



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0912563-9 B1



(22) Data do Depósito: 11/05/2009

(45) Data de Concessão: 09/07/2019

(54) Título: MÉTODO E DISPOSITIVO PARA ESTIMAR A FORÇA DE GRAMPEAMENTO SOBRE UM PACOTE DE ENROLAMENTO DE UM TRANSFORMADOR OU REATOR

(51) Int.Cl.: H02M 1/00; G01R 31/06.

(30) Prioridade Unionista: 14/05/2008 EP 08 156186.2.

(73) Titular(es): ABB RESEARCH LTD..

(72) Inventor(es): TORBJÖRN WASS; TORD BENGTSSON.

(86) Pedido PCT: PCT EP2009055643 de 11/05/2009

(87) Publicação PCT: WO 2009/138370 de 19/11/2009

(85) Data do Início da Fase Nacional: 11/11/2010

(57) Resumo: MÉTODO E DISPOSITIVO PARA ESTIMAR A FORÇA DE GRAMPEAMENTO SOBRE UM PACOTE DE ENROLAMENTO DE UM TRANSFORMADOR OU REATOR A presente invenção refere-se a um método e a um dispositivo para estimar a força de grampeamento de enrolamento sobre um pacote de enrolamento de um transformador ou reator, o pacote de enrolamento compreendendo pelo menos um enrolamento (1) com conexões (1a, 1b) e um núcleo de ferro. O dispositivo compreende um gerador de pulso de corrente (4) configurado para gerar um pulso de corrente suficiente para excitar o enrolamento, um meio para suprir o pulso de corrente para o enrolamento, um sensor (6) para medir as vibrações do transformador ou reator geradas pelo pulso de corrente, e uma unidade de computação (8) configurada para calcular a dita frequência ressonante mecânica com base na medição das vibrações e estimar as forças de grampeamento sobre os pacotes de enrolamento com base na frequência ressonante mecânica calculada e uma relação predeterminada entre a frequência ressonante mecânica esperada e a força de grampeamento.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**MÉTODO E DISPOSITIVO PARA ESTIMAR A FORÇA DE GRAMPEAMENTO SOBRE UM PACOTE DE ENROLAMENTO DE UM TRANSFORMADOR OU REATOR**".

CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A presente invenção refere-se a um método e um dispositivo para estimar a força de grampeamento sobre um pacote de enrolamento de um transformador ou reator, o pacote de enrolamento compreendendo pelo menos um enrolamento com conexões e um núcleo de ferro. A presente invenção é prática e útil na determinação das forças de grampeamento de enrolamento de um transformador de força em serviço em um local.

ANTECEDENTES DA TÉCNICA

[002] Os transformadores de força precisam resistir aos efeitos dinâmicos de um curto-circuito sem danos. No entanto, durante um curto-circuito, as forças eletromagnéticas sobre o pacote de enrolamento de um transformador de força são muito grandes. Portanto, os enrolamentos são fixados para resistir às forças eletromagnéticas durante um curto-circuito. Devido ao envelhecimento e encolhimento do material, aos repetidos ciclos térmicos, curtos-circuitos e assim por diante, as forças de grampeamento diminuem durante a vida útil do transformador. A diminuição da força de grampeamento, consequentemente, reduzirá a capacidade de suportar curtos-circuitos de um transformador de força. Por isso, é importante avaliar o quão rigidamente os pacotes de enrolamento são fixados de modo a garantir a capacidade de suportar curtos-circuitos de um transformador.

[003] Para determinar as forças de grampeamento de um pacote de enrolamento de um transformador de força, convencionalmente, o interior do transformador é inspecionado, por exemplo, medindo o torque dos parafusos da placa de prensa, o que, contudo, exige que o

transformador seja colocado fora de serviço por um tempo considerável enquanto que o transformador tem de ser drenado de óleo e, muitas vezes, a parte ativa tem de ser levantada para fora do tanque. Além disso, há sempre o risco de contaminação todas as vezes que um tanque de transformador é aberto.

[004] Sabe-se que as características de deformação e tração fortemente não lineares da placa de prensa utilizada no isolamento do transformador dá origem a uma frequência ressonante mecânica que é dependente das forças de grampeamento sobre os enrolamentos. Quando a força de grampeamento é reduzida, a frequência ressonante mecânica é deslocada para frequências mais baixas. Assim, ao se determinar a frequência ressonante mecânica, as forças de grampeamento poderão ser determinadas.

[005] A Patente SU1390643 descreve um método para inspecionar a qualidade de impregnação dos enrolamentos de dispositivos elétricos, tais como motores, bobinas de transformadores, reatores, etc. A inspeção se baseia no fenômeno físico da vibração gerada pela passagem de um pulso de corrente através do enrolamento, na qual a qualidade do enrolamento é avaliada a partir do sinal de vibração.

[006] Um Modelo de Utilidade chinês CN2864705Y descreve um dispositivo que utiliza a excitação de uma fonte de alimentação de frequência de varredura para detectar um estado de enrolamento de um transformador. O dispositivo compreende um módulo de excitação incluindo um transformador de excitação e uma fonte de corrente constante de frequência variável para o suprimento de uma corrente para o enrolamento de alta tensão do transformador detectado, um módulo de coleta de dados incluindo um sensor para medir as vibrações de diferentes frequências ressonantes mecânicas, um amplificador de carga e um coletor de dados, e um módulo de controle para controlar e ajustar as magnitudes da corrente suprida e a faixa da frequência de saída

da fonte de corrente constante de frequência variável e analisar o espectro das frequências ressonantes mecânicas com base na vibração medida e determinar o estado do enrolamento do transformador.

