

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 539 403**

51 Int. Cl.:

**G01R 33/02** (2006.01)

**G01R 33/14** (2006.01)

**H02H 9/00** (2006.01)

**G01R 33/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.05.2012 E 12720887 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.03.2015 EP 2710393**

54 Título: **Procedimiento y sistema de control del instante de puesta bajo tensión de un dispositivo que comprende un circuito magnético**

30 Prioridad:

**16.05.2011 FR 1154212**

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

**30.06.2015**

73 Titular/es:

**ELECTRICITÉ DE FRANCE (50.0%)  
22-30 Avenue de Wagram  
75008 Paris, FR y  
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE (CNRS) (50.0%)**

72 Inventor/es:

**CAVALLERA, DIDIER;  
COULOMB, JEAN-LOUIS;  
CHADEBEC, OLIVIER;  
CAILLAULT, BRUNO y  
ZGAINSKI, FRANÇOIS-XAVIER**

74 Agente/Representante:

**CURELL AGUILÁ, Mireia**

ES 2 539 403 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**

Procedimiento y sistema de control del instante de puesta bajo tensión de un dispositivo que comprende un circuito magnético.

5

**Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un procedimiento y a un sistema de control del instante de puesta bajo tensión de un dispositivo que comprende un circuito magnético y por lo menos una bobina conductora.

10

**Antecedentes de la invención**

Durante la nueva puesta bajo tensión de un transformador de potencia en una red de transporte o de distribución de electricidad, se conoce que pueden aparecer sobreintensidades transitorias, debido a una diferencia entre los valores de los flujos remanentes en cada parte del circuito magnético y los flujos generados por las tensiones impuestas en los bornes de cada arrollamiento.

15

Estas sobreintensidades ricas en armónicos pueden presentar, en determinadas configuraciones de la red, valores ampliamente superiores a los niveles admisibles por el transformador.

20

Estas sobreintensidades pueden crear por otro lado esfuerzos electrodinámicos importantes a nivel de los bobinados, conduciendo a una degradación acelerada del transformador (deformación, desplazamiento de los bobinados).

25

Estos problemas de sobreintensidades y de sobretensiones también se pueden encontrar en el contexto de otros dispositivos eléctricos que comprenden un circuito magnético y bobinas eléctricas (arranques de máquinas eléctricas).

30

A modo de ilustración se comentará a continuación el caso de un transformador monofásico.

Antes de la puesta bajo tensión, el flujo  $\Phi$  en el material ferromagnético que constituye el circuito magnético presenta un valor  $\Phi_r$  denominado flujo remanente.

35

Este flujo remanente depende de las condiciones de la puesta fuera de tensión del transformador, que generalmente no se dominan, así como de la naturaleza del circuito magnético (tal como su geometría) y de los parámetros intrínsecos del material que lo constituye.

40

Este flujo remanente es susceptible de evolucionar a lo largo del tiempo, en particular debido a limitaciones exteriores que se pueden ejercer sobre el transformador fuera de tensión (por ejemplo bajo la influencia de dispositivos eléctricos en la proximidad del transformador).

En la puesta bajo tensión en  $t=0$ , siendo la tensión aplicada una tensión alterna, la tensión en los bornes del bobinado inductor se puede escribir como:  $V_0 = V\sqrt{2} \cos(\alpha)$

45

donde:

- V es el valor eficaz de la tensión impuesta
- $\alpha$  es el ángulo que representa la fase en el momento de la puesta bajo tensión
- $V_0$  presenta por tanto un valor que depende únicamente de  $\alpha$ .

50

A este valor le corresponde un flujo  $\Phi_0$  impuesto en el circuito magnético.

La ecuación de funcionamiento es la siguiente:

55

$$V\sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha) = R i(t) + n \frac{d\phi(t)}{dt}$$

donde:

60

- $\omega$  es la pulsación de la tensión
- R es la resistencia total del circuito eléctrico incluida la del bobinado inductor
- n es el número de espiras del bobinado inductor
- $\Phi$  es el flujo medio en el circuito magnético.

Se conoce que la expresión del flujo, tras algunas aproximaciones, es la siguiente:

$$\phi(t) = \frac{V\sqrt{2}}{n\omega} \text{sen}(\omega t + \alpha) + \left(\phi_r - \frac{V\sqrt{2}}{n\omega} \text{sen}\alpha\right) e^{-t/\tau}$$

5 con

$\tau = L / R$  y  $L$  es la inductancia del bobinado inductor.

