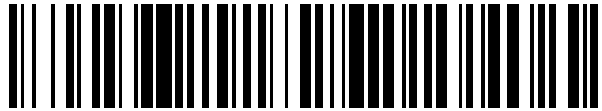


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 439 279**

51 Int. Cl.:

G01R 31/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.12.2010 E 10195712 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.09.2013 EP 2466322**

54 Título: **Método y aparato para diagnóstico de transformador**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.01.2014

73 Titular/es:

**ABB RESEARCH LTD. (100.0%)
Affolternstrasse 44
8050 Zürich, CH**

72 Inventor/es:

**BENGTSSON, TORD y
ABEYWICKRAMA, NILANGA**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 439 279 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 aparato para diagnóstico de transformador

Campo técnico

5 La presente invención se refiere al campo de los transformadores de potencia, y, en particular, al diagnóstico en línea de transformadores.

Antecedentes

10 Los transformadores generalmente forman parte integrante de un sistema de transmisión de potencia, que ofrece la posibilidad de transformar un nivel de tensión en otro. Los transformadores de sistemas de transmisión de potencia a menudo implican grandes inversiones, y por lo general no se fabrican hasta que son solicitados. En el caso en el que se necesite reemplazar un transformador de un sistema de transmisión de potencia, el reemplazo a menudo implica un largo proceso. Con el fin de evitar situaciones en las que haya que reemplazar un transformador de manera urgente, es deseable detectar un problema que surja en una fase temprana, de manera se pueda realizar el mantenimiento requerido o una sustitución planificada.

15 Los sistemas de control en línea de transformadores han sido diseñados para detectar e indicar, mientras que el transformador está en funcionamiento, desviaciones de propiedades del transformador que podrían indicar un deterioro del estado del transformador. Ejemplos de propiedades que pueden ser controladas son la temperatura, el gas disuelto en combustible, y la capacitancia de las bornas.

20 La impedancia de transformador es otra propiedad que se ha utilizado en los diagnósticos de transformadores. Convencionalmente, la impedancia de transformador se ha determinado fuera de línea, es decir, a partir de mediciones realizadas cuando el transformador estaba desconectado del sistema de transmisión de potencia.

25 En el documento US2010/0188240, se propone controlar la impedancia de transformador mientras que el transformador está en funcionamiento. La posibilidad de controlar la impedancia en línea sería un gran beneficio, ya que la impedancia de un transformador incluye información útil sobre el estado del transformador, mientras que la desconexión de un transformador del sistema de transmisión de potencia con el fin de determinar la impedancia resulta costoso. En el documento US2010/0188240, se propone obtener información sobre la impedancia del transformador mediante la medición de la corriente A y la tensión E en los terminales de transformador, y generar (en un sistema trifásico) una matriz de impedancia de 9×9 a partir de tales mediciones usando las relaciones $E_{iH} - E_{jL} = Z_{ij} a_{ij}$ y $A_{iH} = a_{i1} + a_{i2} + a_{i3}$, donde a_{ij} representa corrientes de terminales de transformador, los índices H y L indican "lado de alta tensión" y "lado de baja tensión", respectivamente; el índice $j = 1, 2, 3$ indica fases de los terminales de alta tensión, y el índice $j = 1, 2, 3$ indica fases de los terminales de baja tensión. Como se analizó en el documento US2010/0188240, la solución del sistema de ecuaciones obtenido por el análisis propuesto presenta una considerable complejidad computacional, y por tanto se propone una simplificación del modelo. Sin embargo, incluso aunque no se emplee dicha simplificación, la exactitud de los resultados obtenidos por el método propuesto a menudo no será suficiente para los propósitos de diagnóstico de transformadores.

35 El documento US 2009/099885 da a conocer un procedimiento de dos pasos para la caracterización de un componente eléctrico tal como un motor eléctrico, un generador o un transformador de media o alta tensión. En el primer paso, un conjunto de configuraciones de terminal se aplican a los terminales del componente eléctrico con el fin de obtener datos que describen la respuesta eléctrica lineal del componente a cualquier patrón de tensiones o corrientes aplicadas al terminal. Usando estos datos, la respuesta eléctrica lineal del componente bajo prueba de configuración de terminal se puede calcular en un segundo paso. El procedimiento permite la determinación de la respuesta bajo cualquier prueba de configuración de terminal sin la necesidad de llevar a cabo la medición bajo la prueba de configuración de terminal. Este tipo de información se utiliza en el denominado análisis de respuesta de frecuencia (FRA), que se aplica al evaluar el estado o deterioro de un transformador.

Resumen

45 Un objeto de la presente invención es proporcionar un método más preciso para el diagnóstico en línea de transformadores.

50 Este problema se plantea mediante un método de diagnóstico de transformador que se puede utilizar para un transformador que tiene al menos un devanado de carga y un devanado de fuente. El método comprende recoger, durante al menos dos cargas de transformador diferentes, mediciones de una corriente que es indicativa de la carga de transformador, y mediciones de al menos una señal adicional CA de transformador. El método comprende, además, derivar, a partir de mediciones recogidas, al menos dos valores de una cantidad que depende de al menos una

propiedad de transformador y de una carga de transformador, y determinar, a partir de valores derivados, un coeficiente o un conjunto de coeficientes de una relación según la cual se espera que varíe la cantidad con la carga de transformador. El método comprende además el uso de al menos uno de dichos coeficientes en la realización de un diagnóstico de transformador.

5 Mediante el método de la invención se proporciona una manera de determinar valores de propiedades de transformador que de otro modo serían difíciles de medir. Por otra parte, el método de diagnóstico inventivo se puede utilizar ventajosamente en línea, facilitando de este modo el control y el diagnóstico sin tener que hacerlo fuera de línea.

El término señal CA de transformador se utiliza aquí para referirse a una señal procedente del conjunto $\{I_1, I_2, V_1, V_2\}$, donde I_1, I_2 son, respectivamente, las corrientes a través de los devanados de fuente y de carga del transformador, y V_1, V_2 son, respectivamente, las tensiones a través de los lados de fuente y de carga del transformador.

La recogida de las mediciones se podría realizar mediante la recepción de señales de medición directamente del equipo de medición, o mediante la recepción de datos de medición a partir de otra fuente, tal como una memoria legible por ordenador o un aparato de diagnóstico diferente.

15 El valor de un coeficiente puede ser descrito generalmente en lo que se refiere a una expresión que implica al menos una propiedad de transformador. Algunos coeficientes son en realidad iguales al valor de una propiedad de transformador, en cuyo caso la expresión llega a ser simple. En una realización del método de diagnóstico, la realización de un diagnóstico comprende el uso de al menos un coeficiente para obtener al menos una propiedad de transformador, utilizando la expresión de hasta qué punto depende el coeficiente de la propiedad o propiedades de transformador. Por lo tanto, en esta realización, un valor de una propiedad de transformador puede determinarse a partir de mediciones en línea, proporcionando información útil sobre el estado del transformador. La determinación de una propiedad de transformador se puede repetir de vez en cuando, recogiendo otras mediciones a diferentes cargas, y determinando un nuevo coeficiente o conjunto de coeficientes a partir de los cuales se puede determinar un nuevo valor de la propiedad.

25 En una realización del método de diagnóstico, la realización de un diagnóstico incluye recoger una medición de control en línea de al menos una señal CA de terminal a una primera carga de control; derivar un valor en base a la medición de la cantidad a partir de la medición de control; y determinar un valor esperado de la cantidad a la primera carga de control utilizando dicha relación y dicho coeficiente o coeficientes. El valor basado en la medición de la cantidad es comparado después con el valor esperado de la cantidad, a fin de detectar cualquier problema de transformador al darse un cambio en la cantidad. Puesto que la cantidad depende de al menos una propiedad de transformador, los cambios de una propiedad de transformador de la que depende la cantidad se reflejarán en el valor de la cantidad. Por lo tanto, se puede lograr de manera efectiva mediante el control en línea de la cantidad, y el control en línea de las propiedades de las que depende la cantidad. Si se desea, el valor real de la propiedad o propiedades de transformador se puede determinar tras una indicación de un cambio.

30 La recogida de una medición de control en línea y la comparación con el valor esperado correspondiente se puede repetir tan a menudo como sea necesario o deseado, por ejemplo en intervalos de tiempo que van de segundos a años. Las mediciones de control podrían ser realizadas de forma regular o según demanda.

40 La relación según la cual la cantidad varía con la carga de transformador puede ser una relación lineal, en la que la pendiente y/o la intersección a carga cero es indicativa de una propiedad de transformador. En una realización, la cantidad es la diferencia entre la tensión a través de los terminales de un primer devanado en un primer lado de transformador y la tensión a través de un segundo devanado en un segundo lado de transformador tal como se refleja hacia el primer lado. En una aplicación de esta realización en la que el transformador sólo tiene un devanado por lado, que lleva una potencia significativa, la relación corresponde a:

$$\Delta V = Z_1 I_0 + \frac{Z_w}{n} I_2,$$

$$\Delta V' = \frac{1}{n} \left[Z_1 I_0 + \frac{Z_w}{n} I_2 \right],$$

45 donde Z_1 es la impedancia del devanado de fuente; I_0 es la corriente de magnetización, n es la relación entre el número de vueltas del devanado de fuente y el número de vueltas del devanado de carga; Z_w es la impedancia total de devanado; I_2 es la corriente de carga; ΔV es la diferencia entre la tensión a través de los terminales del devanado de fuente y la tensión a través del devanado de carga tal como se refleja hacia el lado de fuente, y $\Delta V'$ es la diferencia entre la tensión a través del devanado de fuente tal como se refleja hacia el lado de carga y la tensión a través de los

terminales del devanado de carga. En esta realización, las propiedades de transformador de las que dependen los coeficientes de la relación son la impedancia total de devanado, la relación de vueltas, la corriente de magnetización y la impedancia del devanado de fuente.

- 5 En otra realización, la cantidad es la fuente de corriente. En una aplicación de esta realización en la que el transformador sólo tiene un devanado por lado que lleva una potencia significativa, la relación corresponde a:

$$I_1 = \frac{1}{n} I_2 + I_0,$$

donde I_1 es la fuente de corriente; I_2 es la corriente de carga; I_0 es la corriente de magnetización; y n es la relación entre el número de vueltas del devanado de fuente y el número de vueltas del devanado de carga. En esta realización, se puede obtener información de la relación de vueltas y de la corriente de magnetización a carga elevada.

- 10 Aún en otra realización, la cantidad es la pérdida de potencia en el transformador. En una aplicación de esta realización en la que el transformador sólo tiene un devanado por lado, que lleva una potencia significativa, la relación corresponde a:

$$S_{\text{pérdida}} = V_1 I_0^* + Z_1 \frac{I_0 I_2^*}{n} + Z_w \frac{I_2 I_2^*}{n^2},$$

- 15 donde $S_{\text{pérdida}}$ es dicha pérdida de potencia; Z_1 es la impedancia del devanado de fuente; I_0 es la corriente de magnetización, n es la relación entre el número de vueltas del devanado de fuente y el número de vueltas del devanado de carga; Z_w es la impedancia total de devanado; V_1 es la tensión a través del devanado de fuente e I_2 es la corriente de carga. En esta realización, las propiedades de transformador de las que dependen los coeficientes de la relación son la impedancia total del devanado, la relación de vueltas, la corriente de magnetización y la impedancia del devanado de fuente.

- 20 Suponiendo que estas propiedades sean ya conocidas (por ejemplo, a partir de ΔV (ΔV) y relaciones I_2 descritas anteriormente), se puede obtener información sobre la pérdida de potencia de magnetización y la pérdida de potencia de devanado. La pérdida de potencia en el transformador es un indicador general de los muchos tipos de problemas. Mediante el control de la pérdida de potencia, se puede obtener más a menudo una indicación rápida en caso de que se produzca un problema.

- 25 El problema se resuelve mediante un aparato de diagnóstico de transformador y realizaciones del mismo. El aparato de diagnóstico de transformador comprende: una entrada configurada para recibir señales indicativas de mediciones de señales CA de un transformador, incluyendo mediciones de la corriente de carga de transformador, una salida configurada para proporcionar un resultado de diagnóstico de transformador, y un generador de coeficientes (706) conectado a la entrada. El generador de coeficientes está configurado para recoger, durante al menos dos cargas de transformador diferentes, mediciones de una corriente que es indicativa de la carga de transformador, y mediciones de al menos otra señal CA de transformador. El generador de coeficientes está configurado, además, para derivar, a partir de las mediciones recogidas, al menos dos valores de una cantidad que depende de una propiedad de transformador, y de una carga de transformador, y para determinar, a partir de los valores derivados, un coeficiente o un conjunto de coeficientes de una relación según la cual se espera que varíe dicha cantidad con la carga de transformador. El aparato de diagnóstico de transformador comprende además un mecanismo de diagnóstico dispuesto para utilizar el conjunto de coeficientes en la generación de un resultado de diagnóstico. El mecanismo de diagnóstico está conectado al generador de coeficientes y a la salida del aparato de diagnóstico de transformador (posiblemente a través de otros componentes del aparato de diagnóstico).

- 40 El problema se resuelve también mediante un transformador que comprende un aparato de diagnóstico de transformador. El transformador puede ser un transformador monofásico, o incluir otras fases. El transformador puede tener dos o más devanados por fase. En una aplicación en la que el transformador comprende un cambiador de tomas, el generador de coeficientes puede estar configurado para generar un conjunto de coeficientes para cada uno de los puntos de toma del cambiador de tomas. En tal realización, el controlador de estado puede estar configurado para determinar, si se detecta una desviación, en qué posición o posiciones del cambiador de tomas se produce la desviación. Por ello se consigue que pueda ser localizada una posición en la que se ha producido un fallo.