[007] Embora seja sugerido que a força de grampeamento possa ser determinada pela análise das vibrações do transformador, e a frequência ressonante mecânica do enrolamento é conhecida como dependente das forças de grampeamento sobre os enrolamentos de um transformador, nenhum método útil ou prático para se determinar a frequência ressonante mecânica de um pacote de enrolamento de um transformador existe hoje em dia.

[008] É também de interesse geral saber o quanto um transformador ou um reator ressoa. Uma forma de descobrir isso é determinar as frequências ressonantes do transformador ou reator. Há uma necessidade de se determinar as frequências ressonantes de uma forma prática, por exemplo, no local e sem operações complicadas.

OBJETIVOS E SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[009] Um objetivo da presente invenção é prover um método aperfeiçoado para estimar uma força de grampeamento sobre um pacote de enrolamento de um transformador ou reator, que seja apropriado para execução no local.

[0010] Este objeto é alcançado por um método tal como definido na invenção.

[0011] Tal método compreende o suprimento de um pulso de corrente às conexões do enrolamento, a fim de excitar o enrolamento em um modo de vibração desejado, a medição de vibrações do pacote de enrolamento geradas pelo pulso de corrente, o cálculo de uma frequência ressonante mecânica com base nas medições de vibração, e a estimativa da força de grampeamento sobre os pacotes de enrolamento com base na frequência ressonante mecânica calculada e uma relação predeterminada entre a frequência ressonante mecânica espe-

rada do modo de vibração desejado e a força de grampeamento. O método é caracterizado pelo fato de que o pulso de corrente é suprido com um tempo de elevação próximo ou menor que o tempo de elevação da frequência ressonante mecânica esperada.

[0012] Quando um enrolamento é exposto a um impacto, o mesmo irá oscilar em uma pluralidade de modos de vibração. No entanto, um modo de vibração particular é necessário para ser identificado ou medido, dependendo do propósito de uma aplicação. De acordo com a presente invenção, ao se suprir um pulso de corrente, o enrolamento é excitado no modo de vibração desejado.

[0013] Embora as excitações de corrente possam excitar os enrolamentos, nem todas elas excitam o modo de vibração desejado com força suficiente. Por exemplo, a corrente de 50 Hz de estado estacionário durante um funcionamento normal excita apenas 50 Hz e seus harmônicos. Assim, este método apresenta uma limitação.

[0014] De acordo com a presente invenção, um pulso de corrente é injetado através do enrolamento. Deste modo, uma corrente é gerada nesse enrolamento e o modo de vibração desejado é excitado. Para poder excitar o modo de vibração desejado, de acordo com a presente invenção, o pulso de corrente suprido tem um tempo de elevação próximo ou menor que o tempo de elevação da frequência ressonante mecânica do modo de vibração desejado. Isto aumenta a excitação da frequência ressonante mecânica esperada do modo de vibração desejado sobre outras ressonâncias. De outra maneira, inúmeras ressonâncias ou nenhuma ressonância será excitada. Várias ressonâncias resultam na dificuldade de se destacar a ressonância desejada. Uma frequência ressonante mecânica esperada dos enrolamentos de um transformador pode, à grosso modo, ser calculada antecipadamente de acordo com o tipo do transformador.

[0015] A presente invenção torna possível excitar o modo de vi-

bração desejado. Assim, por exemplo, este é um método simples e prático para determinar a frequência ressonante mecânica do modo de vibração desejado para um transformador em comparação à drenagem de óleo para dentro de um transformador a fim de permitir a inspeção do seu interior. As vibrações podem ser medidas simplesmente ligando um aparelho de medição no lado de fora da parede do tanque de um transformador. A frequência ressonante mecânica dos enrolamentos pode ser calculada de uma maneira simples com base na medição das vibrações.

[0016] Entre os especialistas em vibração, o modo de vibração desejado é classificado como um modo de vibração axial simétrica com extremidades fixas para um pacote de enrolamento de um transformador.

[0017] Ao se determinar a frequência ressonante mecânica do modo de vibração axial simétrica, as forças de grampeamento podem ser estimadas. A fim de determinar a frequência ressonante mecânica do modo de vibração axial simétrica, o enrolamento deve ser excitado no modo de vibração axial simétrica. As vibrações dos enrolamentos podem ser medidas e a frequência ressonante mecânica dos enrolamentos que afeta o grampeamento pode ser calculada com base na medição das vibrações. A força de grampeamento dos enrolamentos pode ser estimada com base no cálculo da frequência ressonante mecânica e em uma relação predeterminada entre a frequência ressonante mecânica e a força de grampeamento. Quando a frequência ressonante mecânica calculada é menor do que a frequência ressonante mecânica esperada, uma força de grampeamento reduzida de um transformador é indicada, pois quando as forças de grampeamento são reduzidas, a frequência ressonante mecânica é deslocada para uma frequência menor.

[0018] O estabelecimento de uma relação entre a frequência res-

sonante mecânica e a força de grampeamento torna a invenção mais prática e útil.

[0019] De acordo com uma modalidade da presente invenção, a relação predeterminada entre a frequência ressonante mecânica esperada e o grampeamento é estimada matematicamente com base na potência nominal e na tensão nominal do transformador.

[0020] De acordo com uma modalidade da presente invenção, o pacote de enrolamento do transformador compreende um primeiro enrolamento e um enrolamento secundário com conexões, o método compreendendo a disposição elétrica das conexões do enrolamento secundário de modo que os enrolamentos sejam efetivamente excitados no modo de vibração desejado quando o pulso de corrente é suprido às conexões do primeiro enrolamento.

