en la figura 2 con un transformador YNy0 de 410kV:230kV con 450MVA. El transformador tiene un cambiador de tomas de regulación de tensión convencional en el lado de alta tensión con 17 tomas. En el lado de baja tensión hay 35 tomas con desplazamientos de fase de  $-17,22^\circ$  a  $+17,22^\circ$ . La polaridad del desplazamiento de fase se conecta a un interruptor independiente, por lo general, llamado interruptor de avance/retardo, antes de cablear las tomas al cambiador de tomas en línea (OLTC).

Este transformador se incorpora a dos tanques independientes, tal como se indica mediante las líneas discontinuas que rodean las unidades independientes. El transformador de regulación se conecta solo en el extremo inferior del devanado en estrella de baja tensión y el devanado delta del tanque del transformador principal para crear las tensiones desplazadas en fase  $90^\circ$ . Esto permite una construcción más económica de la unidad reguladora.

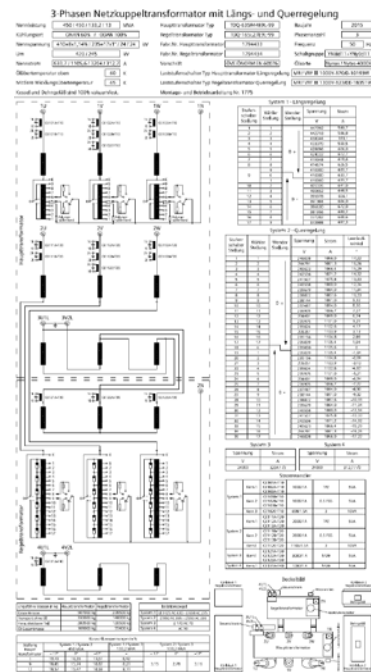


Figura 2: Transformador de potencia trifásico de 410kV:230kV con tomas de control de tensión en el lado de alta tensión y tomas de desplazamiento de fase en el de baja tensión

El principio de cómo se genera el desplazamiento de fase en este transformador se muestra en la figura 3. Para cada fase se añade una pequeña parte de la tensión de las otras dos fases en igual magnitud a la tensión de la fase principal, añadiéndose por último un componente de  $90^\circ$ .

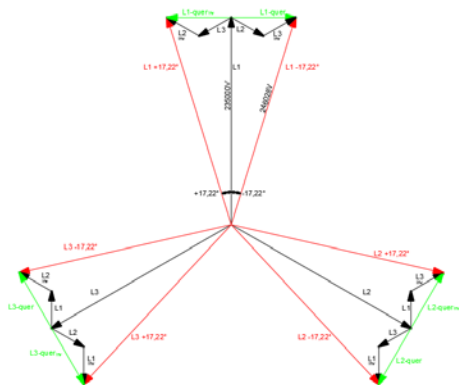


Figura 3: Principio para crear desplazamientos de fase con componentes de tensión de las otras dos fases

Como segundo ejemplo, se muestra en la figura 4 un transformador de desplazamiento de fase de 220kV:110kV con 300MVA en una construcción de un solo núcleo y un solo tanque. Este transformador tiene también tomas reguladoras de tensión en el lado de alta tensión (29 tomas incluyendo un OLTC). En el lado de baja tensión se realizan 17 tomas de desplazamiento de fase con un posible desplazamiento de fase de  $-15,2^\circ$  a  $+15,2^\circ$ .

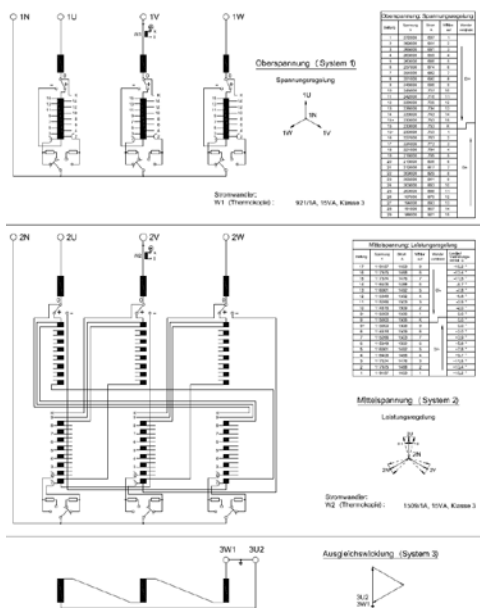


Figura 4: Transformador de potencia de desplazamiento de fase trifásico de 220kV:110kV