Entonces es posible determinar la intensidad  $i(t)$  en función de la curva  $B(H)$  del material magnético del circuito.

10

La puesta bajo tensión óptima del transformador se realiza a un ángulo  $\alpha$  dado tal que el transitorio del flujo (y por tanto de las corrientes), es decir la intensidad máxima alcanzada tras la puesta bajo tensión, sea lo más bajo posible, con el fin de proteger al transformador.

15 A modo de ejemplo, si  $\Phi_r = 0$  y  $\alpha=0$  (es decir, puesta bajo tensión al máximo de tensión y ausencia de flujo remanente), entonces:

$$\phi(t) = \frac{V\sqrt{2}}{n\omega} \text{sen}(\omega t)$$

20 lo que significa que no hay régimen transitorio. Por tanto, la puesta bajo tensión es óptima.

En cambio, si  $\Phi_r = \Phi_{r \text{ máx.}}$  y  $\alpha=3\pi/2$  (es decir, puesta bajo tensión a una tensión de 0 y flujo remanente máximo), entonces:

$$\phi(t) = -\frac{V\sqrt{2}}{n\omega} \cos(\omega t) + \left(\phi_{r \text{ máx.}} + \frac{V\sqrt{2}}{n\omega}\right) e^{-t/\tau}$$

25

En este caso, el flujo adopta valores muy elevados y conlleva una extracción de corriente importante o provoca importantes sobretensiones temporales armónicas en la red.

30 Estos dos ejemplos muestran el interés de conocer el valor del flujo remanente.

Una solución conocida para evaluar el flujo remanente se basa en el hecho de que la tensión es homogénea a la derivada del flujo, y consiste por tanto en evaluar el flujo remanente integrando la tensión en los bornes del transformador antes de ponerlo fuera de tensión.

35

Un método de este tipo se describe por ejemplo en el documento US 2010/0013470.

Los documentos DE 196 41 116 y DE 36 14 057 también dan a conocer unos procedimientos que utilizan datos relativos al estado del dispositivo antes de su puesta fuera de tensión para estimar un instante óptimo de puesta bajo tensión.

40

No obstante, un método indirecto de determinación del flujo remanente de este tipo puede resultar, en determinadas configuraciones de la red eléctrica de alimentación del transformador, poco preciso y poco robusto ya que han podido intervenir fenómenos que hayan cambiado el estado magnético del circuito magnético, y la imprecisión de la medición de tensión, que es el dato de entrada para el cálculo del flujo, hace que ésta sea poco precisa (desviación, deriva, nivel de tensión baja, señal con ruido).

45

Por otro lado, puede transcurrir un lapso de tiempo largo entre la puesta fuera de tensión y la puesta bajo tensión de un transformador, lo que requiere guardar los datos durante un largo periodo y medir el flujo de manera regular para verificar su evolución.

50

Por tanto, un objetivo de la invención es permitir controlar de manera más precisa, sencilla y fiable, el instante de puesta bajo tensión de un transformador o de cualquier otro dispositivo que comprenda un circuito magnético y una o varias bobinas conductoras por las que pasa, en funcionamiento, una corriente, tal como una máquina rotativa por ejemplo.

55

Otro objetivo de la invención es proporcionar un procedimiento sencillo y fiable de puesta bajo tensión de un transformador en condiciones óptimas.

Otro objetivo de la invención es diseñar un sistema de determinación del flujo remanente en un circuito magnético cuyo rendimiento sea mejor y que sea más preciso que los sistemas actuales, y fácil de poner en práctica.

5 **Breve descripción de la invención**

Según la invención, se propone un procedimiento de control del instante de puesta bajo tensión de un dispositivo que comprende un circuito magnético y por lo menos una bobina conductora, caracterizado por que comprende las etapas de:

- 10
- adquirir por lo menos una medición del campo magnético generado por el flujo remanente en dicho circuito magnético mediante por lo menos un sensor de campo magnético colocado en la proximidad del circuito magnético,
  - 15 - procesar las mediciones de campo magnético adquiridas para deducir a partir de las mismas el flujo remanente en el circuito magnético,
  - a partir del flujo remanente, determinar el instante óptimo de la puesta bajo tensión.

20 El conjunto de estas etapas se pone en práctica tras la puesta fuera de tensión del dispositivo y no requiere ningún conocimiento ni memorización del estado del dispositivo en el momento de su puesta fuera de tensión.

