

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 599 306**

51 Int. Cl.:

H02M 1/00 (2006.01)

G01R 31/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.05.2009 PCT/EP2009/055643**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.11.2009 WO09138370**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.05.2009 E 09745702 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.07.2016 EP 2283567**

54 Título: **Un método y un dispositivo para estimar la fuerza de apriete sobre un conjunto de arrollamientos de un transformador**

30 Prioridad:

14.05.2008 EP 08156186

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

01.02.2017

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**WASS, TORBJÖRN y
BENGTSSON, TORD**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 599 306 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

Un método y un dispositivo para estimar la fuerza de apriete sobre un conjunto de arrollamientos de un transformador

CAMPO DEL INVENTO

5 La presente invención se refiere a un método y un dispositivo para estimar la fuerza de apriete sobre un conjunto de arrollamientos de un transformador o reactancia, comprendiendo el conjunto de arrollamientos al menos un arrollamiento con conexiones y un núcleo de hierro. La invención es práctica y útil para determinar las fuerzas de apriete del arrollamiento de un transformador de potencia en servicio in situ.

TÉCNICA ANTERIOR

10 Los transformadores de potencia necesitan resistir los efectos dinámicos de cortocircuito sin daños. Sin embargo durante un cortocircuito, las fuerzas electromagnéticas sobre el conjunto de arrollamientos de un transformador de potencia son muy grandes. Por tanto, los arrollamientos son apretados para resistir las fuerzas electromagnéticas durante un cortocircuito. Debido al envejecimiento y a la contracción del material, a los ciclos térmicos repetidos, cortocircuitos y similares, las fuerzas de apriete disminuyen durante la vida útil del transformador. Una fuerza de apriete disminuida reducirá consecuentemente la capacidad de resistir al cortocircuito de un transformador de potencia. Por tanto es importante evaluar cómo están de rígidamente apretados los paquetes de arrollamientos para asegurar la capacidad de resistencia a los cortocircuitos de un transformador.

15 Para determinar las fuerzas de apriete de un conjunto de arrollamientos de un transformador de potencia, convencionalmente el interior del transformador es inspeccionado, por ejemplo midiendo el par de los pernos de la placa de presión, lo que sin embargo requiere que el transformador sea puesto fuera de servicio durante un tiempo considerable mientras el transformador ha de ser drenado de aceite y a menudo la parte activa ha de ser levantada fuera del depósito. Adicionalmente, hay siempre un riesgo de contaminación siempre que el depósito de un transformador es abierto.

20 Es sabido que la característica de tensión-deformación fuertemente no lineal de la placa de presión utilizada en el aislamiento del transformador da lugar a una frecuencia resonante mecánica que depende de las fuerzas de apriete sobre los arrollamientos. Si la fuerza de apriete es reducida la frecuencia resonante magnética es desplazada a frecuencias inferiores. Así, determinando la frecuencia resonante mecánica pueden ser determinada las fuerzas de apriete.

25 Una patente SU1390643 ha descrito un método para inspeccionar la calidad de impregnación de los arrollamientos de dispositivos eléctricos, tales como motores, bobinas de transformadores, bobinas de choque, etc. La inspección está basada en el fenómeno físico de vibración generado al hacer pasar una corriente de impulso a través del arrollamiento, después de lo cual la calidad del arrollamiento es evaluada a partir de la señal de vibración.

30 Un modelo de utilidad Chino CN2864705Y ha descrito un dispositivo que utiliza la excitación de una fuente de alimentación de frecuencia de barrido para detectar un estado del arrollamiento de un transformador. El dispositivo comprende un módulo de excitación que incluye un transformador de excitación y una fuente de corriente constante de frecuencia variable para suministrar una corriente al arrollamiento de alta tensión del transformador detectado, un módulo de recogida de datos que incluye un sensor para medir vibraciones de diferentes frecuencias resonantes mecánicas, un amplificador de carga y un colector de datos, y un módulo de control para controlar y ajustar magnitudes de la corriente alimentada y del rango de la frecuencia de salida de la fuente de corriente constante de frecuencia variable y para analizar el espectro de las frecuencias resonantes mecánicas basándose en la vibración medida y en la determinación del estado del arrollamiento del transformador.

35 Un método numérico para determinar la frecuencia resonante mecánica de arrollamientos puede ser encontrado en un documento, titulado "Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces, Part 2 - Windings and clamps as a combined system", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-92, Nº 5, Sept-Oct. 1973, pp. 1567-1576. Este método presenta una solución numérica, o un modelo matemático para calcular la frecuencia resonante mecánica de los arrollamientos, siendo a continuación comparadas las frecuencias resonantes calculadas con unas ensayadas. El documento tiene conocimiento de que la tensión-deformación no lineal de la placa de presión utilizada en el aislamiento del transformador da lugar a la frecuencia resonante mecánica del arrollamiento que depende de las fuerzas de apriete. Sin embargo, el método está basado en un modelo matemático para calcular la frecuencia resonante mecánica de arrollamientos en lugar de estarlo en una medición directamente in situ. Esto significa que una variación del modelo ha de ser llevada a cabo. Sin embargo, esto no es práctico para un transformador in situ ya que está basado en bobinas en un laboratorio como la técnica utilizada.

40 Aunque se ha sugerido que la fuerza de apriete puede ser determinada por análisis de vibraciones del transformador, y la frecuencia resonante mecánica del arrollamiento se sabe que depende de las fuerzas de apriete sobre los arrollamientos de un transformador, no existe hoy en día un método práctico y útil para determinar la frecuencia resonante mecánica de un conjunto de arrollamientos de un transformador.

Es también de interés general saber cuánto suena un transformador o reactancia. Un modo de encontrarlo es determinar las frecuencias resonantes del transformador o de la reactancia. Hay una necesidad de determinar las frecuencias resonantes de un modo práctico, por ejemplo in situ y sin operaciones complicadas.

