

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 749 449**

51 Int. Cl.:

G01R 31/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.04.2013** **E 13162478 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2019** **EP 2787357**

54 Título: **Método y dispositivo para el ensayo de un transformador**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.03.2020

73 Titular/es:

OMICRON ELECTRONICS GMBH (100.0%)
Oberes Ried 1
6833 Klaus, AT

72 Inventor/es:

JÄGER, MARKUS;
KRÜGER, MICHAEL;
ATLAS, DMITRY;
PREDL, FLORIAN y
FREIBURG, MICHAEL

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 749 449 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y dispositivo para el ensayo de un transformador

5 Esta invención concierne a un método y un dispositivo para ensayar un transformador o un transformador de medida. En particular, la invención concierne a un método y un dispositivo para ensayar la exactitud de transformadores de tensión, pero sin limitarse a este campo de aplicación preferido.

10 Los transformadores de tensión con principio de funcionamiento inductivo o capacitivo son equipos para la tecnología de alta tensión y componentes de cualquier red de alimentación. El principio de funcionamiento inductivo es esencialmente el principio de un transformador monofásico, mientras que el principio de funcionamiento capacitivo es una combinación de un divisor de tensión capacitivo, una bobina de reactancia y un transformador monofásico. Los transformadores de tensión capacitivos se utilizan, por ejemplo, en redes de alta y muy alta tensión con tensiones muy altas en el rango de varios cientos de kV, por lo que el divisor de tensión capacitivo del transformador de tensión sirve como convertidor reductor para convertir la alta tensión en un rango de media tensión de varios kV y para alimentar el transformador con esta tensión.

15 Los transformadores de tensión sirven, por un lado, para transformar las tensiones de funcionamiento en tensiones proporcionales que pueden ser procesadas posteriormente por la tecnología de la información y, por otro, para aislar galvánicamente la alta tensión y la tecnología secundaria.

20 Los voltajes transformados de los transformadores se utilizan posteriormente con fines de facturación o protección. Dependiendo de este campo de aplicación (facturación o protección), los transformadores deben cumplir una determinada clase de precisión. Las clases de precisión para los transformadores inductivos se definen en la norma DIN EN 60044-2 y para los transformadores capacitivos en la norma DIN EN 60044-5, por lo que actualmente estas normas son sustituidas por la serie de normas DIN EN 61869.

25 Según la norma, los transformadores de tensión se dividen en diferentes clases de precisión en función de su uso previsto. Dependiendo de la clase, el ángulo y el error de amplitud de la transmisión no deben exceder un valor determinado. En particular, los transformadores se dividen en clases que se basan en su desviación porcentual máxima admisible de la medición de la tensión en la tensión nominal y la carga nominal (ejemplos de clases: 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1,0 - 3,0). En el caso de los transformadores para fines de medición, las clases especificadas no deben apartarse de la frecuencia de funcionamiento (50 Hz o 60 Hz), carga nominal (por ejemplo, en la gama del 25 % al 100 %) con un factor de potencia, por ejemplo, en la gama del 0,8 al 1,0 inductivo, y tensiones de, por ejemplo, entre el 80 % y el 120 % de la tensión nominal. Para los transformadores de protección, las clases deben mantenerse a la frecuencia de funcionamiento, cargas nominales (25 % a 100 %) con factor de potencia 0,8 inductivo y tensiones del 5 % al 190 % (dependiendo del factor de defecto a tierra) de la tensión nominal. Las clases y los valores límite mencionados anteriormente pueden variar de un país a otro, y los clientes también pueden solicitar valores que difieran de estos.

30 En cuanto a las clases de precisión, se puede ver que los transformadores de tensión deben ser instrumentos de medición de alta precisión, a los que se imponen unos requisitos de precisión muy elevados tanto en lo que se refiere a la relación de transmisión de tensión como al ángulo de transmisión. Las imprecisiones pueden causar altos costos o poner en peligro la seguridad de la operación debido a desviaciones en la medición de la energía transmitida.

35 Con el fin de comprobar la precisión de los transformadores, actualmente se desmontan según sea necesario, se sustituyen por un transformador de sustitución y se envían a un laboratorio de alta tensión para realizar pruebas de precisión. Las costosas medidas se traducen en elevados costes, tiempos de parada y una gran cantidad de pruebas y trabajos de montaje. En el pasado, las soluciones de prueba se diseñaban para compensar los costes y el esfuerzo permitiendo realizar pruebas in situ a la tensión nominal y minimizando así los costes de montaje y envío.

40 En la actualidad, sin embargo, no existe ningún método para comprobar la precisión de los transformadores en el lugar de trabajo sin casi utilizar la tensión nominal de los transductores como tensión de prueba. La no linealidad de los equipos no permite realizar pruebas de forma inmediata a bajas tensiones.

45 Los procedimientos conocidos de los transformadores de corriente no pueden transferirse completamente a los transformadores de tensión, ya que los parámetros del transformador no pueden determinarse fácilmente debido a las influencias parasitarias y a su estructura interna. Además, los métodos ya conocidos no tienen en cuenta el comportamiento no lineal, dependiente de la frecuencia, de la propagación de pérdidas de los transformadores de tensión.

50 Los documentos más relevantes del estado de la técnica son: EP1398644A1, "CT Analyzer - Revolution in Current Transformer Testing and Calibration" (Omicron Electronics GmbH, XP055080149), EP2466322A1 y EP1653238A1.

55 La invención presente se basa por tanto en la tarea de proporcionar un método mejorado y un dispositivo diseñado correspondientemente con cuya ayuda se pueden ensayar in situ y con escaso esfuerzo la exactitud de transformadores o transformadores de medida, donde la invención deberá ser particularmente adecuada para ensayar

transformadores de tensión. Esta tarea se resuelve según la invención mediante un procedimiento con las características de la reivindicación 1 y un dispositivo con las características de la reivindicación 19. Las reivindicaciones dependientes definen realizaciones preferidas y ventajosas de la invención.

5 La invención propone mapear el transformador a ensayar mediante un circuito equivalente y determinar automáticamente la exactitud del transformador en relación con el circuito equivalente evaluando una respuesta de prueba del transformador generada como resultado de una señal de prueba. La precisión relacionada con el circuito equivalente se convierte automáticamente o con ayuda de un ordenador en una precisión del transformador relacionada con una condición de funcionamiento.

10 Esta invención garantiza una comprobación autosuficiente de la precisión de los transformadores en general que permite una aproximación exacta y reproducible del estado operativo del transformador a través de su comportamiento de transmisión a bajas tensiones de prueba.

15 La invención puede ser implementada en forma de un dispositivo de ensayo portátil para que el transformador pueda ser ensayado en el sitio (in-situ). La invención es particularmente adecuada para probar transformadores de voltaje inductivos o capacitivos, pero generalmente puede ser utilizada para verificar la precisión de los transformadores.

20 Según una forma de realización de la invención, se utiliza un modelo de medición y cálculo para deducir información significativa sobre el comportamiento durante la operación a partir de los resultados de la medición a bajos voltajes de medición con diferentes frecuencias. La base para ello es un circuito equivalente diseñado para este caso de funcionamiento, cuyos elementos pueden determinarse para diferentes variantes. Si se conocen todos los parámetros del circuito equivalente, es posible, sobre la base del circuito equivalente, calcular el comportamiento del transformador y su precisión en magnitud y fase en diferentes condiciones de funcionamiento a partir del diagrama fasorial de tensión del transformador.

25 Según otro ejemplo de realización, la invención permite determinar todos los parámetros necesarios del transformador, la relación de transformación y las pérdidas de hierro lineales o no lineales dependientes de la frecuencia del transformador con bajas tensiones desde el lado de baja tensión del transformador a frecuencia variable y un modelo de interpretación y cálculo de pérdidas correspondiente.

30 Según otro ejemplo de realización de la invención, se utiliza un circuito equivalente del transformador, donde se considera la compleja y distribuida capacidad del bobinado primario como un elemento concentrado y se emplea un método nuevo para determinar la capacidad del bobinado primario, construyendo sobre esto un método para determinar la relación de transformación en vacío del transformador.

35 Según un ejemplo de realización preferida de la invención, se considera una corrección de espiras, que puede haberse llevada a cabo en el procedimiento de fabricación del transformador para mantener la clase de precisión.

