



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 339 387**

51 Int. Cl.:  
**H02H 7/045** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06778346 .4**

96 Fecha de presentación : **24.08.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1958308**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **20.08.2008**

54 Título: **Método y dispositivo para detección de fallos en un transformador de potencia trifásico de n-devanados.**

30 Prioridad: **09.12.2005 SE 2005102749**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**19.05.2010**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**19.05.2010**

73 Titular/es: **ABB TECHNOLOGY Ltd.**  
**Affolternstrasse 44**  
**8050 Zürich, CH**

72 Inventor/es: **Gajic, Zoran**

74 Agente: **Ungría López, Javier**

ES 2 339 387 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Método y dispositivo para detección de fallos en un transformador de potencia trifásico de n-devanados.

**5 Campo técnico de la invención**

La presente invención se refiere a un método y un dispositivo para una detección de fallos avanzada y mejorada en un transformador de potencia trifásico de n-devanados. El método y el dispositivo pueden usarse en la protección diferencial de todos los tipos de transformadores de potencia incluyendo los transformadores de desplazamiento de fase.

**Antecedentes de la invención**

La medición de las corrientes diferenciales es una técnica utilizada en una amplia diversidad de aplicaciones de sistemas de potencia. Por ejemplo, la técnica se usa a menudo en la protección de equipos de sistemas de potencia, tales como transformadores, generadores, motores y similares. Generalmente las técnicas de medición de corrientes diferenciales involucran monitorizar la corriente tanto en el terminal de entrada como en el terminal de salida de un dispositivo, normalizar las corrientes de entrada y de salida medidas para compensar cambios en la fase y la magnitud de las corrientes medidas que pueden introducirse por el dispositivo durante el normal funcionamiento, y a continuación comparar las corrientes normalizadas de entrada y de salida. Si la diferencia entre las corrientes normalizadas de entrada y de salida es cero, entonces es de suponer que el dispositivo está funcionando adecuadamente. Por el contrario, una diferencia detectada entre las corrientes de entrada y de salida normalizadas puede indicar un fallo dentro del dispositivo. En respuesta a la detección de un fallo, un relé diferencial emite un comando de salida a los interruptores relevantes del circuito, para cortar la potencia al objeto protegido y para impedir un daño adicional.

Debido a la reestructuración de la industria de potencia con el principal objetivo de la liberalización del mercado eléctrico, se han planteado requisitos más estrictos para el control del flujo de potencias activa y reactiva sobre las empresas eléctricas de servicio público. Este proceso indica que hay una necesidad en aumento de herramientas adecuadas para controlar el flujo de potencia dentro de una red determinada. El dispositivo usado más comúnmente para este propósito es un transformador de potencia de una construcción especial llamado a menudo transformador de desplazamiento de fase (PST) o transformador de regulación del ángulo de fase (PAR).

En principio, los aspectos técnicos de un transformador de desplazamiento de fase son más bien simples: proporciona un desplazamiento de fase bien definido pero cambiabile entre los terminales de primario y secundario. Normalmente el desplazamiento de fase puede variarse durante el funcionamiento en etapas definitivas por el uso de uno o más cambiadores terminales de carga (OLTC). En la mayor parte de los casos puede cambiarse el signo del desplazamiento de fase de adelanto a atraso.

Actualmente hay disponibles diferentes tipos de diseños de PST. Esto hace el esquema de protección para cada tipo de PST más bien único y de este modo difícil. Actualmente, no hay ningún fabricante de relés, que puede proporcionar un relé de protección diferencial único para todos estos dispositivos, independientemente de su diseño.

Dentro de esta área de la tecnología varias invenciones tratan de solventar estas clases de problemas y se han concedido algunas patentes.

**Técnica anterior**

Los transformadores de potencia normalizados son dispositivos eléctricos, que proporcionan una variación de la magnitud del voltaje y un desplazamiento del ángulo de fase constante a través del transformador de potencia. El desplazamiento de fase puede tener un valor de  $n \cdot 30^\circ$  (n es un número entero entre 0 y 11), dependiendo de los detalles particulares de construcción del transformador.

La protección diferencial de los transformadores de potencia se ha usado durante décadas. Con relés estáticos o electromecánicos se usan CT externos de interposición para compensar el desplazamiento del ángulo de fase y la variación de la magnitud de corriente entre los dos lados del transformador de potencia protegido. Sin embargo, son bien conocidos los siguientes inconvenientes:

- un relé diferencial sólo puede equilibrarse para la posición central de un cambiador de terminales de carga (es decir un OLTC)
- tan pronto como se mueve el OLTC de la posición central, el relé diferencial ya no está completamente equilibrado
- interponiendo CT sólo es posible compensar un desplazamiento de fase del transformador de potencia que es un múltiplo de  $30^\circ$ .

## ES 2 339 387 T3

Con relés numéricos no se requieren CT externos de interposición. La compensación se proporciona internamente dentro del relé por software. Las características de un relé diferencial numérico son las siguientes:

- el relé diferencial puede compensar una variación de la magnitud de corriente causada por un OLTC si se determina la posición del OLTC para el relé (es decir, el relé se equilibra para cualquier posición)
- es posible compensar por fijaciones software un desplazamiento de fase fijo de un transformador de potencia que debe ser un múltiplo de 30°.

Se define un transformador de potencia no normalizado como un transformador de potencia que tiene un desplazamiento del ángulo de fase variable o un desplazamiento del ángulo de fase fijo distinto de 30° o un múltiplo de 30°.

Actualmente están disponibles diferentes diseños de transformadores especiales de potencia conocidos como PST, como se describe en la Normativa Internacional IEC 62032. Esto hace el esquema de protección para cada tipo de PST bastante único y por lo tanto difícil, como se describe en el informe especial del IEEE/PSRC "Protection of Phase Angle Regulating Transformers (PAR)". Actualmente no hay ningún relé diferencial que pueda proporcionar protección diferencial para cualquier PST independientemente de su diseño y el desplazamiento máximo del ángulo de fase.

La razón es que debido al desplazamiento de fase continuamente cambiante del PST, aparecerá una falsa corriente diferencial. La magnitud de esta falsa corriente diferencial puede estimarse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_d = I_{carga} + 2 \cdot \text{sen} \left( \frac{\Theta}{2} \right) \quad (1.1)$$

donde:

$I_d$  es la magnitud de la falsa corriente diferencial

$I_{carga}$  es la corriente del PST a través de la carga, y

$\Theta$  es el desplazamiento del ángulo de fase entre los dos lados del PST.

En la patente US6507184 se describen un método y un aparato para la medición de corrientes diferenciales en un sistema de potencia trifásico. Esta invención está dispuesta para medir la corriente diferencial entre un primer y un segundo terminales y para obtener, para cada una de las fases, una medición de estas corrientes. Sin embargo este método no permite una reducción configurable de las corrientes de secuencia cero y no proporciona la compensación de magnitud.