[0021] De acordo com uma modalidade preferida da presente invenção, as conexões do enrolamento secundário são dispostas de modo que o enrolamento secundário fique em curto-circuito. Com o enrolamento secundário em curto-circuito, todos os enrolamentos são excitados ao mesmo tempo no mesmo modo de vibração axial simétrica desejado como durante um curto-circuito. Uma outra vantagem com o enrolamento secundário em curto-circuito é que, uma vez que a impedância do primeiro enrolamento é muito menor, o pulso de corrente precisa de uma tensão muito menor que a tensão nominal para excitar os enrolamentos. Portanto, a tensão necessária não é uma sobretenção que irá danificar o isolamento do enrolamento.

[0022] O método de acordo com a presente invenção é, portanto, útil para determinar as forças de grampeamento sobre os pacotes de enrolamento de um transformador.

[0023] Outro objetivo da presente invenção é prover um dispositivo para a determinação da frequência ressonante mecânica de um modo de vibração para um pacote de enrolamento de um transformador ou

reator.

[0024] Este objetivo é alcançado por meio de um dispositivo, tal como definido na invenção.

[0025] Tal dispositivo compreende um gerador de pulso de corrente configurado para gerar um pulso de corrente suficiente para excitar o enrolamento, um meio para suprir corrente para o suprimento do pulso de corrente a fim de excitar o enrolamento em um modo de vibração desejado, um sensor para medir as vibrações do pacote de enrolamento do transformador ou reator geradas pelo pulso de corrente, e uma unidade de computação configurada para calcular a frequência ressonante mecânica com base na medição das vibrações e estimar as forças de grampeamento sobre os pacotes de enrolamento com base no cálculo da frequência ressonante mecânica e em uma relação determinada entre uma frequência ressonante mecânica esperada do modo de vibração desejado e a força de grampeamento. O dispositivo é caracterizado pelo fato de que o meio de suprimento de corrente é disposto de modo a suprir o pulso de corrente com um tempo de elevação próximo ou menor que o tempo de elevação da frequência ressonante mecânica esperada do modo de vibração desejado.

[0026] Tal dispositivo pode ser usado como uma ferramenta diagnóstica não destrutiva a fim de determinar as forças de grampeamento de enrolamento de um transformador ou reator no local. A medição realizada por tal dispositivo não irá prejudicar os enrolamentos, já que a tensão utilizada não é uma sobretensão.

[0027] De acordo com uma modalidade da presente invenção, o sensor é um acelerômetro. Para medir as vibrações, o acelerômetro é simplesmente colocado na parte externa da parede de tanque de um transformador ou reator. A posição pode ser acima ou abaixo do enrolamento. O uso de um acelerômetro para obter uma boa amplitude do sinal é econômico e fácil para realizar uma medição no local.

[0028] De acordo com uma modalidade da presente invenção, o gerador de pulso compreende um circuito elétrico a ser conectado ao primeiro enrolamento, incluindo um capacitor, uma fonte de tensão de corrente CC disposta para carregar o capacitor, e uma chave configurada, após ativação, para gerar um pulso de corrente por meio da descarga do capacitor.

[0029] Para injetar um pulso de corrente, o capacitor é carregado por meio da fonte de tensão de corrente CC e, em seguida, descarregado no primeiro enrolamento por meio de comutação da chave.

[0030] Com o enrolamento secundário em curto-circuito, a aparente impedância do primeiro enrolamento é menor, portanto, apenas 10 a 20 % da tensão nominal é necessária para se obter uma corrente próxima à corrente nominal, o que garante que a tensão necessária não seja uma sobretensão que poderá danificar o isolamento do enrolamento. Além disso, é prático se fazer a medição sem a necessidade de uma tensão nominal. A tensão nominal precisa de um capacitor com maior capacitância, o que poderá aumentar a complexidade da construção de tal dispositivo.

[0031] De acordo com uma modalidade da presente invenção, um diodo é disposto em paralelo ao capacitor. Uma vantagem deste diodo é que o pulso de corrente é unipolar e não oscilante. Assim, o pulso de excitação pode excitar ressonâncias em uma faixa de frequência mais ampla, o que torna a presente invenção mais flexível no sentido de que a mesma poderá ser usada para determinar as frequências ressonantes mecânicas de enrolamentos em alguma escala. Por exemplo, as frequências ressonantes mecânicas de um transformador com uma potência nominal de 200MVA pode ser de uma faixa de 75 a 140 Hz. Além disso, é assegurado que a tensão sobre o capacitor seja sempre positiva. Quando a tensão se torna negativa, o capacitor é descarregado pelo diodo.

[0032] De acordo com uma modalidade da presente invenção, o capacitor juntamente com a indutância do enrolamento forma um circuito elétrico ressonante. O capacitor é selecionado de modo que a frequência ressonante do circuito elétrico ressonante fique próxima ou maior do que a frequência ressonante mecânica esperada dos enrolamentos.

[0033] Para excitar a ressonância axial simétrica, a capacitância do capacitor deve ser suficiente. A capacidade suficiente determina um tempo de elevação apropriado do pulso de corrente, a fim de excitar a ressonância axial simétrica.

[0034] Quando os dados do sinal das vibrações axiais simétricas são obtidos, a unidade de computação calcula as ressonâncias axiais simétricas usando alguns métodos de análise bem conhecidos, por exemplo, a análise de Transformada Rápida de Fourier.