40 En otros ejemplos de realización de la invención las características siguientes también pueden ser realizadas individualmente o en combinación:

45 - Con los transformadores de tensión capacitivos también se puede comprobar la precisión del divisor de tensión capacitivo del transformador de tensión.

50 - Se puede utilizar un modelo de simulación de las pérdidas de hierro dependientes de la frecuencia y del flujo del transformador que reduce los modelos convencionales de pérdidas empírico-analíticas en la dependencia de la densidad de flujo de $P_{\text{ges}} = C \cdot f^x \cdot \Psi^y$. C, f^x y Ψ^y describen los componentes que dependen del transformador, así como de la frecuencia f y del flujo Ψ . Para hacer posible esta simplificación, se realizan mediciones con diferentes frecuencias para el mismo flujo concatenado. Utilizando un método basado en modelos, se puede determinar finalmente el coeficiente dinámico C así como el exponente x de la frecuencia f y el exponente y para el flujo Ψ . Para operar el modelo de simulación, las mediciones se realizan preferentemente a bajos voltajes de menos de 10V y frecuencias variables entre 0 y 50Hz.

55 - La capacidad de bobinado primario concentrado del circuito equivalente puede determinarse basándose en mediciones de referencia con una capacitancia de referencia exactamente conocida. Para ello, se aplica una pequeña señal de frecuencia variable al transformador de tensión en el lado secundario para encontrar la primera resonancia paralela. Con la ayuda de una capacitancia de referencia que se añade, esta frecuencia de resonancia se desintoniza deliberadamente para determinar la capacitancia de bobinado primario con el conocimiento de la capacitancia de referencia y la resonancia recién ajustada. Este método solo se utiliza para transformadores de tensión inductivos, ya que la capacidad de bobinado de los convertidores inductivos utilizados en los transformadores de tensión capacitivos es insignificante para la gama de frecuencias en torno a 50 Hz.

60 - Las resistencias del devanado del circuito equivalente se pueden determinar con señales de tensión continua.

65 - La suma de las inductancias de dispersión del circuito equivalente puede determinarse a partir de la capacidad

determinada del devanado primario o a partir de una reactancia de cortocircuito medida. En el caso de transformadores con un devanado, se puede suponer una división de las inductancias de dispersión según los valores determinados empíricamente. En el caso de transformadores con varios devanados, las inductancias de dispersión relacionadas con el lado respectivo pueden determinarse sobre la base de mediciones mutuas de los devanados individuales.

5 En general, la invención permite obtener una información significativa completa sobre la precisión del transformador sin huellas dactilares ni conocimiento de los materiales utilizados y, basándose en la serie de normas DIN EN 60044 o actualmente DIN EN 61869, permite la consideración de una carga variable con diferentes factores de potencia y diferentes voltajes de funcionamiento.

10 La invención está explicada en más detalle abajo por medio del dibujo adjunto con referencia a ejemplos preferidos de ejecución.

15 La fig. 1 muestra la estructura de un transformador en forma de un transformador de tensión acoplado capacitivamente y el correspondiente circuito equivalente.

La fig. 2 muestra un diagrama de bloques esquemático simplificado de un dispositivo de ensayo para ensayar un transformador según una forma de realización de la invención.

20 La fig. 3 muestra un ejemplo de acoplamiento y conexión del dispositivo de ensayo con el transformador de tensión acoplado capacitivamente que se muestra en la fig. 1 para ensayar el transformador de tensión, en particular para ensayar la relación de transformación total del transformador de tensión.

25 La fig. 4 muestra un ejemplo de cableado del dispositivo de ensayo con el transformador de tensión de la fig. 1 para ensayar la relación de transformación de la sección del transformador de tensión inductivo del transformador y para ensayar el divisor de tensión capacitivo del transformador.

30 La fig. 5 muestra un diagrama de flujo que explica la secuencia de un procedimiento para ensayar la precisión de los transformadores según un ejemplo de realización de la invención.

La fig. 6 muestra un diagrama de flujo para determinar la inductancia principal y la resistencia a la pérdida del circuito equivalente mostrado en la fig. 1 utilizando un modelo de pérdida ferromagnética según un ejemplo de realización de la invención.

35 La fig. 7 muestra un diagrama de flujo para determinar la inductancia principal y la resistencia a la pérdida del circuito equivalente mostrado en la fig. 1 utilizando un modelo de pérdida ferromagnética según otro ejemplo de realización de la invención.

40 La invención está explicada a continuación a partir de un transformador de tensión acoplado capacitivamente, a pesar de que la invención no está limitada a esta aplicación, sino que también puede ser aplicada a transformadores de tensión inductivos, así como a transformadores y transformadores de medida en general.

45 La fig. 1 muestra la estructura de dicho transformador de tensión acoplado capacitivamente 20, donde el transformador de tensión 20 comprende una sección de acoplamiento 21 con capacidades de acoplamiento C1 y C2, que forman un divisor de tensión capacitivo, y una bobina de reactancia L sintonizada con las capacidades C1 y C2, así como una sección de transformador (inductivo) 22 con un transformador monofásico. Los terminales primarios del transformador de voltaje 20 están etiquetados como A o NHF, mientras que los terminales secundarios están etiquetados como 1a y 1n. Para mayor claridad, en la fig. 1 se muestra un transformador de tensión o un transformador con un solo devanado secundario.

50 Dentro del contexto de esta invención, el transformador o transformador de voltaje está representado por un circuito equivalente. El circuito equivalente puede referirse opcionalmente tanto al lado primario como al lado secundario del transformador de voltaje.

55 Este tipo de circuito equivalente 30 se muestra también de forma ejemplar en la fig. 1, donde una sección 31 del circuito equivalente está asociado a la sección de acoplamiento 21 del transformador de tensión 20, mientras que una sección 32 del circuito equivalente se corresponde con la sección del transformador 22 del transformador de tensión 20.

60 La fig. 2 muestra un diagrama de bloques de un dispositivo de ensayo 10 según un ejemplo de realización de la invención, que, sobre la base de dicho circuito equivalente, comprueba la exactitud del transformador de tensión mediante secuencias automáticas y, con este fin, determina los componentes individuales o parámetros del circuito equivalente mediante la aplicación de una suma de señales de prueba y la realización de varias mediciones descritas más detalladamente a continuación, con el fin de determinar posteriormente, sobre esta base, en primer lugar, la precisión del transformador de tensión en relación con el circuito equivalente y convertir esa precisión en una precisión relacionada con una condición de funcionamiento.

65

El dispositivo de ensayo 10 mostrado esquemáticamente en la fig. 2 comprende una fuente de señal 11 para generar una señal de prueba o de medición de una cierta amplitud y frecuencia, así como un amplificador controlable 12 a través del cual se emite al objeto de prueba la señal de prueba amplificada de la manera deseada. El dispositivo de ensayo puede tener salidas separadas para una prueba de bajo voltaje por un lado y una prueba de alto voltaje por el otro. La fuente de señal 11 y el amplificador controlable 12 se controlan a través de una unidad de control 14, que puede ser un microcontrolador o un procesador de señal digital. La respuesta de prueba que se genera posteriormente en el objeto de prueba o en el elemento de prueba es detectada por un dispositivo de medición o registro 13 y alimentada a la unidad de control 14, que evalúa la respuesta de prueba e inicia otras acciones en función de la misma.

La unidad de control 14 es el componente central del dispositivo de ensayo 10 y es responsable de la secuencia en su mayor medida automática del procedimiento de ensayo que se explica a continuación utilizando un ejemplo de realización preferida. Como se muestra en la fig. 2, el dispositivo de ensayo 10 tiene una memoria 15 para almacenar los programas de operación o control de la unidad de control 14 o para almacenar los resultados de los ensayos, etc. Una sección de entrada/salida 16 puede utilizarse para alimentar comandos o información de control al dispositivo de ensayo 10 o para emitir resultados de ensayo o información de control para otros dispositivos. Esta sección de entrada/salida puede comprender por ejemplo un teclado, una pantalla y varios tipos de interfaces (USB, D-Sub 9, ranuras para tarjetas flash, etc.). El dispositivo de ensayo también puede tener una conexión equipotencial.