Otro problema que no puede resolverse aplicando la protección tradicional diferencial de los transformadores de potencia es el reconocimiento de un fallo entre vueltas de bajo nivel, cuando sólo están cortocircuitadas unas pocas vueltas de los devanados del transformador de potencia. En este caso sólo se medirán cambios muy pequeños en las corrientes en los terminales del transformador, mientras que se produce un corriente de fallo elevada en las vueltas cortocircuitadas. Esto se debe a la proporción comparativamente alta de la proporción de transformación entre los devanados del transformador como un conjunto y los pocos elementos cortocircuitados. La sensibilidad de los métodos de detección de fallos durante la protección diferencial conocidos en el presente no es suficiente para reconocer este fallo entre vueltas de un devanado antes de que se transforme en un fallo de tierra más serio, que es costoso reparar, especialmente si afecta al núcleo de hierro del transformador de potencia. Un fallo entre vueltas no detectado puede ser también la causa de un peligroso arco dentro del tanque de aceite de un transformador de potencia.

Un modo para detectar tales fallos entre vueltas puede ser el uso del llamado relé Buchholz, también conocido como relé de gas o relé de presión súbita. El relé Buchholz se aplica a los transformadores rellenos de aceite que se equipan con un depósito de aceite externo, llamado conservador. Cuando se produce un fallo entre vueltas, se crea gas que asciende a la parte superior del aceite. El cambio resultante en el flujo del aceite se detecta por la actuación de un conmutador flotador en el relé. Un inconveniente en el relé de Buchholz es el tiempo que pasa entre la producción del fallo entre vueltas y su detección real, que usualmente es de 50 a 100 ms. Este periodo de tiempo puede ser lo suficientemente largo para permitir que el fallo entre vueltas inicial evolucione a uno más grave.

Este transcurso de tiempo puede ser muy importante, como muestra un estudio de los registros de rupturas de modernos transformadores de potencia en los últimos años. Se determinó que el origen de entre el 70% y el 80% del número total de fallos de transformadores era finalmente un fallo del aislamiento interno de los devanados. El fallo del aislamiento de devanados es generalmente el resultado de un proceso de envejecimiento gradual que conduce a la degradación del sistema de aislamiento debido al estrés térmico, eléctrico y mecánico y a la humedad. Bajo un estrés aumentado, el aislamiento ya degradado puede sufrir un fallo dieléctrico entre vueltas adyacentes, de modo que

desarrolla un fallo entre vueltas. Como el envejecimiento es un proceso generalmente inevitable, es importante tener en cuenta los fallos entre vueltas durante la detección de fallos.

## Resumen de la invención

El objeto de la presente invención es resolver los problemas indicados anteriormente y presentar un método y un dispositivo para la detección eficaz de fallos en un transformador de potencia trifásico de n-devanados, donde la detección de fallos es adecuada para usarse en la protección diferencial de cualquier transformador de potencia incluyendo los transformadores con desplazamiento de fase no normalizado.

Otro objeto de la presente invención es proporcionar una compensación dinámica de la magnitud de corriente.

Un objeto adicional de la presente invención es proporcionar una compensación dinámica del ángulo de fase para un desplazamiento de fase arbitrario entre los dos lados del objeto protegido.

Un objetivo adicional más de la presente invención es proporcionar una reducción independiente de la corriente de secuencia cero (es decir, por cada lado).

Otro objeto de la presente invención es compensar uno, dos o incluso más OLTC dentro del mismo transformador de potencia.

Otro objeto de la presente invención es proporcionar protección diferencial con una tecnología numérica avanzada. Con tal dispositivo será posible proporcionar una protección diferencial universal para transformadores de potencia con un desplazamiento de fase arbitrario y variaciones de la magnitud de la corriente debidas al funcionamiento del OLTC.

Estos objetos se consiguen de acuerdo con la presente invención por el método descrito en la reivindicación 1, un dispositivo como se describe en la reivindicación 18 y un producto de programa de ordenador como se describe en la reivindicación 19.

## Breve descripción de los dibujos

Para el mejor entendimiento de la presente invención, se hará referencia a los dibujos adjuntos.

La Figura 1 ilustra un diagrama de flujo de un método de medición y cálculo de las corrientes diferenciales de un objeto protegido para realizar una protección diferencial.

La Figura 2 ilustra el método de acuerdo con la figura 1 con más detalle para un transformador de potencia de 2 devanados o PST.

## Descripción detallada de las realizaciones preferidas

El método de acuerdo con la invención se describe en conexión con la Figura 1 donde se revela el principio para la protección diferencial de un objeto protegido en un sistema de potencia trifásico, en particular de un PST, en un diagrama de flujo. La primera etapa 1a, 1b es, para cada uno de los lados del objeto protegido 10 como se define en la Figura 2, medir todas las corrientes de fases del objeto protegido 10, en ambos lados. La segunda etapa 2a, 2b es decidir si hacer la reducción de corriente de secuencia cero, o no. Esto depende de la fijación del usuario 7a, 7b. Si se debe hacer la reducción de corriente de secuencia cero entonces se deducirán las corrientes de secuencia cero 12a, b. Los valores de las corrientes de secuencia cero se insertan en 11a, b.

La tercera etapa 3a, b es realizar la compensación de magnitud usando la corriente base 8a, b. La cuarta etapa 4a, b es realizar la compensación del ángulo de fase usando el ángulo de fase 9a, b del lado respectivo del objeto protegido 10.

A continuación, las señales resultantes de ambos lados se combinan y se calculan las corrientes diferenciales en la quinta etapa 5.

Finalmente en la etapa 6 se realiza un algoritmo de protección diferencial.

En la Figura 2 se describe el método de acuerdo con la Figura 1 con más detalle por un diagrama de bloques. Se han usado los números correspondientes como en la Figura 1 para simplificar el entendimiento de la invención.

El objeto protegido 10 puede ser un transformador de potencia de cualquier tipo incluyendo los transformadores de desplazamiento de fase. El objeto protegido 10 se conecta a una red de potencia en ambos lados (lado 1 y lado 2).

Las corrientes de fase se miden en la etapa 1 incluyendo la conversión A/D, el prefiltrado, DFF (extracción de fasores), etc. En la etapa 7 se realiza la fijación de sustracción de la corriente de secuencia cero ("Si-No"). Los datos necesarios para realizar la compensación de magnitud y del ángulo de fase se determinan en los bloques 8 y 9 en las

## ES 2 339 387 T3

figuras. En el caso de que el objeto protegido 10 esté acoplado a un cambiador de terminales de carga (OLTC), la posición del OLTC se determina en el bloque 13. Las señales son necesarias para los cálculos como la reducción de la corriente de secuencia cero 2, la compensación de magnitud 3 y la compensación del ángulo de fase 4, por lo tanto las señales resultantes desde ambos lados del objeto protegido 10 se introducen a continuación en los bloques 12, 3 y 4 respectivamente. Finalmente se calculan las corrientes diferenciales en el bloque 5. Cuando las corrientes diferenciales adquieren un cierto nivel de señal, se libera una señal de salida desde el bloque 6 que desconecta el objeto protegido 10 del resto del sistema de potencia.

A continuación se describen los fundamentos de la invención con más detalle.