Con esta configuración del devanado se realiza la tensión reactiva como la suma de dos componentes, uno de la propia fase y otro con el doble de la magnitud de una de las otras fases, como se puede ver en la figura 5 en el diagrama fasorial (triángulo de la derecha a  $60^\circ$ ).

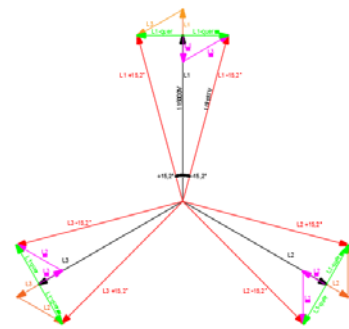


Figura 5: Principio para crear desplazamientos de fase con un componente de tensión sólo a partir de una de las otras fases

### 3 Retos para la protección diferencial

El principio de protección principal de los transformadores de potencia es la protección diferencial (ANSI 87T). Elementos de protección diferencial supervisan la corriente diferencial entre los lados de alta y baja tensión y se disparan en cuanto el valor diferencial supera un umbral determinado. Para estabilizar la protección se suele utilizar una característica de frenado por porcentaje, en la que se utiliza una magnitud de frenado (corriente de polarización), que por lo general, refleja la magnitud de las corrientes que pasan por el transformador. Usando una característica de restricción por porcentaje, el umbral de corriente diferencial puede controlarse en función de la corriente de polarización. Cuanto mayor sea la corriente de polarización, mayor será el umbral necesario.

Restringiendo el elemento diferencial con una corriente de polarización se consigue estabilidad para una gran cantidad de diferentes circunstancias durante el funcionamiento del transformador, tal como errores del TC o saturación del TC. Asimismo, la característica de restricción por porcentaje puede compensar pequeñas diferencias en las corrientes diferenciales calculadas debido a las tomas reguladoras de tensión del transformador. Aunque hay algunos relés de protección que tienen en cuenta la posición de la toma de corriente y ajustan la relación de transformación de forma correspondiente.

Para el cálculo de la magnitud de restricción (corriente de polarización) los distintos fabricantes de relés utilizan fórmulas y métodos bastante diferentes. Hay relés de protección que determinan la corriente de polarización de forma individual para cada fase, mientras que otros relés eligen un valor máximo entre todas las fases para conseguir una buena estabilidad en todos los grupos vectoriales diferentes.

En un transformador con tomas para el desplazamiento de fase, la influencia del desplazamiento de fase en el ángulo y la magnitud no se puede compensar mascon una característica de restricción de mayor porcentaje. Los desplazamientos de fase de hasta  $20^\circ$  y más dan lugar a un comportamiento de transformación de corriente que es casi similar a un grupo vectorial diferente. Por ello, para la protección de los transformadores de desplazamiento de fase, los relés diferenciales tienen que adaptar su comportamiento a la posición existente de la toma para conseguir una estabilidad

coherente en todos los diferentes estados de funcionamiento del transformador.

Un reto especial para la protección diferencial son las fallas bifásicas fuera del transformador protegido. El desplazamiento de fase logrado en el transformador es eficaz para los componentes de secuencia positiva, tal como se especifica. Pero en el caso de las corrientes de secuencia negativa se aplica el ángulo de fase en la dirección opuesta. Esto podría causar una distribución no simétrica de las corrientes en el transformador en el caso de las fallas bifásicas, donde están presentes corrientes de secuencia negativa y esto introducirá una corriente diferencial considerable en la fase sin falla también.