[0035] Tal dispositivo é fácil de construir para estimar as forças de grampeamento sobre os enrolamentos de um pacote de enrolamento de um transformador.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[0036] A presente invenção será explicada a seguir mais precisamente por meio da descrição de diferentes modalidades, e com referência às figuras em apenso.

[0037] A figura 1 apresenta um dispositivo para a determinação da frequência ressonante mecânica de um modo de vibração dos enrolamentos em um pacote de enrolamento de um transformador, de acordo com uma modalidade da presente invenção.

[0038] As figuras 2a-c mostram um exemplo de como a frequência ressonante mecânica depende da força de grampeamento por meio de uma comparação de caixas bem grampeadas (figura 2a e figura 2c) e uma caixa quase sem grampeamento (figura 2b).

[0039] A figura 3 mostra um exemplo do esquema elétrico do ge-

rador de pulso de corrente, de acordo com uma modalidade da presente invenção.

[0040] A figura 4 mostra a estimativa de uma frequência ressonante mecânica esperada como uma função da potência nominal para diferentes tipos de transformadores.

[0041] A figura 5a mostra a corrente através do enrolamento durante o pulso de corrente com um tempo de elevação finito.

[0042] A figura 5b mostra a vibração medida nos enrolamentos durante o pulso de corrente da figura 5a.

[0043] A figura 5c mostra o espectro do sinal de vibração da figura 5b.

DESCRIÇÃO DETALHADA DAS MODALIDADES PREFERIDAS DA INVENÇÃO

[0044] Essencialmente, uma força axial pode ser criada por meio de um impacto mecânico, por exemplo, uma batida com um martelo, ou eletricamente por meio de um pulso de corrente através do enrolamento. Sabe-se que, com o impacto mecânico, inúmeras ressonâncias são excitadas, o que torna difícil ou quase impossível identificar a frequência ressonante dos enrolamentos. Além disso, é impossível realizar tal impacto mecânico no local. Alternativamente, a excitação de corrente pode ser usada para excitar o enrolamento. A excitação de corrente excita principalmente os enrolamentos, o que torna possível encontrar a frequência ressonante mecânica quando as bobinas oscilam por meio da força axial.

[0045] A excitação mais simples é a da corrente de 50 Hz de estado estacionário durante uma operação normal. Mas essa corrente só excita 50 Hz e seus harmônicos. A frequência ressonante mecânica dos enrolamentos é excitada somente na partida e depois desaparece no estado estacionário. Portanto, as frequências ressonantes mecânicas são difíceis de se encontrar por meio desse método. Alternativa-

mente, uma corrente de partida pode ser usada para excitar os enrolamentos. Tal método pode ser realizado por meio do fechamento dos disjuntores de um lado do transformador, deixando os disjuntores do outro lado abertos. A corrente de partida pode excitar ao longo de um espectro mais amplo do que o estado estacionário de 50 Hz, no entanto, a mesma excita o núcleo e também outras partes do transformador, ao mesmo tempo. Portanto, é muito difícil isolar a frequência ressonante mecânica dos enrolamentos de outras ressonâncias.

[0046] A seguir, o método da presente invenção será explicado em relação a um transformador, no entanto, a invenção é também aplicável a um reator.

[0047] A figura 1 ilustra um dispositivo para a determinação da frequência ressonante mecânica de um modo de vibração dos enrolamentos em um pacote de enrolamento de um transformador, de acordo com uma modalidade da presente invenção. Conforme mostrado na figura 1, o pacote de enrolamento compreende um primeiro enrolamento 1 e um enrolamento secundário 2 com conexões 1a, 1b, 2a e 2b. Um gerador de corrente 4 é conectado às conexões 1a, 1b do primeiro enrolamento 1. A função do gerador de corrente 4 é gerar um pulso de corrente para criar uma força axial que excita os enrolamentos no modo de vibração desejado. Um sensor 6, por exemplo, um acelerômetro, é colocado no fundo de uma parede de tanque 3 para medir os sinais das vibrações. A medição das vibrações pelo sensor é obtida por uma unidade de computação 8. Mais adiante, as frequências ressonantes mecânicas são calculadas com base nas vibrações medidas e os resultados são exibidos em uma unidade de vídeo 10.

[0048] As conexões 2a, 2b do enrolamento secundário 2 devem ser eletricamente dispostas de tal forma que o pulso de corrente excite os dois enrolamentos. Na modalidade mostrada na figura 1, as conexões do enrolamento secundário estão em curto-circuito. Esta disposi-

ção simula um curto-circuito. Em outro caso, o pacote de enrolamento de um transformador pode incluir dois ou mais enrolamentos secundários. Neste caso, todos os enrolamentos secundários estão em curto-circuito. No caso de um reator, o enrolamento secundário 2 não existe e, portanto, esta etapa é omitida.

[0049] Alternativamente, com o enrolamento secundário 2 aberto, a impedância do primeiro enrolamento 1 é elevada e, portanto, uma tensão que fica próxima de uma tensão nominal é necessária para poder excitar os enrolamentos no modo de vibração desejado. Isso pode envolver o risco de uma sobretensão.

[0050] Uma vantagem da presente invenção é que a mesma excita apenas a frequência ressonante mecânica com um pulso de corrente, o que torna mais fácil medir as vibrações. Outra vantagem é que a excitação de pulso de corrente excita ao longo de um espectro relativamente amplo. Assim, a presente invenção pode ser aplicada a uma ampla faixa de transformadores no sentido de estimar as forças de grampeamento dos transformadores.