OBJETOS Y RESUMEN DE LA INVENCION

- 5 Un objeto de la presente invención es proporcionar un método perfeccionado para estimar una fuerza de apriete sobre un conjunto de arrollamientos de un transformador o reactancia, que sea adecuado para ser llevado a cabo in situ.

Este objeto es conseguido mediante un método como se ha definido en la reivindicación 1.

- 10 Tal método comprende suministrar un impulso de corriente a las conexiones del arrollamiento con el fin de excitar el arrollamiento, medir las vibraciones del conjunto de arrollamientos generadas por el impulso de corriente, calcular la frecuencia resonante mecánica basado en las vibraciones medidas, y estimar las fuerzas de apriete sobre los paquetes de arrollamiento basado en la frecuencia resonante mecánica calculada y una relación predeterminada entre la frecuencia resonante mecánica esperada y la fuerza de apriete.

- 15 Cuando un arrollamiento es expuesto a un impacto oscilará en una pluralidad de modos de vibración. Sin embargo, se necesita que un modo de vibración particular sea identificado o medido dependiendo del propósito de una aplicación. De acuerdo con la invención, suministrando un impulso de corriente, el arrollamiento es excitado en el modo de vibración deseado.

Aunque las excitaciones de corriente pueden excitar los arrollamientos, no todas ellas excitan el modo de vibración deseado con suficiente intensidad. Por ejemplo, la corriente de 50 Hz de estado estacionario durante el funcionamiento nominal solo excita 50 Hz y sus armónicos. Así, este método tiene una limitación.

- 20 De acuerdo con la invención, un impulso de corriente es inyectado a través del arrollamiento. Por ello, se genera una corriente en este arrollamiento y se excita el modo de vibración deseado.

De acuerdo con la invención, un condensador junto con la inductancia del arrollamiento forma un circuito eléctrico resonante. El condensador es seleccionado de manera que la frecuencia resonante del circuito eléctrico resonante esté próxima o sea mayor que la frecuencia resonante mecánica esperada de los arrollamientos.

- 25 Para excitar la resonancia simétrica axial, la capacitancia del condensador debería ser suficiente. Una capacitancia suficiente determina un tiempo de subida apropiado del impulso de corriente para excitar la resonancia simétrica axial.

- 30 La invención hace posible excitar el modo de vibración deseado. Por tanto, por ejemplo, este es un método simple y práctico de determinar la frecuencia resonante mecánica del modo de vibración deseado para un transformador comparado con el drenaje del aceite de dentro del transformador para permitir la inspección del interior. Las vibraciones pueden ser medidas simplemente fijando un aparato de medición en el exterior de la pared del depósito de un transformador. La frecuencia resonante mecánica de arrollamientos puede ser calculada simplemente basándose en las vibraciones medidas.

Entre expertos en vibraciones, el modo de vibración deseado es clasificado como un modo de vibración simétrica axial con extremos fijos para un conjunto de arrollamientos de un transformador.

- 35 Determinando la frecuencia resonante mecánica del modo de vibración simétrica axial pueden ser estimadas las fuerzas de apriete. Con el fin de determinar la frecuencia resonante mecánica del modo de vibración simétrica axial, el arrollamiento debería ser excitado en el modo de vibración simétrica axial. Las vibraciones de los arrollamientos pueden ser medidas y la frecuencia resonante mecánica de los arrollamientos que afecta al apriete puede ser calculada basándose en las vibraciones medidas. La fuerza de apriete de los arrollamientos puede ser estimada basándose en la frecuencia resonante mecánica calculada y una relación predeterminada entre la frecuencia resonante mecánica y la fuerza de apriete. Si la frecuencia resonante mecánica calculada es menor que la frecuencia resonante mecánica esperada, se indica una fuerza de apriete reducida de un transformador ya que cuando las fuerzas de apriete son reducidas la frecuencia resonante mecánica es desplazada a una frecuencia inferior.

- 45 Establecer una relación entre la frecuencia resonante mecánica y la fuerza de su gestión hace la invención más práctica y útil.

De acuerdo con una realización de la invención, la relación predeterminada entre la frecuencia resonante mecánica esperada y el apriete es estimada matemáticamente basándose en la potencia nominal y en la tensión nominal del transformador.

- 50 De acuerdo con una realización de la invención, el conjunto de arrollamientos del transformador comprende un arrollamiento primario y un arrollamiento secundario con conexiones, comprendiendo el método disponer eléctricamente las conexiones del arrollamiento secundario de manera que los arrollamientos sean excitados de manera efectiva en el modo de vibración deseado cuando el impulso de corriente es suministrado a las conexiones del primer arrollamiento.

De acuerdo con una realización preferida de la invención, las conexiones del arrollamiento secundario están dispuestas de manera que el arrollamiento secundario es cortocircuitado. Con el arrollamiento secundario cortocircuitado, todos los arrollamientos son excitados al mismo tiempo en el mismo modo de vibración simétrica axial deseado como durante un cortocircuito. Otra ventaja con el arrollamiento secundario cortocircuitado es que como la impedancia del primer arrollamiento es mucho menor, el impulso de corriente necesita mucha menor tensión que la tensión nominal para excitar los arrollamientos. Por tanto, la tensión necesaria no es una sobretensión que dañará el aislamiento del arrollamiento.

De acuerdo con una realización de la invención, el impulso de corriente tiene un tiempo de subida que está próximo o es más corto que el tiempo de subida de la frecuencia resonante mecánica esperada. Esto mejora la excitación de la resonancia simétrica axial sobre otras resonancias. Por el contrario, o bien numerosas resonancias son excitadas o bien no hay resonancias excitadas. Numerosas resonancias dan como resultado una dificultad para individualizar la resonancia deseada. Una frecuencia resonante mecánica esperada de los arrollamientos de un transformador puede ser calculada aproximadamente de manera previa de acuerdo con el tipo del transformador.

El método de acuerdo con la invención es así útil para determinar fuerzas de apriete en paquetes de arrollamiento de un transformador.