### *Compensación de magnitud*

Para conseguir la compensación de magnitud de la corriente, las corrientes de las fases medidas deben normalizarse sobre todos los lados del transformador de potencia dividiéndolas por la llamada corriente base. La corriente base en amperios de primario tiene un valor, que se calculará para cada uno de los lados del transformador de potencia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{base} = \frac{S_r \max}{\sqrt{3} \cdot U_r} \quad (1.2)$$

donde:

$S_{max}$  es la potencia aparente alcanzada de un devanado del transformador de potencia protegido con la máxima potencia nominal, y  $U_r$  es el voltaje alcanzado entre fases sin carga sobre el lado relevante del transformador protegido.

Debería observarse que típicamente  $U_r$  puede tener valores diferentes para diferentes posiciones del OLTC al menos sobre un lado del transformador de potencia. Por lo tanto la corriente base también tiene valores diferentes para diferentes posiciones del OLTC. Por lo tanto del lado donde se localiza el OLTC, se usarán diferentes valores de  $I_{base}$  para cada posición del OLTC para compensar las variaciones de magnitud de la corriente. Una vez que se realiza esta normalización de las corrientes medidas, las corrientes de los dos lados se ponen en la misma escala (es decir están en unidades de primario) y pueden usarse para calcular la corriente diferencial en unidades de primario.

Se observará que la fórmula anterior se da para la corriente base en amperios de primario. Para algunos relés esta corriente se convierte al lado secundario del CT dividiendo el valor de primario entre la proporción del CT relevante. En los textos adicionales se mostrarán todos los cálculos en amperios de primario.

### *Compensación del desplazamiento del ángulo de fase*

En lo siguiente se asumirá que se ha realizado la normalización de la magnitud de las corrientes de los dos lados y que sólo se presentará el procedimiento para la compensación del desplazamiento del ángulo de fase.

La característica común para un transformador de potencia y un dispositivo PST es que introducen el desplazamiento del ángulo de fase  $\Theta$  entre los voltajes del lado 1 y el lado 2.

Los transformadores de potencia normalizados también introducen un desplazamiento de fase entre los voltajes de sus terminales. La única diferencia entre un transformador de potencia normalizado y un transformador PST es que:

- el desplazamiento de fase  $\Theta$  para el transformador de potencia normalizado es fijo y es un múltiplo de  $30^\circ$  (es decir  $n \cdot 30^\circ$ ;  $n=0, 1, 2, \dots, 11$ ) dependiendo de las conexiones del devanado particular y el grupo de vectores del transformador,
- el desplazamiento de fase  $\Theta$  para el PST es variable. Típicamente se usan uno o más cambiadores de terminales de carga (OLTC) para realizar este desplazamiento de fase variable. El desplazamiento del ángulo de fase puede alterarse en un amplio intervalo (hasta  $\pm 75^\circ$ ) mientras que el OLTC puede tener desde 10 a 70 etapas.

Como se muestra en el Libro de Referencia de Transmisión y Distribución Eléctricas, Capítulo 5, 4ª Edición, Westinghouse Electric Corp., Pittsburg Este, PA de 1950, existen reglas estrictas para el desplazamiento del ángulo de fase entre los voltajes sin carga de secuencias positiva, negativa y cero sobre los dos lados de un transformador de potencia.

## ES 2 339 387 T3

5 Tan pronto como se carga el transformador de potencia esta relación de voltaje ya no será válida debido a la caída de voltaje a través del transformador. Sin embargo, como se muestra en el Libro de Referencia de Transmisión y Distribución Eléctricas, Capítulo 5, 4ª Edición, Westinghouse Electric Corp., Pittsburg Este, PA de 1950, ahora la misma relación será válida para las corrientes de secuencia que fluyen en el interior del transformador sobre el lado 1 y que fluyen hacia fuera desde el transformador de potencia sobre el lado 2.

Por lo tanto pueden escribirse las siguientes relaciones para las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero desde los dos lados (es decir, devanados) para un transformador de potencia o un PST.

10

$$IPS\_W1 = e^{j\theta} \cdot IPS\_W2 \quad (1.3)$$

$$INS\_W1 = e^{-j\theta} \cdot INS\_W2 \quad (1.4)$$

15

$$IZS\_W1 = IZS\_W2 \quad (1.5)$$

Lo siguiente se mantendrá cierto para las corrientes de secuencia:

20

La corriente de secuencia positiva desde el lado 2 se retrasará respecto a la corriente de secuencia positiva del lado 1 exactamente en el ángulo  $\theta$  (la misma relación que para los voltajes de secuencia positiva sin carga).

25 La corriente de secuencia negativa desde el lado 2 se adelantará respecto a la corriente de secuencia negativa del lado 1 exactamente en el ángulo  $\theta$  (la misma relación que para los voltajes de secuencia negativa sin carga).

La corriente de secuencia cero del lado 2 estará exactamente en fase con la corriente de secuencia cero del lado 1, cuando las corrientes de secuencia cero se transfieren todas desde un lado al otro lado del objeto protegido (la misma relación que para los voltajes de secuencia cero sin carga).

30

Para la protección diferencial típicamente se miden las corrientes de todos los lados del objeto protegido con la misma dirección de referencia hacia el objeto protegido, como se muestra en la Figura 2. Por lo tanto a partir de ahora se usarán sobre tales direcciones de referencia para la medición de corrientes.

35

Como las relaciones entre las corrientes de secuencia sobre los dos lados del objeto protegido son conocidas, las corrientes diferenciales de secuencia pueden calcularse de acuerdo con las siguientes tres ecuaciones:

40

$$Id\_PS = IPS\_W1 + e^{j\theta} \cdot IPS\_W2$$

(1.6) Corriente Diferencial de Secuencia Positiva.

45

$$Id\_NS = INS\_W1 + e^{j\theta} \cdot INS\_W2$$

(1.7) Corriente Diferencial de Secuencia Negativa.

50

$$Id\_ZS = IZS\_W1 + IZS\_W2$$

(1.8) Corriente Diferencial de Secuencia Cero.

55

Usando la relación básica entre las cantidades de secuencia y fase pueden escribirse las siguientes relaciones para las corrientes diferenciales orientadas a las fases:

60

$$\begin{bmatrix} Id\_L1 \\ Id\_L2 \\ Id\_L3 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} Id\_ZS \\ Id\_PS \\ Id\_NS \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

65

donde

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (1.10),$$

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.11),$$

y

$$a = e^{j120^\circ} = \cos(120^\circ) + j \cdot \text{sen}(120^\circ) = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.12)$$

Combinando las ecuaciones (1, 6), (1, 7) y (1, 8) en la ecuación (1, 9) y haciendo algunas redistribuciones básicas puede deducirse la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} Id_{L1} \\ Id_{L2} \\ Id_{L3} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} IZS\_W1 \\ IPS\_W1 \\ INS\_W1 \end{bmatrix} + A \cdot \begin{bmatrix} IZS\_W2 \\ e^{j\theta} \cdot IPS\_W2 \\ e^{-j\theta} \cdot INS\_W2 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} IZS\_W1 \\ IPS\_W1 \\ INS\_W1 \end{bmatrix} + A \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\theta} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IZS\_W2 \\ IPS\_W2 \\ INS\_W2 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Mediante una elemental manipulación matemática adicional puede deducirse la siguiente ecuación (1.14)

$$\begin{bmatrix} Id_{L1} \\ Id_{L2} \\ Id_{L3} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} IZS\_W1 \\ IPS\_W1 \\ INS\_W1 \end{bmatrix} + A \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\theta} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix} \cdot (A^{-1} \cdot A) \cdot \begin{bmatrix} IZS\_W2 \\ IPS\_W2 \\ INS\_W2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} IL1\_W1 \\ IL2\_W1 \\ IL3\_W1 \end{bmatrix} + A \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\theta} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix} \cdot A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} IL1\_W2 \\ IL2\_W2 \\ IL3\_W2 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

La ecuación (1.14) ahora representa la relación básica entre las corrientes diferenciales orientadas a las fases y las corrientes de fase individuales desde los dos lados del objeto protegido.