El problema se resuelve también mediante un programa informático para proporcionar un diagnóstico de un transformador, en el que el programa informático, cuando se ejecuta en un aparato de diagnóstico de transformador, hará que el aparato de diagnóstico realice el método de la invención.

5 Otros aspectos de la invención se exponen en la siguiente descripción detallada y en las reivindicaciones que se acompañan.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una ilustración de un modelo de transformador ideal.

10 La figura 2a es una ilustración de un modelo de transformador teniendo en cuenta efectos de corrientes de magnetización en el núcleo de transformador, inductancias de fuga y resistencias efectivas de los devanados primario y secundario.

La figura 2b es una ilustración alternativa del modelo del transformador que se muestra en la figura 2a, en el que las impedancias en el lado de carga se han reflejado hacia el lado de fuente.

La figura 2c es una ilustración alternativa del modelo de transformador que se muestra en las figuras 2a y 2b, en el que las impedancias en el lado de fuente se han reflejado hacia el lado de carga.

15 La figura 3 es un gráfico que muestra ΔV como una función de I_2 para un transformador, donde ΔV es la diferencia entre la tensión en el terminal de fuente y la tensión en el terminal de carga como se ve desde el lado de fuente e I_2 es la corriente de carga, y donde ΔV se obtuvo a partir de mediciones de las tensiones de fuente y de carga a diferentes cargas de transformador.

20 La figura 4 es un gráfico que muestra los resultados experimentales de I_1 vs I_2 , en donde I_1 es la corriente de terminal de fuente e I_2 es la corriente de carga.

La figura 5 es un organigrama que ilustra esquemáticamente una realización de un método de la invención.

La figura 6a es un organigrama que ilustra esquemáticamente un ejemplo de uso de una relación $T(I_2)$ determinada mediante el método que se muestra en la figura 5.

25 La figura 6b es un organigrama que ilustra esquemáticamente otro ejemplo de uso de una relación $T(I_2)$ determinada mediante el método que se muestra en la figura 5.

La figura 7a es un ejemplo de una realización de un aparato de diagnóstico de acuerdo con la invención.

La figura 7b es un ejemplo de una realización de un generador de coeficientes.

La figura 7c es un ejemplo de una realización de un controlador de estado.

30 La figura 8 es una ilustración alternativa de un aparato de diagnóstico, un generador de coeficientes, un generador de valores de propiedades de transformador, o un controlador de estado.

La figura 9 es una ilustración esquemática de un transformador que tiene un cambiador de tomas.

Descripción detallada

35 En sistemas de transmisión y distribución de potencia, se utilizan típicamente transformadores para transformar un nivel de tensión en otro, y/o para proporcionar aislamiento galvánico entre diferentes secciones de un sistema de transmisión de potencia. Una ilustración esquemática de un transformador 100 se muestra en la figura 1. El transformador 100 de la figura 1 comprende un primer devanado 105, un segundo devanado 110, un núcleo de transformador 113, un primer par de terminales de devanado 115a, 115b conectados al primer devanado 105, y un segundo par de terminales de devanado 120a, 120b conectados al segundo devanado 110. La tensión a través del primer devanado 105 se indica como V_1 , y la tensión a través del segundo devanado 110 se indica como V_2 , mientras que la corriente a través del primer devanado 105 se indica como I_1 y la corriente a través del segundo devanado 110 se indica como I_2 . El número de vueltas del primer devanado se indica como n_1 , y el número de vueltas en el segundo devanado se indica como n_2 , la relación n_1/n_2 se denomina a partir de ahora relación de vueltas n . Se debe tener en cuenta que, aunque una práctica utilizada a menudo consiste en que n sea mayor de 1, n tal como se define en este documento puede ser menor, igual, o mayor de 1. Además, con el fin de simplificar la descripción, la tensión a través de un devanado 105/110 será a menudo denominada tensión de terminal, y una corriente a través de un devanado 105/110 será a menudo denominada corriente de terminal, aunque en algunas configuraciones de devanado, por ejemplo, en un devanado trifásico Δ , las

tensiones y corrientes de terminal no van a reflejar directamente las tensiones/corrientes de devanado, aunque sí van a proporcionar un medio para derivar las tensiones/corrientes de devanado.

5 A continuación, para facilitar la descripción, se supondrá que el primer devanado 105 es el devanado que es alimentado por una fuente, y el segundo devanado 110 es el devanado que proporciona potencia a una carga. Sin embargo, puede usarse alternativamente de manera opuesta.

En un transformador ideal sin pérdidas, y por tanto del 100% de eficiencia, se cumplen las siguientes relaciones:

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = n \quad (1a);$$

$$n_1 \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{I_2}{I_1} = n \quad (1b)$$

$$Z_{\text{fuente}} = \frac{V_1}{I_1} = n^2 \cdot Z_{\text{carga}} \quad \text{donde} \quad Z_{\text{carga}} = \frac{V_2}{I_2} \quad (1c),$$

Donde Z_{fuente} es la impedancia vista desde el lado de fuente y Z_{carga} es la impedancia vista desde el lado de carga.

10 Sin embargo, un transformador real, experimenta pérdidas de potencia aparente, incluidas tanto pérdidas de potencia activa como reactiva. Las principales fuentes de pérdida de potencia aparente incluyen:

Pérdidas en el núcleo, denominadas pérdida en el núcleo o pérdida sin carga: pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas.

Pérdidas en los devanados: pérdidas I^2R , pérdidas en el cobre y por proximidad.

15 Pérdidas por dispersión: en las partes metálicas del transformador, por ejemplo, la pared del tanque, debido a campos magnéticos de dispersión.

Además de la pérdida de potencia, normalmente existe una caída de tensión a través del transformador, debido a la fuerza magnetomotriz asociada a la fuga de flujo magnético y a la resistencia de los devanados.

20 La figura 2a muestra un ejemplo de un circuito equivalente utilizado a menudo para un transformador no ideal 100, denominado modelo de primer orden de un transformador 100. Además de los componentes de transformador que se muestran en la figura 1, es decir, los devanados 105, 110, el núcleo 113 y los terminales de devanado 115a, 115b y 120a, 120b, la figura 2a también ilustra los efectos de la caída de tensión a través del transformador causada por la fuga de flujo magnético y los efectos de las pérdidas de potencia aparente analizados anteriormente. En la figura 2a, los efectos que causan tal caída de tensión y tal pérdida de potencia aparente se ilustran incluyendo, en el circuito equivalente, los siguientes elementos:

25 una resistencia del devanado de fuente, R_1 ;

una reactancia de fuga del devanado de fuente, X_1 ;

una resistencia del devanado de carga, R_2 ;

una reactancia de fuga del devanado de carga, X_2 ;

una resistencia que representa las pérdidas de núcleo, R_m ; y

30 una reactancia que representa la magnetización de núcleo, X_m ;

donde R_1 y X_1 están conectados en serie con el devanado de fuente 105; R_2 y X_2 están conectados en serie con el devanado de carga 110; y R_m y X_m , que están conectados en paralelo, forman un elemento de derivación equivalente que está conectado en paralelo con el devanado de fuente 105. La corriente equivalente a través del elemento de

derivación equivalente se indica como I_0 , mientras que la tensión a través del elemento de derivación equivalente se indica como E_1 . La corriente I_0 se va a denominar en lo sucesivo corriente de magnetización I_0 .

A menudo, el modelo de transformador de primer orden de la figura 2a se describe en lo que se refiere a un modelo equivalente, en el que las impedancias son vistas únicamente desde un solo lado del transformador. Tales modelos equivalentes simplifican el análisis del modelo de transformador, ya que el nivel de tensión es generalmente diferente en los dos lados. En la figura 2b se muestra un modelo de transformador de primer orden equivalente en el que las impedancias del lado de carga se han reflejado hacia el lado de fuente, mientras que la figura 2c muestra un modelo de transformador de primer orden equivalente en el que las impedancias del lado de fuente se han reflejado hacia el lado de carga. En las figuras 2b y 2c se utilizan los siguientes símbolos:

10 R_{12} : la resistencia del devanado de carga reflejada hacia el lado de fuente;

X_{12} : la reactancia de fuga del devanado de carga reflejada hacia el lado de fuente;

R_{21} : la resistencia del devanado de fuente reflejada hacia el lado de carga,

$$R_{21} = \frac{R_1}{n^2};$$

X_{21} : la reactancia de fuga del devanado de fuente reflejada hacia el lado de carga,

15
$$X_{21} = \frac{X_1}{n^2};$$

R_m : la resistencia equivalente que representa las pérdidas de núcleo, como se ve desde el lado de fuente;

X_m : la reactancia equivalente que representa la magnetización de núcleo, X_m ;

$$I_{12} = \frac{I_2}{n};$$

$$I_{21} = nI_1.$$

20 Con miras únicamente a hacer más fácil la descripción, la siguiente descripción se hará generalmente según el modelo de transformador que se muestra en la figura 2b. Sin embargo, podría hacerse un análisis equivalente en base al modelo de transformador equivalente que se muestra en la figura 2c.

25 Convencionalmente, la magnitud de los componentes de circuito equivalente mencionados anteriormente puede ser determinada mediante mediciones fuera de línea. La impedancia total Z_w de los devanados de transformador, a menudo denominada impedancia de cortocircuito Z_w , se puede estimar fuera de línea como la relación entre una tensión aplicada y la corriente absorbida por el transformador en el lado de fuente, mientras que el lado de carga es puesto en cortocircuito, donde la impedancia total de devanado corresponde a la suma de la impedancia en serie Z_1 del devanado del lado de fuente y la impedancia en serie Z_{12} del devanado del lado de carga como se ve desde el lado de fuente, es decir,

30
$$Z_w = Z_1 + Z_{12} = (R_1 + jX_1) + (R_{12} + jX_{12}).$$

Z_{12} es a menudo denominada impedancia reflejada hacia el lado de fuente, y se puede expresar como $Z_{12} = n^2 Z_2$. La resistencia de un devanado (véase R_1 y R_{12}) se puede medir mediante métodos convencionales, por ejemplo aplicando una tensión y midiendo la corriente resultante en estado estacionario. Además, los valores de los componentes R_m y X_m de la rama de magnetización se pueden estimar realizando mediciones sin carga, durante las cuales sólo la corriente de magnetización I_0 fluye hacia el transformador.

35 Por otra parte, una vez que se ha determinado la impedancia de cortocircuito Z_w por medio de las mediciones fuera de línea, se puede determinar otra característica fundamental del transformador, a saber, la relación de vueltas n . La relación de vueltas se puede determinar fuera de línea por medio de mediciones de tensión sin carga, utilizando la siguiente relación, donde la influencia de la corriente de magnetización es a menudo despreciable:

40
$$V_1 = n \cdot V_2 + Z_1 I_0 \approx n \cdot V_2 \tag{2}$$

Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, es deseable un control más frecuente del transformador que pueda lograrse de manera factible con mediciones fuera de línea.

5 El método presentado en el documento US2010/0188240, en el que las mediciones en línea de las tensiones y corrientes de terminales se utilizan para calcular los valores de la impedancia de transformador, puede proporcionar una estimación aproximada en línea de la impedancia de transformador. Sin embargo, el documento US2010/0188240 no
 10 tiene en cuenta ninguna corriente de magnetización, aunque supone que toda la caída de tensión a través de los devanados 105 y 110 es causada por la corriente de carga sobre la impedancia de transformador (que en el documento US2010/0188240 se define como matriz de impedancia). La influencia de la corriente de magnetización en la impedancia y en los cálculos de la relación de vueltas es a menudo despreciable, y por otra parte, esta influencia no es constante, por lo que la exactitud de cualquier valor de la impedancia de transformador derivada del uso del método sugerido en el documento US2010/0188240 normalmente será insuficiente.

15 A continuación se propone un análisis mejorado de los resultados de mediciones de las tensiones y corrientes de terminales durante el funcionamiento de un transformador 100. De acuerdo con la invención, un diagnóstico de un transformador 100 se puede obtener recogiendo, durante al menos dos cargas diferentes de transformador, mediciones de una corriente que es indicativa de la carga de transformador, así como mediciones de al menos otra señal CA de terminal. A partir de estas mediciones, se pueden establecer los coeficientes de una relación entre una cantidad T y la carga de transformador, en donde la cantidad T depende de una propiedad de transformador a determinar, así como de la carga de transformador, pudiéndose obtener al mismo tiempo a partir de las mediciones recogidas.

20 Con el uso de los coeficientes de la relación que describe cuánto se espera que varíe la cantidad T con la carga, se puede derivar un valor de una propiedad de transformador, de la que depende el valor de T. Una cantidad T típicamente puede ser descrita como una suma de un término dependiente de la carga y un término que es independiente de la carga, aunque están previstas cantidades T con otras dependencias de carga.

25 Utilizando una cantidad T, que se puede obtener a partir de las mediciones de al menos una señal CA, donde la cantidad T depende de la propiedad de transformador a determinar, así como de la carga de transformador, la propiedad de transformador puede ser extraída de la variación de la cantidad T con la carga de transformador. Por lo tanto, mediante la realización de mediciones durante al menos dos cargas de transformador diferentes, un análisis adecuado de la variación de cantidad con la carga dará información sobre el valor de la propiedad a determinar. Como se verá a continuación, ejemplos de propiedades de transformador que se pueden determinar mediante un análisis, como se ha descrito anteriormente, son la impedancia de cortocircuito Z_w , la relación de vueltas n y la corriente de magnetización I_0 .
 30

35 El análisis sugerido podría ser utilizado para determinar, a partir de mediciones en línea de señales CA de terminales, un valor absoluto de una propiedad de transformador. Además, el análisis podría ser usado para el control en línea del estado del transformador. Cuando se utiliza el análisis para fines de control en línea, los coeficientes de la relación entre la cantidad T y la carga de transformador I_2 se determinan, normalmente, primero en circunstancias que reflejan un estado normal del transformador. El valor de la cantidad T se controla a continuación, de manera que se detecte cualquier desviación significativa del valor de la cantidad T medida a partir de la cantidad T obtenida mediante el uso de la relación T-carga de estado normal determinada.