Otro objeto de la invención es proporcionar un dispositivo para estimar una fuerza de apriete sobre un conjunto de arrollamientos de un transformador o reactancia.

El objeto es conseguido por un dispositivo según ha sido definido en la reivindicación 6.

Tal dispositivo comprende un generador de impulsos de corriente configurado para generar un impulso de corriente suficiente para excitar el arrollamiento, medios para suministrar el impulso de corriente al arrollamiento, un sensor para medir vibraciones del transformador o de la reactancia generadas por el impulso de corriente, y una unidad de cálculo configurada para calcular la frecuencia resonante mecánica basándose en las vibraciones medidas y para estimar las fuerzas de apriete sobre los paquetes de arrollamiento basándose en la frecuencia resonante mecánica calculada y una relación predeterminada entre la frecuencia resonante mecánica esperada y la fuerza de apriete.

Tal dispositivo puede ser utilizado como una herramienta de diagnóstico no destructivo para determinar las fuerzas de apriete del arrollamiento de un transformador o de una reactancia in situ. Una medición realizada mediante tal dispositivo no perjudicará a los arrollamientos ya que la tensión utilizada no es una sobretensión.

De acuerdo con una realización de la invención, el sensor es un acelerómetro. Para medir las vibraciones, el acelerómetro es colocado justo sobre el exterior de la pared del depósito de un transformador o de una reactancia. La posición puede ser o bien por encima o bien por debajo del arrollamiento. Utilizar un acelerómetro para obtener la amplitud apropiada de la señal es económico y es fácil realizar la medición in situ.

De acuerdo con una realización de la invención, el generador de impulsos comprende un circuito eléctrico para ser conectado al primer arrollamiento, que incluye un condensador, una fuente de tensión de CC (corriente continua) prevista para cargar el condensador, y un interruptor configurado, tras su activación para generar un impulso de corriente descargando el condensador.

Para inyectar un impulso de corriente el condensador es cargado por la alimentación de tensión de CC y a continuación descargado sobre el primer arrollamiento mediante la conexión del interruptor.

Con el arrollamiento secundario cortocircuitado, la impedancia aparente del primer arrollamiento es menor; por tanto, solamente es necesario un 10-20% de la tensión nominal para obtener una corriente próxima a la corriente nominal, lo que asegura que la tensión necesaria no es una sobretensión que dañará el aislamiento del arrollamiento. Además, es práctico realizar la medición sin necesidad de la tensión nominal. Una tensión nominal necesita un condensador con más capacitancia lo que puede aumentar la complejidad de construcción de tal dispositivo.

De acuerdo con una realización de la invención, un diodo es previsto en paralelo con el condensador. Una ventaja con el diodo es que el impulso de corriente es unipolar y no oscilante. Así, el impulso de excitación puede excitar resonancias en un rango de frecuencias más amplio, lo que hace la invención más flexible en un modo que puede ser utilizado para determinar las frecuencias resonantes mecánicas de arrollamientos en algún rango. Por ejemplo, las frecuencias resonantes mecánicas de un transformador con una potencia nominal de 200 MVA pueden ser de un rango de 75-140 Hz. Adicionalmente, se asegura que la tensión sobre el condensador es siempre positiva. Cuando la tensión resulta negativa, el condensador es descargado sobre el diodo.

Cuando los datos de señal de las vibraciones simétricas axiales son adquiridos, la unidad de cálculo calcula las resonancias simétricas axiales utilizando algunos métodos de análisis bien conocidos, por ejemplo, el análisis de Transformada de Fourier Rápida.

Tal dispositivo es fácil de construir para estimar las fuerzas de apriete sobre los arrollamientos de un conjunto de arrollamientos de un transformador.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La invención será explicada a continuación más estrechamente mediante la descripción de diferentes realizaciones de la invención y con referencia a las figuras adjuntas.

5 La fig. 1 muestra un dispositivo para determinar la frecuencia resonante mecánica de un modo de vibración de los arrollamientos en un conjunto de arrollamientos de un transformador, de acuerdo con una realización de la invención.

Las figs. 2a-c muestran un ejemplo de cómo depende la frecuencia resonante mecánica de la fuerza de apriete mediante una comparación de casos bien apretados (fig. 2a y fig. 2c) y un caso casi sin apriete (fig. 2b).

La fig. 3 muestra un ejemplo del esquema eléctrico del generador de impulsos de corriente, de acuerdo con una realización de la invención.

10 La fig. 4 muestra la estimación de una frecuencia resonante mecánica esperada como una función de la potencia nominal para diferentes tipos de transformadores.

La fig. 5a muestra la corriente a través del arrollamiento durante el impulso de corriente con un tiempo de subida finito.

La fig. 5b muestra la vibración medida sobre los arrollamientos durante el impulso de corriente en la fig. 5a.

La fig. 5c muestran el espectro de la señal de vibración en la fig. 5b.

15 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE REALIZACIONES PREFERIDAS DE LA INVENCION

Esencialmente, una fuerza axial puede ser creada bien mediante un impacto mecánico, por ejemplo un golpe con un martillo, o bien eléctricamente por un impulso de corriente a través del arrollamiento. Es sabido que con el impacto mecánico se excitan numerosas resonancias, lo que hace difícil o casi imposible identificar la frecuencia resonante de los arrollamientos. Adicionalmente, es imposible realizar tal impacto mecánico in situ. Alternativamente, la excitación de corriente puede ser utilizada para excitar el arrollamiento. La excitación de corriente excita fundamentalmente los arrollamientos, lo que hace posible encontrar la frecuencia resonante mecánica cuando los arrollamientos oscilan por la fuerza axial.