Para simplificar más la ecuación (1, 14), se define y se simplifica la nueva matriz M(θ) en la ecuación siguiente:

$$M(\theta) = A \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\theta} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix} \cdot A^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1+2 \cdot \cos \theta & 1-\cos \theta - \sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta & 1-\cos \theta + \sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta \\ 1-\cos \theta + \sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta & 1+2 \cdot \cos \theta & 1-\cos \theta - \sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta \\ 1-\cos \theta - \sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta & 1-\cos \theta + \sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta & 1+2 \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

O usando las bien conocidas relaciones trigonométricas  $\cos(x \pm y) = \cos(x)\cos(y) \pm \text{sen}(x)\text{sen}(y)$  puede obtenerse lo siguiente

$$M(\theta) = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1+2 \cdot \cos(\theta) & 1+2 \cdot \cos(\theta+120^\circ) & 1+2 \cdot \cos(\theta-120^\circ) \\ 1+2 \cdot \cos(\theta-120^\circ) & 1+2 \cdot \cos(\theta) & 1+2 \cdot \cos(\theta+120^\circ) \\ 1+2 \cdot \cos(\theta+120^\circ) & 1+2 \cdot \cos(\theta-120^\circ) & 1+2 \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

## ES 2 339 387 T3

Por lo tanto ahora la ecuación (1, 14) puede reescribirse como sigue:

$$\begin{matrix} 5 \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{bmatrix} Id_{L1} \\ Id_{L2} \\ Id_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} IL1_{W1} \\ IL2_{W1} \\ IL3_{W1} \end{bmatrix} + M(\theta) \cdot \begin{bmatrix} IL1_{W2} \\ IL2_{W2} \\ IL3_{W2} \end{bmatrix} = M(0^\circ) \cdot \begin{bmatrix} IL1_{W1} \\ IL2_{W1} \\ IL3_{W1} \end{bmatrix} + M(\theta) \cdot \begin{bmatrix} IL1_{W2} \\ IL2_{W2} \\ IL3_{W2} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

10 Por favor obsérvese que puede asignarse  $M(0^\circ)$  a las corrientes del devanado del primer lado ya que este lado se toma como lado de referencia con cero grados de desplazamiento de fase.

Alternativas técnicas para obtener el valor de compensación del ángulo de fase correcto.

15 El método propuesto es enteramente dependiente de que el valor correcto para la compensación del ángulo de fase esté disponible para el algoritmo de detección de fallos. Este ángulo de fase puede obtenerse de uno de los siguientes modos:

- 20 1. para transformadores normalizados es un valor fijo determinado por el grupo de vectores del transformador de potencia protegido que se introduce como un parámetro de configuración por el usuario,
2. desde una tabla de búsqueda que describe la relación entre las diferentes posiciones del OLTC y la variación correspondiente de la magnitud y el ángulo de fase del transformador de potencia protegido/PST/dispositivo FACTS,
- 25 3. a partir de dos, tres o más tablas de búsqueda similares a la descrita en el punto 2 anterior, para dispositivos con más de un OLTC,
4. a través de una red de comunicaciones como el valor actual exacto desde un sistema de control externo del objeto protegido (generalmente aplicable a dispositivos FACTS como UPFC),
- 30 5. por un algoritmo interno que durante las condiciones de funcionamiento del estado estable mide la diferencia del ángulo de fase entre los voltajes de secuencia positiva desde los dos lados del PST cuando el PST no está cargado o alternativamente midiendo el ángulo de fase entre las corrientes de secuencias positivas desde los dos lados del PST cuando el PST está cargado.

35 Por lo tanto, esta invención podría usarse para la protección diferencial de los siguientes dispositivos:

- 40 1) transformadores de desplazamiento de fase de cualquier construcción,
- 2) transformadores industriales especiales con desplazamiento del ángulo de fase no normalizado, por ejemplo de  $22,5^\circ$ , que se usan a menudo para grandes "Controladores MV" u otras aplicaciones especiales,
- 3) cualquier transformador normalizado con n-devanados,
- 45 4) cualquier dispositivo FACTS que cumpla los principios descritos anteriormente.

### *Eliminación de la Corriente de Secuencia Cero*

50 A veces es necesario deducir la corriente de secuencia cero desde uno o de ambos lados del transformador de potencia debido al hecho de que a veces la corriente de secuencia cero no está transferida adecuadamente desde uno al otro lado.

55 Cuando las corrientes de secuencia cero no están transferidas adecuadamente deben deducirse explícitamente desde ese lado del transformador de potencia. En tal caso puede usarse la siguiente forma más general de la ecuación (1.17):

$$\begin{matrix} \\ \\ 60 \end{matrix} \begin{bmatrix} Id_{L1} \\ Id_{L2} \\ Id_{L3} \end{bmatrix} = M(0^\circ) \cdot \begin{bmatrix} IL1_{W1} - k_{w1} \cdot I_{0\_W1} \\ IL2_{W1} - k_{w1} \cdot I_{0\_W1} \\ IL3_{W1} - k_{w1} \cdot I_{0\_W1} \end{bmatrix} + M(\theta) \cdot \begin{bmatrix} IL1_{W2} - k_{w2} \cdot I_{0\_W2} \\ IL2_{W2} - k_{w2} \cdot I_{0\_W2} \\ IL3_{W2} - k_{w2} \cdot I_{0\_W2} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

donde

65  $I_{0\_W1}$  es la corriente de secuencia cero sobre el lado 1 del objeto protegido,

$I_{0\_W2}$  es la corriente de secuencia cero sobre el lado 2 del objeto protegido, y

## ES 2 339 387 T3

$k_{w1}$  y  $k_{w2}$  son parámetros de configuración que pueden tener valores 0 ó 1, que se fijan por el usuario final para habilitar/deshabilitar la reducción de corriente de secuencia cero sobre cualquiera de los dos lados.