[0051] Quando o pulso de corrente é injetado através do primeiro enrolamento, com o enrolamento secundário adequadamente disposto eletricamente, neste exemplo em curto-circuito, o pulso de corrente cria uma força axial, que faz os enrolamentos oscilarem ainda mais. As vibrações passam através do óleo e para a parede do tanque. A amplitude do sinal pode ser muito dependente da posição do sensor, mas a frequência não deve mudar para as diferentes posições do sensor. A conexão mecânica a partir do enrolamento para o sensor pode ser vista como um filtro, aumentando e diminuindo diferentes frequências. Diferentes posições de sensores podem, portanto, reforçar frequências diferentes. A melhor posição é, provavelmente, em um detalhe de construção rígida, com uma frequência ressonante natural, que é muito maior do que a frequência ressonante mecânica. Neste exemplo, o

sensor é colocado na parte inferior da parede do tanque.

[0052] A unidade de computação 10 realiza a obtenção dos dados de sinal das vibrações, calcula as ressonâncias axiais simétricas usando alguns métodos de análise bem-conhecidos, por exemplo, o método FFT, e exibe os resultados calculados na unidade de vídeo 10.

[0053] As figuras 2a-2c reconhecem a dependência da frequência ressonante mecânica de uma força de grampeamento. Conforme ilustrado, um aumento da força de grampeamento resulta em uma frequência ressonante mecânica maior. Por exemplo, a figura 2a mostra uma frequência ressonante mecânica significativa quando os enrolamentos são grampeados, enquanto a figura 2b mostra que a frequência ressonante mecânica é menor quando não há grampeamento nos enrolamentos. A figura 2c mostra que a frequência ressonante mecânica é novamente aumentada quando os enrolamentos são novamente grampeados.

[0054] A frequência ressonante mecânica é indicada no primeiro modo axial simétrico, com ambas as extremidades grampeadas, na seguinte frequência indicada " f_2 fix-fix".

[0055] Sabe-se que a característica de deformação e tração não linear da placa de prensa de um transformador dá origem à frequência f_2 fix-fix que é dependente da força de grampeamento. Consequentemente, quando os enrolamentos são excitados no modo f_2 fix-fix, a frequência ressonante mecânica f_2 fix-fix de um transformador pode ser calculada com base nas vibrações medidas e em um modelo mecânico detalhado do transformador.

[0056] A figura 3 mostra um exemplo de um esquema elétrico do gerador de pulsos de corrente 4 de acordo com uma modalidade da presente invenção. O circuito elétrico do gerador de pulsos de corrente 4 compreende uma fonte de tensão de corrente CC 12, um capacitor 14, um diodo 16 e duas chaves 18 e 20. Alternativamente, um esque-

ma elétrico sem a chave 18 é também aplicável.

[0057] Nesta configuração, o gerador de pulsos de corrente 4 está conectado às conexões 1a, 1b do primeiro enrolamento 1. As conexões 2a, 2b do enrolamento secundário 2 estão em curto-circuito.

[0058] Um dos terminais da fonte de tensão de corrente CC 12 é conectado a uma das conexões 1a do primeiro enrolamento 1 através das chaves 18 e 20. O outro terminal é ligado à outra conexão 1b do primeiro enrolamento. De preferência, a magnitude da fonte de tensão de corrente CC é da faixa de 10 a 20 % da tensão nominal do transformador. A função da fonte de tensão de corrente CC é carregar o capacitor 14. O capacitor é disposto em paralelo com a fonte de tensão de corrente CC. A capacitância do capacitor é dependente do tempo de elevação requerido do pulso de corrente, conforme apresentado abaixo. A função do capacitor é armazenar a energia para gerar o pulso de corrente. A chave 18 é disposta entre a fonte de tensão de corrente CC e o capacitor. A função da chave 18 é carregar o capacitor quando o mesmo se encontra fechado. A chave 20 é disposta entre o capacitor 14 e o diodo 18. A função da chave 20 é descarregar o capacitor para injetar o pulso de corrente para o primeiro enrolamento quando o mesmo se encontra fechado. O capacitor 14 juntamente com a indução de enrolamento formam um circuito elétrico ressonante. O diodo 16 é disposto em paralelo ao capacitor. A função do diodo é eliminar a oscilação do circuito ressonante elétrico quando o pulso de corrente é gerado.

[0059] Para injetar um pulso de corrente no primeiro enrolamento 1, o capacitor 14 é carregado pela fonte de tensão de corrente CC 12 com a chave 18 fechada e a chave 20 aberta, e em seguida o capacitor é descarregado ao fechar a chave 20.

[0060] A fim de excitar somente a frequência ressonante mecânica, o pulso de corrente deve ser injetado com um tempo de elevação

t_{rise} próximo ao ou menor que o tempo de elevação t da frequência ressonante mecânica esperada. Isto significa que a frequência ressonante elétrica f_0 da corrente deve ser próxima à ou maior que a frequência ressonante mecânica f_2 *fix-fix*. O circuito elétrico ressonante tem uma frequência ressonante elétrica.

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

na qual f_0 é a frequência ressonante elétrica, L é a indutância em curto-circuito do transformador e C é a capacitância do capacitor 14.

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

na qual U_N é a tensão nominal, P_N é a potência nominal, ω_N é a frequência de rede e uk é a impedância de curto-circuito.

C é a capacitância do capacitor que pode ser calculada a partir das fórmulas (1) e (2).