La distribución de la corriente en un transformador de desplazamiento en el caso de una falla externa bifásica se muestra en la figura 6 con un desfaseador de un solo núcleo.

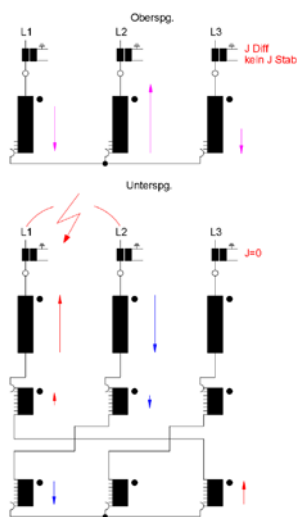


Figura 6: Distribución de corriente con un transformador de desplazamiento de fase en el caso de una falla bifásica externa

La ocurrencia de una falla externa L1-L2 en el lado de baja tensión que forzará una corriente de falla con un ángulo de fase de  $180^\circ$  por las fases L1 y L2. Pero debido a las partes del devanado de las otras fases, que se utilizan para introducir el componente de  $90^\circ$  del desplazamiento de fase, se introduce una corriente en la fase sin falla en el lado de alta tensión también. Las corrientes de las fases con falla L1 y L2 en el lado de alta tensión ya no son simétricas.

El mismo efecto también puede observarse en otras configuraciones de devanado (consulte [2]). Para la protección diferencial, esta corriente adicional en la fase sin falla puede causar un disparo diferencial, puesto que no hay ninguna corriente de polarización adicional en la fase sin falla. La protección diferencial del transformador de desplazamiento de fase tiene que hacer frente a esta situación y garantizar la estabilidad en el caso de fallas externas en todas las situaciones de funcionamiento y con todas las posiciones de las tomas de desplazamiento de fase. Los diferentes fabricantes de relés aplican diferentes soluciones que se tratarán en el siguiente capítulo.

## 4 Protección diferencial de los transformadores de desplazamiento de fase

La protección diferencial de los transformadores de desplazamiento de fase tiene que tener en cuenta el desplazamiento de fase de las corrientes para el cálculo preciso de las corrientes diferenciales. Los relés diferenciales de los transformadores convencionales más antiguos no habían sido diseñados para hacer frente a este requisito específico. Sin embargo, para la protección de los transformadores de desplazamiento de fase pueden utilizarse dispositivos diseñados para la protección de transformadores convencionales si se utiliza un tercer devanado artificial para simular las corrientes de desplazamiento de fase. Este es un método usado muy a menudo y ha sido documentado por los distintos fabricantes en notas de aplicación para sus relés. Los relés diferenciales de transformador de la generación más reciente ya están diseñados para admitir transformadores de desplazamiento de fase y pueden modelar el comportamiento específico del transformador en el algoritmo del relé del firmware.

Como ejemplo del método con un tercer devanado, explicamos una solución para la protección de un transformador de desplazamiento de fase en una compañía eléctrica de Austria. Se utiliza allí un relé diferencial para un transformador de 3 devanados de Schneider Electric. Las entradas de corriente del lado de alta tensión se cablean como es habitual en las entradas A. En el lado de baja tensión, las corrientes secundarias procedentes del TC se cablean primero a las entradas B y, a continuación, en serie a las entradas C para el tercer devanado del relé de 3 devanados.

En el relé se utilizan grupos de ajustes diferentes que parametrizan el tercer devanado de tal manera que el elemento diferencial tiene en cuenta los componentes desplazados de fase en función del desplazamiento de fase de corriente del transformador protegido. Para los desplazamientos de fase positivos, se utiliza un grupo vectorial Yy0y8, y un Yy0y4 para los desplazamientos de fase negativos. Además, el ajuste de la relación de transformación del TC en el relé del tercer devanado se establece de tal manera que la magnitud resultante es aproximadamente la misma que el componente de  $90^\circ$  introducido por el transformador de desplazamiento de fase.