El dispositivo de ensayo 10 está configurado preferentemente en forma de dispositivo portátil compacto, de modo que pueda utilizarse para ensayar fácilmente un transformador in situ. Como se explica con más detalle más adelante, el dispositivo de ensayo 10 puede acoplarse a un amplificador de tensión para realizar determinadas mediciones, que amplifica la tensión de prueba suministrada por el dispositivo de ensayo a un valor de alta tensión deseado y la aplica al objeto de prueba.

La unidad de control 14 del dispositivo de ensayo 10 está diseñada de tal manera que determina los componentes individuales del circuito equivalente mostrado como ejemplo en la fig. 1 con la ayuda de varias mediciones automáticas y determina la precisión del transformador de tensión relacionado con el circuito equivalente sobre la base del circuito equivalente así conocido. El dispositivo de ensayo 10 se puede conectar al transformador de tensión 20 según un procedimiento de medición de cuatro hilos, donde se mide la tensión aplicada directamente al objeto de prueba para evitar que los cables o las resistencias de contacto en los terminales influyan en la medición.

A continuación, la unidad de control 14 convierte la precisión referida al circuito equivalente en una precisión referida a una condición de funcionamiento para permitir una evaluación del transformador de tensión en lo que respecta tanto a la precisión de amplitud como a la precisión de fase.

Para determinar los componentes del circuito equivalente, se llevan a cabo en particular las medidas siguientes según un ejemplo de realización de la invención: Mediciones de impedancia primaria y secundaria de cortocircuito, medición de la resistencia de los devanados secundarios del transformador de tensión, medición del comportamiento de magnetización del transformador de tensión, medición de la relación de transformación del transformador de tensión.

La resistencia del devanado de CC se determina para cada devanado secundario del transformador de tensión 20, de modo que la información sobre la respectiva resistencia del devanado secundario R2 del circuito equivalente 30 se conoce a partir de la respuesta de prueba del transformador de tensión 20 (véase fig. 1). La medición se realiza preferentemente en la secuencia del devanado más alto al más bajo para reducir el esfuerzo de cableado. La resistencia transformada del devanado primario R1" del circuito equivalente 30 puede calcularse a partir de las pérdidas por dispersión medidas y de los valores de resistencia secundaria de CC.

Las mediciones de la impedancia de cortocircuito pueden ser realizadas por el dispositivo de ensayo 10 tanto en el lado primario como en el secundario.

En la medición de la impedancia de cortocircuito del lado primario, los terminales de entrada A y NHF del transformador de tensión 20 están cortocircuitados y conectados al potencial de tierra, y se aplica una señal de prueba al transformador de tensión para detectar sucesivamente la respuesta de prueba en cada devanado secundario y poder determinar las pérdidas por dispersión antes mencionadas en función de la respuesta de prueba del transformador de tensión 20. Si existen varios devanados secundarios, esta medición se realiza por separado para cada devanado secundario.

La medición de la impedancia de cortocircuito en el lado secundario solo se realiza para un devanado secundario, es decir, por ejemplo, solo el segundo devanado secundario 2a-2n del transformador de tensión 20 está cortocircuitado y la impedancia de cortocircuito se mide en el primer devanado secundario 1a-1n (si el transformador de tensión tiene solo un devanado secundario, no se requiere ninguna medición de la impedancia de cortocircuito en el lado secundario).

Esto permite determinar la inductancia de dispersión primaria transformada "X1" y la inductancia de dispersión secundaria "X2" por separado para cada devanado secundario del circuito equivalente que se muestra en la fig. 1.

La medición del comportamiento de magnetización del transformador de tensión solo debe realizarse para un devanado secundario, por ejemplo, para el devanado secundario más interno 1a-1n, ya que el núcleo de hierro del transformador de tensión es el mismo para todos los devanados secundarios y las pérdidas por dispersión de este devanado secundario son conocidas para poder calcular la tensión FEM en consecuencia. Sin embargo, también se pueden realizar varias mediciones de este tipo.

La relación de transformación del transformador de tensión 20 es medida por el dispositivo de ensayo 10 para determinar la relación real de devanado o de espiras del transformador de tensión 20, teniendo en cuenta en particular una corrección de espiras realizada durante el procedimiento de fabricación.

Un transformador de tensión siempre es calculado por el fabricante en el procedimiento de desarrollo antes de que el transformador de tensión sea producido en serie. Este cálculo se realiza sobre la base de valores básicos "constantes" de los materiales que se van a utilizar y, por lo general, teniendo en cuenta también las tolerancias en el procedimiento de fabricación. Tanto las tolerancias de los materiales utilizados como las tolerancias de los procedimientos de fabricación influyen en última instancia en la precisión del producto acabado. Por lo tanto, durante el procedimiento de fabricación, se suele realizar una medición de comprobación después de la colocación de los devanados y antes del aislamiento para determinar si el transformador de tensión se encuentra dentro del rango de trabajo habitual. Si hay desviaciones, el transformador de tensión se "ajusta" al rango deseado cambiando el número de espiras. Debido a esta corrección de espiras, la relación de transformación del devanado puro del transformador de tensión ya no corresponde a la relación de transformación de tensión nominal.

Como se ha explicado anteriormente, el dispositivo de ensayo 10 mide generalmente las pérdidas del transformador de tensión 20 sometido a prueba para determinar o calcular su "precisión". Además de estas pérdidas, también se debe registrar una corrección de espiras de este tipo durante el procedimiento de fabricación del transformador de tensión 20 para poder determinar la precisión absoluta del transformador de tensión 20. Por esta razón, el dispositivo de ensayo 10 está diseñado para realizar una medición de la relación de transformación del transformador de tensión 20 aplicando una tensión de prueba en el lado primario del transformador de tensión 20 que se va a probar.

Para medir la transformación, es importante que se realice con una tensión que no sea demasiado baja en comparación con la tensión nominal primaria del objeto de prueba. Se ha comprobado que son adecuadas tensiones que oscilan entre el 3 % y el 80 % de la tensión nominal.

Dado que el dispositivo de ensayo 10 funciona a baja tensión, preferentemente en el orden de 10V o 40V RMS, para realizar las demás mediciones descritas anteriormente, y dado que la fuente de tensión 11 del dispositivo de ensayo 10 está diseñada en consecuencia para bajas tensiones, se requiere el uso de una disposición de amplificador correspondiente en forma de amplificador de tensión para realizar la medición de la relación de transformación. Esta disposición de amplificador también puede integrarse en el dispositivo de ensayo 10, pero esto aumentaría el peso y el tamaño del dispositivo de ensayo en consecuencia. El uso de una disposición de amplificador separada también puede ser ventajoso por razones de seguridad debido a los altos voltajes involucrados. Si se requieren diferentes variantes de voltaje, también puede ser ventajoso trabajar con diferentes componentes.

En la fig. 3 se muestra un cableado ejemplar del dispositivo de ensayo 10 con un amplificador de tensión 40 y el transformador de tensión 20 mostrado en la fig. 1.

Las salidas de señal de prueba del dispositivo de ensayo 10 están acopladas al lado primario de un transformador 41 del amplificador de tensión 40, mientras que las entradas de medición de respuesta de prueba primaria y secundaria del dispositivo de ensayo 10 están acopladas a través de un divisor de voltaje 42 al lado secundario del transformador 41 y al lado primario del transformador de voltaje 20, o al lado secundario del transformador de tensión 20. El dispositivo de ensayo se conecta al transformador de tensión según un procedimiento de medición de cuatro hilos, mediante el cual se mide la tensión aplicada directamente al objeto de prueba para evitar que los cables o las resistencias de contacto en los terminales influyan en la medición.

Con la disposición mostrada en la fig. 3 se puede medir la relación total de transformación del transformador de tensión 20. Los terminales NHF y N del transformador de tensión 20 están conectados a tierra. La alta tensión de prueba suministrada por el amplificador de tensión 40 se aplica entre los terminales A y NHF y, por tanto, entre A y tierra. La entrada de medición de baja tensión del dispositivo de ensayo 10 se conecta al devanado secundario 1a-1n del transformador de tensión 20.