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

[0061] Por exemplo, para a corrente com uma frequência nominal de 50 Hz, para obter um pulso de corrente com a mesma corrente de pico I_{peak} que a corrente nominal, o capacitor 14 deve ser carregado com U_{peak} ,

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

na qual Z é a impedância de curto-circuito,

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

[0062] Quando o pulso de corrente é injetado em um quarto do período de seno, neste caso temos um tempo de elevação, como

$$t_{rise} = \frac{1}{4} \frac{1}{f_0} \quad (6)$$

[0063] A capacitância necessária é calculada da seguinte forma:

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

[0064] Sem um modelo detalhado de um transformador, a ressonância mecânica esperada f_2 pode, à grosso modo, ser estimada a partir da potência nominal e da tensão nominal de um transformador, como

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

na qual MVA é a potência nominal de um transformador. Portanto, uma relação entre a frequência ressonante mecânica esperada e a força de grampeamento poderá ser predeterminada.

[0065] A figura 4 mostra que a frequência ressonante mecânica esperada dos enrolamentos é estimada como uma função da potência nominal para diferentes tipos de transformadores. A figura ilustra que os diferentes tipos de transformadores possuem diferentes ressonâncias de enrolamento. Uma vez que a frequência ressonante elétrica f_0 do pulso de corrente deve ser próxima ou maior que a frequência ressonante mecânica f_2 *fix-fix*, f_2 na fórmula (8) pode ser usada na fórmula (6) no sentido de determinar o tempo de elevação t_{rise} e, neste caso, a capacitância C poderá ser determinada com a fórmula (7). A figura 4 mostra também que para um transformador com uma potência nominal de 200MVA, as frequências ressonantes mecânicas podem ser de uma faixa de 75 a 140 Hz. Para estimar a força de grampeamento, a frequência ressonante mecânica calculada pode ser comparada à frequência ressonante esperada, e, quando a frequência ressonante mecânica calculada é menor que a frequência ressonante mecânica esperada, uma força de grampeamento reduzida é indicada.

[0066] A figura 5a mostra a corrente através do enrolamento durante o pulso de corrente. A corrente atinge o seu pico no tempo de elevação t_{rise} . A figura 5 também mostra que, com um diodo disposto em paralelo com o capacitor, as correntes são mantidas pela indutância e caem lentamente devido às perdas no enrolamento depois de uma corrente atingir o seu pico.

[0067] A figura 5b mostra a vibração medida nos enrolamentos durante o pulso de corrente mostrado na figura 5a. Nota-se que o tempo de elevação da oscilação é, de modo geral, igual a t_{rise} .

[0068] A figura 5c mostra o espectro do sinal de vibração da figura 5b. O valor de pico é uma estimativa da frequência ressonante mecânica, que pode, por exemplo, ser usada para estimar a força de grampeamento sobre os enrolamentos de um transformador.

[0069] Para ser capaz de calcular a frequência ressonante com base na medição das vibrações dos enrolamentos, vários métodos podem ser usados. Por exemplo, a Transformação Digital de Fourier é um algoritmo efetivo para uma análise espectral. Além disso, métodos de ajuste podem ser aplicados nos casos em que a análise espectral não é adequada. Para um exemplo, uma vez que a excitação de pulso de corrente oferece uma curta duração do sinal, a análise espectral deve ser realizada em uma estrutura de tempo muito curta de modo a evitar influências de distúrbios. No entanto, devido à propriedade da Transformada de Fourier, a resolução de frequência, Δf , é limitada, uma vez que $\Delta f = 1/T$, sendo que T é a duração de tempo do sinal analisado. Para outro exemplo, a análise de Fourier, por vezes, resulta em uma ampla irregularidade com vários picos. Neste caso, será muito difícil determinar a frequência apropriada.

[0070] Em seguida, será apresentado um exemplo de um possível método de ajuste que se encaixa em uma parte apropriada do sinal, $\Phi(t)$, para

$$\varphi(t) = A \operatorname{seno}(\omega_{fit} t + \rho) e^{-t/\tau} + V_{DC} \quad (9)$$

sendo que A é a amplitude, ω_{fit} é a frequência angular, ρ é a fase, τ é o amortecimento e V_{DC} é o desvio de corrente CC offset do sinal.

[0071] Embora ω_{fit} seja de interesse principal, os demais parâmetros são necessários para encontrar o mesmo. O método de ajuste se baseia na minimização da soma dos quadrados dos desvios entre $\Phi(t)$ e $\varphi(t)$:

$$d = \sum_{t=T_{start}}^{t=T_{end}} [\Phi(t) - \varphi(t)]^2 \quad (10)$$

[0072] O procedimento é como se segue:

1. Valores iniciais para todos os parâmetros são selecionados;
2. Uma etapa inicial é estabelecida para cada parâmetro;
3. Para cada parâmetro:
 - a. Alteração pela etapa até que d não mais diminua;
 - b. O novo valor de parâmetro é no mínimo d .
4. Diminuir a etapa;
5. Quando a etapa é maior que o valor fixado, o que pode ser definido por um operador, voltar para o item 3;
6. Pronto.

[0073] Este método é bastante sensível aos valores iniciais. Portanto, o operador poderá precisar ajustar os valores iniciais a fim de ajudar o algoritmo a convergir. Especialmente a amplitude inicial e a frequência são sensíveis a este respeito.