De un examen más próximo de la ecuación (1.18) resulta obvio que es realmente posible deducir las corrientes de secuencia cero de los dos modos siguientes:

- midiendo la corriente de secuencia cero en el punto neutro común de los devanados como se describe en la patente US5790357
- por un cálculo interno de las corrientes de secuencia cero a partir de las corrientes medidas individualmente de los devanados trifásicos.

$$I_0 = \frac{I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}}{3} \quad (1.19)$$

En el segundo caso es entonces posible incluir la reducción de la corriente de secuencia cero dentro de la matriz  $M(\Theta)$  definiendo una nueva matriz  $M0(\Theta)$  que realiza la compensación del desplazamiento de fase y la eliminación de la corriente de secuencia cero al mismo tiempo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$M0(\Theta) = M(\Theta) - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta+120^\circ) & \cos(\theta-120^\circ) \\ \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \cos(\theta+120^\circ) & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

o mediante una manipulación matemática adicional

$$M0(\Theta) = \frac{2}{3} \cdot \text{Re} \left( \begin{bmatrix} e^{j\theta} & e^{j(\theta+120^\circ)} & e^{j(\theta-120^\circ)} \\ e^{j(\theta-120^\circ)} & e^{j\theta} & e^{j(\theta+120^\circ)} \\ e^{j(\theta+120^\circ)} & e^{j(\theta-120^\circ)} & e^{j\theta} \end{bmatrix} \right) = \frac{2}{3} \cdot \text{Re} \left( e^{j\theta} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \right) \quad (1.21)$$

Por lo tanto la ecuación (1.18) puede ahora reescribirse como sigue:

$$\begin{bmatrix} Id\_L1 \\ Id\_L2 \\ Id\_L3 \end{bmatrix} = M0(\Theta) \cdot \begin{bmatrix} IL1\_W1 \\ IL2\_W1 \\ IL3\_W1 \end{bmatrix} + M(\Theta) \cdot \begin{bmatrix} IL1\_W2 \\ IL2\_W2 \\ IL3\_W2 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Se observará que las ecuaciones (1.22) y (1.17) realmente tienen la misma forma. La única diferencia es que se usa realmente la matriz (es decir  $M(\Theta)$  o  $M0(\Theta)$ ). Se observará que realmente es posible mezclar las matrices (es decir usar ambas) en una ecuación. En ese caso, sobre el lado donde se use la matriz  $M(\Theta)$  no se eliminará la corriente de secuencia cero, mientras que del otro lado donde se usa la matriz  $M0(\Theta)$  se eliminará la corriente de secuencia cero. Este es por ejemplo un requisito típico para la protección diferencial de un transformador de potencia conectado en YNd.

Se observará que la matriz  $M0(\Theta)$  es realmente un equivalente numérico de una transformada de normalización generalizada que se describe en la patente US6507184.

Sin embargo se observará lo siguiente respecto a la patente US6507184:

- cuando se usa la matriz  $M0(\Theta)$  sobre todos los lados del objeto protegido la sensibilidad de protección diferencial se reduce innecesariamente sobre los lados en los que no es necesario eliminar las corrientes de secuencia cero
- cuando se usa la matriz  $M(\Theta)$  sobre todos los lados del objeto protegido el cálculo de la corriente diferencial instantánea puede corromperse innecesariamente lo cual puede causar problemas para el funcionamiento adecuado del criterio de bloqueo/restricción de los armónicos 2º y 5º.

Por lo tanto la invención presentada en este documento ofrece claras ventajas a este respecto.

Compensación simultánea de magnitud, ángulo de fase y secuencia de cero

Si ahora se ponen juntas todas las tres compensaciones descritas anteriormente en una ecuación puede escribirse la siguiente ecuación completa en el caso de un transformador de potencia de dos devanados o PST:

$$\begin{bmatrix} I_{Dif\_L1} \\ I_{Dif\_L2} \\ I_{Dif\_L3} \end{bmatrix} = \frac{1}{I_{b\_w1}} M(\theta^*) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_W1} - k_{w1} \cdot I_{0\_W1} \\ I_{L2\_W1} - k_{w1} \cdot I_{0\_W1} \\ I_{L3\_W1} - k_{w1} \cdot I_{0\_W1} \end{bmatrix} + \frac{1}{I_{b\_w2}} M(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_W2} - k_{w2} \cdot I_{0\_W2} \\ I_{L2\_W2} - k_{w2} \cdot I_{0\_W2} \\ I_{L3\_W2} - k_{w2} \cdot I_{0\_W2} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Finalmente, puede escribirse la siguiente ecuación más general para un transformador de potencia de n-devanados de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} I_{Dif\_L1} \\ I_{Dif\_L2} \\ I_{Dif\_L3} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_{b\_wi}} \cdot M(\Theta_{wi}) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \\ I_{L2\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \\ I_{L3\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

donde:

n es el número de devanados dentro del transformador protegido n= 1, 2, 3,...n (típicamente n≤6),

$I_{Dif\_Lx}$  son las corrientes diferenciales orientadas a las fases en unidades de primario,

$I_{b\_wi}$  es la corriente base del bobinado relevante como se define en la ecuación (1, 2) (es un valor variable si el bobinado incorpora OLTC),

$M(\Theta W)$  es una matriz de 3x3 que realiza la compensación dinámica del desplazamiento del ángulo de fase sobre las corrientes de los devanados de fase medidas dependiendo de la posición del OLTC en el caso de un PST.

$I_{Lx\_wi}$  son las corrientes medidas de los devanados de fase,

$K_{wi}$  es la fijación que determina si se deducirán las corrientes de secuencia cero de las corrientes medidas de los devanados de fase o no (es decir puede tener un valor de 0 ó 1), y

$I_{0\_wi}$  es la corriente de secuencia cero del devanado bien medida o calculada.

Como alternativa, cuando se realiza la reducción de secuencia cero por cálculos internos en base a

$$I_{0\_wi} = \frac{I_{L1\_wi} + I_{L2\_wi} + I_{L3\_wi}}{3}$$

la ecuación (1, 24) puede reescribirse como sigue:

$$\begin{bmatrix} I_{Dif\_L1} \\ I_{Dif\_L2} \\ I_{Dif\_L3} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_{b\_wi}} \cdot MX(\Theta_{wi}) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_wi} \\ I_{L2\_wi} \\ I_{L3\_wi} \end{bmatrix}$$

donde:

$MX(\Theta_{wi})$  es igual bien a  $M(\Theta_{wi})$  (véase (1.16) en el caso de que no se elimine la corriente de secuencia cero o a  $M0(\Theta_{wi})$  (véase 1.20) en el caso de que se elimine la corriente de secuencia cero.

La ecuación (1,24) ilustra la etapa inventiva de la presente invención. Se usa para calcular las corrientes diferenciales para los transformadores de potencia con desplazamiento del ángulo de fase arbitrario entre los diferentes devanados. Puede usarse directamente durante la protección (es decir, los cálculos de corrientes diferenciales) de cualquier transformador de potencia, PST y dispositivos FACTS. Como se muestra en la ecuación (1.13) las corrientes diferenciales incluyen componentes de corriente de secuencia positiva, negativa y cero desde todos los lados del objeto protegido, pero como alternativa pueden eliminarse las corrientes de secuencia cero de cualquiera de los lados del objeto protegido si así se requiere por las características del objeto protegido.

Los coeficientes de la matriz  $M(\Theta)$  son siempre números reales. Por lo tanto se observará que el método de cálculo de las corrientes diferenciales presentado puede usarse sobre los fasores de corriente de frecuencia fundamental o sobre valores de corriente instantánea (es decir, muestras). De este modo, pueden calcularse las corrientes diferenciales de frecuencia fundamental e instantáneas para los objetos protegidos del mismo modo que en las protecciones diferenciales existentes para transformadores de potencia trifásicos normalizados. Esto significa que todas las características ya disponibles como:

- cálculo de la corriente de polarización
- características de limitación del funcionamiento
- nivel operativo sin limitaciones
- bloqueo del segundo armónico
- bloqueo del quinto armónico
- bloqueo de la forma de onda
- bloqueo de cruce
- discriminador de fallos sensible externo/interno basado en la secuencia negativa,

pueden reutilizarse directamente. Este principio se ha tratado en la solicitud de patente WO 2005/064759 A1.