La medición de la relación de transformación total del transformador de tensión 20 con la disposición indicada en la fig. 3 se realiza preferentemente una sola vez para el primer devanado secundario 1a-1n, incluso si existen varios devanados secundarios. Además, la medición de la relación de transformación total solo se realiza para transformadores de tensión acoplados capacitivamente, mientras que esta prueba no es necesaria para transformadores de tensión inductivos. Como resultado de esta medición, la relación de transformación total se determina en forma de relación entre la tensión en los terminales A y NHF y la tensión en el devanado secundario 1a-1n del transformador de tensión 20.

Con una disposición de prueba ligeramente modificada que se muestra en la fig. 4, se puede determinar la transformación de la sección del transformador de tensión inductivo del transformador de tensión 20. El objetivo de esta medición es, en particular, poder distinguir entre la relación de transformación capacitiva y la relación de transformación inductiva.

Como se muestra en la fig. 4, el terminal NHF se conecta al terminal de alta tensión A del transformador de tensión 20 para este fin, aplicándose la tensión de prueba entre estos dos terminales y tierra. De lo contrario, el cableado es similar a la disposición de prueba mostrada en la fig. 3. La tensión aplicada al lado primario del transformador de tensión se ajusta preferentemente de forma que la tensión en el devanado secundario 1a-1n corresponda a la tensión medida con la disposición de medición de la fig. 3. Como resultado de esta medición, la transformación del transformador de tensión inductivo, es decir, sin el divisor de tensión capacitivo C1, C2, se determina en forma de la relación entre la tensión en el lado primario del transformador inductivo y la tensión en los terminales secundarios 1a-1n.

Esta medición también se realiza preferentemente una sola vez para el primer devanado secundario 1a-1n. Si esta medición se realiza para un transformador de tensión inductivo, el resultado de la medición correspondería directamente a la relación de transformación del transformador de tensión inductivo en condiciones de vacío.

Por último, la relación de transformación de los divisores capacitivos de tensión C1, C2 del transformador de tensión 20 también puede calcularse a partir de los resultados de medición obtenidos según las figs. 3 y 4, dividiendo la tensión obtenida de la medición de la figs. 3 entre los terminales A y NHF del transformador de tensión 20 por la tensión obtenida de la medición de la fig. 4 en el lado primario del transformador con los terminales A-NHF cortocircuitados.

Las mediciones descritas anteriormente son realizadas por el dispositivo de ensayo 10 con el fin de determinar la precisión del transformador de tensión probado 20 sobre la base de la información obtenida.

La fig. 5 muestra, en forma de un diagrama de flujo, una posible secuencia del procedimiento para determinar la clase de precisión de los transformadores de tensión inductivos que se ejecuta automáticamente en el dispositivo de ensayo 10 bajo el control de la unidad de control 14, según un ejemplo de realización de la presente invención. A continuación, se mencionan por separado los puntos adicionales que deben tenerse en cuenta al aplicar este método a los transformadores de tensión acoplados capacitivamente.

Este procedimiento se basa en el circuito equivalente del transformador (ESB) ya descrito, que puede relacionarse con el lado secundario del transformador de tensión que se va a probar (etapa 100). De este modo, una medición secundaria garantiza una correspondencia directa con el circuito equivalente. La capacitancia concentrada integrada en el circuito equivalente representa la capacitancia del devanado a considerar para las frecuencias relevantes hasta 50Hz o 60Hz (para ciertos tipos de transformadores la capacitancia del devanado es insignificante). Otra propiedad de este método es el hecho de que el elemento transversal, que consiste en la inductancia principal X_m y la resistencia a la pérdida R_c , se supone inicialmente que es desconocido.

Para determinar los elementos del circuito equivalente, se realizan las pruebas de vacío y de cortocircuito anteriormente descritas (etapa 101) con el fin de rellenar el circuito equivalente con la información así obtenida (etapa 102).

Un barrido de frecuencia con la capacitancia de referencia activada (etapa 103) puede utilizarse para determinar el valor de la capacitancia del devanado primario C_p (etapa 104). Las etapas 103 y 104 para determinar la capacidad del devanado primario C_p se realizan preferentemente solo si la capacidad del devanado primario es relativamente alta y, por lo tanto, se debe tener en cuenta la influencia de la capacidad del devanado primario.

Si los valores obtenidos no son plausibles (etapa 105), se repiten las mediciones y, en consecuencia, las etapas 101-105.

Sin embargo, si los valores son plausibles, el comportamiento de magnetización del transformador de tensión puede medirse desde el lado secundario. Para ello se miden tanto la corriente $i(t)$ como la tensión $u(t)$ y con resolución temporal (etapa 106) para cada caso de funcionamiento imaginable de la modulación, utilizando preferentemente solo tensiones de hasta 10 V. Variando la frecuencia a la misma amplitud, el flujo puede ser ajustado de acuerdo a las especificaciones.

Después de la medición del comportamiento de magnetización, se tiene en cuenta la influencia de la capacidad del bobinado primario ya calculada (etapa 107). La corriente capacitiva se resta de la corriente terminal, de modo que solo se tiene en cuenta el componente de corriente $i_0(t)$ responsable de la magnetización del núcleo y la tensión aplicada al núcleo $u_{kern}(t)$.

Dado que para las mediciones se utilizan frecuencias distintas de la frecuencia de funcionamiento, pero el núcleo del transformador presenta un comportamiento fuertemente dependiente de la frecuencia, los valores medidos $u(t)$ e $i(t)$

se convierten en valores relacionados con el caso de funcionamiento. Para ello se utiliza un modelo completo de interpretación de pérdidas ferromagnéticas y de cálculo de pérdidas (etapa 108), que se describe de forma independiente a continuación utilizando la fig. 6. A partir del modelo de interpretación de pérdidas, los valores de corriente y tensión se transforman finalmente en elementos de red. Los valores simulados de la curva de magnetización (característica corriente-voltaje) a la frecuencia de operación y la información de ángulo a diferentes voltajes son devueltos. Ahora, se puede calcular, para cualquier carga y tensión de funcionamiento, la desviación de tensión y el error de ángulo o fase del transformador de medida, según el diagrama fasorial de tensión.

Para calcular la precisión real durante el funcionamiento a partir de esta "precisión relativa" del transformador de tensión referida al circuito equivalente, la relación de transformación en vacío del transformador de tensión debe medirse con gran precisión, tal como se describe. Esta suele diferir de la transformación nominal, ya que, por un lado, hay que tener en cuenta la caída de tensión dependiente de la carga a través de la impedancia secundaria del transformador de tensión y, por otro lado, cualquier ajuste del devanado que se lleve a cabo durante la producción. La consideración del ajuste del devanado se denomina "corrección de espiras". Dependiendo del diseño físico del transformador de tensión (etapa 109), la corrección de espiras puede llevarse a cabo en dos variantes diferentes. Por un lado, se puede aplicar un alto voltaje al lado primario del transformador de tensión como se describe (etapa 111). La medición secundaria permite entonces la medición de la corrección de espiras para la tensión explícita. Una segunda solución universal para la consideración de esta corrección de espiras es una medición de resonancia del lado secundario en conexión con los valores de la capacitancia del bobinado y la inductancia de dispersión ya determinados de antemano (etapa 110). Los valores de tensión indicados en la fig. 5 deben entenderse solo a modo de ejemplo.

El error de medición determinado inicialmente sin conocer la transformación real del transformador de tensión (etapa 112) puede corregirse ahora teniendo en cuenta la corrección de espiras (etapa 113), de modo que finalmente las curvas de error para el error de medición se emiten en magnitud y fase relacionadas con el caso de funcionamiento (etapa 114).

A continuación, con referencia a la fig. 6, se explica un procedimiento para determinar la inductancia principal y la resistencia a la pérdida del circuito equivalente utilizando el modelo de pérdida ferromagnética ya mencionado (véase la etapa 108 de la fig. 5) según un ejemplo de realización de la invención.

Debido a los materiales del núcleo utilizados, los transformadores de tensión tienen un comportamiento de pérdida claramente dependiente de la frecuencia y de la polarización. Este comportamiento es más o menos no lineal, dependiendo del control de las placas base. Dependiendo de la velocidad de inducción y de la amplitud de inducción, se obtiene una disposición de la estructura de dominio dependiente de la intensidad de campo y, por lo tanto, una polarización dependiente de la intensidad de campo o de la densidad de flujo, que va acompañada de una propagación de pérdida no lineal en forma de calor joule. Si se utiliza una señal de medición con una frecuencia que se desvía de la frecuencia de funcionamiento, se recomienda compensar la propagación de pérdida dependiente de la frecuencia con la ayuda de un modelo.