Dicho procedimiento comprende ventajosamente una etapa previa de calibración del sensor, en la que se establece la función de transferencia entre el valor del campo magnético medido mediante el sensor y el valor del flujo remanente en el circuito magnético.

25 Para ello, según un primer modo de realización, se colocan por lo menos un par de sensores en el circuito magnético de manera simétrica con respecto a dicho circuito magnético, lo que permite eliminar mediante resta la componente del campo perturbador en las mediciones adquiridas mediante los sensores y se determina dicha función de transferencia en función de los valores del campo magnético medido mediante dicho par de sensores y de la permeabilidad relativa del material que forma el circuito magnético.

30 Según una variante de ejecución del calibrado, se colocan por lo menos un par de sensores en la proximidad del circuito magnético de manera simétrica con respecto a dicho circuito magnético, lo que permite eliminar mediante resta la componente del campo perturbador en las mediciones adquiridas por los sensores; la calibración del sensor comprende entonces una etapa de determinación de la integral, a lo largo de un periodo de la corriente, de la tensión en los bornes de la bobina al paso de la corriente por cero y una etapa de determinación, en la curva de histéresis de la inducción en el circuito magnético en función de la intensidad de la corriente que circula en la bobina antes de la puesta fuera de tensión, de la inducción al paso de la corriente por cero, y la determinación de la función de transferencia a partir de dichas etapas.

35 Según un modo particular de puesta en práctica de la invención, dicho dispositivo comprende un recinto que rodea el circuito magnético y la bobina, y entonces se coloca por lo menos un sensor de campo magnético sobre una cara externa de dicho recinto.

40 La invención también se refiere a la aplicación del procedimiento anterior para la puesta bajo tensión de un transformador, en la que se pone el transformador bajo tensión en el instante óptimo determinado mediante dicho procedimiento para cada una de las fases de alimentación.

45 Según una forma de ejecución particular de la invención, en la que dicho dispositivo comprende varias fases de alimentación, se pone en práctica el procedimiento anterior para determinar el valor del flujo remanente en el circuito magnético para cada una de las fases de dicho dispositivo fuera de tensión, y se calcula el instante óptimo de puesta bajo tensión para la fase que presenta el flujo remanente más elevado.

50 La invención también se refiere a una aplicación de dicho procedimiento para la puesta bajo tensión de un transformador trifásico, en la que se pone bajo tensión la fase de alimentación que presenta el flujo remanente más elevado en el instante óptimo determinado mediante dicho procedimiento para dicha fase de alimentación, después se ponen simultáneamente bajo tensión las otras fases de alimentación en un instante en el que la tensión inducida por la puesta bajo tensión de la primera fase pasa por un valor nulo.

55 Otro objeto de la invención se refiere a un sistema de control del instante de puesta bajo tensión de un dispositivo que comprende un circuito magnético y por lo menos una bobina conductora.

Este sistema es notable por que comprende:

- 60
- por lo menos un sensor de campo magnético,

- un sistema de adquisición de las mediciones de campo magnético procedentes de dicho sensor,
- un sistema de procesamiento de los datos adquiridos por el sistema de adquisición, para calcular el flujo remanente en el circuito magnético y para determinar, a partir del flujo remanente, el instante óptimo de puesta bajo tensión del dispositivo.

Por último, la invención también se refiere a un transformador que comprende un circuito magnético, por lo menos una bobina conductora primaria y una bobina conductora secundaria, estando dicho circuito magnético y dichas bobinas conductoras rodeados por un recinto, estando dicho transformador dotado, en el circuito magnético y/o sobre o en la proximidad de una cara externa del recinto, de por lo menos un sensor de campo magnético perteneciente a un sistema tal como se describió anteriormente.

### Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas de la invención se desprenderán de la siguiente descripción detallada, en referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- la figura 1 es una vista esquemática de un transformador monofásico y de los sensores de campo magnético;
- la figura 2A ilustra un modelo numérico de una parte de un circuito magnético y de un recinto que rodea dicho circuito;
- la figura 2B ilustra los diferentes valores de la inducción magnética generada por el flujo remanente en el circuito magnético de la figura 2A en el exterior del recinto;
- la figura 3 ilustra la inducción medida en una trayectoria perpendicular a una cara del circuito magnético de la figura 2A, con y sin el recinto;
- la figura 4 ilustra una curva del flujo magnético en el circuito magnético en función de la intensidad que circula en la bobina antes de la puesta fuera de tensión;
- la figura 5 ilustra una curva de la inducción en el circuito magnético en función de la intensidad de la corriente que circula en la bobina antes de la puesta fuera de tensión.