40 Teniendo en cuenta la corriente de magnetización del transformador, cuando se determina la relación entre la cantidad T y la carga de transformador I_2 , se mejora la exactitud del control y la exactitud de la determinación del valor absoluto de la propiedad de transformador.

45 La relación T (I_2) que se utiliza en el análisis puede basarse, por ejemplo, en el circuito equivalente del modelo de primer orden que se muestra en la figura 2a. En este contexto, una propiedad de transformador está relacionada con los parámetros del modelo de transformador de primer orden. Como se verá más adelante, cantidades útiles T, cuya dependencia de carga podría proporcionar información sobre propiedades de transformador interesantes, incluyen la corriente de terminal 11 en el lado de fuente del transformador (que en la convención utilizada en este documento es el lado primario); la diferencia entre la tensión del terminal del lado de carga V_1 y la tensión del lado de carga V_{12} según se ve desde el lado de fuente, esta diferencia en lo sucesivo se denomina caída de tensión, ΔV ; y la pérdida de potencia $S_{p\acute{e}rdida}$ en el transformador.

50 En la figura 2b, se puede ver que las tensiones de terminal V_1 y V_2 , y las corrientes de terminal, I_1 y I_2 , que son todas cantidades medibles, muestran una relación diferente, en un transformador no ideal, a la presentada para un transformador ideal en las expresiones (1a) y (1b). Sin embargo, las cantidades no medibles V_{12} e I_{12} , correspondientes a la tensión de carga y a la corriente de carga, según se ve desde el lado de fuente, están relacionadas con V_2 e I_2 de la misma manera que V_1 e I_1 están relacionadas con V_2 e I_2 en las expresiones (1a) y (1b):

$$\frac{V_{12}}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} \Rightarrow \frac{V_{12}}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = n \quad (3a);$$

$$n_1 \cdot I_{12} = n_2 \cdot I_2 \Rightarrow \frac{I_2}{I_{12}} = n \quad (3b)$$

Por tanto, si se conoce la relación de vueltas n , la tensión de carga V_{12} , según se ve desde el lado de fuente, se puede obtener a partir de la tensión de terminal de carga V_2 , y la caída de tensión ΔV , se puede obtener por tanto a partir de mediciones:

$$\Delta V = V_1 - V_{12} = V_1 - n \cdot V_2 \quad (4a),$$

5

donde la expresión (4a) es una expresión basada en mediciones para obtener un valor de ΔV (siendo un ejemplo de una cantidad T) a partir de mediciones de señales CA de transformador. Como se verá a continuación, un valor de la relación de vueltas n puede obtenerse a partir de un análisis de otra cantidad T , o podría aceptarse adoptar el valor que figura en la placa de datos.

10 La caída de tensión ΔV representa la caída de tensión provocada por la corriente de magnetización I_0 y la corriente I_{12} (carga de corriente reflejada hacia el lado de fuente) que fluye a través de la impedancia de transformador (véase la figura 2). Suponiendo que sea el modelo de transformador de primer orden, ΔV se puede expresar alternativamente como:

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_1 - V_{12} \approx (R_1 + jX_1) \cdot I_0 + ((R_1 + jX_1) + (R_{12} + jX_{12})) \cdot I_{12} \\ &= Z_1 \cdot I_0 + (Z_1 + Z_{12}) \cdot I_{12} = Z_1 I_0 + Z_w I_{12} = Z_1 I_0 + \frac{Z_w}{n} I_2 \end{aligned} \quad (4b).$$

15 Por lo tanto, suponiendo que la corriente de magnetización I_0 es constante, la caída de tensión vs la carga se puede describir mediante una expresión lineal, con la pendiente de la dependencia correspondiendo a la impedancia total de devanado, Z_w . Con cargas elevadas, las variaciones de la corriente de magnetización I_0 son insignificantes, y la relación lineal de la expresión (4b) describirá con precisión la relación entre la tensión y la carga de transformador. En este sentido, las cargas elevadas podrían ser, por ejemplo cargas para las que $I_1 \approx 10I_0$. La intersección de esta dependencia lineal con el eje ΔV a carga cero, se corresponde con el producto de la corriente de magnetización I_0 y la primera impedancia de devanado Z_1 . Como se verá más adelante, la corriente de magnetización a carga elevada I_0 se puede obtener a partir de estudios de la corriente del lado de fuente I_1 vs la corriente de carga I_2 , y por tanto, la impedancia del devanado de fuente Z_1 se puede determinar a partir de la intersección de la expresión lineal (4b). La impedancia de devanado de carga Z_{12} puede determinarse a continuación a partir de la impedancia total de devanado Z_w determinada a partir del gradiente de la expresión lineal (4b).

Una relación útil entre la corriente del lado de fuente I_1 y la carga del transformador, expresada como la corriente del lado de fuente I_2 , puede identificarse mediante el estudio de la figura 2:

$$I_1 = \frac{1}{n} I_2 + I_0 \quad (5a).$$

Aquí, la cantidad T es la fuente de corriente, la cual se puede obtener de manera sencilla a partir de mediciones I_1 :

$$I_1 = I_1 \quad (5b),$$

30

donde la expresión (5b) es una expresión basada en mediciones para obtener un valor de I_1 a partir de mediciones de una señal CA de terminal de transformador.

Por lo tanto, la corriente del lado de fuente I_1 muestra una dependencia lineal de la corriente del lado carga I_2 , donde la pendiente de la dependencia corresponde al inverso de la relación de vueltas de transformador n . Por lo tanto, a partir de mediciones de la corriente del lado de fuente I_1 a diferentes cargas, se puede obtener un valor de la relación de vueltas n .

- 5 Por otra parte, como puede verse a partir de la expresión (5a), la intersección con el eje I_1 a carga cero corresponde a la corriente de magnetización, I_0 . Por lo tanto, si se mide la corriente del lado de fuente a diferentes cargas, y se extrapola la dependencia lineal expresada en (5a) a la carga cero, se puede obtener un valor de la corriente de magnetización I_0 .

- 10 Por tanto, una vez determinada una relación esperada entre una cantidad T (por ejemplo, ΔV o I_1) y la carga de transformador I_2 , cualquier desviación en una propiedad de transformador (tal como Z_w , I_0 o n) de la que depende la cantidad T , puede ser detectada por otras mediciones de las señales CA de terminal adecuadas.

Como se ve en las expresiones (4b) y (4a), ambas cantidades ΔV y I_1 muestran una dependencia lineal de la carga. Cuando la relación $T(I_2)$ es una expresión lineal, los coeficientes de la expresión lineal se pueden determinar, a partir de los valores medidos obtenidos en el paso 503, por medio de un método de regresión lineal adecuado, tal como por ejemplo un ajuste de mínimos cuadrados.

- 15 Por otro lado, la pérdida de potencia $S_{p\acute{e}rdida}$ dentro del transformador 100, es una cantidad T que muestra una dependencia cuadrática de la carga. La pérdida de potencia $S_{p\acute{e}rdida}$ se puede obtener como la diferencia entre la entrada de potencia aparente, $S_{entrada}$, y la salida de potencia aparente, S_{salida} , del transformador 100:

$$S_{p\acute{e}rdida} = S_{entrada} - S_{salida} = V_1 \cdot I_1^* - V_2 \cdot I_2^* \quad (6a).$$

- 20 La expresión (6a) representa una expresión basada en las mediciones de la pérdida de potencia. Mediante la medición de las señales CA I_1 , I_2 , V_1 y V_2 , un valor de medición de $S_{p\acute{e}rdida}$ se puede determinar, $S_{p\acute{e}rdida \text{ medida}}$.

Por otra parte, suponiendo que se aplica el modelo de transformador de primer orden, la pérdida de potencia se puede expresar en lo que se refiere a la corriente de carga, I_2 , de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} S_{i \text{ p\acute{e}rdida}} &= (V_1 - Z_1 I_1) I_0^* + Z_1 I_1 I_1^* + Z_{12} \frac{I_2 I_2^*}{n^2} = V_1 I_0^* - Z_1 \left(\frac{I_2}{n} + I_0 \right) I_0^* + Z_1 \left(\frac{I_2}{n} + I_0 \right) \left(\frac{I_2}{n} + I_0 \right)^* + Z_{12} \frac{I_2 I_2^*}{n^2} = \\ &= V_1 I_0^* + Z_1 \left(\frac{I_2}{n} + I_0 \right) \frac{I_2^*}{n} + Z_{12} \frac{I_2 I_2^*}{n^2} = V_1 I_0^* + Z_1 \frac{I_0 I_2^*}{n} + Z_w \frac{I_2 I_2^*}{n^2} = \\ &= a + b I_2^* + c |I_2|^2 \end{aligned} \quad (6b),$$

- 25 donde Z_1 es la impedancia del devanado de fuente 105 y Z_{12} es la impedancia del devanado de carga 110 reflejada hacia el lado de fuente.

- 30 A partir de un conjunto de mediciones de señales CA I_1 , I_2 , V_1 y V_2 , realizadas a diferentes cargas, los coeficientes a , b y c de la expresión (6b) se pueden determinar, por ejemplo, mediante un ajuste de mínimos cuadrados. Mediante el uso de la relación determinada $S_{p\acute{e}rdida}(I_2)$, la pérdida de potencia se puede controlar en mediciones de control en línea con el fin de detectar una desviación del valor esperado obtenido a partir de la expresión (6b), utilizando los coeficientes derivados. Una desviación de la pérdida de potencia medida a partir de la relación esperada proporcionada por la expresión (6b), por ejemplo, podría ser utilizada como un activador para un análisis adicional de los valores medidos, por ejemplo un análisis utilizando la expresión (4b) y/o (5a). Además, los coeficientes de la expresión (6b) podrían ser utilizados para obtener información sobre el valor de las propiedades de transformador I_0 , n , Z_w y Z_1 . En combinación con la información obtenida a partir de estudios bien de otras cantidades T , tales como ΔV o I_2 , o bien de otras fuentes de información (por ejemplo, suponiendo que se aplica la relación de vueltas que figura en la placa de datos), se podría obtener un valor de estas propiedades de transformador a partir de coeficientes determinados a , b y c . Por otra parte, el término constante en la expresión (6b), denominado a , proporciona un valor de la pérdida sin carga a la tensión nominal cuando V_1 es igual a la tensión nominal.

Aun suponiendo que se aplica el modelo de transformador de primer orden, la pérdida de potencia, $S_{p\acute{e}rdida}$, puede ser dividida en una contribución de magnetización y de otras pérdidas por dispersión, $S_{p\acute{e}rdida\ de\ magnetizaci\acute{o}n}$, y una contribución de pérdida de devanado, $S_{p\acute{e}rdida\ de\ devanado}$.

$$S_{p\acute{e}rdida} = V_1 \cdot I_1^* - V_2 \cdot I_2^* = V_1 \cdot I_1^* - n \cdot V_2 \cdot \frac{I_2^*}{n} = V_1 \cdot I_1^* - V_{12} \cdot I_{12}^* =$$

$$V_1 \cdot I_1^* - (V_1 - \Delta V) \cdot I_{12}^* = V_1 \cdot (I_1^* - I_{12}^*) + \Delta V \cdot I_{12}^* \approx V_1 \cdot I_0^* + \Delta V \cdot I_{12}^* \quad (6c)$$

$$V_1 \cdot I_0^* + \Delta V \cdot \frac{I_2^*}{n} = S_{p\acute{e}rdida\ de\ magnetizaci\acute{o}n} + S_{p\acute{e}rdida\ de\ devanado}$$

5

Mediante la separación de la pérdida de potencia $S_{p\acute{e}rdida}$ en una contribución de magnetización, $S_{p\acute{e}rdida\ de\ magnetizaci\acute{o}n}$, y una contribución de pérdida de devanado, $S_{p\acute{e}rdida\ de\ devanado}$, como en la expresión (6c), se puede obtener más información referente a la fuente de cualquier pérdida de potencia inesperada. Las contribuciones de pérdida de potencia se pueden determinar a partir de valores de la corriente de magnetización I_0 y de la relación de vueltas n determinada de acuerdo con lo anterior.

10

La información referente a si una o ambas de las contribuciones de pérdida de potencia aumentan de una manera inesperada, se puede utilizar para identificar si se ha producido un problema en el núcleo 113 y/o en los devanados 105/110. Por otra parte, si hay un aumento inesperado de pérdida de potencia, sin un aumento de cualquiera de la contribución de magnetización y la contribución de pérdida de devanado, se puede deducir que el aumento es causado por otra fuente de pérdida de potencia.

15

El análisis de una cantidad T puede dar información sobre más de una propiedad de transformador, dependiendo de qué propiedades de transformador influyen en la cantidad como una función de carga. Por ejemplo, el análisis de la dependencia lineal $I_1(I_2)$ puede proporcionar información sobre la relación de vueltas n (pendiente) y la corriente de magnetización I_0 (intersección). Por otra parte, se puede realizar un análisis de más de una cantidad T , obtenidas a partir del mismo conjunto de datos, con el fin de obtener información sobre más de una propiedad de transformador. Por ejemplo, las mediciones I y V a diferentes cargas se pueden utilizar para obtener información sobre cualquier combinación de las cantidades $S_{p\acute{e}rdida}(I_2)$, $I_1(I_2)$ y $\Delta V(I_2)$.