Para ello se puede utilizar un modelo de simulación de las pérdidas de hierro dependientes de la frecuencia y del flujo del transformador que reduce los modelos convencionales de pérdidas empírico-analíticas en la dependencia de la densidad de flujo de $P_{9es} = C \cdot f^x \cdot \Psi^y$. C, f^x y Ψ^y describen los componentes que dependen del transformador, así como de la frecuencia f y del flujo Ψ . Para hacer posible esta simplificación, se realizan mediciones con diferentes frecuencias para el mismo flujo concatenado. Utilizando un método basado en modelos, se puede determinar finalmente el coeficiente dinámico C así como el exponente x de la frecuencia f y el exponente y para el flujo Ψ . Para operar el modelo de simulación, las mediciones se realizan preferentemente a bajos voltajes de menos de 10V y frecuencias variables entre 0 y 50Hz.

La fig. 6 muestra un diagrama de flujo para determinar la inductancia principal y la resistencia a la pérdida del circuito equivalente mostrado en la fig. 1 utilizando tal modelo de pérdida ferromagnética o modelo de simulación según un ejemplo de realización de la invención.

Al comienzo del procedimiento (etapa 200), se transfieren inicialmente al modelo de pérdidas (etapa 201) los valores de corriente $i_0(t)$, que ya han sido corregidos en la corriente capacitiva por la capacidad del devanado primario, y los valores de tensión asociados $u_{kern}(t)$. A continuación, se realizan mediciones de potencia de baja frecuencia con las densidades de flujo de funcionamiento habituales (etapa 202). La baja frecuencia de medición va asociada a la demanda de pequeñas amplitudes de tensión.

Las pérdidas P_{9es} que ocurren durante las mediciones de potencia se separan en pérdidas estáticas P_{stat} y pérdidas dinámicas P_{dyn} con un enfoque de separación de pérdidas. Las pérdidas estáticas P_{stat} aumentan linealmente con la frecuencia (etapa 203). La resistencia a la pérdida estática R_{stat} para el modelo de red puede calcularse directamente a partir del componente estático (etapa 204)

A continuación, se interpreta el comportamiento dinámico de la propagación de la pérdida con la frecuencia (etapa 206). Dependiendo del tipo de transformador, puede ser constante, lineal o no lineal a lo largo de la frecuencia. Para

uno de los dos primeros casos se puede calcular directamente la resistencia a la pérdida dinámica R_{dyn} . Dado que en el caso no lineal la propagación de la pérdida sigue el enfoque $P_{dyn} = C_{dyn} \cdot f^x$, en este caso el coeficiente C_{dyn} y el exponente x de la función de potencia deben determinarse primero según un determinado procedimiento (etapa 208). Así, la resistencia a la pérdida dinámica R_{dyn} puede convertirse físicamente en un elemento de red incluso en el caso de propagación no lineal (etapas 209 y 210). Este enfoque se basa en mediciones exhaustivas de la propagación de pérdidas en el laboratorio.

La inductancia principal en su curso temporal (curva de histéresis) puede determinarse a partir de la diferencia entre la corriente magnetizante total y las corrientes óhmicas mediante las resistencias calculadas R_{dyn} y R_{stat} (etapa 211).

Finalmente, la curva característica corriente/tensión de magnetización y la información sobre el ángulo de fase de la impedancia principal a diferentes tensiones de núcleo son convertidas por el modelo en la información correspondiente a la frecuencia de funcionamiento o en el caso de funcionamiento (etapa 212) y transferidas como datos para su posterior procesamiento mediante el método mostrado en la fig. 5.

La fig. 7 muestra un diagrama de flujo de un método alternativo a las fig. 5 y fig. 6 utilizando un modelo de pérdida ferromagnética o un modelo de simulación según otro ejemplo de realización de la invención, donde no se determina la capacidad del devanado primario C_p . En la fig. 7, las etapas correspondientes a las etapas mostrados en las fig. 5 y fig. 6 están provistos de las mismas marcas de referencia para que se pueda hacer referencia a la descripción anterior de estas etapas.

El procedimiento mostrado en la fig. 7 difiere de los procedimientos mostrados en las fig. 5 y fig. 6 esencialmente en que se omiten las etapas que se refieren a la determinación y consideración de la capacidad del devanado primario C_p , y por otro lado en el diseño o formulación alternativa del modelo de pérdida ferromagnética 108.

Después de la etapa 206, las pérdidas P_{ges} que ocurren durante las mediciones de potencia se separan de nuevo en pérdidas estáticas P_{stat} y pérdidas dinámicas P_{dyn} utilizando un enfoque de separación de pérdidas para determinar los elementos del circuito equivalente sobre esta base. En la etapa 211, la inductancia principal se determina a partir de $i_0(t)$, $u_{kern}(t)$ y la resistencia dinámica R_{dyn} (también conocida como R_{eddy}).

Como se indica en la fig. 7, la medición de la transformación en la etapa 111 se realiza preferentemente con tensiones en el rango del 3 % al 80 % de la tensión nominal del objeto a ensayar.

Los modelos de interpretación de pérdidas explicados anteriormente utilizando las fig. 6 y 7 solo deben entenderse como ejemplos, por lo que también pueden utilizarse otros modelos. Dado que en las mediciones descritas en relación con la fig. 5 se utilizan preferentemente tensiones y frecuencias claramente inferiores a los valores nominales correspondientes del transformador de tensión a ensayar, la tarea principal del modelo utilizado es convertir los datos de medición que se desvían de los valores nominales en datos que se refieran a los valores nominales. Por un lado, se debe registrar la curva de magnetización del transformador de tensión, donde el núcleo del transformador de tensión se conduce preferentemente hacia la saturación desde el lado secundario aplicando una tensión adecuada por debajo de la frecuencia nominal. Por otro lado, las pérdidas dependientes de la frecuencia del transformador de tensión deben registrarse para que puedan volver a convertirse a los valores nominales con los factores correctos. La forma en que se miden y convierten los parámetros respectivos depende del modelo utilizado.

Algunos tipos de transformadores tienen una unidad de amortiguación conectada. Esta unidad de amortiguación se puede tener en cuenta al determinar la precisión del transformador para mejorar la significatividad de la prueba de precisión del transformador.

REIVINDICACIONES

1. Método de ensayo de un transformador de tensión (20) que comprende las etapas de
 - a) emular el transformador de tensión (20) mediante un circuito equivalente (30),
 - b) aplicar una señal de prueba al convertidor de tensión (20),
 - c) detectar una respuesta de prueba del transformador de tensión (20) en función de la señal de prueba y determinar automáticamente los valores de los componentes del circuito equivalente (30) en función de la respuesta de prueba del transformador de tensión (20),
 - d) determinar automáticamente una precisión del transformador de tensión (20) en relación con el circuito equivalente (30) sobre la base de la respuesta del ensayo y sobre la base del circuito equivalente (30) así ocupado por los valores determinados para los componentes, y
 - e) determinación automática de la precisión del transformador de tensión (20) en un caso de funcionamiento a partir de la precisión del circuito equivalente (30), donde se determinan en la etapa d) una desviación de tensión en relación con el circuito equivalente (30) y/o un ángulo de error del transformador de tensión (20) en relación con el circuito equivalente (30) para diferentes cargas, las tensiones de funcionamiento y/o frecuencias de funcionamiento del transformador de tensión (20) y se convierten en la etapa e) en una desviación de tensión correspondiente o en un ángulo de error correspondiente para los casos de funcionamiento correspondientes del transformador de tensión (20).
2. Método, según la reivindicación 1, **caracterizado porque** en la etapa e), la precisión del transformador de tensión (20) en relación con el circuito equivalente (30) se convierte, utilizando un modelo de simulación del transformador de tensión (20), en la precisión del transformador de tensión (20) en relación con el caso de funcionamiento, teniendo en cuenta el modelo de simulación las pérdidas de hierro dependientes de la frecuencia y del flujo del transformador de tensión (20).
3. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** para determinar la precisión del convertidor de tensión (20) en relación con el circuito equivalente (30), se aplica una señal de prueba con una tensión máxima de 10V y/o una frecuencia máxima de 10Hz.
4. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** para determinar la precisión del transformador de tensión (20) en relación con el circuito equivalente (30) se aplica una señal de prueba con una tensión inferior a la tensión nominal del transformador de tensión (20) y una frecuencia inferior a la frecuencia nominal del transformador de tensión (20).
5. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** en las etapas b)-d) se determina una resistencia primaria del devanado y una resistencia secundaria del devanado del circuito equivalente (30) mediante una medición de la resistencia en el transformador de tensión (20).
6. Método, según la reivindicación 5, **caracterizado porque** se mide la resistencia de cada devanado secundario del transformador de tensión (20) para determinar la resistencia del devanado secundario correspondiente a cada devanado secundario, determinándose automáticamente una resistencia transformada del devanado primario del circuito equivalente (30) a partir de las resistencias determinadas del devanado secundario y de las pérdidas por dispersión medidas del transformador de tensión (20).
7. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** las pérdidas por dispersión del transformador de tensión (20) se determinan automáticamente en las etapas b)-d) mediante una medición de la impedancia de cortocircuito.
8. Método, según la reivindicación 7, **caracterizado porque** el transformador de tensión (20) se cortocircuita en el lado primario para determinar las pérdidas por dispersión, y se aplica sucesivamente una señal de prueba a cada bobinado secundario del transformador de tensión (20).
9. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** las inductancias de dispersión del circuito equivalente (30) del transformador de tensión (20) se determinan automáticamente en las etapas b)-d) mediante mediciones de la impedancia de cortocircuito del lado primario y del lado secundario.
10. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** en las etapas b)-d) se realiza una medición del comportamiento de magnetización del transformador de tensión (20) mediante la aplicación de señales de prueba con diferentes tensiones y frecuencias.
11. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