### Descripción detallada de la invención

El dispositivo al que se le aplica el procedimiento comprende de manera general un circuito magnético, formado de un material ferromagnético y una o varias bobinas conductoras que rodean o no una parte del circuito magnético y por las que puede pasar una corriente.

Por otro lado, el circuito magnético y la o las bobinas conductoras pueden estar encerrados en un recinto, que normalmente es una cubierta de chapa de acero.

Este recinto está destinado en particular a contener el aceite necesario para la refrigeración del transformador.

El material del recinto no forma una barrera para el campo de fuga procedente del circuito magnético, de manera que es posible medir el flujo magnético en la superficie exterior del recinto.

En el caso de un transformador, una de las bobinas está conectada a una fuente de alimentación eléctrica alterna, y una o varias bobinas adicionales están conectadas a un circuito eléctrico que debe ser alimentado.

En este ejemplo no limitativo se describirá un transformador monofásico, pero el principio del método se aplica de manera similar a cualquier otro dispositivo, tal como un transformador trifásico, una máquina rotativa, etc.

### Método de determinación del flujo remanente

De una manera general, el método se basa en la determinación del flujo remanente en el circuito magnético tras la puesta fuera de tensión del dispositivo por medio de una o varias mediciones del campo magnético generado por este flujo remanente en la proximidad del circuito magnético.

El conocimiento del flujo remanente permite entonces determinar el instante óptimo de puesta bajo tensión.

La figura 1 representa de manera esquemática un transformador monofásico.

Este transformador comprende un circuito 1 magnético, una bobina conductora primaria 2 conectada a una fuente de

alimentación eléctrica alterna y una bobina conductora secundaria 3 conectada a un circuito eléctrico que debe ser alimentado.

5 El circuito magnético comprende un núcleo de material ferromagnético que, en esta figura, se representa como homogéneo.

No obstante, de manera convencional, el circuito magnético puede presentar una estructura laminada formada por una pluralidad de chapas paralelas aisladas unas de otras.

10 Según un modo particular de realización, el circuito 1 magnético y las bobinas conductoras primaria y secundaria 2 y 3 están rodeados por un recinto 4 que se presenta en forma de una cubierta de chapa de acero, representada parcialmente en este caso.

15 Cuando se pone el transformador fuera de tensión, el flujo que circula en el circuito magnético se detiene tras un régimen transitorio y se obtiene como resultado un flujo remanente  $\Phi_r$  presente en el circuito 1 magnético.

Para determinar el valor de este flujo remanente, se colocan en la proximidad del circuito 1 magnético uno o varios sensores de campo magnético.

20 Por "en la proximidad" se entiende en el presente texto que el sensor se coloca o bien en el propio circuito magnético, o bien a una distancia suficientemente pequeña como para que la medición del campo magnético permita una determinación precisa del flujo magnético en el circuito magnético.

25 A modo de ejemplo, se considera en este caso que el sensor está en la proximidad del circuito magnético si está situado a una distancia del mismo que inferior al lado más grande de dicho circuito magnético.

Existen dos fuentes principales de campo magnético en el transformador fuera de tensión: por un lado el flujo remanente y por otro lado un campo perturbador (principalmente constituido por el campo magnético terrestre).

30 Si otros campos, aparte del campo magnético terrestre, constituyen el campo perturbador, se puede utilizar un sistema de rechazo de estas perturbaciones. En efecto, métodos de procesamiento de la señal conocidos permiten separar las diferentes fuentes de campo magnético.

35 Cuando se realiza una medición de campo magnético en la proximidad del circuito magnético, el valor medido resulta de estas dos fuentes.

Cuando un recinto rodea el circuito magnético, es posible colocar el o los sensores sobre la cara externa o interna del recinto o en su proximidad, sin que éste anule el campo de fuga.

40 En efecto, se ha demostrado que, de manera inesperada, la inducción captada en el exterior del recinto es suficiente para permitir una medición fiable del campo magnético generado por el flujo remanente.

Las figuras 2A a 3 presentan simulaciones realizadas en un modelo de una parte de un circuito y de un recinto que rodea dicha parte.