20

Como ya se ha mencionado anteriormente, las mediciones de señales CA de terminales podrían utilizarse para controlar una propiedad de transformador en función del tiempo, a fin de detectar cambios en la propiedad de transformador. Los cambios detectados en la impedancia de transformador Z_w normalmente indican que hay un problema de contacto y/o una deformación geométrica/desplazamiento de los devanados. Los problemas de contacto podrían incluir, por ejemplo ramales de devanados rotos, problemas de contacto de terminales, un aumento de la resistencia en puntos de contacto en, por ejemplo, un cambiador de tomas, etc. La deformación/desplazamiento geométrico de los devanados suele alterar la reactancia de devanado X . Las desviaciones en la parte imaginaria de la impedancia de transformador Z_w están normalmente asociadas a problemas relacionados con la geometría de transformador, mientras que las desviaciones en la parte real están normalmente asociadas a problemas de contacto.

25

30

Los cambios detectados en la relación de vueltas n suelen indicar fallos entre vueltas, tales como cortocircuitos entre vueltas.

35

Los cambios detectados en la corriente de magnetización I_0 suelen ser indicativos de un deterioro de núcleo de transformador 113, tal como por ejemplo una puesta a tierra no deseada del núcleo 113, deformación mecánica de laminación y de juntas que forman el núcleo 113, cortocircuitado de paquetes de laminación de núcleo, o corrientes de Foucault significativas en otras partes del transformador, por ejemplo, alrededor de la superficie del núcleo 113, etc.

40

Por lo tanto, mediante el control de una o más propiedades de transformador, se puede obtener información significativa sobre el estado del transformador 100. Los resultados experimentales realizados en las mediciones recogidas de un transformador 100 se muestran en las figuras 3 y 4. Las señales CA que se presentan en las figuras 3 y 4 son magnitudes complejas, y, para simplificar los gráficos, los valores absolutos de las señales CA se muestran en los gráficos.

45

En la figura 3, los resultados experimentales de ΔV se representan como una función de I_2 . El transformador utilizado para este análisis es un transformador trifásico de la clasificación 160 MVA, 220/11 kV y con una relación de vueltas $n = 8,1163 \cdot 10^2$. Los valores representados se refieren a una de las fases. Con el fin de investigar la sensibilidad de la determinación de las propiedades de transformador en el valor supuesto de la relación de vueltas n , el análisis se ha realizado para tres valores diferentes de n : Los resultados que forman la línea media se obtuvieron utilizando la relación

de vueltas de la placa de datos $n_{\text{placa de datos}}$, los resultados que forman la línea inferior se obtuvieron utilizando $n = 0,99 \cdot n_{\text{placa de datos}}$, mientras que $n = 1,01 \cdot n_{\text{placa de datos}}$, fue utilizado para obtener los resultados de la línea superior. Como puede verse en el gráfico de la figura 3, un pequeño error en el valor supuesto de n no influirá significativamente en el valor de la impedancia total deducida Z_{12} . Por ejemplo, en la configuración experimental que se ilustra en el gráfico de la figura 3, un cambio del 1% en n sólo alterará la impedancia total de devanado Z_w deducida de los ajustes lineales en torno al 0,05%. Se puede por tanto concluir que la impedancia de devanado Z_w se puede determinar con gran precisión, incluso aunque el valor supuesto de la relación de vueltas n esté ligeramente en error. Además, como se analizó anteriormente, la relación de vueltas n puede ser determinada con precisión usando la expresión (5a), y tal valor determinado se puede utilizar en un análisis ΔV del transformador. La influencia de un valor incorrecto de n será típicamente más perceptible en la caída de tensión sin carga, y por tanto, con el fin de obtener un resultado preciso de un análisis de los componentes del término de caída de tensión sin carga, puede resultar útil una relación determinada de vueltas mediante el uso de la expresión (5a).

En la figura 4, los resultados experimentales de I_1 se representan como una función de I_2 para el mismo transformador (y la misma fase) al igual que los resultados que se muestran en la figura 3. Una línea que corresponde a la expresión lineal (5a) también está incluida en el gráfico. Un valor de la corriente de magnetización I_0 se puede obtener a partir del gráfico de la figura 4, como la intersección del ajuste lineal con el eje I_1 a carga cero. Este valor se corresponderá con la corriente de magnetización I_0 a carga elevada (por lo general, la corriente de magnetización a carga baja se desvía ligeramente de este valor, ya que la magnetización del núcleo 113 muestra un comportamiento no lineal, y también hay un ligero aumento de la tensión de alimentación a carga muy ligera). Por lo tanto, con el fin de reducir la influencia de la variación de I_0 con carga, se podrían incluir ventajosamente sólo mediciones en las que $I_1 \approx 10I_0$ cuando se realiza un análisis de la relación $I_1(I_2)$, así como para el análisis ΔV descrito en relación a la expresión (4b) y a la figura 3.

Como I_1 e I_2 son números complejos, un ajuste lineal puede dar como resultado un valor de n que tiene una pequeña parte imaginaria. Dado que la relación de vueltas debe ser un número real, la magnitud de la parte imaginaria obtenida a partir del ajuste lineal refleja la precisión del ajuste. Una pequeña parte imaginaria generalmente se puede ignorar, mientras que una parte imaginaria más significativa indica que la precisión del ajuste es insuficiente. Por lo tanto, una comprobación de la magnitud de la parte imaginaria de n , podría servir como una prueba sólida del análisis de n , así como de I_0 y Z_w . Las mediciones de carga baja, para las que I_0 se desvía significativamente del valor de carga elevada, influirán en el valor derivado de n con el fin de aumentar la parte imaginaria. Por lo tanto, el ajuste lineal se podría hacer de manera ventajosa utilizando los valores de carga elevada.

La corriente de magnetización I_0 normalmente varía con la tensión de fuente V_1 . Por lo tanto, las mediciones utilizadas para obtener una relación entre una cantidad T y la carga de transformador I_2 deben llevarse a cabo preferiblemente con tensiones de fuente similares V_1 . Por otra parte, en caso de que se utilice el análisis en una situación de control en línea, la tensión de fuente V con la que se realiza el control del transformador, preferiblemente debe ser similar al nivel de tensión en el que se estableció la relación. Las mediciones en las que la tensión de fuente V_1 se desvía significativamente de la tensión nominal podrían por tanto ser excluidas del análisis.

En la figura 5, se muestra un organigrama que ilustra esquemáticamente una realización de un método inventivo en el que un análisis como el descrito anteriormente se utiliza en el diagnóstico del estado de un transformador 100. En el paso 500, las mediciones de la corriente de carga, así como de al menos otra señal CA, se realizan a diferentes cargas. En el paso 503, los valores medidos de T se derivan a las diferentes cargas, utilizando una expresión adecuada basada en medidas (véanse las expresiones (4a), (5b) y (6a)). En el paso 505, un conjunto de al menos un coeficiente o varios coeficientes de una relación $T(I_2)$ se determina mediante el ajuste de los valores de T a la relación $T(I_2)$ aplicable (véanse las expresiones (4b), (5a) y (6b)). Los pasos 500, 503 y 505 pueden denominarse fase de aprendizaje del diagnóstico.

En el paso 510 de la figura 5, los coeficientes determinados en el paso 505 se utilizan para analizar el estado del transformador 100.

En la figura 6a, una realización del paso 510 del método de la figura 5 se muestra como un paso 600. En el paso 600, los coeficientes obtenidos en el paso 505 se utilizan para obtener el valor de una o más propiedades de transformador. En algunos casos, un coeficiente en sí mismo representa el valor de un parámetro de transformador, en cuyo caso el paso 600 es muy simple. En la tabla 1, se proporciona una visión general de ejemplos de diferentes cantidades T que pueden ser usadas para determinar o controlar las propiedades de transformador mediante el uso de diferentes realizaciones de la invención. También se ofrecen ejemplos de propiedades de transformador que se pueden obtener mediante el análisis de diferentes relaciones $T(I_2)$. También se muestran señales CA que se utilizan para obtener un valor de T , incluyendo la señal CA que se utiliza para determinar la carga. La carga se obtiene típicamente a partir de mediciones de I_2 .

Tabla 1. Ejemplos de cantidades T , que se pueden usar para determinar o controlar propiedades de transformador mediante el uso de diferentes realizaciones de la invención.

| Cantidad T | Relación T(I ₂) | Propiedades de transformador | Señales CA |
|----------------------|---|---|--|
| ΔV | $\Delta V = Z_1 I_0 + \frac{Z_w}{n} I_2$ | Z _w Z ₁ | I ₂ V ₁ & V ₂ |
| I ₁ | $I_1 = \frac{1}{n} I_2 + I_0$ | I ₀ a carga elevada n | I ₂ & I ₁ |
| S _{pérdida} | $s_{pérdida} = V_1 I_0^* + Z_1 \frac{I_0 I_2^*}{n} + Z_w \frac{I_2 I_2^*}{n^2}$ | S _i pérdida de devanado S _i pérdida de magnetización | I ₁ & I ₂ V ₁ & V ₂ |

En la figura 6b se muestra un organigrama que ilustra esquemáticamente otro ejemplo de cómo se pueden utilizar los coeficientes, determinados en el paso 505, en el análisis del estado de un transformador 100. El organigrama de la figura 6b ilustra un ejemplo de un proceso de control en línea de acuerdo con la invención. En el paso 605, se determina una desviación máxima aceptable, DEV_{máx}, que representa la desviación máxima aceptable de un valor medido de T a partir de un valor de T derivado del uso de una relación T (I₂) esperada. Esto se hace típicamente mediante el análisis de los resultados de medición obtenidos en el paso 500. En una aplicación, DEV_{máx} se determina como un número determinado b de desviaciones estándar σ, DEV_{máx} = bσ. Están contempladas otras formas de determinar DEV_{máx}, tal como por ejemplo como la desviación máxima de un conjunto certificado de mediciones, o como un valor fijo. En una aplicación donde DEV_{máx} se basa en la desviación estándar, se puede determinar un valor específico de carga de σ para cada carga en la que se han hecho las mediciones. Otros valores de σ podrían ser extrapolados a continuación para cargas en las que no hay mediciones disponibles, si es necesario. Alternativamente, una estimación general de σ

podría obtenerse a partir de la distribución de $\frac{T_{ajustado} - T_{medido}}{T_{ajustado}}$, donde T_{medido} es un valor medido de T a una carga particular, mientras que T_{ajustado} es el valor de T que se espera a partir de la relación obtenida en el paso 505 a la carga particular. En una aplicación, se utiliza una combinación de una estimación general de σ y valores específicos de carga de σ, de modo que la estimación general de σ se utiliza cuando no hay un valor específico de carga de σ obtenido a partir de mediciones a la carga particular, por lo tanto se beneficia de la distribución específica de la carga más reducida cuando existen mediciones disponibles a la carga particular, durante el uso de una estimación general de DEV_{máx} a otras cargas.

En el paso 610 de la figura 6b, se realiza una medición de control de la carga, así como de otra señal o señales CA requeridas con el fin de obtener un valor de T, (véase la tabla 1). Un valor de T, denominado T_{control}, se determina entonces a partir de la medición de control. En el paso 615, se determina la desviación de T_{control} a partir del valor esperado T_{ajustado} con la carga presente. Esta desviación es en una aplicación definida como $\frac{T_{ajustado} - T_{control}}{T_{ajustado}}$. Por otra parte, en el paso 615, se determina si la desviación de T_{control} a partir de T_{ajustado} sobrepasa la desviación máxima aceptable, DEV_{máx}.

Si la presente desviación de T_{control} a partir de T_{ajustado} es menor que DEV_{máx}, se realiza otra medición de control volviendo a introducir el paso 610. Como se muestra en la figura 6b, la reintroducción del paso 610 podría estar precedida por una redeterminación de DEV_{máx} (véase ruta b de la figura 6b), o el paso 610 se podría introducir utilizando el valor anterior de DEV_{máx} (véase ruta a). Si se toman varias mediciones de control a una carga similar, se podría obtener una nueva definición de la desviación máxima aceptable mediante la inclusión de la medición o mediciones de control obtenidas en el paso 610 en la distribución T en la que se basa el valor de DEV_{máx}. Una nueva determinación de DEV_{máx} podría también ser útil, por ejemplo, si se ha introducido un nuevo rango de carga, para el que el control no ha sido previamente realizado.

Si se comprueba en el paso 615 que la presente desviación de T_{control} a partir de T_{ajustado} sobrepasa DEV_{máx}, entonces se introduce el paso 620. En el paso 620, se toman las medidas adecuadas. En una aplicación, la acción realizada en el paso 620 es para determinar el valor presente de una propiedad de transformador que se puede obtener a partir de la cantidad T (véase la tabla 1). Otro análisis del estado del transformador 100 también podría ser activado al entrar en el paso 620, con el fin de determinar la causa de dicha desviación. Tal análisis o diagnóstico adicional del transformador, podría incluir, por ejemplo, la comprobación de la temperatura, del nivel de gas, un análisis basado en otra cantidad T (I₂), etc. En una aplicación, la entrada en el paso 620 activará mediciones de control más frecuentes, con el fin de permitir un estrecho control de la evolución del estado del transformador. En una aplicación, la entrada en el paso 620 activará la emisión de una alarma, indicando la alarma a un operario del transformador 100 que se desea otra investigación del estado del transformador 100. Esta alarma puede ser por ejemplo una indicación luminosa, una

indicación auditiva, la transmisión de un mensaje de correo electrónico o de un SMS a una dirección de correo electrónico predeterminada o a un número de teléfono móvil, o cualquier alarma adecuada, o una combinación de las mismas. Otra acción posible que puede llevarse a cabo en el paso 620 es realizar una desconexión prevista del transformador 100 con el fin de realizar investigaciones fuera de línea en base a una técnica de análisis diferente.