caracterizado porque

se determina la relación de transformación del transformador de tensión (20) en las etapas b)-d).

- 5 12. Método, según la reivindicación 11, **caracterizado porque** se aplica una señal de prueba con una tensión comprendida entre el 3 % y el 80 % de la tensión nominal del transformador de tensión (20) al transformador de tensión (20) en el lado primario para determinar la relación de transformación.
- 10 13. Método, según la reivindicación 11 o 12, **caracterizado porque** se mide una relación de transformación total del transformador de tensión (20), una relación de transformación de un transformador de tensión inductivo del transformador de tensión (20) y una relación de transformación de un divisor de tensión capacitivo del transformador de tensión (20).
- 15 14. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** al determinar la precisión del transformador de tensión (20) se tiene en cuenta automáticamente un ajuste del devanado realizado durante la fabricación del transformador de tensión (20).
- 20 15. Método, según la reivindicación 14 y una de las reivindicaciones 11-13, **caracterizado porque** el ajuste del devanado se tiene en cuenta al determinar la relación de transformación del transformador de tensión (20).
- 25 16. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la respuesta de la prueba se detecta utilizando un método de medición de cuatro hilos.
- 30 17. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el método se lleva a cabo para un transformador de tensión (20) configurado como transformador de tensión inductivo o para un transformador de tensión (20) configurado como transformador de tensión capacitivo.
- 35 18. Método, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el método se lleva a cabo con la ayuda de un dispositivo de ensayo portátil (10) en el lugar de instalación del transformador de tensión (20).
- 40 19. Dispositivo (10) para ensayar un transformador de tensión (20) que comprende una fuente de señal de prueba (11) para generar una señal de prueba a aplicar al transformador de tensión (20), un dispositivo de registro de la respuesta de la prueba (13) para detectar una respuesta de prueba del transformador de tensión (20) dependiente de la señal de prueba, y un dispositivo de evaluación (14) diseñado de forma que simule el convertidor de tensión mediante un circuito equivalente (30) y determine automáticamente los valores de los componentes del circuito equivalente (30) en función de la respuesta de prueba del transformador de tensión (20), para determinar automáticamente, sobre la base de la respuesta de la prueba y del circuito equivalente (30) al que se han asignado los valores determinados para los componentes, una precisión del transformador de tensión (20) en relación con el circuito equivalente (30) y convertir esta precisión en una precisión del transformador de tensión (20) en relación con una condición de funcionamiento, determinando así el dispositivo de evaluación (14) una desviación de tensión en relación con el circuito equivalente (30) y/o un ángulo de error del transformador de tensión (20) en relación con el circuito equivalente (30) para diferentes cargas, tensiones de funcionamiento y/o frecuencias de funcionamiento del transformador de tensión (20), y convirtiéndolo en una desviación de tensión correspondiente o un ángulo de error correspondiente para los casos de funcionamiento correspondientes del transformador de tensión (20).
- 45 20. Dispositivo, según la reivindicación 19, **caracterizado porque** el dispositivo (20) está configurado como dispositivo de ensayo portátil para realizar una prueba in situ del transformador de tensión (20).
- 50 21. Dispositivo, según una de las reivindicaciones 19-20, **caracterizado porque** el dispositivo está diseñado para llevar a cabo el método conforme a una de las reivindicaciones 1-18.
- 55