Usando los contactos de entrada binarios del cambiador de tomas que controla las tomas de desplazamiento de fase en el lado de BT, el relé se conmuta inmediatamente entre los diferentes grupos de ajustes. Es importante que el relé admita un cambio del grupo de ajustes durante el funcionamiento normal de la protección y no requiera el reinicio del firmware ni ingresar otro retardo en las funciones de protección al cambiar el grupo de ajustes. Para esta aplicación específica, era suficiente utilizar 3 grupos de ajustes. Para la toma en posición neutra +/- en la posición de toma, se utilizó el grupo de ajustes 1 que no utilizaba el tercer devanado virtual en absoluto. Para todas las posiciones de toma entre 1 y 7 con desplazamientos de fase en dirección positiva, se utilizó el grupo de ajustes 2 y para todas las tomas entre 11 y 17 con desplazamientos de fase negativos, se utilizó el grupo de ajustes 3. Esto era suficiente

para cumplir los requisitos de estabilidad con todas las diferentes posiciones de toma tanto de las tomas reguladoras de tensión en el lado de AT como de las tomas de desplazamiento de fase en el lado de BT. Se cambiaban los grupos de ajustes usando las entradas binarias de las posiciones de toma.

El comportamiento de la protección ante una falla bifásica externa puede visualizarse mediante la distribución de la corriente que incluye el tercer devanado virtual como se muestra en la figura 7.

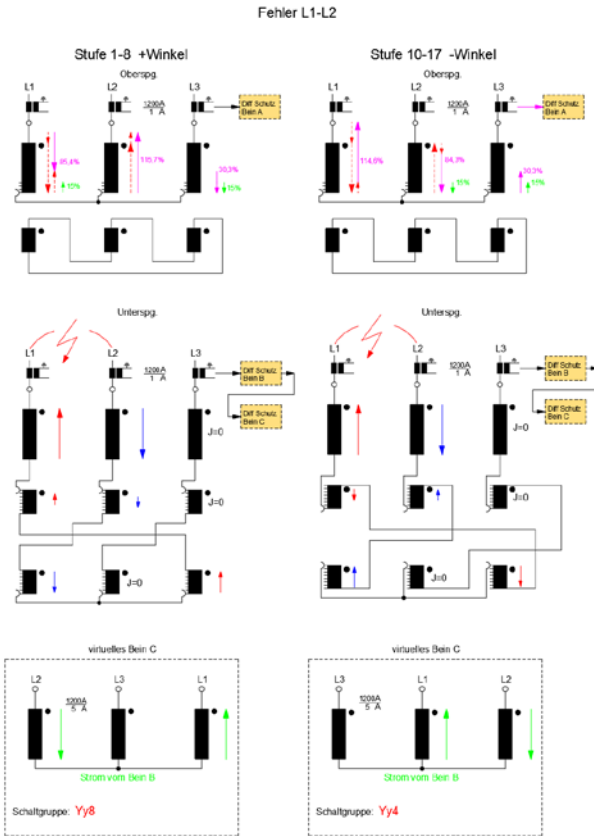


Figura 7: Distribución de la corriente en fallas bifásicas externas, incluido el tercer devanado

En el lado izquierdo, una falla bifásica externa en el lado de BT fuerza la corriente de falla con un ángulo de fase de 180° hacia las fases L1 y L2. El transformador de desplazamiento de fase se supone que está en una posición de toma con un ángulo de fase negativo. Esto introducirá una corriente de falla en la fase L3 en el lado de alta tensión. El uso del tercer devanado virtual en el grupo vectorial y8, compensará esta corriente en la fase L3 con un componente en la dirección opuesta. La distribución de la corriente en el lado derecho en la figura 7 muestra la situación de las posiciones de toma con un desplazamiento de fase positivo, en el que se conecta el tercer devanado virtual en el grupo vectorial y4.

Pudo verificarse el comportamiento del relé de protección con la característica de restricción por porcentaje. Ahora todos los valores de corriente diferencial se encuentran por debajo de la característica de restricción y no provocan ningún disparo incluso para la fase L3.