45 La figura 2A ilustra un modelo numérico de una parte de un circuito 1 magnético y de un recinto 4 que rodea dicho circuito.

50 Aunque sólo se ha modelado un cuarto del circuito, en este caso por medio del software Flux 2D, la simulación numérica se refiere a la totalidad del dispositivo.

El circuito magnético se ha modelado en forma de un conjunto de imanes de los que cada uno presenta una dirección de imantación específica.

55 Los imanes presentan una permeabilidad relativa  $\mu_{r1} = 5000$  y una inducción remanente  $B_r = 1$  T.

Las imperfecciones del circuito magnético se modelan mediante entrehierros 1e de 0,5 mm ubicados en las esquinas del circuito magnético.

60 Las flechas representan la orientación de las líneas de campo magnético en el circuito magnético.

El recinto 4 metálico presenta una permeabilidad relativa  $\mu_{r4} = 100$  y un grosor de 1 cm.

65 La figura 2B ilustra los diferentes valores de la inducción magnética generada por el flujo remanente en el circuito 1 magnético así modelado en el exterior del recinto 4.

La escala de a a p corresponde a zonas de isoinducción cuyo valor está comprendido entre 0,5  $\mu\text{T}$  y 50  $\mu\text{T}$ .

Tal como se puede apreciar, la inducción magnética en la proximidad del recinto presenta valores suficientemente elevados como para permitir una medición aprovechable mediante un sensor de campo magnético dispuesto en esta zona.

Esto es visible en la figura 3 que presenta la inducción magnética B medida en una trayectoria C1 (esquemática en la figura 2B) perpendicular a una cara del circuito 1 magnético, sin el recinto (curva discontinua) y con el recinto (curva continua), en función de la distancia d con respecto al circuito magnético.

Así, en presencia del recinto, la inducción captada inmediatamente en el exterior del recinto es de 20  $\mu\text{T}$ , mientras que la inducción medida en el mismo lugar en ausencia de recinto es de 34  $\mu\text{T}$ .

Por consiguiente, aunque el recinto altera el valor del campo magnético generado por el flujo remanente, existe, en el exterior del recinto, una huella representativa de este campo magnético que se puede medir y correlacionar con el valor real gracias a una calibración adecuada.

Esto se puede explicar por el hecho de que los campos magnéticos generados por el dispositivo al que se refiere la invención son suficientemente elevados como para generar una huella medible en el exterior del recinto.

En el caso de la simulación descrita en este caso, una inducción remanente de 1 T del circuito magnético se representa mediante una inducción medida en la exterior del recinto de 20  $\mu\text{T}$ .

Una inducción remanente del orden de 1 mT se representaría por tanto mediante una inducción en el exterior del recinto del orden de algunos nT, lo cual es superior a la precisión de los sensores presentes actualmente en el mercado, y que por tanto se puede medir. Por tanto, una medición mediante un sensor colocado en el exterior del recinto puede ser representativa de la inducción remanente siempre que las perturbaciones exteriores puedan ser ignoradas.

Con referencia a la figura 1, se han colocado por tanto tres sensores de campo magnético 10a, 10b, 10c sobre tres caras exteriores del recinto 4.

Las condiciones preferentes de colocación y de orientación de los sensores se indican más adelante.

Preferentemente, se colocan el o los sensores en el plano medio del circuito magnético, de manera que sean lo más sensibles posible a las líneas de campo magnético alrededor del circuito.

Para su colocación se emplea cualquier modo de fijación apropiado (adhesivo, etc.) con respecto al circuito magnético y/o del recinto, incluso un soporte distinto del circuito magnético o del recinto.

Gracias al/a los sensor(es) se adquieren uno o varios valores del campo magnético en la proximidad del circuito magnético.

A continuación se procesan dicho o dichos valores para deducir a partir de los mismos el valor del flujo remanente en el circuito magnético.

En efecto, tal como se verá más adelante, una calibración previa de cada sensor permite determinar la función de transferencia entre el valor del campo magnético medido mediante ese sensor y el valor del flujo remanente.

Control del instante de puesta bajo tensión

El conocimiento del flujo remanente permite determinar a continuación el instante óptimo de puesta bajo tensión.