20 La excitación más simple es la corriente de 50 Hz de estado estacionario durante funcionamiento normal. Pero esta corriente sólo excita 50 Hz y sus armónicos. La frecuencia resonante mecánica de los arrollamientos es solamente excitada en irrupción y a continuación desaparece en el estado estacionario. Por ello, las frecuencias resonantes mecánicas son difíciles de encontrar utilizando este método. Alternativamente, una corriente de entrada puede ser utilizada para excitar los arrollamientos. Tal método puede ser realizado cerrando los interruptores de un lado del transformador mientras se dejan los interruptores del otro lado abiertos. La corriente de entrada puede excitar sobre un espectro más amplio que el estado estacionario de 50 Hz, sin embargo excita el núcleo y otras partes del transformador también al mismo tiempo. Por tanto, es muy difícil individualizar la frecuencia resonante mecánica de los arrollamientos de las otras resonancias.

25 A continuación se explicará el método de la invención en conexión con un transformador, sin embargo la invención también es aplicable a una reactancia.

35 La fig. 1 ilustra un dispositivo para determinar la frecuencia resonante mecánica de un modo de vibración de los arrollamientos en un conjunto de arrollamientos de un transformador, de acuerdo con una realización de la invención. Como se ha mostrado en la fig. 1, el conjunto de arrollamientos comprende un arrollamiento primario 1 y un arrollamiento secundario 2 con conexiones 1a,1b, 2a y 2b. Un generador 4 de corriente está conectado a las conexiones 1a, 1b del arrollamiento primario 1. La función del generador 4 de corriente es generar un impulso de corriente para crear una fuerza axial que excite los arrollamientos en el modo de vibración deseado. Un sensor 6, por ejemplo un acelerómetro, es colocado en la parte inferior de una pared 3 de depósito para medir las señales de las vibraciones. Las vibraciones medidas por el sensor son adquiridas por una unidad de cálculo 8. Además, las frecuencias resonantes mecánicas son calculadas basándose en las vibraciones medidas y los resultados son presentados en una unidad de presentación 10.

40 Las conexiones 2a, 2b del arrollamiento secundario 2 deberían estar eléctricamente dispuestas de modo que el impulso de corriente excite ambos arrollamientos. En la realización mostrada en la fig. 1, las conexiones del arrollamiento secundario están cortocircuitadas. Esta disposición simula un cortocircuito. En otro caso, el conjunto de arrollamientos de un transformador puede incluir dos o más arrollamientos secundarios. Entonces todos los arrollamientos secundarios están cortocircuitados. En el caso de una reactancia, el arrollamiento secundario 2 no existe y por tanto esta operación es omitida.

45 Alternativamente, con el arrollamiento secundario 2 abierto, la impedancia del arrollamiento primario 1 es alta y, por tanto, se necesita una tensión que esté próxima a una tensión nominal para que sea capaz de excitar los arrollamientos en el modo de vibración deseado. Esto puede correr el riesgo de una sobretensión.

50

Una ventaja con la invención es que excita sólo la frecuencia resonante mecánica con un impulso de corriente, lo que hace fácil medir las vibraciones. Otra ventaja es que la excitación del impulso de corriente excita sobre un espectro relativamente amplio. Así, la invención puede ser aplicada a un amplio rango de transformadores para estimar las fuerzas de apriete de los transformadores.

5 Cuando el impulso de corriente es inyectado a través del arrollamiento primario, estando el arrollamiento secundario dispuesto eléctricamente de manera apropiada, en este ejemplo cortocircuitado, el impulso de corriente crea una fuerza axial, que además hace oscilar a los arrollamientos. Las vibraciones pasan a través del aceite y a la pared del depósito. La amplitud de la señal puede ser muy dependiente de la posición del sensor pero la frecuencia no debería cambiar para diferentes posiciones del sensor. La conexión mecánica desde el arrollamiento al sensor puede ser vista como un filtro,
10 que aumenta y disminuye frecuencias diferentes. Diferentes posiciones del sensor pueden por tanto mejorar diferentes frecuencias. La mejor posición es probablemente en un detalle de construcción rígida con una frecuencia resonante natural que es mucho más elevada que la frecuencia resonante mecánica. En este ejemplo, el sensor está colocado en la parte inferior de la pared del depósito.

15 La unidad de cálculo 10 realiza la adquisición de los datos de señal de las vibraciones, calcula las resonancias simétricas axiales utilizando algunos métodos de análisis bien conocidos, por ejemplo FFT, y presenta los resultados calculados sobre la unidad de presentación 10.

Las figs. 2a-2c reconocen la dependencia de la frecuencia resonante mecánica sobre una fuerza de apriete. Como se ha ilustrado, una fuerza de apriete incrementada da como resultado una frecuencia resonante mecánica incrementada. Por ejemplo, la fig. 2a muestra una frecuencia resonante mecánica significativa cuando los arrollamientos están apretados,
20 mientras que la fig. 2b muestra que la frecuencia resonante mecánica ha disminuido cuando no hay apriete sobre los arrollamientos. La fig. 2c muestra que la frecuencia mecánica resonante es incrementada de nuevo cuando los arrollamientos son apretados de nuevo.

La frecuencia resonante mecánica es denominada el primer modo simétrico axial con ambos extremos fijos, en la siguiente notación " f_2 fix-fix".

25 Se sabe que la característica de deformación-tensión no lineal de la placa de prensado de un transformador da lugar a la f_2 fix-fix que depende de la fuerza de apriete. Consecuentemente, cuando los arrollamientos son excitados en el modo f_2 fix-fix, la frecuencia resonante mecánica f_2 fix-fix de un transformador puede ser calculada basándose en las vibraciones medidas y en un modelo mecánico detallado del transformador.

30 La fig. 3 muestra un ejemplo de un esquema eléctrico del generador 4 de impulsos de corriente de acuerdo con una realización de la invención. El circuito eléctrico del generador 4 de impulsos de corriente comprende una alimentación de tensión de CC 12, un condensador 14, un diodo 16, y los interruptores 18 y 20. Alternativamente también es aplicable un esquema eléctrico sin el interruptor 18.

En esta configuración, el generador 4 de impulsos de corriente es conectado a las conexiones 1a, 1b del arrollamiento primario 1. Las conexiones 2a, 2b del arrollamiento secundario 2 están cortocircuitadas.