5 El valor de $DEV_{m\acute{a}x}$ normalmente dependerá de qué acciones van a realizarse en el paso 620 si se detecta una desviación del valor esperado de T. Si la acción que se ha de realizar es planear una desconexión del transformador 100, el valor deseado de $DEV_{m\acute{a}x}$ será normalmente mayor que si la acción en el paso 620 consiste en realizar un nuevo análisis de los datos medidos, o en incrementar la tasa de medición de control. Los valores adecuados de $DEV_{m\acute{a}x}$ podrían, por ejemplo, encontrarse dentro de la gama de entre 6σ y 8σ para la activación de una desconexión prevista
10 del transformador 100; dentro de la gama de entre 4σ y 6σ para emitir una alarma, y dentro de la gama de entre 2σ y 4σ para aumentar la tasa de medición de control y realizar otro análisis. Un conjunto de dos o más valores de $DEV_{m\acute{a}x}$ podría ser definido para el mismo proceso de control, si se desea, de modo que se active una primera acción cuando la desviación sobrepase un primer $DEV_{m\acute{a}x}$, una segunda acción cuando se desviase de un segundo $DEV_{m\acute{a}x}$, etc.

15 El método de la figura 6b podría incluir un paso 600 en el que se determine un valor de la propiedad de transformador a partir de la relación T (I_2) proporcionada por los coeficientes determinados en el pasof. Por lo tanto, la determinación y los organigramas de control mostrados en las figuras 6a y 6b podrían combinarse. Por ejemplo, el paso 615, en lugar de la comprobación de la cantidad T, podría incluir una comprobación de si el valor de una propiedad de transformador, derivado de la cantidad T, se desvía del valor de la propiedad obtenida a partir de los coeficientes determinados en el paso 505. Tal determinación del valor presente de una propiedad de transformador incluiría recoger mediciones a
20 diferentes cargas, y realizar un nuevo ajuste de los valores medidos con respecto a la relación T (I_2) aplicable.

Las corrientes y tensiones V_1 , V_2 , I_1 , e I_2 , tal como se han utilizado anteriormente, representan los componentes de frecuencia fundamental a 50/60 Hz de las corrientes y tensiones, respectivamente. Estas corrientes y tensiones son cantidades complejas y pueden por ejemplo expresarse como fasores. El fasor de una corriente/tensión puede por ejemplo determinarse mediante la aplicación de una Transformada Rápida de Fourier en una medición continua de la
25 tensión/corriente en un par de terminales pertinentes 115, 120, o mediante la aplicación de una Transformada Discreta de Fourier para un conjunto de muestras de la tensión/corriente pertinente, donde la tasa de muestreo podría ser, por ejemplo 1000 Hz. Con el fin de mejorar la precisión del valor de fasor, se podría determinar un promedio de varios fasores, por ejemplo, como un promedio móvil. En una situación de control, en general no hay presión de tiempo, y se podría utilizar el tiempo suficiente en la recogida de los resultados de las mediciones, si se desea. Se pueden utilizar otros modos de obtener los valores de fasor a partir de las mediciones.

30 La frecuencia fundamental de un sistema de transmisión de potencia puede, de vez en cuando, desviarse de la frecuencia nominal de 50/60 Hz. Por ejemplo, en Europa, una desviación de $\pm 0,2\%$ es generalmente tolerada. Las variaciones de frecuencia pueden influir en el valor del fasor medido, de modo que la exactitud de la determinación de las propiedades de transformador se reduce si las mediciones se toman a diferentes frecuencias. Con el fin de mejorar la exactitud de las propiedades de transformador determinadas, se podría controlar la frecuencia de transmisión de
35 potencia, y las mediciones que se realizaron en la frecuencia particular (por ejemplo, 50/60 Hz), o en una cierta gama de frecuencias (por ejemplo, 50/60 Hz. $\pm 0,1\%$), podrían seleccionarse para la determinación de las cantidades de transformador.

40 Las figuras 7a a 7c ilustran esquemáticamente una realización de un aparato de diagnóstico de transformador 700. En la figura 7a, el aparato de diagnóstico de transformador 700 comprende una entrada 702, una salida 704, un generador de coeficientes 706, un generador de valores de propiedad de transformador 708 y un controlador de estado 710. La entrada 702 está dispuesta para recibir una señal I_2 indicativa de la corriente de carga, así como al menos otra señal CA I_1 , V_1 y/o V_2 . La entrada 702 está conectada a un equipo de medición (no mostrado), tal como los transformadores de potencia y tensión, dispuesto para medir señales CA en la fuente y los terminales de devanado de carga 115/120 de un transformador 100. La entrada 702 está conectada a una entrada del generador de coeficientes 706. El generador de coeficientes 706 está dispuesto para generar, a partir de señales de entrada recibidas en la entrada 702, coeficientes C de una relación T (I_2) (véanse las expresiones ((4b), (5a) y (6b)). Una salida de generador de coeficientes 706 está, en la realización del aparato de diagnóstico 700 mostrado en la figura 7a, conectada a un generador de valores de propiedad de transformador 708, así como a un controlador de estado 710. El generador de valores de propiedad de transformador 708 está configurado para generar, a partir de coeficientes C recibidos del generador de coeficientes 706, un valor de al menos una propiedad de transformador P (donde P puede ser por ejemplo la relación de vueltas n, la impedancia de cortocircuito Z_w o la corriente de magnetización a carga elevada I_0). El generador de valores de propiedad de transformador 708 tiene una memoria para almacenar el formato de una o más relaciones T (I_2) (véanse las expresiones (4b), (5a) y (6b)), a partir del cual se puede determinar un valor de una propiedad de transformador una
45 vez que se conocen los coeficientes, tal como se ha descrito anteriormente.

55 La entrada de un controlador de estado 710 está conectada además a la entrada 702 y dispuesta para recibir señales indicativas de carga medida y otra señal o señales CA. En una realización, analizada en relación a la figura 7c, el

controlador de estado 710 está dispuesto además para recibir un conjunto $\{T, I_2\}$ de mediciones de T a cargas correspondientes I_2 desde el generador de coeficientes 706, como se indica con la línea discontinua. El controlador de estado 710 está configurado para controlar el estado del transformador 100, y para generar una señal de acción A si se detecta cualquier desviación significativa con respecto al comportamiento esperado. Las salidas del generador de valores de propiedad de transformador 708 y del controlador de estado 710 están conectadas a la salida 704 del aparato de diagnóstico de transformador 700. La salida 704 está dispuesta para distribuir una señal de resultado de diagnóstico, de la cual A y P forman ejemplos.

El generador de valores de transformador 708 y el controlador de estado 710 forman dos ejemplos diferentes de mecanismos de diagnóstico de transformador que utilizan un conjunto de coeficientes generados por el generador de coeficientes 706 para generar un resultado de diagnóstico. También están previstas otras realizaciones del aparato de diagnóstico 700, en las que está presente sólo uno del generador de valores de propiedad de transformador 708 y el controlador de estado 710.

En la figura 7b, se muestra con más detalle una realización de un generador de coeficientes 706. El generador de coeficientes 706 de la figura 7b comprende una entrada 712, una salida 714, un generador de T 716 dispuesto para determinar un valor de medida (T_{medido}) de una propiedad de T; un buffer de T 718 y un generador de ajustes de T (I_2) 720. El generador de T 716 está dispuesto para recibir la señal de carga I_2 , así como una selección adecuada de la otra señal o señales CA I_1, V_1 y/o V_2 , dependiendo de qué cantidad T está dispuesto a generar el generador de T 716. A partir de estas señales recibidas, el generador de T 716 está configurado para generar un valor medido de una propiedad de T, mediante el uso de una expresión adecuada (véanse las expresiones (4a), (5b) y (6a)), y para transmitir el valor junto con un valor de la carga I_2 con la que se obtuvo el valor de T. La salida del generador de T 716 está conectada a la entrada del buffer de T 718, que está dispuesta para almacenar un conjunto de diferentes valores de T recibidos del generador de T 716 junto con una indicación de la carga de I_2 con la que se obtuvo el valor de T. La salida del buffer de T 718 está conectada a la entrada del generador de T (I_2) 720, y dispuesta para suministrar una señal indicativa de un conjunto $\{T, I_2\}$ de valores de T, por ejemplo al solicitarlo el generador de ajustes de T (I_2), al solicitarse manualmente, o cuando se ha recibido un determinado número de valores de T. El generador de T (I_2) 720 está configurado para ajustar el conjunto recibido de valores $\{T, I_2\}$ a la relación adecuada T (I_2) (véase el paso 505 de la figura 5), por ejemplo mediante un ajuste de mínimos cuadrados como es bien conocido en el estado de la técnica. El generador de T (I_2) 720 está configurado además para enviar, a la salida 714, una señal C indicativa de los coeficientes resultantes de la operación de ajuste realizada. En una realización del generador de coeficientes 706, la salida 714 está además conectada a una salida del buffer de T 718, de modo que se puede generar una señal $\{T, I_2\}$ en la salida 714.

En la figura 7c, se muestra con más detalle una realización de un controlador de estado 710. El controlador de estado 710 comprende una entrada 722, una salida 724, una memoria de coeficientes 725, un generador de T_{ajustado} 726, un generador de T_{control} 728, un generador de $DEV_{\text{máx}}$ 730 y un comparador 732. El controlador de estado 710 comprende además al menos un mecanismo de acción, del cual se muestran como ejemplos otro activador de análisis 734, un generador de alarma 736 y un activador de salida prevista 738. La entrada 722 del controlador de estado 710 de la figura 7c está dispuesta para recibir una señal C indicativa de un conjunto de coeficientes de una relación (T I_2), una señal I_2 indicativa de una carga de transformador de corriente, al menos otra señal CA de corriente I_1, V_1 y/o V_2 , y un conjunto de valores $\{T, I_2\}$, que por lo general se han recogido durante un proceso de aprendizaje. La memoria de coeficientes 725 está conectada a la entrada 722 y dispuesta para recibir una señal C, y para almacenar los coeficientes para un uso futuro. La memoria de coeficientes 725 podría, en una aplicación, estar dispuesta para almacenar más de un conjunto de coeficientes C, que representan diferentes ajustes de la relación T (I_2) llevada a cabo en diferentes conjuntos de datos $\{T, I_2\}$. Una salida de la memoria de coeficientes está conectada al generador de T_{ajustado} 726. En una aplicación, la memoria de coeficientes 725 está dispuesta para suministrar una señal indicativa de los coeficientes C al solicitarlo el generador de T_{ajustado} . El generador de T_{ajustado} 726 está además conectado a la entrada 722 y dispuesto para recibir una señal I_2 indicativa de la carga de transformador de corriente. El generador de T_{ajustado} 726 está configurado para derivar, a partir de una señal I_2 recibida y una relación T (I_2) adecuada, utilizando coeficientes C recibidos de la memoria de coeficientes 725, un valor ajustado de T, T_{ajustado} , a la carga presente. Ejemplos de relaciones T (I_2) se dan en las expresiones (4b), (5a) y (6b). El generador de T_{ajustado} 726 está dispuesto además para suministrar una señal T_{ajustado} , indicativa de un valor derivado, a una salida.

Por otra parte, el generador de T_{control} 728 está configurado para derivar un valor de T a partir de una expresión basada en una medición adecuada correspondiente, cuyos ejemplos se dan en las expresiones (4a), (5b) y (6a). El generador de T_{control} 728 está conectado a la entrada 722 y dispuesto para recibir una selección adecuada de las señales CA I_1, I_2, V_1 y V_2 , dependiendo de la selección de la cantidad T que se va a determinar. El generador de T_{control} 728 está además dispuesto para suministrar una señal T_{control} , indicativa de un valor derivado, a una salida. El generador de T_{control} 728 normalmente funciona de la misma manera que el generador de T 716, y podría, de hecho, aplicarse con el mismo hardware/software.

El comparador 732 está conectado a las salidas del generador de T_{ajustado} 726 y del generador de T_{control} 728. El comparador 732 está configurado para determinar si la desviación de un valor de T_{control} a partir del valor de T_{ajustado}

correspondiente sobrepasa una desviación máxima aceptable $DEV_{m\acute{a}x}$. El comparador 732 está dispuesto para suministrar una señal de activación TR, al determinar que la desviación de un valor de $T_{control}$ recibido de un valor de $T_{ajustado}$ correspondiente sobrepasa $DEV_{m\acute{a}x}$.

5 $DEV_{m\acute{a}x}$ podría por ejemplo ser un valor fijo o, como en la realización de la figura 7c, podría determinarse a partir del conjunto de datos $\{T, I_2\}$ utilizados para determinar los coeficientes \bar{C} . El generador de $DEV_{m\acute{a}x}$ 730 de la figura 7c está dispuesto para recibir un conjunto de datos $\{T, I_2\}$, y configurado para derivar un valor de $DEV_{m\acute{a}x}$ del conjunto, por ejemplo, usando un método descrito en relación al paso 605 de la figura 6b. El generador de $DEV_{m\acute{a}x}$ 730 de la figura 7c incluye una memoria para almacenar un valor derivado de $DEV_{m\acute{a}x}$, y está dispuesto para suministrar un valor de $DEV_{m\acute{a}x}$ a una salida conectada al comparador 732. En las aplicaciones en las que $DEV_{m\acute{a}x}$ adquiere un valor fijo, el generador de $DEV_{m\acute{a}x}$ 730 podría reducirse a una memoria.