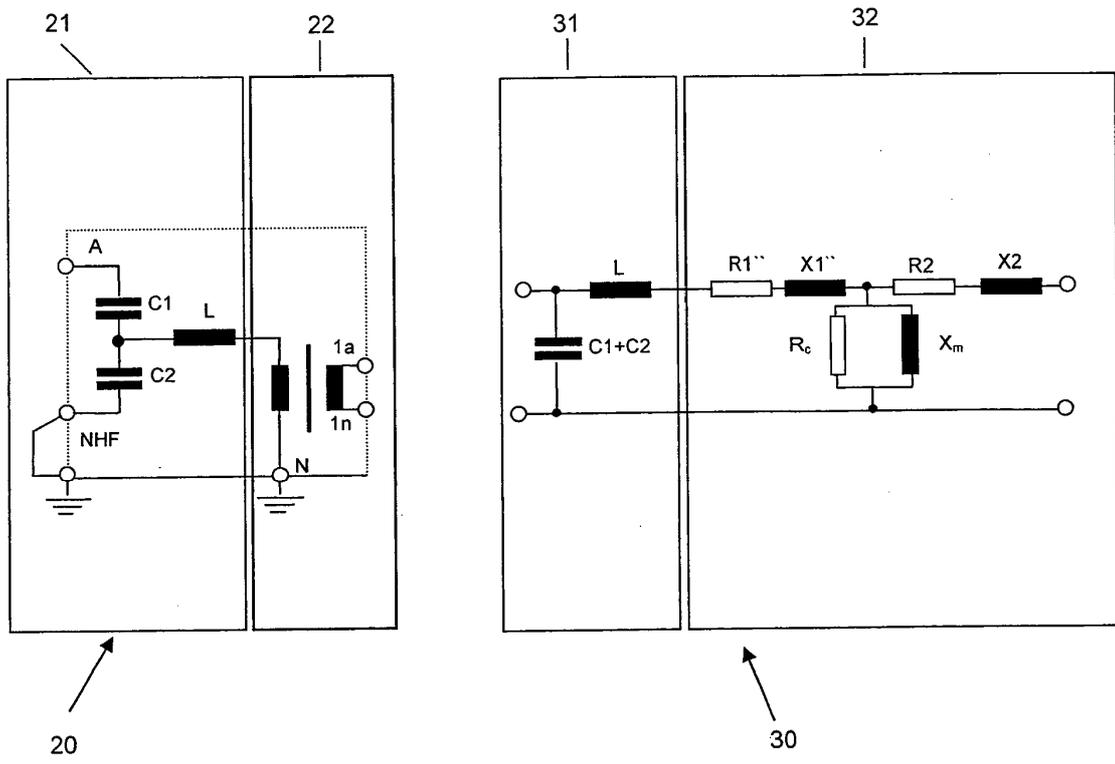


Fig. 1

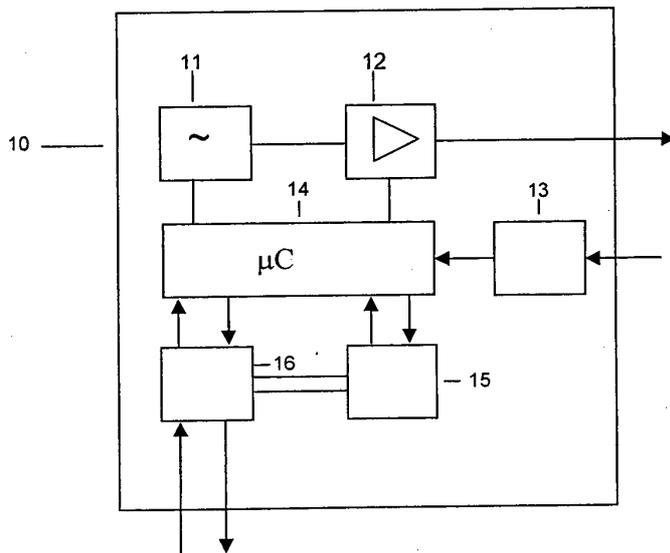


Fig. 2

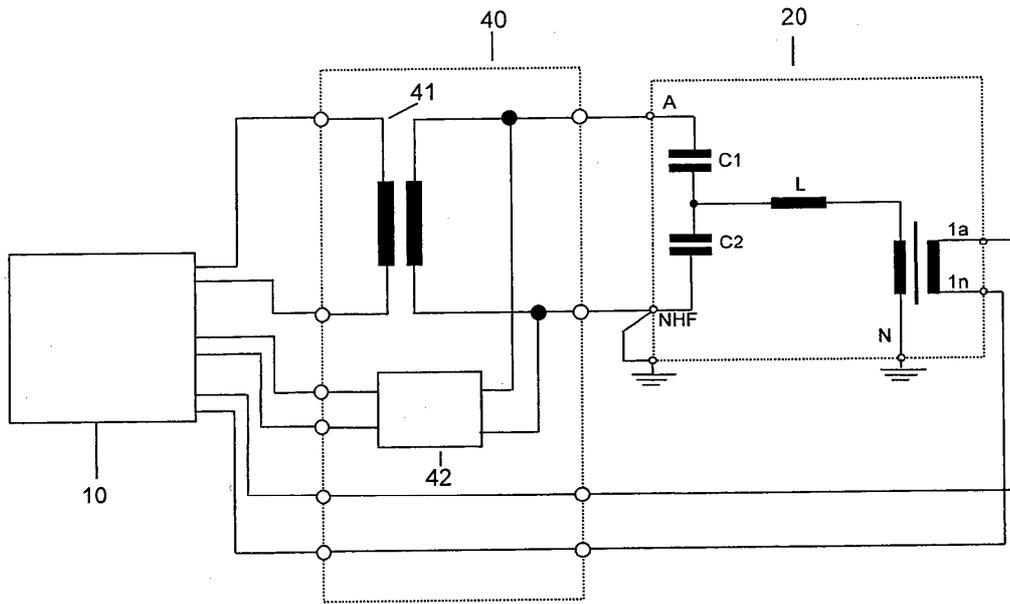


Fig. 3

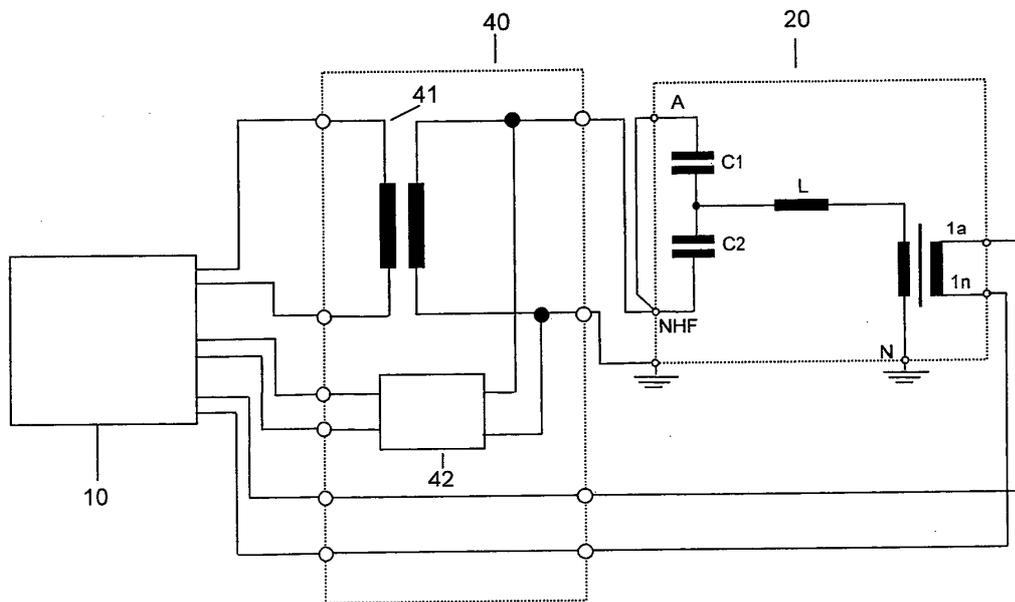