Se presenta ahora otro ejemplo de una protección diferencial en un transformador de desplazamiento de fase de 400kV:110kV con 350 MVA realizado utilizando un relé diferencial de transformador de ABB. Este transformador tiene 27 tomas en el lado de AT con un paso de tensión del 1,25%. En el lado de BT hay 21 tomas con desplazamientos de fase de 0° a 27,34°. El componente de 90° de este transformador se crea con los devanados de cada una de las otras dos fases. El relé diferencial del transformador se conecta a los TC como se muestra en la figura 8.

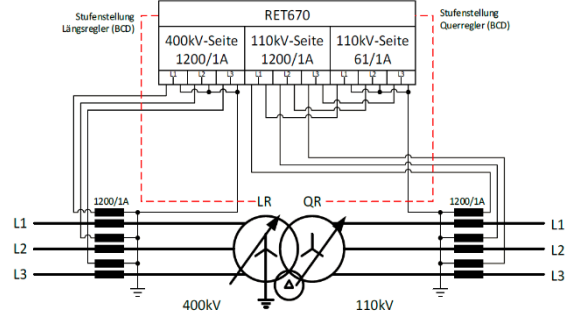


Figura 8: Esquema de conexión para la protección diferencial del transformador con tercer devanado virtual

De nuevo en el lado de 110 kV, las corrientes de los TC de 1200A:1A se conectan en serie a las entradas de los devanados B y C del relé. El relé ABB admite el modelado de las tomas reguladoras de tensión en el lado de AT y se adaptan sus elementos de corriente diferencial en función de la relación de transformación cambiada del transformador.

Para el tercer devanado virtual, la relación del TC en el relé se ajusta a 61A:1A. Dentro de la lógica del relé de protección, estas magnitudes de entrada se usan para calcular los componentes de corriente de 90° usando elementos de lógica para sumas trifásicas (3PH SUM), desde las entradas de corriente del tercer devanado virtual, que son la suma de dos elementos con conexiones de fase permutadas, tal como se muestra en la figura 9.

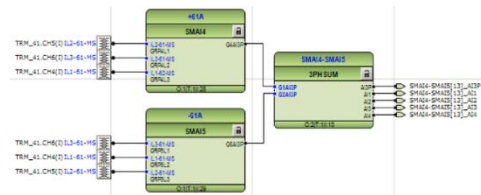


Figura 9: Cálculo de los componentes de 90° para desplazamientos de fase de 5° usando elementos de la lógica del relé

Para un solo elemento de suma se calcula una cantidad de  $\sqrt{3} 61A e^{j90^\circ} = 105A e^{j90^\circ}$ , que corresponde a la componente de 90° para un desfase de 5°. Estos componentes de 90° se añaden entonces a los componentes de corriente de las entradas del devanado de BT, mientras se utilizan uno o más pasos de 5° en función de la posición de las tomas de desplazamiento de fase, tal como se muestra en la figura 10.



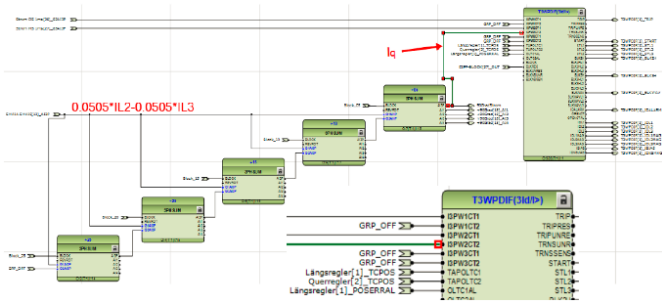


Figura 10: Lógica para habilitar los elementos de lógica 3PH SUM en función de las posiciones de toma del desfasador

Tanto las posiciones de las tomas en el lado de AT como de las tomas de desplazamiento de fase en el lado de BT, se comunican al relé usando las entradas binarias desde el controlador del cambiador de tomas. Dentro del relé, se implementa la lógica adicional para verificar las posiciones de toma correctas usando elementos de lógica binaria. Esta lógica verifica que las posiciones de toma son razonables después de un cambio de toma y supervisa el sincronismo de los contactos binarios adicionales durante un procedimiento de cambio de toma. En caso de cualquier comportamiento sospechoso, el relé emite alarmas al centro de control y fuerza los elementos de protección diferencial a las posiciones de toma nominales.