Calculando las corrientes diferenciales  $I_{Dif\_Lx}$  que usan la ecuación (1.24), teóricamente podría detectarse un fallo en el transformador de potencia si una de las corrientes diferenciales  $I_{Dif\_Lx}$  comienza a ser distinta de cero. Esto se mantiene cierto bajo condiciones normales de funcionamiento a través de la carga del transformador de potencia, es decir cuando el transformador de potencia no está saturado. En la práctica sólo se detecta un fallo si una de las corrientes diferenciales excede un límite predeterminado, para aumentar la seguridad de fallo del método. Una corriente diferencial que es distinta de cero indica que hay una diferencia entre la corriente de entrada normalizada y la corriente de salida normalizada del transformador de corriente. La corriente de entrada normalizada corresponde a la corriente normalizada del devanado primario W1 y la corriente de salida normalizada para un transformador de potencia de n-devanados corresponde a la suma de las corrientes normalizadas de todos los demás devanados W2 a Wn, donde se incluye un desplazamiento de fase de  $180^\circ$  (véase la Figura 2, dirección de las corrientes de salida  $I_{Lx\_W2}$ ). Por lo tanto, el método general de detección de fallos basado en la ecuación (1.24) puede describirse como un método, donde la corriente normalizada para el devanado primario W1 se compara con las corrientes normalizadas para todos los otros devanados de W2 a Wn.

Un modo de realizar esta comparación es usando la ecuación (1.24) para calcular explícitamente las corrientes diferenciales  $I_{Dif\_Lx}$ .

Otro modo puede encontrarse cuando se reescribe la ecuación (1.24) de la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} I_{Dif\_L1} \\ I_{Dif\_L2} \\ I_{Dif\_L3} \end{bmatrix} = \frac{1}{I_{b\_w1}} \cdot M(\Theta_{w1}) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_w1} - k_{w1} \cdot I_{0\_w1} \\ I_{L2\_w1} - k_{w1} \cdot I_{0\_w1} \\ I_{L3\_w1} - k_{w1} \cdot I_{0\_w1} \end{bmatrix} + \sum_{i=2}^n \frac{1}{I_{b\_wi}} \cdot M(\Theta_{wi}) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \\ I_{L2\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \\ I_{L3\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

Ahora las contribuciones del devanado primario W1, que es la primera parte de la ecuación (1.25) y la contribución de los demás devanados W2 a Wn a las corrientes diferenciales  $I_{Dif\_Lx}$  pueden verse explícitamente.

La ecuación 1.24 podría también escribirse de cualquier otro modo con la contribución de uno de los n devanados que se extraen, es decir el lado izquierdo de la ecuación (1.25) podría calcularse por ejemplo para el devanado W2 en lugar del devanado W1. A continuación la contribución de este único devanado W2 se compararía con la contribución del resto de devanados W1 y de W3 a Wn. Por lo tanto, la ecuación (1.24) puede considerarse en el modo más general

como la base de un método para comparar la corriente normalizada de un único devanado de un transformador de potencia con las corrientes normalizadas de los demás devanados.

Como ya se ha apuntado, si no se produce un fallo interno y bajo condiciones normales de funcionamiento a través de la carga del transformador de potencia, las corrientes diferenciales  $I_{Dif\_Lx}$  deberían ser todas cero. Por consiguiente los fasores de las dos partes que contribuyen en la ecuación (1.25) son iguales en su magnitud y tienen un desplazamiento de fase de  $180^\circ$  entre sí. En términos matemáticos, esto puede expresarse reescribiendo la ecuación (1.24):

$$\frac{i}{i_{b\_w1}} \cdot M(\Theta_{w1}) \cdot \begin{bmatrix} i_{L1\_w1} - k_{w1} \cdot i_{0\_w1} \\ i_{L2\_w1} - k_{w1} \cdot i_{0\_w1} \\ i_{L3\_w1} - k_{w1} \cdot i_{0\_w1} \end{bmatrix} = - \sum_{i=2}^n \frac{1}{i_{b\_wi}} \cdot M(\Theta_{wi}) \cdot \begin{bmatrix} i_{L1\_wi} - k_{wi} \cdot i_{0\_wi} \\ i_{L2\_wi} - k_{wi} \cdot i_{0\_wi} \\ i_{L3\_wi} - k_{wi} \cdot i_{0\_wi} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Ahora puede detectarse un fallo simplemente comparando los lados derecho e izquierdo de la ecuación (1.26), donde los fasores resultantes para cada una de las fases  $Lx$ , con  $x= 1, 2, \text{ ó } 3$ , deberían ser de la misma magnitud y tener un desplazamiento de fase de  $0^\circ$ , es decir estar en fase entre sí.

De acuerdo con una realización de la invención, se ha encontrado que la ecuación (1.26) es ahora especialmente adecuada para la detección de un fallo de bajo nivel entre vueltas. En el caso de un fallo de bajo nivel entre vueltas las magnitudes de los dos lados de la ecuación (1.26) no mostrarán casi ninguna diferencia relevante entre sí, debido a la proporción comparativamente alta de transformación entre el devanado del transformador afectado como un conjunto y los pocos elementos cortocircuitados. Pero al mismo tiempo, se producirá un desplazamiento de fase en la fase correspondiente en la ecuación (1.26) que tomará un valor arbitrario diferente de  $0^\circ$ , debido a la elevada corriente en las vueltas cortocircuitadas.

Por lo tanto, monitorizando el ángulo de fase entre las dos contribuciones a las corrientes diferenciales de la ecuación (1.25) o también monitorizando el desplazamiento de fase entre los dos lados de la ecuación (1.26) continuamente y para cada una de las tres fases, se consigue un método sensible pero sencillo para detectar fallos de bajo nivel entre vueltas. Un fallo entre vueltas se notifica tan pronto como el desplazamiento de fase alcanza un nivel predeterminado, por ejemplo  $4^\circ$ .

Además de monitorizar las corrientes de fases individuales, puede usarse una monitorización del desplazamiento de fase entre las contribuciones de las componentes de secuencia positiva y negativa como criterio de comprobación adicional.

Para mejorar adicionalmente la seguridad de detección del método de detección de fallos puede incluirse una etapa adicional donde se determina y se evalúa el desplazamiento del ángulo de fase de cada una de las tres fases de la ecuación (1.26). Si cada una de las tres fases muestra prácticamente el mismo desplazamiento del ángulo de fase se indica un problema en la compensación del ángulo de fase, ya que es bastante improbable que se produzca un fallo de las tres fases. Para comprobar adicionalmente que existe un problema de compensación del ángulo de fase, puede determinarse el desplazamiento del ángulo de fase de la corriente de secuencia positiva comparando el devanado  $W1$  con los demás devanados  $W2$  a  $Wn$ . Si este cuarto desplazamiento del ángulo de fase es del mismo valor que los desplazamientos de los ángulos de fase de las tres fases de la ecuación (1.26), se aprueba la indicación de un fallo de la compensación del ángulo de fase.