10 Un controlador de estado 710 incluye además al menos un mecanismo de acción conectado a la salida del comparador 732 y configurado para generar una señal de acción A_i siempre que el comparador 732 haya detectado una desviación. El controlador de estado 710 de la figura 7c incluye los siguientes mecanismos de acción: otro activador de análisis 734, un activador de alarma 736 y un activador de salida prevista 738. Los diferentes mecanismos de acción de un controlador de estado 710 podrían utilizarse en diferentes situaciones, por ejemplo, el otro activador de análisis 734 podría utilizarse siempre que se detecte una primera desviación, un generador de alarma 736 podría entonces utilizarse siempre que el otro análisis indique que se necesita la atención de un operario, un activador de salida prevista 738 podría utilizarse siempre que la desviación sea de una determinada magnitud, etc.

20 El aparato de diagnóstico de transformador 700 se ha descrito anteriormente en lo que se refiere a una sola cantidad T utilizada en el análisis del estado del transformador. Sin embargo, un aparato de diagnóstico de transformador 700 podría estar configurado para utilizar dos o más cantidades T diferentes en el diagnóstico. Dos o más cantidades T podrían por ejemplo ser controladas en paralelo, o una desviación en una primera cantidad T podría activar el análisis de otra cantidad, etc.

25 Los componentes del aparato de diagnóstico de transformador 700 descritos en relación a las figuras 7a a 7c podrían aplicarse mediante el uso de una combinación adecuada de hardware y software. En la figura 8 se muestra una forma alternativa de ilustrar esquemáticamente un aparato de diagnóstico 700. La figura 8 muestra un aparato de diagnóstico 700 que comprende un procesador 800 conectado a una memoria 805, así como a una entrada 702 y a una salida 704. La memoria 805 comprende un medio legible por ordenador que almacena un programa o varios programas informáticos 810, que cuando son ejecutados por el medio de procesamiento 800 hacen que el aparato de diagnóstico 700 lleve a cabo el método ilustrado en la figura 5 (o una realización del mismo). Es decir, el aparato de diagnóstico 700 y sus mecanismos 706, 708 y 710 son aplicados en esta realización con la ayuda de módulos de programa correspondientes del programa informático 810.

30 El procesador 800, en una aplicación, podría ser uno o más procesadores físicos. El procesador podría ser una única CPU (unidad central de procesamiento), o podría comprender dos o más unidades de procesamiento. Por ejemplo, el procesador puede incluir microprocesadores de uso general, procesadores de conjuntos de instrucciones y/o de conjuntos de chips correspondientes y/o microprocesadores de uso especial tales como ASIC (Circuito Integrado Específico de Aplicación). El procesador también puede comprender memoria interna con fines de almacenamiento en caché. La memoria 805 comprende un medio legible por ordenador en el que se almacenan los módulos de programa informático, así como los datos correspondientes. La memoria 805 puede ser de cualquier tipo de memorias no volátiles legibles por ordenador, tales como un disco duro, una memoria flash, un CD, un DVD, un EEPROM, etc, o una combinación de diferentes memorias legibles por ordenador. Los módulos de programa informático descritos anteriormente en realizaciones alternativas podrían ser distribuidos en diferentes productos de programa informático en forma de memorias dentro de un aparato de diagnóstico 700.

35 Muchas instalaciones de transformador están provistas de un sistema de protección dispuesto para medir las tensiones y corrientes de terminales con el fin de permitir una desconexión rápida del transformador, siempre que se produzca cualquier problema que sea detectable por el sistema de protección. Generalmente, tal sistema de protección está dispuesto para afectar únicamente a los valores instantáneos, y no realiza ningún control de las corrientes y tensiones en el transformador. Sin embargo, si se deseara, podrían también utilizarse los mismos sensores de medición de corriente y tensión que se utilizan para el sistema de protección, para propósitos de control con la tecnología descrita en este documento. Por lo tanto, las mediciones a utilizar en la determinación de las propiedades de transformador y/o en el control de las propiedades de transformador, generalmente podrían obtenerse sin la necesidad de grandes inversiones en hardware. Equipos de medición de corriente adecuados podrían ser, por ejemplo transformadores de potencia. Equipos de medición de tensión adecuados podrían ser, por ejemplo transformadores de tensión. En la aplicación de control, se pueden controlar desviaciones en cantidades, en lugar de valores reales de las cantidades, y por tanto, los requisitos de precisión de los equipos de medición son menores que en un método de control en el que se requiere el valor real de una propiedad de transformador. Si los mismos equipos de medición se utilizan tanto para

establecer la relación o relaciones T (I_2) como para mediciones de control, cualquier desviación en la salida del equipo puede ignorarse a efectos de control.

5 En un transformador 100 que tiene un cambiador de tomas mediante el cual puede variar la relación de vueltas n, otro análisis de los resultados de medición podría proporcionar, en algunas situaciones, información sobre la localización de un fallo que dé lugar a una desviación del valor esperado de una propiedad de transformador. Un devanado 105/110 provisto de un cambiador de tomas 900 se ilustra esquemáticamente en la figura 9, en la que se ve que el cambiador de tomas 900 tiene seis tomas diferentes 905, cada una provista de un selector de tomas 910 y mediante las cuales se pueden conseguir seis estados diferentes del cambiador de tomas 900, proporcionando cada estado un número determinado de vueltas de devanado. También se proporciona un interruptor de derivador 915, el interruptor de derivador está dispuesto para adoptar una de dos posiciones diferentes, donde en una primera posición, un terminal de devanado 115/120a está conectado a un primer conjunto de los interruptores de selector de tomas 910, y en una segunda posición, el terminal de devanado 115/120a está conectado a un segundo conjunto de los interruptores de selector de derivador 915 está en una posición en la que el interruptor de selector de tomas particular 910 está conectado al terminal de devanado 115/120a, se consigue un estado particular del cambiador de tomas 900.

20 Para una cantidad T, que depende de la relación de vueltas n, los coeficientes para la relación entre la cantidad T y la corriente de carga I_2 dependerán del estado del selector de tomas 900. Por tanto, los coeficientes para una relación entre una o más cantidades T e I_2 podrían ser determinados para más de un (y posiblemente cada) estado del cambiador de tomas 900, dando así diferentes valores esperados de la propiedad o propiedades de transformador para diferentes estados del cambiador de tomas 900. El control de la propiedad o propiedades de transformador mientras que el cambiador de tomas 900 se encuentra en diferentes estados, puede ofrecer así información sobre la localización de un fallo que dé lugar a desviaciones en una propiedad de transformador, dependiendo de la localización de los fallos en relación a la localización de las diferentes tomas 905. Por ejemplo, si aumenta la resistencia de uno de los interruptores de selector de tomas 910, por ejemplo, debido a coquización o a otros contaminantes, el valor de la caída de tensión ΔV obtenido a partir de la relación (4a) sólo se desvía del valor esperado cuando el cambiador de tomas está en la posición correspondiente. Del mismo modo, si se ha producido un fallo entre vueltas en una parte de un devanado 105, 110 que se puede desconectar mediante el cambiador de tomas 900, el valor de la relación de vueltas obtenido a partir de la relación (5a) sólo se desviará del valor esperado cuando el cambiador de tomas 900 se encuentre en un estado en el que la parte en la que se ha producido el fallo esté conectada entre los terminales de devanado 115/120a y 115/120b.

30 En lo anterior, se han desarrollado varias realizaciones de la presente invención mediante el uso del circuito equivalente de un transformador no ideal 100 mostrado en la figura 2b, en el que las impedancias, tensiones y corrientes del lado de carga se han reflejado hacia el lado de fuente. El modelo equivalente de un transformador no ideal 100 mostrado en la figura 2c, en el que la impedancia del lado de fuente, la corriente y las tensiones se reflejan hacia el lado de carga, podría utilizarse de forma alternativa en estas realizaciones de la técnica de diagnóstico de transformador descrita anteriormente. Cuando se utiliza el modelo equivalente de la figura 2c, las expresiones (5a) y (5b), así como las expresiones (6a) a (6c), permanecerán sin alteraciones. Sin embargo, en lugar de utilizar las expresiones (4a) y (4b), se podrían utilizar de manera ventajosa las siguientes expresiones:

$$\Delta V' = \frac{V_1}{n} - V_2 \quad (4a')$$

$$\Delta V' = \frac{1}{n} \left[Z_1 I_0 + \frac{Z_w}{n} I_2 \right] = \frac{1}{n} \Delta V \quad (4b')$$

40 Además, la descripción anterior se ha hecho en lo que se refiere a un transformador 100 que tiene dos devanados. En algunas aplicaciones, se puede utilizar un transformador 100 que tiene tres o más devanados. Cualquier devanado o devanados presentes, además de los devanados de fuente y los devanados de carga descritos anteriormente, en lo sucesivo se van a denominar devanado o devanados adicionales. El devanado o devanados adicionales podrían ser un devanado o devanados de fuente y/o un devanado o devanados de carga. A menudo, la potencia en cualquier otro devanado o devanados es insignificante o aproximadamente constante, y no tiene que ser tenida en cuenta para fines de determinación/control de las propiedades de transformador, el error causado por tales corrientes es normalmente insignificante y/o constante. Sin embargo, incluso aunque la disipación de potencia en uno o más devanados adicionales sea significativa, la determinación/control inventivo descrito anteriormente todavía se podría hacer. Dependiendo de la configuración del devanado o devanados adicionales, las expresiones (4a) a (6c) se pueden adaptar en

correspondencia. Como ejemplo, para un transformador con dos devanados de carga y un devanado de fuente, la expresión (5a), puede ser adaptada con éxito a:

$$I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2 + \frac{n_3}{n_1} I_3 + I_0 \quad (5a^*)$$

5 donde el índice 3 indica el devanado adicional. A partir de la expresión (5a*), la corriente de magnetización I_0 y la relación de vueltas n_2/n_1 y n_3/n_1 se pueden encontrar con un ajuste bidimensional, por ejemplo, utilizando variaciones estocásticas en I_2 e I_3 y al menos tres mediciones.

En la misma configuración, la expresión (4b) se puede adaptar para separarla en una relación para cada devanado de carga, i, como

$$\begin{aligned} \Delta V_{12} &= V_1 - \frac{n_1}{n_2} V_2 = Z_1 I_1 + Z_2 I_{12} = Z_1 I_0 + Z_1 I_{31} + (Z_1 + Z_2) I_{12} \\ &= Z_1 (I_0 + I_{13}) + Z_{w12} I_{12} \end{aligned}$$

$$\Delta V_{13} = V_1 - \frac{n_1}{n_3} V_3 = Z_1 I_1 + Z_3 I_{13} = Z_1 (I_0 + I_{12}) + Z_{w13} I_{13} \quad (4b^*)$$

10 Cuando se conocen las relaciones de vueltas, n_i/n_1 , este conjunto de relaciones determina las impedancias de devanado usando un ajuste bidimensional de las dos corrientes de carga. Por otra parte, en esta configuración, la expresión (6a) es simplemente la diferencia entre la potencia que fluye dentro y fuera del transformador 100:

$$S_{p\acute{e}rdida} = V_1 I_1^* - V_2 I_2^* - V_3 I_3^* \quad (6a^*)$$

15 Una adaptación similar de las expresiones (4b) a (6c) se podría hacer para un transformador 100 con cualquier configuración de devanado. Generalmente, cuando el número total de devanados del transformador es N, las propiedades de transformador se pueden obtener mediante el uso de un ajuste N-1- dimensional de al menos N mediciones.

20 La descripción anterior del método de la invención y de un aparato para el diagnóstico de transformador se ha dado en lo que se refiere a una sola fase. Sin embargo, el método se puede aplicar para el diagnóstico de transformadores con cualquier número de fases, y, en particular, de transformadores trifásicos. El método se puede aplicar a cada una de las fases de transformador por separado, una vez que se han determinado las corrientes individuales a través de los devanados y las tensiones. La configuración de las fases a menudo implica que la corriente/tensiones de terminales no dan directamente las corrientes y tensiones individuales. Una configuración Δ -Y, por ejemplo, da como resultado un desplazamiento de fase de 30 grados entre las corrientes y tensiones de terminales del lado de fuente y de carga, así como una diferencia de magnitud mediante un factor de $\sqrt{3}$ entre la corriente de terminal y la corriente de devanado en el lado Δ y entre la tensión de terminal a terminal y la tensión de devanado en el lado Y. La corriente y las tensiones individuales generalmente se pueden determinar a partir de mediciones de las corrientes y tensiones de terminales, como se describe por ejemplo en el documento US6507184B1.

30 A continuación, para facilitar la descripción, el término "controlar una cantidad" se utiliza para referirse al control de cualquier cantidad, o al control de una propiedad derivada de un valor de la cantidad.