Dentro de la protección diferencial del transformador de ABB, la corriente de restricción se toma como la corriente máxima de todos los devanados y todas las fases de manera que la estabilidad ante fallas bifásicas externas no sea tan crítica como con los relés de protección de otros fabricantes. Por otro lado, en este transformador de desplazamiento de fase que tiene tomas con desplazamientos de fase hasta  $27^{\circ}$ , incluso en el funcionamiento estable simétrico, puede producirse un falso disparo simplemente porque el componente de corriente reactiva introducido puede causar una corriente diferencial por encima del umbral de restricción por porcentaje. Por lo tanto, es necesaria una corrección de las posiciones de toma para los elementos diferenciales.

Como último ejemplo de un relé de generación más reciente para la protección diferencial de transformadores, trataremos la implementación en un relé 7UT86 de Siemens. El algoritmo del relé permite modelar las tomas de desplazamiento de fase exactamente igual que para el transformador real. Tanto las tomas para la regulación de tensión como las tomas con desplazamientos de fase adicionales, pueden parametrizarse dentro del relé. Un cambiador de tomas puede modelarse tanto para el lado de AT como de BT. Por lo tanto, los ajustes detallados de las tomas tienen que introducirse en el software de ajustes del relé, incluidos los valores de la tensión nominal y los desplazamientos de fase en grados.

El relé de Siemens tiene diferentes posibilidades para obtener las posiciones de toma reales del cambiador de tomas utilizando las entradas binarias. Por ejemplo, se puede configurar para codificar la posición de toma existente como un valor de decimal codificado en binario (BCD) en varias entradas binarias. Las posiciones de las tomas reguladoras de tensión, por ejemplo, en el lado de AT y de las tomas de

desplazamiento de fase, pueden obtenerse de forma independiente. Consulte [3] para obtener más información.

## 5 Puesta en servicio y pruebas de los relés de protección de transformadores de desplazamiento de fase

Puesto que todas las soluciones para la protección de los transformadores de desplazamiento de fase conllevan o bien una compleja lógica personalizada en los relés o ajustes detallados elaborados, es necesario realizar una completa puesta en servicio y pruebas exhaustivas antes de poner en marcha la protección. Tiene que verificarse que con todas las posiciones de toma el relé se comporta según lo diseñado y que se cumplen los requisitos relativos a estabilidad y selectividad.

Una compañía eléctrica en Austria puso en servicio un transformador de desplazamiento de fase con una prueba de cortocircuito primaria en el transformador. Por lo tanto, la inyección primaria se realizó utilizando un equipo generador diésel móvil y transformadores de distribución de 20kV:400V. Se inyectó en el lado de 200kV del transformador y se provocó un cortocircuito en el lado secundario de 110 kV. La corriente de cortocircuito se aplicó con 100A, lo que dio lugar a una tensión de 3,3kV. Se realizaron pruebas con fallas externas tripolares, bipolares y monopulares. Las corrientes resultantes se aplicaron al relé de protección y los valores IDif e IPol se obtuvieron del dispositivo de protección conectado. Dentro de la característica de restricción por porcentaje, se ampliaron los valores según la tensión nominal de cortocircuito del transformador que corresponden a condiciones de alimentación realistas durante el funcionamiento normal. En todas las pruebas realizadas, se pudo demostrar que la protección era estable ante la falla externa usando el principio de protección con el tercer devanado virtual.

Para las pruebas secundarias, se desarrolló un modelo del transformador para calcular su distribución de la corriente basado en un modelo matemático del transformador (consulte [1]) en una hoja de cálculo Excel. Usando estos valores, fue posible realizar las pruebas de protección con la inyección de valores de estado estacionario según los valores calculados, que dieron los mismos resultados que las pruebas primarias realizadas.