En efecto, retomando el ejemplo de un transformador monofásico, si se conoce el valor de  $\Phi_r$ , el ángulo de puesta bajo tensión  $\alpha$  óptimo para minimizar el régimen transitorio de corriente se deduce a partir de las ecuaciones anteriores mediante la fórmula:

$$\frac{V\sqrt{2}}{n\omega} \text{sen}\alpha = \phi_r$$

es decir:

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{\phi_r n \omega}{V\sqrt{2}}\right)$$

La ventaja de este procedimiento es que no requiere conocer las condiciones en las que se puso el dispositivo fuera de tensión, lo cual evita un archivado de las condiciones de funcionamiento del dispositivo.

5 Por otro lado, este procedimiento es más directo que los métodos de integración de la técnica anterior, y por tanto es más preciso ya que permite prescindir de los fenómenos que se han podido producir y modificar el estado magnético del circuito magnético, así como de las imprecisiones de la medición de tensión que se utiliza como dato de entrada para el cálculo del flujo en los métodos anteriores.

10 En el caso en el que el dispositivo es un transformador trifásico de tres columnas, se mide el flujo remanente en cada columna, colocando por lo menos un sensor de campo magnético en el circuito magnético de cada una de las columnas.

15 Para poner bajo tensión el transformador, se pone en primer lugar bajo tensión la fase para la que el flujo remanente es el más elevado, determinándose el instante de dicha puesta bajo tensión de manera que se minimice el régimen transitorio de corriente.

20 La puesta bajo tensión de la primera fase genera una tensión inducida en las otras dos fases, desfasada 180° con respecto a la primera fase.

Tras un retardo correspondiente a algunos semi-periodos de dicha tensión inducida (destinado a reducir la asimetría del flujo magnético en las dos fases que se van a poner bajo tensión), se ponen simultáneamente bajo tensión estas dos fases en un instante correspondiente a un paso de la tensión inducida por cero.

25 Este método de puesta bajo tensión se describe en el artículo de A. Mercier *et al.*, "Transformer Controlled Switching taking into account the Core Residual Flux - A real case study", CIGRE 13-201, 2002, al que se podrá hacer referencia.

30 Naturalmente, se podrá elegir cualquier otra estrategia de puesta en marcha sin apartarse por ello del marco de la presente invención.

#### Calibración del sensor

35 Las mediciones realizadas por medio de los sensores permiten una evaluación cualitativa del flujo remanente, a saber su presencia y su sentido.

40 Para una evaluación cuantitativa, es decir para deducir el valor del flujo remanente en el circuito magnético a partir de los valores de campo magnético medidos, es necesario realizar previamente una calibración del sensor para determinar la función de transferencia entre el campo magnético medido y el flujo remanente correspondiente.

Como ilustración a modo de ejemplo se presenta a continuación la utilización de dos sensores utilizados cerca de un transformador monofásico que no comprende ningún recinto.

45 Tal como se verá más adelante, la ventaja de emplear dos sensores dispuestos de manera simétrica es poder eliminar mediante resta la componente del campo perturbador en las mediciones adquiridas por dichos sensores.

50 Se distingue el caso en el que los sensores están colocados directamente en el circuito magnético, y después el caso en el que los sensores están colocados a una cierta distancia del circuito magnético.

#### *Caso 1: sensores en el circuito magnético*

55 En este caso, se mide la componente tangencial del campo magnético, en la dirección principal de la inducción en el circuito magnético.

Por tanto, el sensor debe estar orientado con respecto al circuito magnético de manera que se mida esta componente.

60 Este caso también es válido cuando se coloca el sensor suficientemente cerca del circuito magnético como para poder medir la componente tangencial del campo magnético en la interfaz circuito - aire.

La inducción medida mediante un sensor se define por la fórmula:

$$B_{\text{sensor}} = A_1 \cdot B_0 + A_2 \cdot B_a$$



donde:

$A_1$  es una magnitud que depende a la vez de la posición del sensor y de la inducción en el circuito magnético;

$B_0$  es la componente del campo perturbador (principalmente el campo magnético terrestre) en la dirección de la inducción tangencial;

$B_a$  es la componente principal de la inducción en el circuito magnético, tangencial a la interfaz entre el aire y el circuito magnético;

$A_2 = 1/\mu_a$  por la conservación del campo magnético tangencial a nivel del paso circuito - aire (teorema de Ampère);

$\mu_a$  es la permeabilidad relativa del material que compone el circuito magnético.

Cuando se colocan dos sensores de manera simétrica en el circuito magnético, la componente del campo perturbador se modifica de la misma manera por la presencia del circuito magnético.