Un experto en la técnica apreciará que la tecnología presentada en este documento no se limita a las realizaciones dadas a conocer en los dibujos adjuntos y a la descripción detallada anterior, que se presentan con fines únicamente ilustrativos, aunque se puede aplicar de varias maneras diferentes, y se define mediante las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Método de diagnóstico de transformador para un transformador (100) que tiene al menos un devanado de carga (105) y un devanado de fuente (110), comprendiendo el método:
- 5 recoger, (500), en un aparato de diagnóstico de transformador (700) que comprende un procesador (800), durante al menos dos cargas de transformador diferentes, mediciones de una corriente que es indicativa de la carga de transformador, y mediciones de al menos una señal adicional CA de transformador;
- derivar (503), en el aparato de diagnóstico de transformador a partir de las mediciones recogidas, al menos dos valores de una cantidad que depende de al menos una propiedad de transformador así como de la carga de transformador;
- 10 determinar (505), en el aparato de diagnóstico de transformador a partir de los valores derivados, un coeficiente o un conjunto de coeficientes de una relación según la cual se espera que varíe dicha cantidad con la carga de transformador; y caracterizado por que
- dicha relación se basa en un modelo de transformador en el que se tienen en cuenta los efectos de corrientes de magnetización en el núcleo de transformador, las inductancias de fuga y las resistencias eficaces de los devanados primario y secundario; y
- 15 comprendiendo el método derivar, en el aparato de diagnóstico de transformador usando al menos uno de dichos coeficientes, el valor de al menos una de las siguientes propiedades de transformador: la impedancia total de devanado, Z_w ; la impedancia de un devanado de fuente, Z_1 ; la impedancia de un devanado de carga, Z_2 ; una relación de vueltas, n , y la corriente de magnetización, I_0 ; en el que
- 20 el valor de una propiedad de transformador está relacionado con al menos un parámetro de dicho modelo de transformador.
2. Método de diagnóstico de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además:
- recoger, en el aparato de diagnóstico de transformador, una medición de control en línea de al menos una señal CA de terminal a una primera carga de control;
- 25 derivar, en el aparato de diagnóstico de transformador, un valor basado en las mediciones de la cantidad a partir de la medición de control;
- determinar, en el aparato de diagnóstico de transformador, un valor esperado de la cantidad en la primera carga de control, utilizando dicha relación y dicho coeficiente o coeficientes;
- comparar, en el aparato de diagnóstico de transformador, el valor basado en las mediciones de la cantidad con el valor esperado con el fin de detectar cualquier problema de transformador al darse un cambio en la cantidad.
- 30 3. Método de acuerdo con la reivindicación 2, que comprende además
- recoger, en el aparato de diagnóstico de transformador, otra medición u otras mediciones de control en línea de por lo menos una señal CA de terminal a al menos otra carga;
- determinar, en el aparato de diagnóstico de transformador a partir de las mediciones de control en línea, otro conjunto de al menos un coeficiente para dicha relación;
- 35 derivar, en el aparato de diagnóstico de transformador a partir del otro coeficiente u otros coeficientes, otro valor de dicha propiedad de transformador; y
- comparar, en el aparato de diagnóstico de transformador, el primer valor y el otro valor de la propiedad de transformador con el fin de detectar cualquier cambio de dicha propiedad.
4. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que
- 40 la relación según la cual la cantidad varía con la carga de transformador es una relación lineal, en la que la pendiente y/o la intersección a carga cero es indicativa de una propiedad.
5. Método de acuerdo con la reivindicación 4, en el que

dicha cantidad es la diferencia (ΔV , $\Delta V'$) entre la tensión a través de los terminales de un primer devanado en un primer lado de transformador y la tensión a través de un segundo devanado en un segundo lado de transformador tal como se refleja hacia el primer lado.

6. Método de acuerdo con la reivindicación 4, en el que la cantidad es la fuente de corriente.

5 7. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que dicha cantidad es la pérdida de potencia en el interior del transformador.

8. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que

10 el paso que consiste en determinar un conjunto de coeficientes de una relación comprende realizar un ajuste N-1 dimensional de al menos N valores derivados de la cantidad, donde N representa el número de devanados del transformador a diagnosticar.

9. Aparato de diagnóstico de transformador que comprende:

una entrada configurada para recibir señales indicativas de mediciones de señales CA de un transformador, incluyendo mediciones indicativas de la corriente de carga de transformador;

una salida configurada para ofrecer un resultado de diagnóstico de transformador;

15 un procesador (800) conectado a la entrada y configurado para:

recoger, durante al menos dos cargas de transformador diferentes, mediciones de una corriente indicativa de la carga de transformador, y mediciones de al menos otra señal CA de transformador;

derivar, a partir de las mediciones recogidas, al menos dos valores de una cantidad que depende de una propiedad de transformador y de la carga de transformador; y

20 determinar, a partir de valores derivados, un coeficiente o conjunto de coeficientes de una relación según la cual se espera que dicha cantidad varíe con la carga de transformador; caracterizado por que

dicha relación se basa en un modelo de transformador, en el que se tienen en cuenta los efectos de corrientes de magnetización en el núcleo de transformador, las inductancias de fuga y las resistencias eficaces de devanados primario y secundario; y por que

25 el procesador está configurado además para determinar, utilizando al menos un coeficiente de dicho conjunto de coeficientes, un valor de al menos una de las siguientes propiedades de transformador: la impedancia total de devanado, Z_w ; la impedancia de un devanado de fuente, Z_1 ; la impedancia de un devanado de carga, Z_2 ; una relación de vueltas, n, y la corriente de magnetización, I_0 ; en el que

30 el valor de una propiedad de transformador está relacionado con al menos un parámetro de dicho modelo de transformador.

10. Aparato de diagnóstico de acuerdo con la reivindicación 9, en el que:

el procesador está configurado además para:

recoger una medición de control en línea de al menos una señal CA de terminal a una primera carga de control;

derivar un valor en base a las mediciones de la cantidad a partir de la medición de control;

35 determinar un valor esperado de la cantidad a la primera carga de control, utilizando dicha relación y un coeficiente o conjunto de coeficientes determinados;

comparar un valor en base a las mediciones de la cantidad con un valor esperado correspondiente a fin de detectar cualquier problema de transformador al darse un cambio en la cantidad.

11. Transformador que comprende un aparato de diagnóstico de transformador de acuerdo con la reivindicación 9 o 10.

40 12. Transformador de acuerdo con la reivindicación 11, cuando depende de la reivindicación 10, que comprende además un cambiador de tomas, en el que

el procesador está configurado para generar un conjunto de coeficientes para cada uno de los puntos de toma de cambiador de tomas; y

el controlador de estado está configurado para determinar, si se detecta una desviación, en qué posición o posiciones de cambiador de tomas se produce la desviación.

- 5 13. Programa informático para proporcionar un diagnóstico de transformador, comprendiendo el programa informático partes de código de programa informático que, cuando se ejecutan en un procesador, hacen que el procesador lleve a cabo el método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