35 Uno de los terminales de la alimentación de tensión 12 de CC está conectado a una de las conexiones 1a del arrollamiento primario 1 a través de los interruptores 18 y 20. El otro terminal está conectado a la otra conexión 1b del arrollamiento primario. Preferiblemente, la magnitud de la alimentación de tensión de CC es del orden de un 10-20% de la tensión nominal del transformador. La función de la alimentación de tensión de CC es cargar el condensador 14. El condensador está dispuesto en paralelo con la alimentación de tensión de CC. La capacitancia del condensador
40 depende del tiempo de subida requerido del impulso de corriente como se ha descrito a continuación. La función del condensador es almacenar la energía para generar el impulso de corriente. El interruptor 18 está previsto entre la alimentación de tensión de CC y el condensador. La función del interruptor 18 es cargar el condensador cuando está cerrado. El interruptor 20 está previsto entre el condensador 14 y el diodo 16. La función del interruptor 20 es descargar el condensador para inyectar el impulso de corriente al arrollamiento primario cuando está cerrado. El condensador 14
45 junto con la inductancia del arrollamiento forman un circuito eléctrico resonante. El diodo 16 está dispuesto en paralelo con el condensador. La función del diodo es eliminar la oscilación del circuito eléctrico resonante cuando el impulso de corriente es generado.

50 Para inyectar un impulso de corriente en el arrollamiento primario 1, el condensador 14 es cargado por la alimentación de tensión 12 de CC con el interruptor 18 cerrado y el interruptor 20 abierto, y a continuación el condensador es descargado cerrando el interruptor 20.

Con el fin de excitar solamente la frecuencia resonante mecánica, el impulso de corriente debería ser inyectado con un tiempo de subida t_{subida} próximo o más corto que el tiempo de subida t de la frecuencia resonante mecánica esperada. Esto significa que la frecuencia resonante eléctrica f_0 de la corriente debería estar próxima o ser mayor que la frecuencia resonante mecánica f_2 fix-fix. El circuito resonante eléctrico tiene una frecuencia resonante eléctrica

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

donde f_0 es la frecuencia resonante eléctrica, L es la inductancia de cortocircuito del transformador y C es la capacitancia del condensador 14.

$$L = uk \frac{U_N^2}{P_N \omega_N} \quad (2)$$

- 5 donde U_N es la tensión nominal, P_N la potencia nominal, ω_N la frecuencia de red y uk la impedancia de cortocircuito. C es la capacitancia del condensador que puede ser calculada a partir de las fórmulas (1) y (2).

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} = \frac{P_N \omega_N}{(2\pi f_0)^2 uk U_N^2} \quad (3)$$

Por ejemplo, para la corriente con una frecuencia nominal de 50 Hz, para obtener un impulso de corriente con la misma corriente de pico f_{pico} que la corriente nominal, el condensador 14 debería ser cargado con U_{pico} .

$$10 \quad U_{pico} = Z * I_{pico} = \omega_0 L * \frac{P}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{2}}{U_N} = \sqrt{\frac{2}{3}} uk * U_N \frac{f_0}{50} \quad (4)$$

donde Z es la impedancia de cortocircuito

$$Z = 2\pi f_0 L = f_0 uk \frac{U_N^2}{P_N f_N} \quad (5)$$

Si el impulso de corriente es inyectado en una cuarta parte de período sinusoidal, entonces tenemos un tiempo de subida como

$$15 \quad I_{subida} = \frac{1}{4} \frac{1}{f_0} \quad (6)$$

La capacitancia necesaria es calculada como sigue:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} = \frac{4t_{subida}^2}{\pi^2 L} \quad (7)$$

Sin un modelo detallado de un transformador, la resonancia mecánica f_2 podría ser estimada de manera aproximada a partir de la potencia nominal y de la tensión nominal de un transformador como

$$20 \quad f_2 \propto \frac{1}{\sqrt{MVA}} \quad (8)$$

donde MVA es la potencia nominal de un transformador. Por tanto, una relación entre la frecuencia resonante mecánica esperada y la fuerza de apriete puede ser predeterminada.

- 25 La fig. 4 muestra que la frecuencia resonante mecánica esperada de los arrollamientos es estimada como una función de la potencia nominal para diferentes tipos de transformadores. La figura ilustra que diferentes tipos de transformadores tienen diferentes resonancias de arrollamiento. Debido a que la frecuencia resonante eléctrica f_0 del impulso de corriente debería estar próxima o ser mayor que la frecuencia resonante mecánica f_2 *fix-fix*, f_2 en la fórmula (8) puede ser utilizada en la fórmula (6) para determinar el tiempo de subida t_{subida} y por tanto la capacitancia C puede ser determinada con la fórmula (7). La fig. 4 también muestra que para un transformador con una potencia nominal como 200 MVA, las frecuencias resonantes mecánicas pueden ser del orden de 75-140 Hz. Para estimar la fuerza de apriete, la frecuencia resonante mecánica calculada puede ser comparada con la frecuencia resonante esperada, si la frecuencia resonante mecánica calculada es menor que la frecuencia resonante mecánica esperada se indica una fuerza de apriete reducida.

- 30 La fig. 5a muestra la corriente a través del arrollamiento durante el impulso de corriente. La corriente alcanza su pico en el tiempo de subida t_{subida} . La fig. 5a también muestra que, con un diodo dispuesto en paralelo con el condensador, las corrientes son mantenidas por la inductancia y decaen lentamente debido a las pérdidas en el arrollamiento después de

que una corriente alcance su pico.

La fig. 5b muestra la vibración medida en los arrollamientos durante el impulso de corriente mostrado en la fig. 5a. Obsérvese que el tiempo de subida de la oscilación es aproximadamente el mismo que t_{subida} .

5 La fig. 5c muestra el espectro de la señal de vibración en la fig. 5b. El valor de pico es una estimación de la frecuencia resonante mecánica, que puede, por ejemplo, ser utilizada para estimar la fuerza de apriete sobre los arrollamientos de un transformador.