Como las ecuaciones (1.25) y (1.26), respectivamente, requieren condiciones normales a través de la carga, la monitorización del ángulo de fase o del desplazamiento de fase debería deshabilitarse cuando la corriente que pasa a través de las mismas, que es en la práctica la corriente de polarización, toma un valor fuera de una banda predeterminada de valores de corriente, donde la banda de valores de corriente se define por un nivel de corriente mínimo y uno máximo.

REIVINDICACIONES

1. Un método para la detección de fallos en un transformador de potencia trifásico de n-devanados que comprende las etapas de:

- para cada uno de los devanados ( $W_i$ , donde  $i=1, \dots, n$ ):
  - medir las tres corrientes de fase ( $I_{L1\_wi}$ ;  $I_{L2\_wi}$ ;  $I_{L3\_wi}$ ),
  - decidir (7) si se realizará la reducción de la corriente de secuencia cero ( $I_{0\_wi}$ ) dependiendo de al menos una configuración del usuario ( $K_{wi}$ ) y si es así, deducir la corriente de secuencia cero ( $I_{0\_wi}$ ) de cada una de las corrientes de las tres fases ( $I_{L1\_wi}$ ;  $I_{L2\_wi}$ ;  $I_{L3\_wi}$ ),
  - generar corrientes normalizadas realizando una compensación de magnitud (3) y una compensación del desplazamiento del ángulo de fase (4) sobre los resultados de la etapa anterior,
- seguido por las etapas para cada una de las fases (Lx, donde,  $x=1, 2, 3$ ):
  - comparar (5) la corriente normalizada de un devanado único con las corrientes normalizadas de los demás devanados, y
  - generar una señal de fallo, si la diferencia entre el devanado único y los demás devanados excede un nivel predefinido.

2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, donde el devanado único es el devanado primario (W1) y los demás devanados son el segundo y siguientes devanados (W2, ..., Wn).

3. Un método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 ó 2, donde para cada una de las fases (Lx) las corrientes normalizadas se comparan añadiendo la corriente normalizada del devanado único (W1) a la suma de las corrientes normalizadas de los demás devanados determinando por lo tanto las corrientes diferenciales orientadas a las fases ( $I_{Dif\_Lx}$ ) de acuerdo con:

$$\begin{bmatrix} I_{Dif\_L1} \\ I_{Dif\_L2} \\ I_{Dif\_L3} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_{b\_wi}} \cdot M(\Theta_{wi}) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \\ I_{L2\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \\ I_{L3\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \end{bmatrix}$$

con

$$M(\Theta_{wi}) = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi}) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi} + 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi} - 120^\circ) \\ 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi} - 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi}) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi} + 120^\circ) \\ 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi} + 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi} - 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{wi}) \end{bmatrix},$$

y donde se genera una señal de fallo si una de las corrientes diferenciales orientadas a las fases ( $I_{Dif\_Lx}$ ) excede un nivel predefinido.

4. Un método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 ó 2, donde para cada una de las fases (Lx) se comparan las corrientes normalizadas comparando el fasor de la corriente normalizada del devanado único (W1) con el fasor negativo de la suma de corrientes normalizadas de todos los demás devanados (W2, ..., Wn) de acuerdo con:

$$\frac{1}{I_{b\_W1}} \cdot M(\Theta_{W1}) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_W1} - k_{W1} \cdot I_{0\_W1} \\ I_{L2\_W1} - k_{W1} \cdot I_{0\_W1} \\ I_{L3\_W1} - k_{W1} \cdot I_{0\_W1} \end{bmatrix} = - \sum_{i=2}^n \frac{1}{I_{b\_wi}} \cdot M(\Theta_{wi}) \cdot \begin{bmatrix} I_{L1\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \\ I_{L2\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \\ I_{L3\_wi} - k_{wi} \cdot I_{0\_wi} \end{bmatrix}$$

con

$$M(\Theta_{Wi}) = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi}) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi} + 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi} - 120^\circ) \\ 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi} - 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi}) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi} + 120^\circ) \\ 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi} + 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi} - 120^\circ) & 1 + 2 \cdot \cos(\Theta_{Wi}) \end{bmatrix},$$

y donde se genera una señal de fallo si para una de las fases (Lx) la magnitud y/o el ángulo de fase entre los fasores correspondientes excede un nivel predefinido.

5. Un método de acuerdo con la reivindicación 4, donde adicionalmente el desplazamiento del ángulo de fase entre el devanado único (W1) y los demás devanados (W2 a Wn) se comprueba para las contribuciones de las componentes de secuencia positiva y negativa.

6. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones 4 ó 5, donde se comparan los tres ángulos de fase entre los dos fasores correspondientes de las tres fases (Lx) y donde se indica un fallo en la compensación del desplazamiento del ángulo de fase (4) si los tres ángulos de fase son del mismo tamaño.

7. Un método de acuerdo con las reivindicaciones 5 y 6, donde el desplazamiento del ángulo de fase de la contribución de la componente de secuencia positiva se compara con los tres ángulos de fase y donde se aprueba una fallo en la compensación del desplazamiento del ángulo de fase (4) si son todos del mismo tamaño.

8. Un método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones anteriores, donde se mide la corriente de secuencia cero ( $I_{0\_Wi}$ ) para al menos uno de los devanados (Wi) en el punto neutro común de los devanados.

9. Un método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones anteriores de 1 a 7, donde se determina la corriente de secuencia cero ( $I_{0\_Wi}$ ) para al menos uno de los devanados (Wi) a partir de las tres corrientes de fase medidas ( $I_{L1\_Wi}$ ;  $I_{L2\_Wi}$ ;  $I_{L3\_Wi}$ ) usando la ecuación:

$$I_{0\_Wi} = \frac{I_{L1\_Wi} + I_{L2\_Wi} + I_{L3\_Wi}}{3}$$

10. Un método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones anteriores, donde para cada uno de los devanados (Wi) se realiza la compensación de magnitud dividiendo las corrientes de fase medidas ( $I_{L1\_Wi}$ ;  $I_{L2\_Wi}$ ;  $I_{L3\_Wi}$ ) a través de la corriente base ( $I_{b\_Wi}$ ) usando la ecuación:

$$I_{b\_Wi} = \frac{S_{r \max\_Wi}}{\sqrt{3} \cdot U_r},$$

donde

$S_{\max\_Wi}$  es la potencia nominal de las tres fases del devanado correspondiente (Wi) y  $U_r$  es el voltaje nominal entre fases sin carga del devanado correspondiente (Wi).

11. Un método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones anteriores, donde la detección del fallo se realiza en un transformador de potencia que tiene un desplazamiento del ángulo de fase variable o un desplazamiento de fase fijo distinto de  $30^\circ$  y distinto de un múltiplo de  $30^\circ$ .

12. Un método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones anteriores, donde en el caso de que el transformador de potencia esté acoplado a un cambiador de terminales de carga (OLTC), se determina la corriente base ( $I_{b\_Wi}$ ) para el correspondiente devanado (Wi) de acuerdo con la posición (13) del cambiador de terminales.