[0074] Com estes dois métodos, as ressonâncias mecânicas podem ser calculadas com base na medição das vibrações, e as forças de grampeamento sobre um pacote de enrolamento de um transformador podem ser estimadas.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para estimar uma força de grampeamento de enrolamento sobre um pacote de enrolamento de um transformador ou reator, o pacote de enrolamento compreendendo pelo menos um enrolamento (1) com conexões (1a, 1b) e um núcleo de ferro, o método compreendendo:

- suprir um pulso de corrente às conexões do enrolamento (1a, 1b) a fim de excitar o enrolamento (1) em um modo de vibração desejado,

- medir as vibrações do pacote de enrolamento geradas pelo pulso de corrente,

- calcular a referida frequência ressonante mecânica com base nas vibrações medidas, e

- estimar a força de grampeamento sobre os pacotes de enrolamento com base na frequência ressonante mecânica calculada e uma relação predeterminada entre uma frequência ressonante mecânica esperada do dito modo de vibração desejado e a força de grampeamento,

caracterizado pelo fato de que o pulso de corrente é suprido com um tempo de elevação próximo ou menor que o tempo de elevação da frequência ressonante mecânica esperada do dito modo de vibração desejado.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dito modo de vibração desejado é um modo de vibração axial simétrica com extremidades fixas para um pacote de enrolamento de um transformador.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que o dito pacote de enrolamento do transformador compreende um primeiro enrolamento (1) e um enrolamento secundário (2) com conexões (1a, 1b, 2a, 2b), o método compreendendo a

etapa de dispor eletricamente as conexões do enrolamento secundário (2a, 2b) de modo que os enrolamentos (1, 2) sejam excitados no modo de vibração, e o pulso de corrente seja suprido às conexões do primeiro enrolamento (1a, 1b).

4. Método, de acordo com a reivindicação 2 ou 3, caracterizado pelo fato de que as conexões do enrolamento secundário (2a, 2b) são dispostas de modo que o enrolamento secundário (2) fique em curto-circuito.

5. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que a relação predeterminada entre a frequência ressonante mecânica esperada e o grampeamento é estimada matematicamente com base na potência nominal e na tensão nominal do transformador.

6. Dispositivo para estimar uma força de grampeamento de enrolamento sobre um pacote de enrolamento de um transformador ou reator, o pacote de enrolamento compreendendo pelo menos um enrolamento (1) com conexões (1a, 1b) e um núcleo de ferro, o dispositivo compreendendo:

- um gerador de pulso de corrente (4) configurado para gerar um pulso de corrente suficiente para excitar o enrolamento,
- um meio para suprir corrente para o suprimento do pulso de corrente de modo a excitar o enrolamento em um modo de vibração desejado,
- um sensor (6) para medir as vibrações do pacote de enrolamento do transformador ou reator geradas pelo pulso de corrente, e
- uma unidade de computação (8) configurada para calcular a dita frequência ressonante mecânica com base na medição das vibrações e estimar as forças de grampeamento sobre os pacotes de enrolamento com base na frequência ressonante mecânica calculada e uma relação predeterminada entre uma frequência ressonante me-

cânica esperada do dito modo de vibração desejado e a força de grampeamento,

caracterizado pelo fato de que o meio para suprir corrente é disposto de modo a suprir o pulso de corrente com um tempo de elevação próximo ou menor que o tempo de elevação da frequência ressonante mecânica do modo de vibração desejado.

7. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de o dito pacote do enrolamento do transformador compreende um primeiro enrolamento (1) e um enrolamento secundário (2) com conexões (1a, 1b, 2a, 2b), em que as conexões (2a, 2b) do enrolamento secundário (2) são eletricamente dispostas de tal forma que os enrolamentos sejam excitados no modo de vibração desejado, e o pulso de corrente seja suprido às conexões do primeiro enrolamento (1).

8. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que as conexões (2a, 2b) do enrolamento secundário (2) são dispostas de modo que o enrolamento secundário (2) fique em curto-circuito.

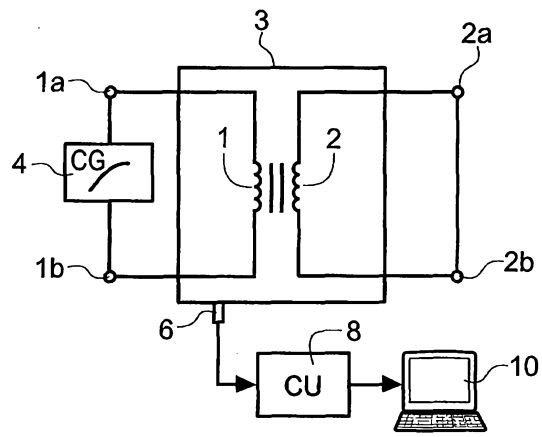
9. Dispositivo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 a 8, caracterizado pelo fato de que o dito sensor (6) é um acelerômetro.

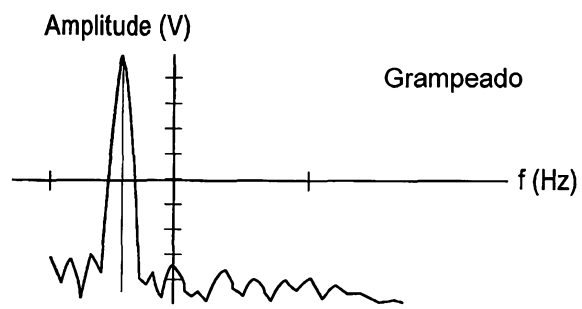
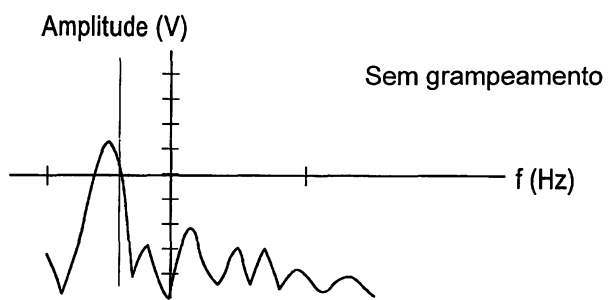
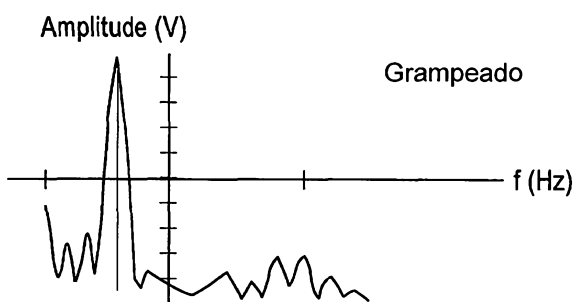
10. Dispositivo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 a 9, caracterizado pelo fato de que o gerador de pulso compreende um circuito elétrico a ser conectado ao primeiro enrolamento (1), incluindo um capacitor (14), uma fonte de tensão de corrente CC (12) disposta de modo a carregar o capacitor (14), e uma chave (20) configurada, após ativação, para gerar um pulso de corrente por meio da descarga do capacitor (14).