10 Para ser capaz de calcular la frecuencia resonante basándose en las vibraciones medidas de los arrollamientos, pueden utilizarse varios métodos. Por ejemplo, la transformada de Fourier digital es un algoritmo efectivo para análisis espectral. Además, pueden aplicarse métodos de ajuste en casos en los que el análisis espectral no es adecuado. Para un ejemplo, como la excitación de impulso de corriente da una corta duración de la señal, el análisis espectral debería ser realizado en un marco de tiempo más bien corto para evitar influencias perturbadoras. Sin embargo, debido a la propiedad de la transformada de Fourier, la resolución de frecuencia, Δf , está limitada debido a que $\Delta f = 1/T$, donde T es la duración de tiempo de la señal analizada. Para otro ejemplo, el análisis de Fourier algunas veces da una amplia protuberancia con varios picos. Entonces es muy difícil determinar la frecuencia apropiada.

15 Daremos a continuación un ejemplo de un método de ajuste posible que ajusta una parte apropiada de la señal, $\Phi(t)$, a

$$\varphi(t) = A \sin(\omega_{ajuste} t + \rho) e^{-t/\tau} + V_{CC} \quad (9)$$

donde A es la amplitud, ω_{ajuste} es la frecuencia angular, ρ es la fase, τ es la amortiguación, y V_{CC} es el desplazamiento de CC de la señal. Aunque ω_{ajuste} es de interés principal, los otros parámetros son requeridos para encontrarlo. El método de ajuste se basa en minimizar la suma de desviaciones al cuadrado entre $\Phi(t)$ y $\varphi(t)$:

$$20 \quad d = \sum_{t=T_{inicial}}^{t=T_{final}} |\Phi(t) - \varphi(t)|^2 \quad (10)$$

El procedimiento es el siguiente:

1. Se seleccionan valores de inicio para todos los parámetros.
 2. Se establece un escalón inicial para cada parámetro.
 3. Para cada parámetro:
 - 25 a. Cambiar por el escalón hasta que d ya no disminuye;
 - b. El nuevo valor de parámetro está en un mínimo d ;
 4. Disminuir escalón;
 5. Si el escalón es mayor que el valor prescrito, que puede ser ajustado por un operador, volver a 3;
 6. Listo.
- 30 Este método es muy sensible a los valores iniciales. Por tanto el operador puede necesitar ajustar los valores iniciales para ayudar al algoritmo a converger. Especialmente la amplitud y la frecuencia iniciales son sensibles a este respecto.

Con estos dos métodos, las resonancias mecánicas pueden ser calculadas basándose en las vibraciones medidas y las fuerzas de apriete sobre un conjunto de arrollamientos de un transformador pueden ser estimadas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para estimar una fuerza de apriete de arrollamientos sobre un conjunto de arrollamientos de un transformador comprendiendo el conjunto de arrollamientos al menos un arrollamiento (1) con conexiones y un núcleo de hierro, comprendiendo el método:

- 5 – generar (4) un impulso de corriente suficiente para excitar el arrollamiento en un modo de vibración deseado,
- suministrar el impulso de corriente a las conexiones del arrollamiento,
- medir (6) vibraciones del conjunto de arrollamientos generadas por el impulso de corriente,
- calcular (8) una frecuencia resonante mecánica basándose en las vibraciones medidas, y
- 10 – estimar la fuerza de apriete sobre los paquetes de arrollamientos basándose en la frecuencia resonante mecánica calculada y en una relación predeterminada entre una frecuencia resonante mecánica esperada de dicho modo de vibración deseado y la fuerza de apriete, por lo que

el impulso de corriente es generado por un generador (4) de impulsos que incluye un condensador (14) que junto con el arrollamiento (1) forma un circuito eléctrico resonante, y el condensador (14) es seleccionado de manera que la frecuencia resonante de dicho circuito resonante esté próxima o sea mayor que la frecuencia resonante mecánica calculada del arrollamiento con el fin de generar un impulso de corriente con un tiempo de subida suficiente para excitar el arrollamiento (1) en dicho modo de vibración deseado.

15

2. El método según la reivindicación 1, en el que dicho modo de vibración deseado es un modo de vibración simétrica axial con extremos fijos para un conjunto de arrollamientos de un transformador.

3. El método según la reivindicación 1 o 2, en el que dicho conjunto de arrollamientos del transformador comprende un arrollamiento primario (1) y un arrollamiento secundario (2) con conexiones, comprendiendo el método disponer eléctricamente las conexiones del arrollamiento secundario (2) de manera que los arrollamientos (1, 2) son excitados en el modo de vibración, y el impulso de corriente es suministrado a las conexiones del arrollamiento primario (1).

20

4. El método según la reivindicación 2 o 3, en el que las conexiones del arrollamiento secundario (2) están dispuestas de manera que el arrollamiento secundario (2) esté cortocircuitado.

5. El método según las reivindicaciones 1-4, en el que la relación predeterminada entre la frecuencia resonante mecánica calculada y el apriete es estimada matemáticamente basándose en la potencia nominal y en la tensión nominal del transformador.