13. Un método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones anteriores, donde el ángulo de fase (i) para la compensación del desplazamiento del ángulo de fase (4) se determina para cada uno de los devanados (Wi) leyendo al menos un parámetro fijo determinado por el usuario.

## ES 2 339 387 T3

14. Un método de acuerdo con la reivindicación 12, donde el ángulo de fase (i) para la compensación del desplazamiento del ángulo de fase (4) se determina a partir de la tabla de búsqueda correspondiente al devanado ( $W_i$ ) del cambiador de terminales de carga que describe la relación entre las diferentes posiciones del cambiador de terminales de carga y las correspondientes variaciones del ángulo de fase.

5

15. Un método de acuerdo con la reivindicación 14, donde en el caso de cambiadores de terminales de carga múltiples se determina el ángulo de fase (i) para la compensación del desplazamiento del ángulo de fase (4) para los devanados correspondientes a partir de más de una tabla de búsqueda de acuerdo con el número de cambiadores de terminales.

10

16. Un método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones anteriores de 1 a 12, donde el ángulo de fase (i) para la compensación del desplazamiento del ángulo de fase (4) se recibe para cada uno de los devanados a través de una red de comunicaciones desde un sistema de control externo.

15

17. Método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones anteriores de 1 a 12, donde en el caso de un transformador de desplazamiento de fase (PST) se determina el ángulo de fase (i) para la compensación del desplazamiento del ángulo de fase (4) para cada uno de los devanados ( $W_i$ ) por un algoritmo interno a partir de los voltajes de secuencia positiva cuando el PST no está cargado, o a partir de las corrientes de secuencia positiva cuando el PST está cargado.

20

18. Dispositivo para la detección de fallos en un transformador de potencia trifásico de n-devanados que comprende:

25

- un medio para la medida de las tres corrientes de fase ( $I_{L1\_wi}$ ;  $I_{L2\_wi}$ ;  $I_{L3\_wi}$ ) para cada uno de los devanados ( $W_i$ , donde  $i= 1, \dots, n$ ),

30

- un medio (7) para decidir para cada uno de los devanados ( $W_i$ ) si se realizará la reducción de la corriente de secuencia cero ( $I_{0\_wi}$ ) (2) dependiendo de al menos una fijación del usuario ( $k_{wi}$ ) y si es así, deducir la corriente de secuencia cero ( $I_{0\_wi}$ ) desde cada una de las tres corrientes de fase ( $I_{L1\_wi}$ ;  $I_{L2\_wi}$ ;  $I_{L3\_wi}$ ),

35

- un medio (3, 4) para generar para cada uno de los devanados ( $W_i$ ) corrientes normalizadas realizando una compensación de magnitud y una compensación del desplazamiento del ángulo de fase sobre los resultados de la etapa anterior,

40

- un medio (5) para comparar para cada una de las fases ( $L_x$ , donde  $x=1, 2, 3$ ) la corriente normalizada del devanado primario ( $W_i$ ) con las corrientes normalizadas de los demás devanados ( $W_2, \dots, W_n$ ), y

- un medio (6) para generar para cada una de las fases ( $L_x$ ) una señal de fallo, si la diferencia entre el devanado primario ( $W_1$ ) y los demás devanados ( $W_2, \dots, W_n$ ) excede un nivel predefinido.

45

50

55

60

65

19. Un producto programa de ordenador plasmado sobre uno o más medios legibles de ordenador para implementar un método de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones 1-17.

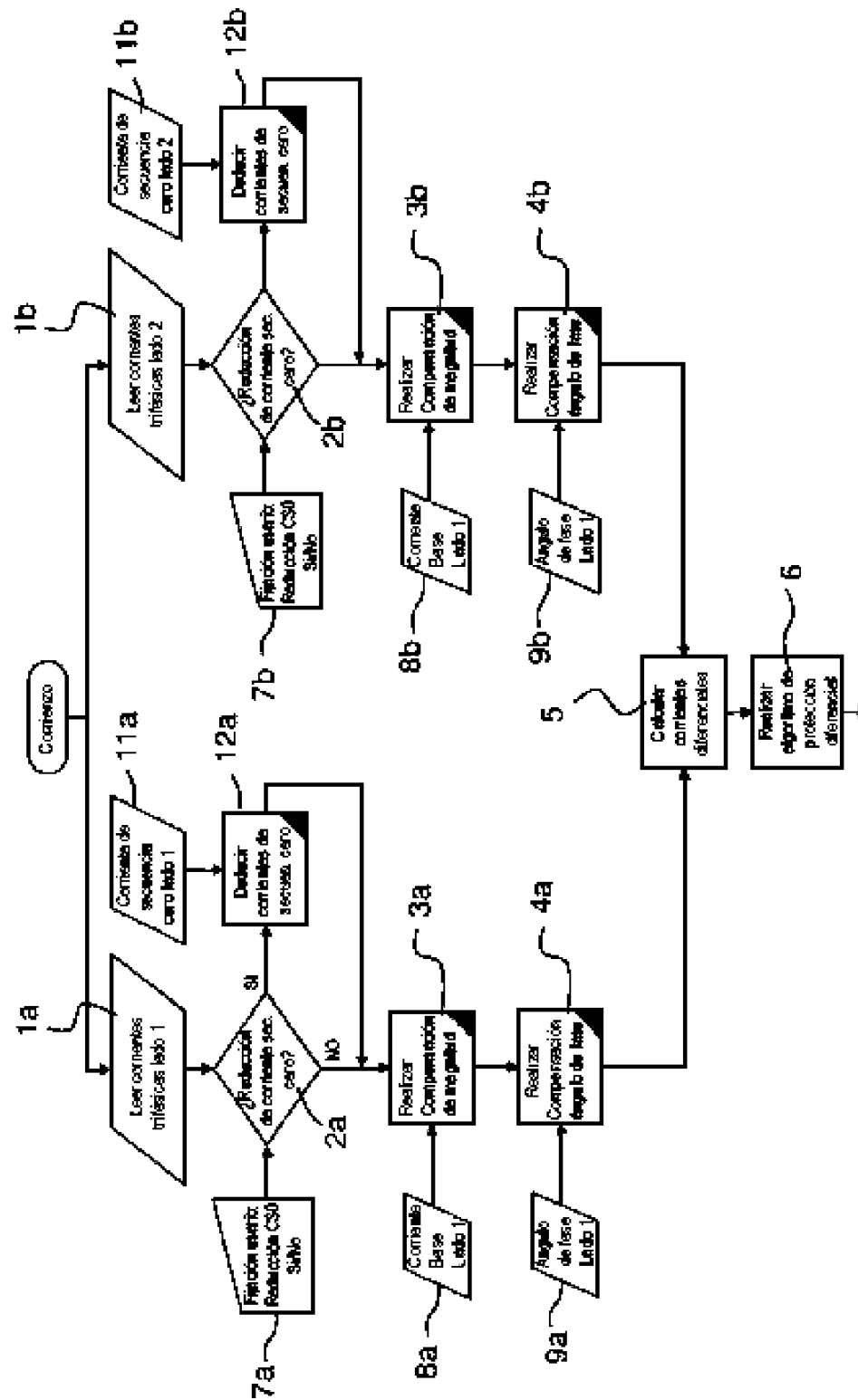


Figura 1