Las pruebas más adecuadas se pueden realizar mediante un nuevo software de pruebas de protección que es capaz de simular el comportamiento transitorio de un transformador de desplazamiento de fase. En este software se modela el transformador con todas sus tomas, tanto en el lado de AT como BT. A continuación, pueden simularse fácilmente diferentes escenarios con fallas de estado estacionario y dinámicas, mientras que las señales de corriente transitorias resultantes pueden inyectarse al relé de protección utilizando un dispositivo de pruebas de protección convencional. La interfaz de usuario de este software se muestra en la figura 11.

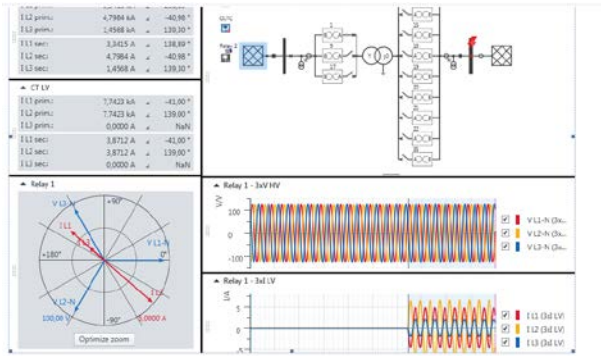


Figura 11: El software de pruebas de protección que puede simular un transformador de desplazamiento de fase

De nuevo, todas las pruebas para todas las diferentes posiciones de toma dieron resultados correctos y demostraron que el concepto de protección cumple los requisitos de estabilidad y selectividad.

## 6 Resumen

Los relés diferenciales de los transformadores de desplazamiento de fase tienen que tener en cuenta la posición del cambiador de tomas de tensión y desplazamiento de fase para poder calcular las magnitudes  $IDif$  e  $IPol$  correctas. Un método común utilizado con relés de protección diferencial de transformadores convencionales consiste en utilizar un tercer devanado virtual con corrientes de los TC en serie con el devanado de BT. Usando este método, es posible simular el componente de corriente de  $90^\circ$  usando elementos de la lógica del relé o un grupo vectorial correspondiente en el dispositivo de protección. Utilizando las entradas binarias del cambiador de tomas, la lógica del relé puede adaptarse o cambiarse en consonancia entre los diferentes grupos de ajustes del relé. En la generación más reciente de relés diferenciales de transformador ya es posible modelar el comportamiento detallado de las tomas de tensión y desplazamiento de fase en el firmware del relé.

Para la puesta en servicio de los relés diferenciales en un transformador de desplazamiento de fase, es necesario verificar el correcto comportamiento de la protección con las diferentes posiciones de toma del desfasador. En el caso crítico de una falla externa bifásica, que provocará una corriente diferencial adicional en la fase sin falla, no deben producirse disparos falsos.

Un nuevo software de pruebas de protección basado en la simulación, que puede simular un transformador de desplazamiento de fase con todas sus tomas de tensión y desplazamiento de fase, constituye una manera cómoda y práctica de probar y poner en servicio estos relés de protección. Ya no es necesario realizar cálculos manuales de las magnitudes de prueba, que son complicados y propensos a errores.

## Referencias

- [1] P. Baumgartner, Lickinger W., "Protección diferencial de los transformadores de desplazamiento de fase" (en alemán: "Differentialschutz soy Querreglertransformator"), tesis de licenciatura, Technische Universität Graz, Austria, (2016)
- [2] L. Fickert. "La explotación de sistemas de potencia usando transformadores de desplazamiento de fase y las dificultades que plantea su protección" (en alemán: "Netzbetrieb mit Quer-/ Schrägreglertransformatoren und schutztechnische Herausforderungen"), reunión de usuarios de OMICRON, Darmstadt, Alemania, (2016)
- [3] H-J. Hermann, S. Schneider. "Protección diferencial optimizada para transformadores de desplazamiento de fase y especiales" (en alemán: "Optimaler Differentialschutz für Phasenschieber- und Spezialtransformatoren"), Netzpraxis, Jg. 55, Heft 5, S. 12-18, (2016)

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.