25

6. Un dispositivo para estimar una fuerza de apriete de un arrollamiento sobre un conjunto de arrollamientos de un transformador, comprendiendo el conjunto de arrollamientos al menos un arrollamiento (1) con conexiones (1a, 1b) y un núcleo de hierro, comprendiendo el dispositivo:

- 30 – un generador (4) de impulsos de corriente configurado para generar un impulso de corriente suficiente para excitar el arrollamiento (1) en un modo de vibración deseado,
- un medio (12) de alimentación de corriente para alimentar el impulso de corriente al arrollamiento (1),
- 35 – un sensor (6) para medir vibraciones del conjunto de arrollamientos del transformador generadas por el impulso de corriente, y
- una unidad de cálculo (8) configurada para calcular dicha frecuencia resonante mecánica basándose en las vibraciones medidas y para estimar las fuerzas de apriete sobre los paquetes de arrollamientos basándose en la frecuencia resonante mecánica calculada y una relación predeterminada entre la frecuencia resonante mecánica esperada de dicho modo de vibración deseado y la fuerza de apriete, en que

el generador de impulsos incluye un condensador (14) que junto con el arrollamiento (1) forma un circuito eléctrico resonante, y el condensador (14) es seleccionado de manera que la frecuencia resonante de dicho circuito resonante esté próxima o sea mayor que la frecuencia resonante mecánica esperada del arrollamiento con el fin de generar un impulso de corriente con un tiempo de subida suficiente para excitar el arrollamiento en dicho modo de vibración deseado.

40

7. El dispositivo según la reivindicación 6, comprendiendo dicho conjunto de arrollamientos del transformador un arrollamiento primario (1) y un arrollamiento secundario (2) con conexiones (1a, 1b, 2a, 2b), en que las conexiones (2a, 2b) del arrollamiento secundario (2) están dispuestas eléctricamente de manera que los arrollamientos son excitados en el modo de vibración deseado, y el impulso de corriente es suministrado a las conexiones del arrollamiento primario (1).

45

8. El dispositivo según la reivindicación 7, en el que las conexiones (2a, 2b) del arrollamiento secundario (2) están

dispuestas de modo que el arrollamiento secundario (2) esta cortocircuitado.

9. El dispositivo según las reivindicaciones 6-8, en el que dicho sensor (6) es un acelerómetro.

5 10. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 6-9, en el que el generador de impulsos comprende un circuito eléctrico para ser conectado al arrollamiento primario (1), incluyendo dicho condensador (14), una alimentación de tensión (12) de CC prevista para cargar el condensador (14), y un interruptor (20) configurado, después de activación, para generar un impulso de corriente mediante la descarga del condensador (14).

11. El dispositivo según la reivindicación 10, en el que un diodo (16) está dispuesto en paralelo con el condensador (14).