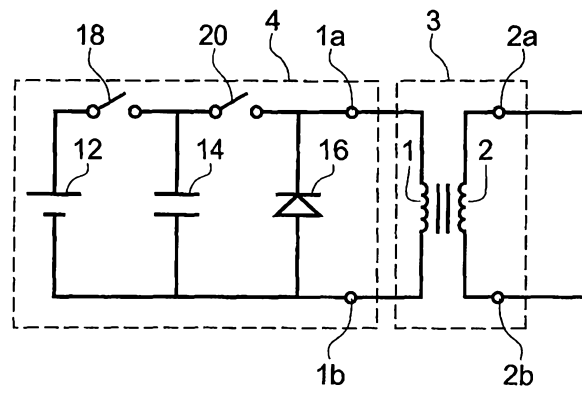
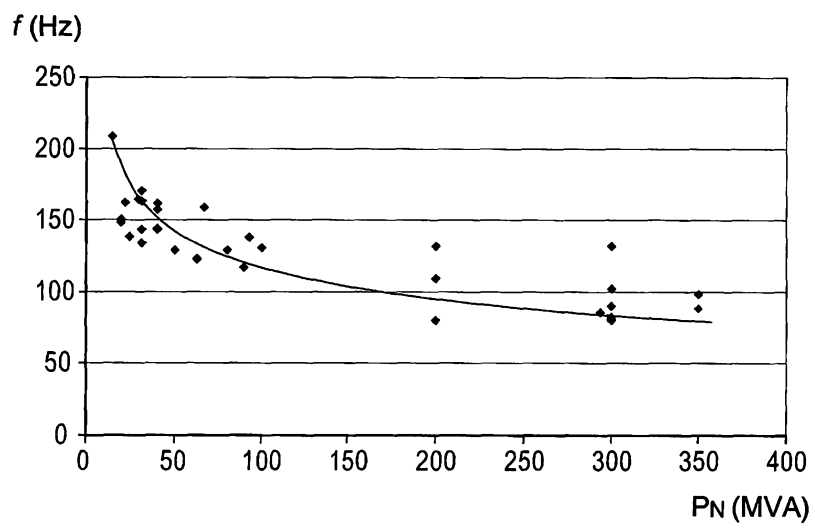
11. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que um diodo (16) é disposto em paralelo ao capa-

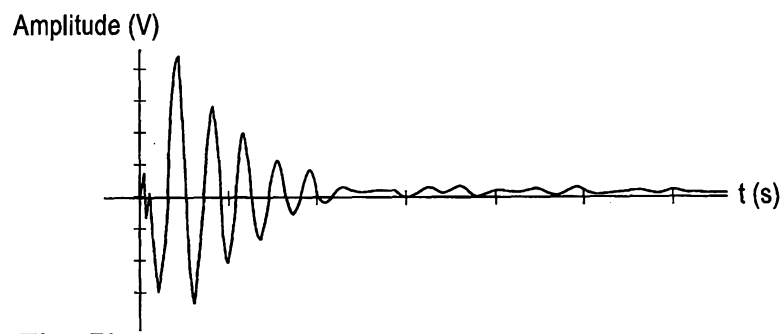
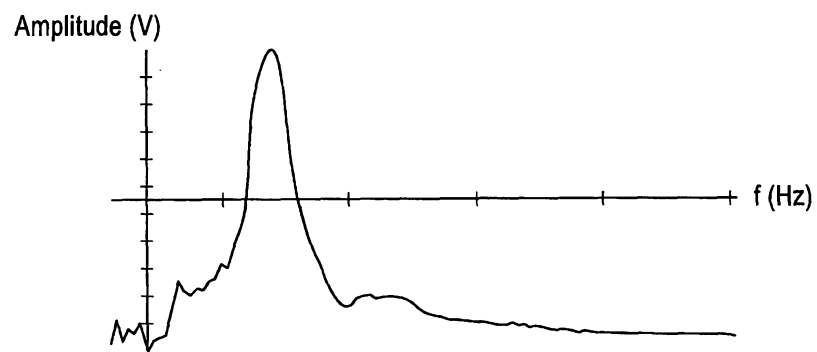
citor (14).

12. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 10 ou 11, caracterizado pelo fato de que o capacitor (14) juntamente com a indução de enrolamento forma um circuito elétrico ressonante e o capacitor é selecionado de modo que a frequência ressonante do circuito elétrico ressonante fique próxima ou maior que a frequência ressonante mecânica esperada dos enrolamentos.

*Fig. 1*

*Fig. 2a**Fig. 2b**Fig. 2c*

*Fig. 3**Fig. 4*

*Fig. 5a**Fig. 5b**Fig. 5c*