Fig. 1

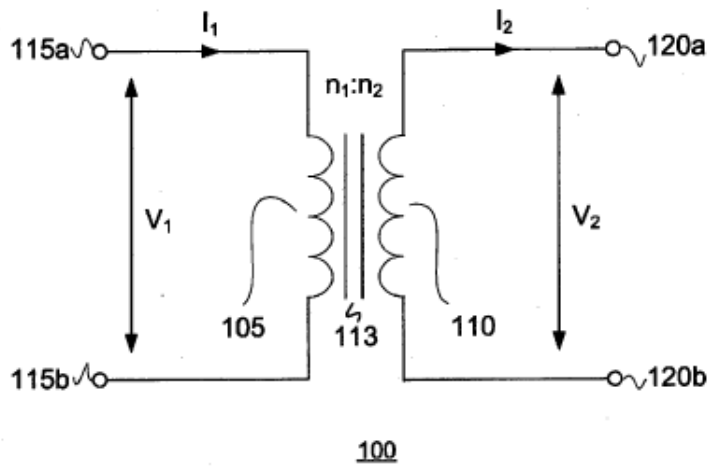


Fig. 2a

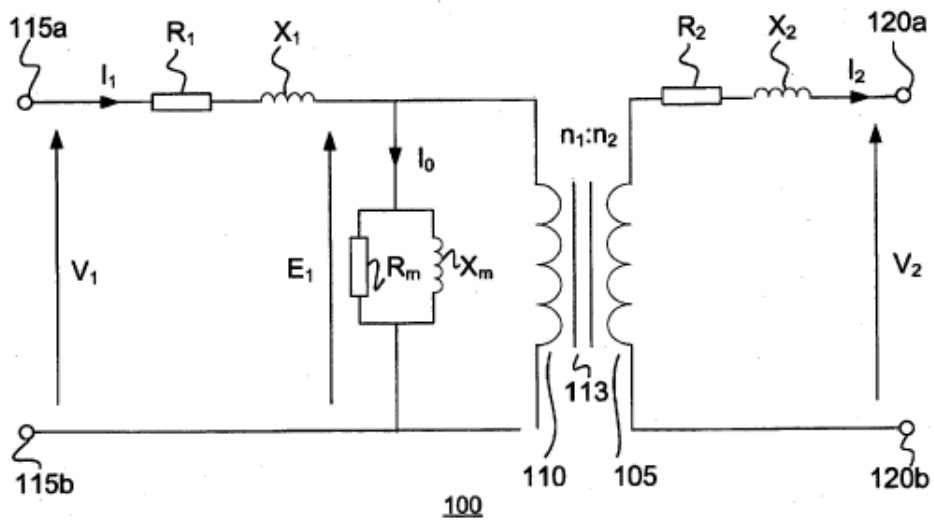


Fig. 2b

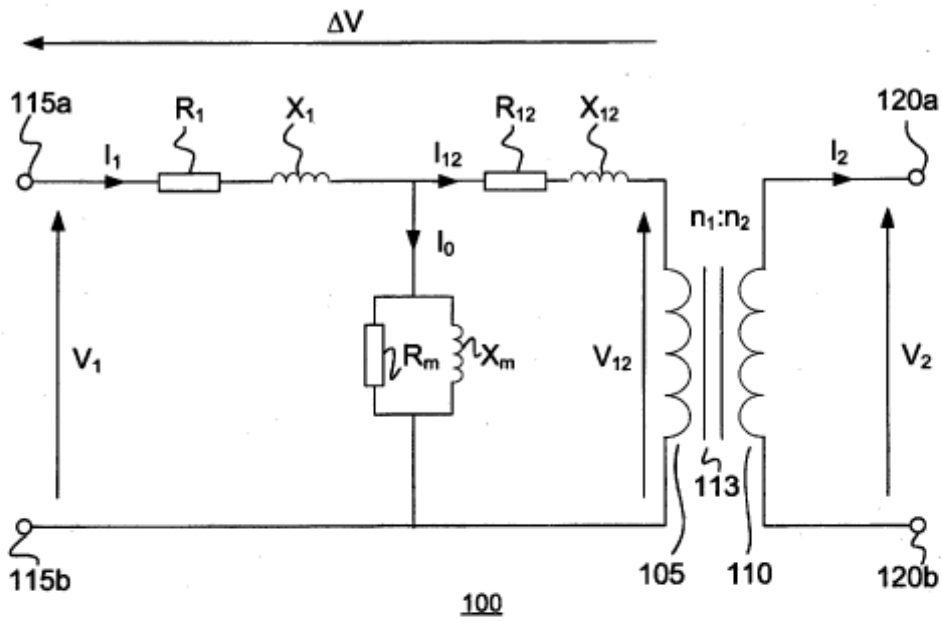


Fig. 2c

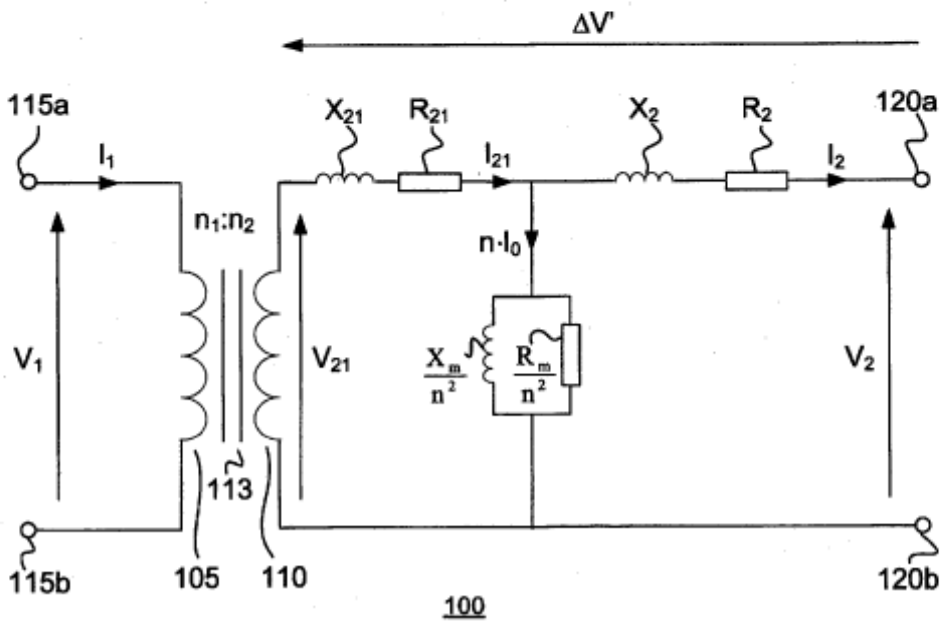


Fig. 3

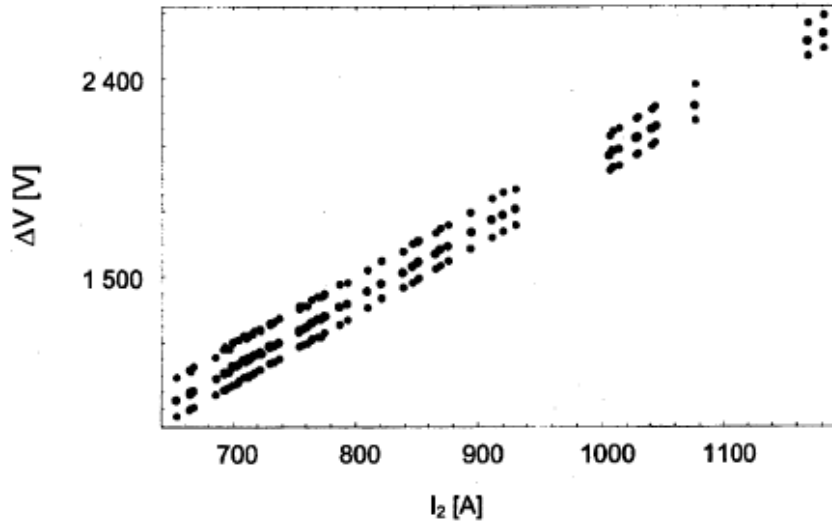


Fig. 4

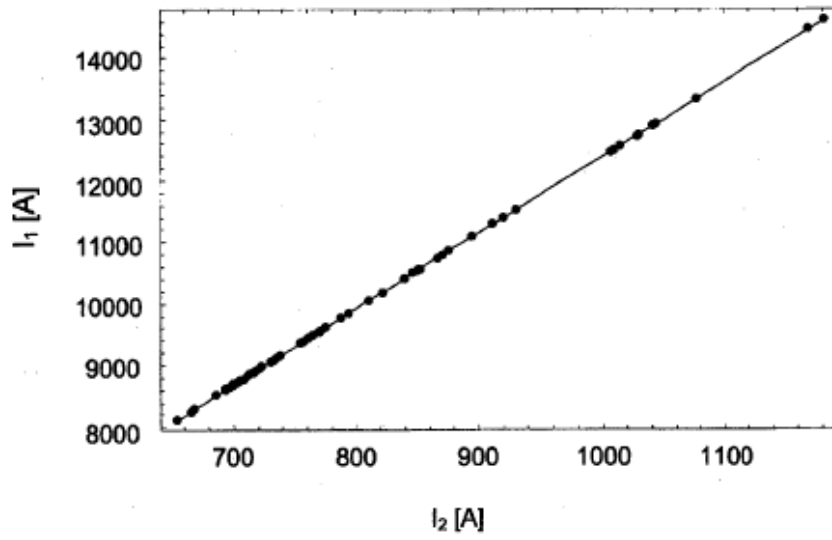


Fig. 5

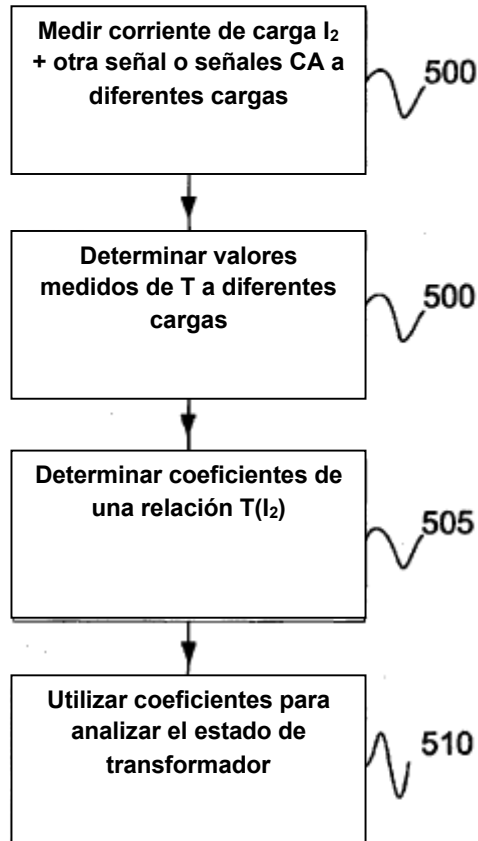


Fig. 6a

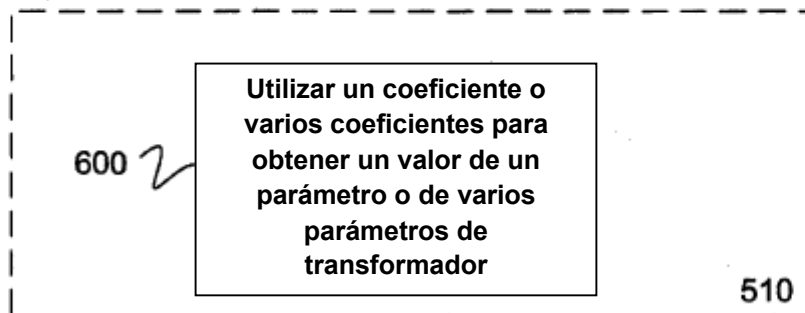
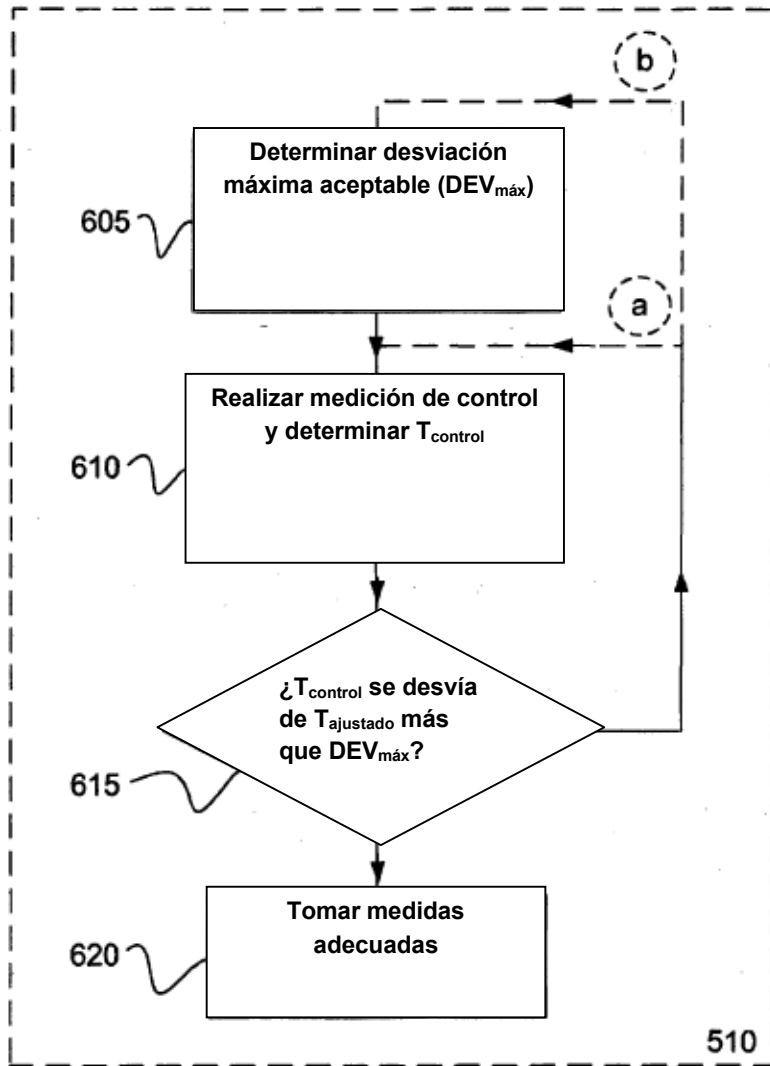


Fig. 6b



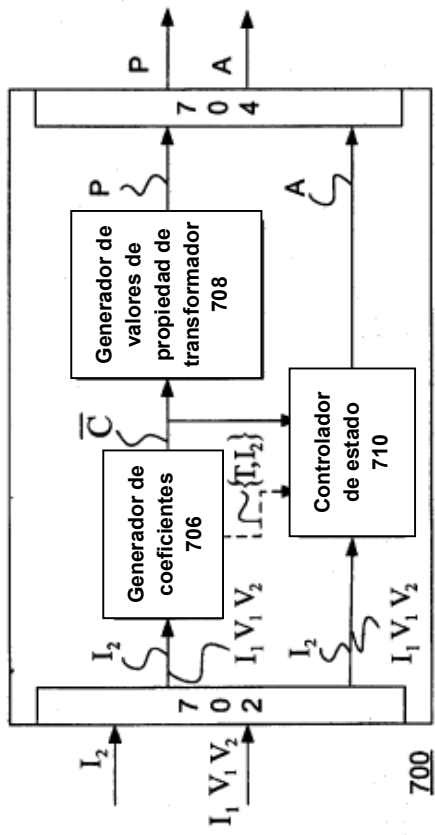


Fig. 7a

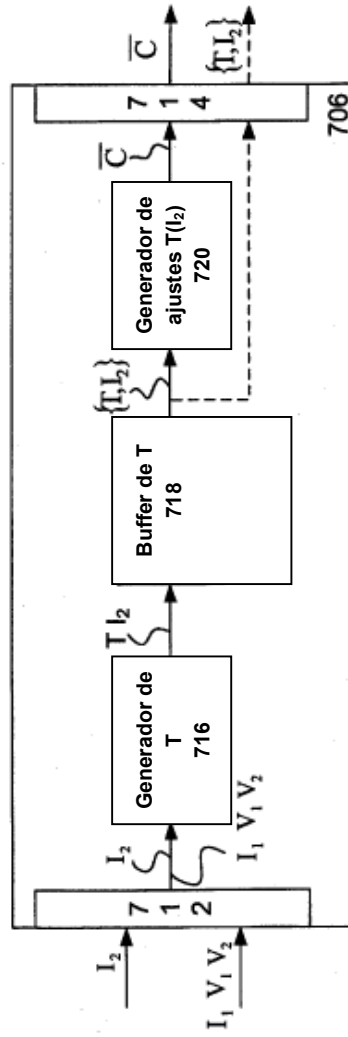


Fig. 7b

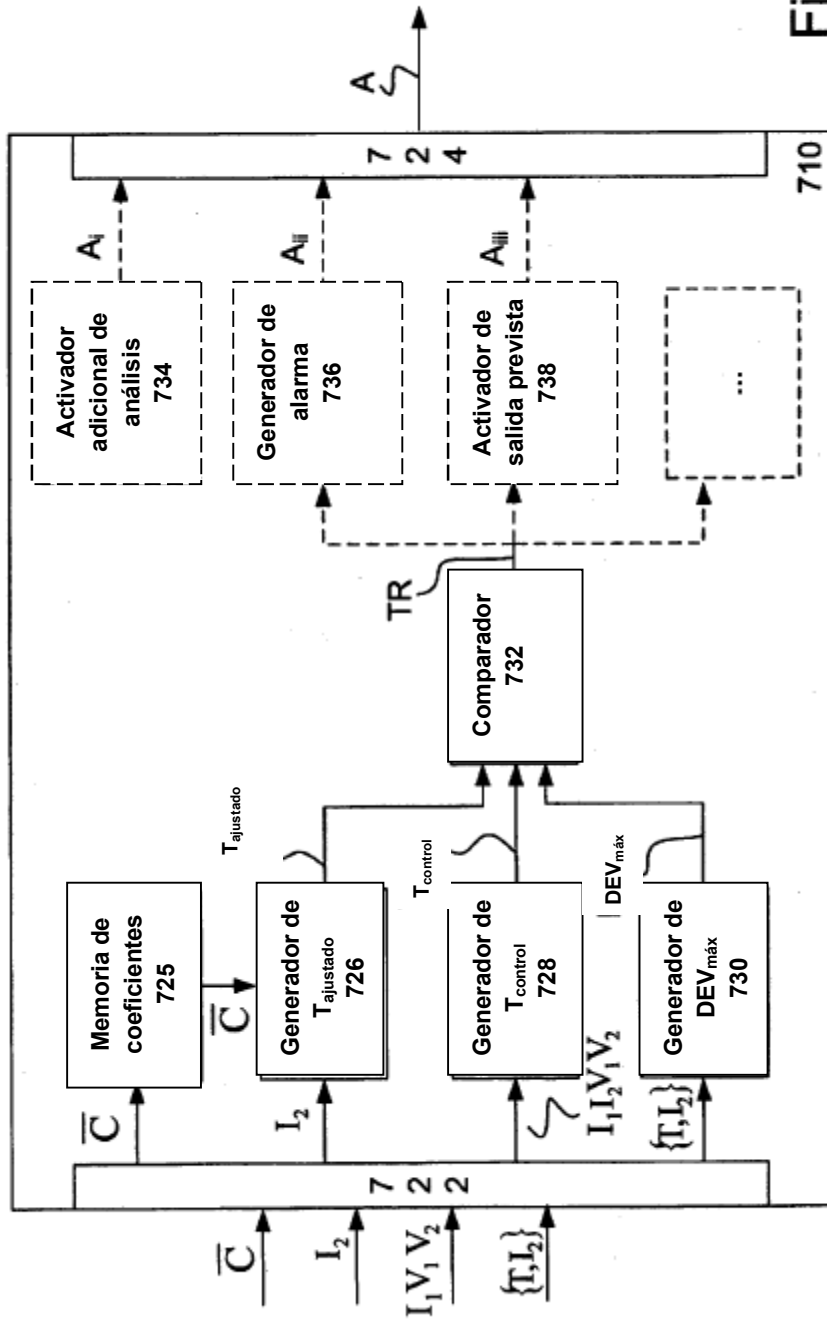


Fig. 7c

Fig. 8

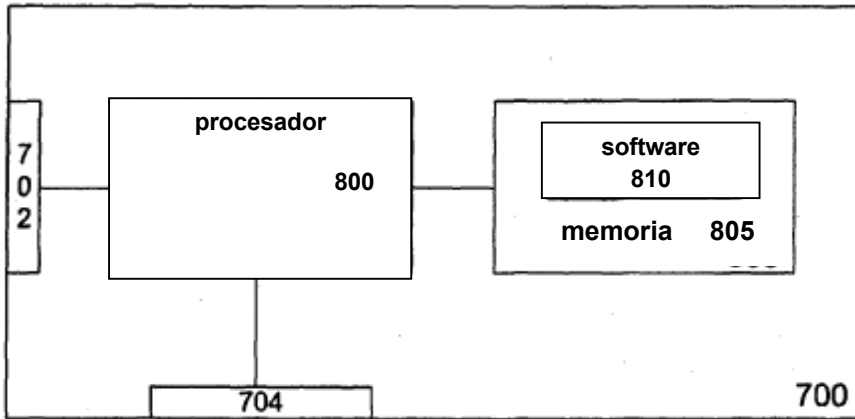


Fig. 9