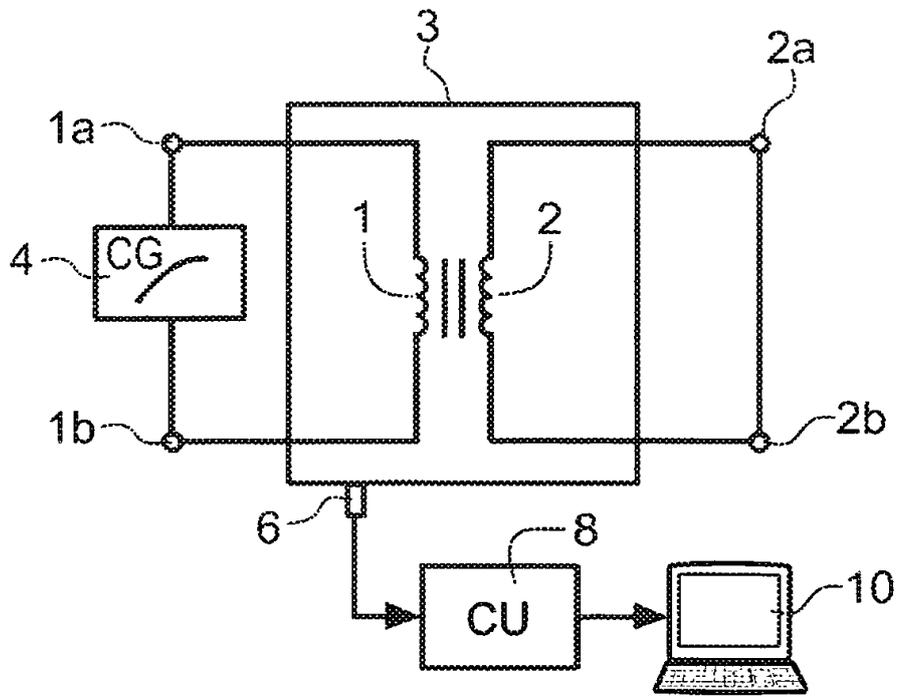


Fig. 1

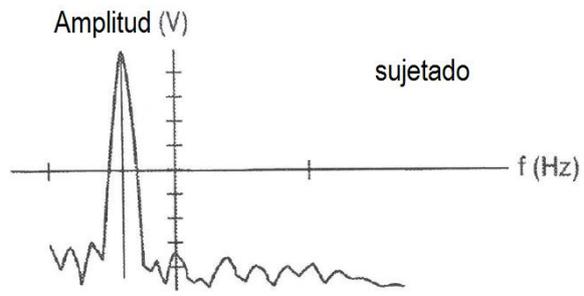


Fig. 2a

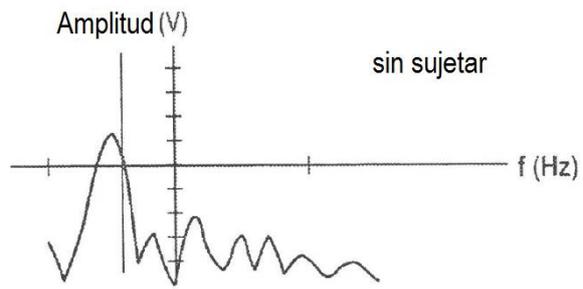


Fig. 2b

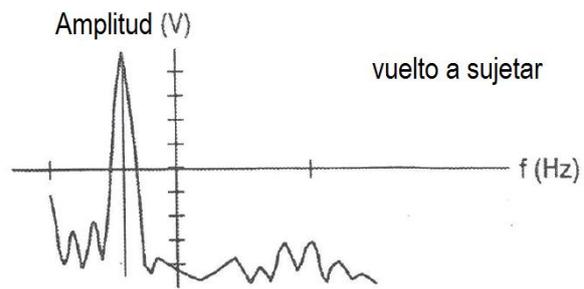


Fig. 2c

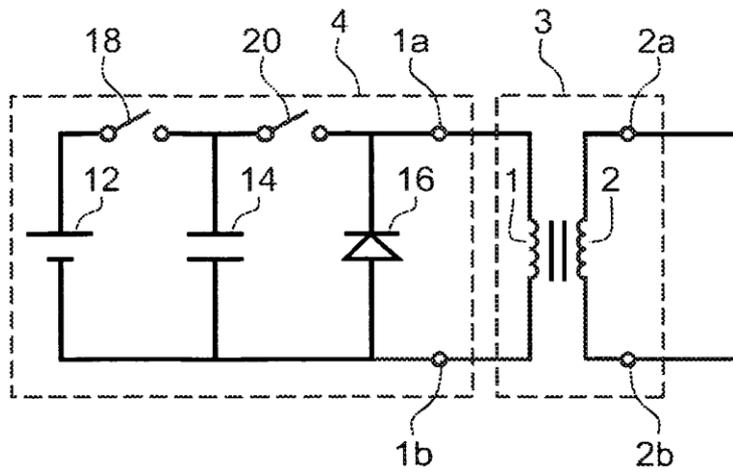


Fig. 3

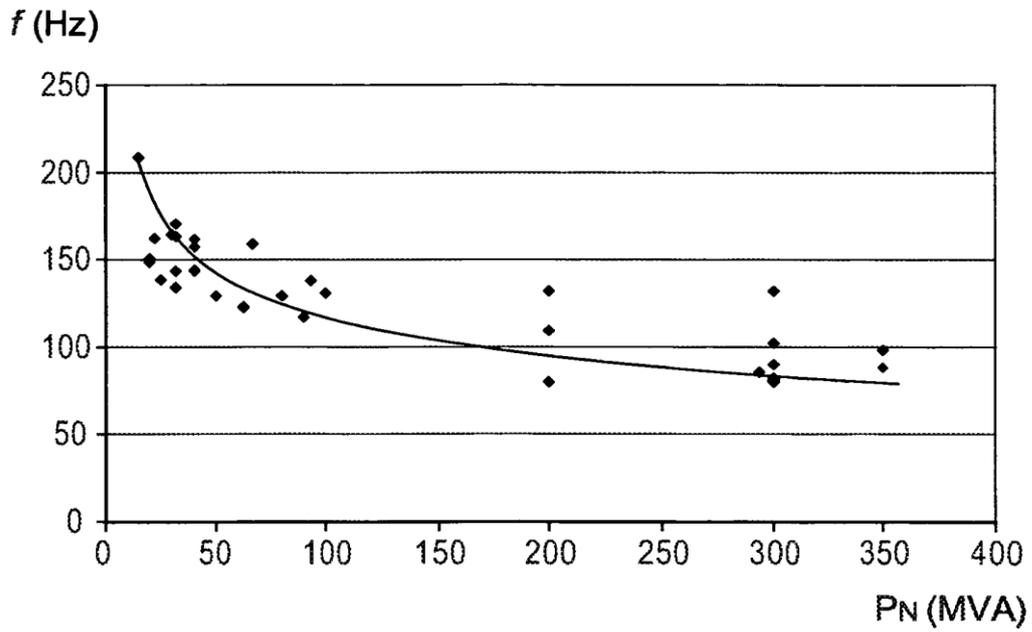


Fig. 4

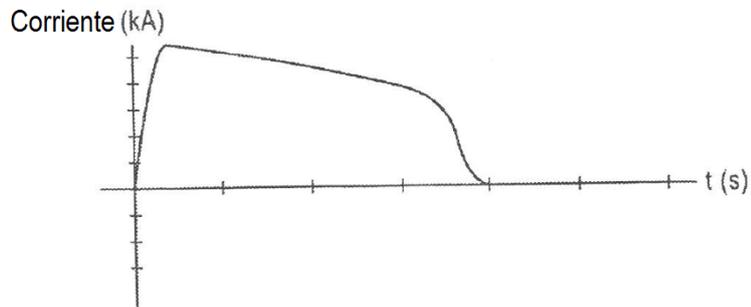


Fig. 5a

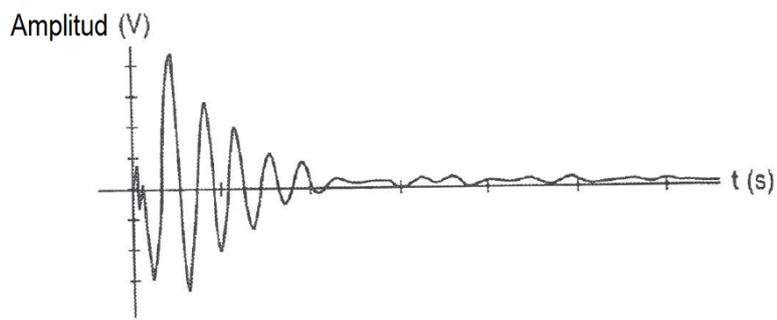


Fig. 5b

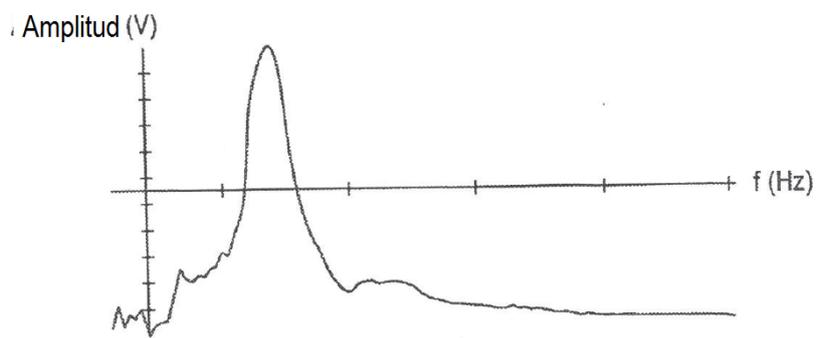


Fig. 5c