Fig. 4

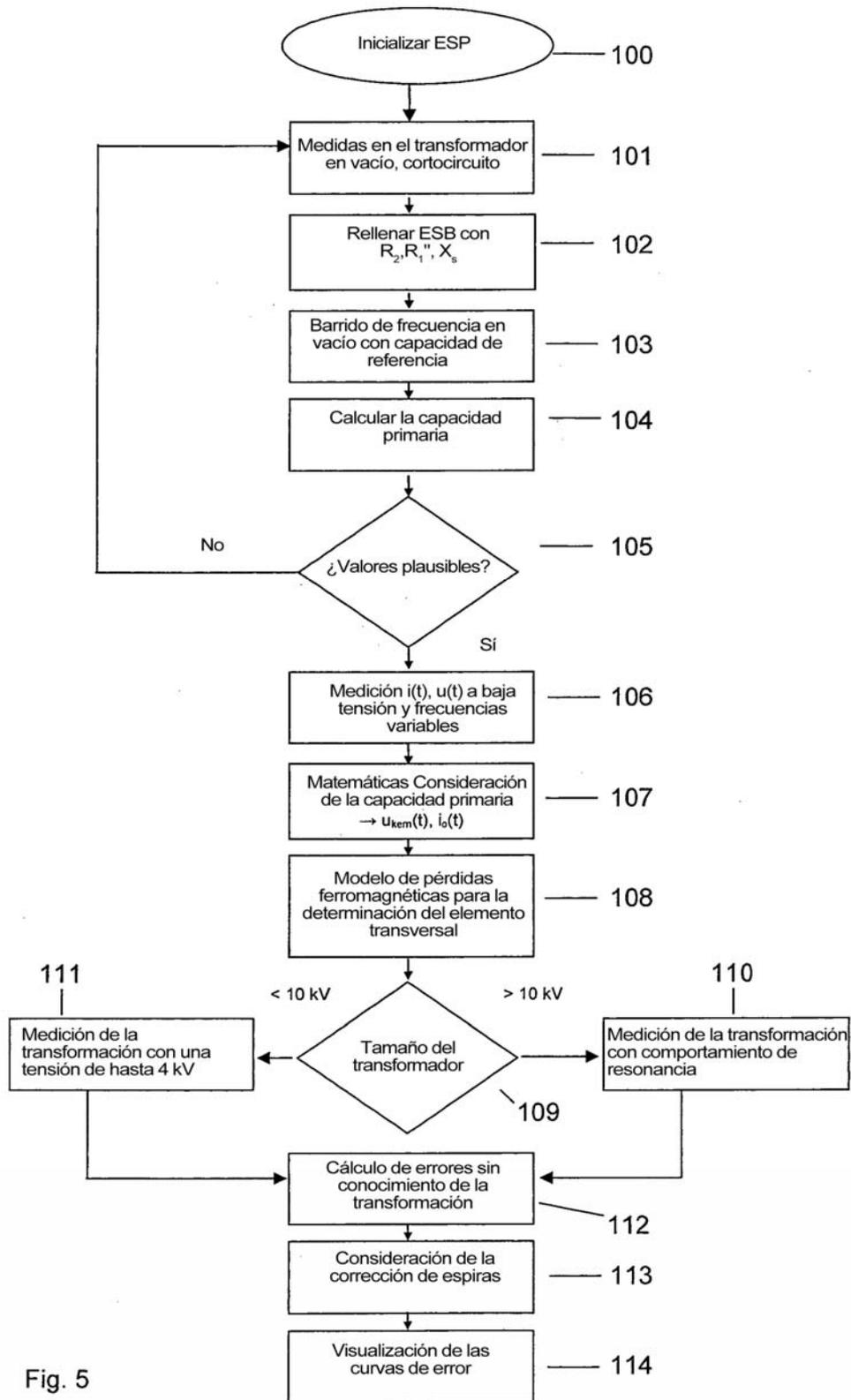


Fig. 5

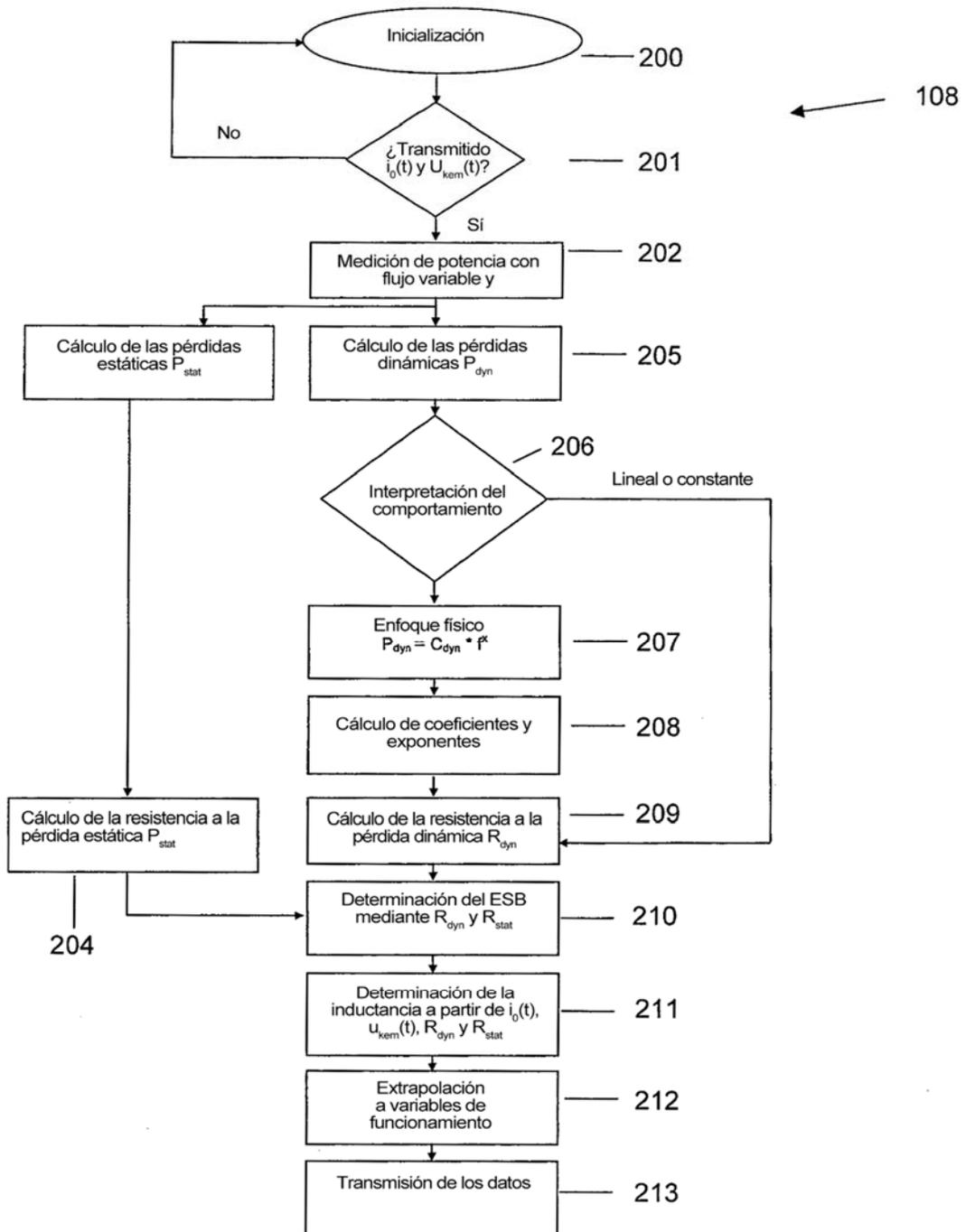


Fig. 6

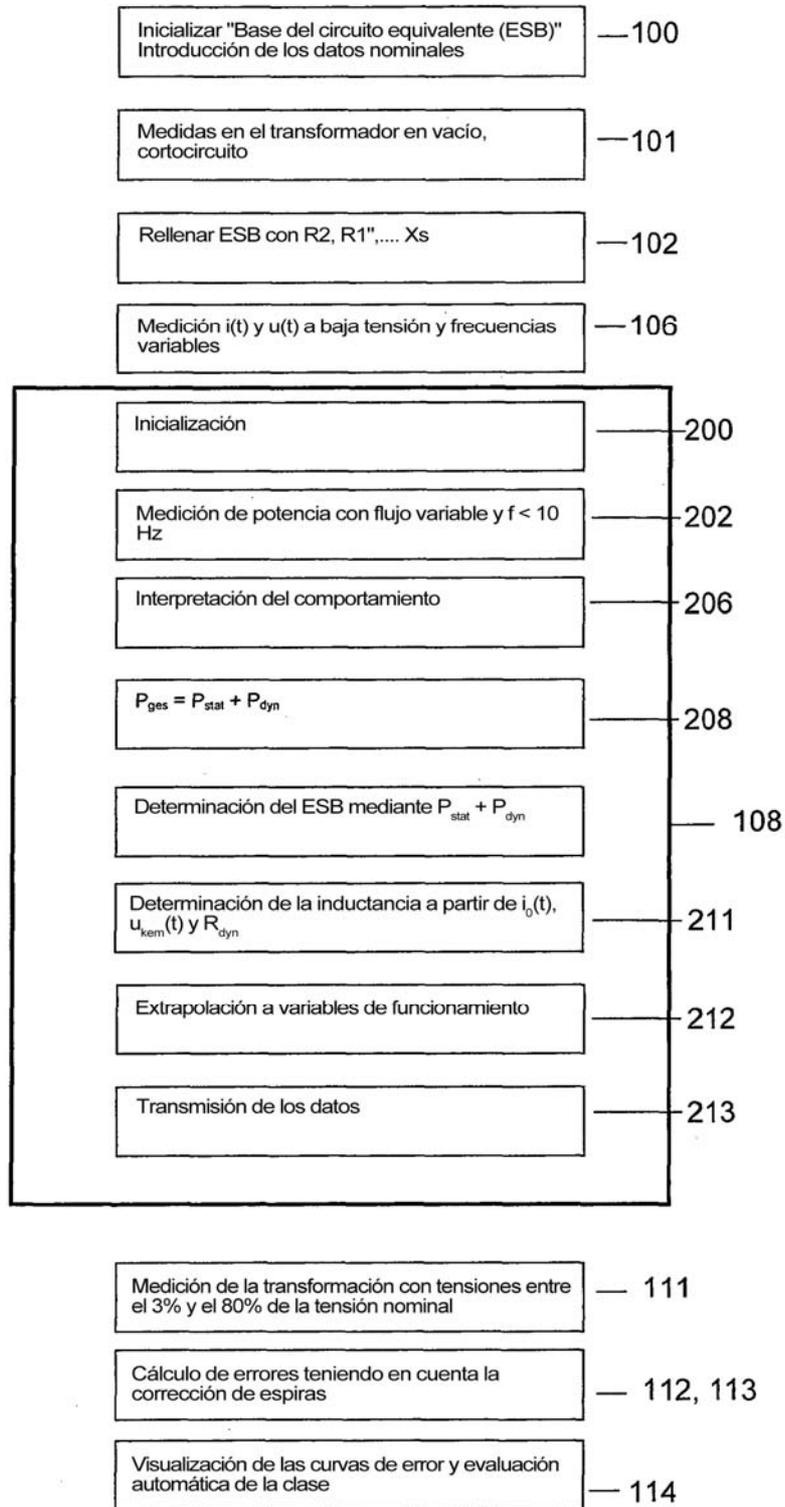


Fig. 7