Las mediciones de inducción realizadas mediante los dos sensores se escriben por tanto como:

$$\begin{aligned} B_{\text{sensor1}} &= A_1 \cdot B_0 + A_2 \cdot B_a \\ B_{\text{sensor2}} &= A_1 \cdot B_0 - A_2 \cdot B_a \end{aligned}$$

La resta de las mediciones obtenidas por los dos sensores permite eliminar la componente del campo perturbador y se obtiene por tanto:

$$B_{\text{sensor1}} - B_{\text{sensor2}} = 2A_2 \cdot B_a$$

Por tanto, se puede deducir el valor de  $B_a$  a partir de las mediciones obtenidas por medio de los dos sensores y de la permeabilidad relativa del material del circuito magnético, que se conoce.

Entonces se puede determinar el valor del flujo que circula en el circuito magnético, que viene dado por la relación:

$$\phi_a = n \cdot B_a \cdot S_a$$

donde  $n$  es el número de espiras de la bobina inductora y  $S_a$  es la sección del circuito magnético.

*Caso 2: sensores a una cierta distancia del circuito magnético*

Cuando el sensor no está en el circuito magnético, la inducción medida mediante este sensor presenta la expresión:

$$B_{\text{sensor}} = A_1 \cdot B_0 + A_2 \cdot B_a$$

donde las magnitudes  $A_1$ ,  $B_0$  y  $B_a$  presentan las mismas definiciones que en el caso anterior.

En cambio, el coeficiente  $A_2$  se debe determinar mediante las etapas siguientes:

1) Medición de la tensión primaria o secundaria (indicada por  $V$ ), de la inducción magnética (indicada por  $B$ ) medida mediante un sensor y de la corriente primaria (indicada por  $I$ ) cuando el transformador (en vacío) se alimenta con tensión alterna.

2) Trazado de la curva  $\varphi(I)$  donde  $\varphi$  se define como la integral de la tensión  $V$  en función del tiempo a lo largo de un periodo de la corriente (es decir 20 ms a 50 Hz). Esta curva se ilustra en la figura 4. Se obtiene por un lado calculando, a lo largo de un periodo de corriente, la integral  $\varphi$  de la tensión en función del tiempo (que presenta una forma sinusoidal desfasada  $90^\circ$  con respecto a la tensión  $V$ ), y por otro lado midiendo la variación de la corriente  $I$  a lo largo del mismo periodo, y trazando, a partir de estas dos series de datos, la curva de histéresis  $\varphi(I)$ . Una curva de este tipo, así como las formas de onda de la tensión, del flujo y de la corriente, se ilustran por ejemplo en la página 455 de la obra *Electrotechnique - 3ª edición*, de Théodore Wildi, De Boeck Supérieur, 2003.

Se debe observar en este caso que la integración se realiza a lo largo de un periodo de la corriente, con vistas a determinar la función de transferencia del sensor. Por tanto, esta integración no se ve afectada por derivas, al contrario que los métodos anteriores mencionados anteriormente, que utilizan una integración de la tensión a lo largo de una larga duración para deducir a partir de la misma el flujo remanente.

De manera alternativa, se puede construir la curva de histéresis  $\varphi(I)$  a partir de la curva de saturación del transformador, que proporciona el constructor del transformador. Dicha curva de saturación, que se traza con ayuda de una serie de ensayos en vacío, es una curva no lineal de la tensión en los bornes del bobinado primario en función de la intensidad. Se puede trazar la curva de histéresis  $\varphi(I)$  correspondiente gracias a un software de simulación adaptado tal como el software EMTP.

3) En la curva  $\varphi(I)$ , medición de la magnitud  $\Delta\varphi$  que corresponde a la diferencia entre los valores mínimo y máximo de  $\varphi$  al paso de la corriente por cero (es decir  $I = 0$ ).

4) Trazado de la curva  $B(I)$  ilustrada en la figura 5 a partir de las mediciones de la inducción magnética obtenidas mediante el sensor en diferentes instantes y de las mediciones de la corriente primaria en los mismos instantes cuando se alimenta el transformador (en vacío) con tensión alterna.

5) En la curva  $B(I)$ , medición de la magnitud  $\Delta B$  que corresponde a la diferencia entre los valores mínimo y máximo de  $B$  al paso de la corriente por cero.

6) Cálculo de  $A_2$  mediante la siguiente fórmula:

$$A_2 = \frac{\Delta B}{\Delta\varphi / (n \cdot S_a)}$$

donde  $n$  es el número de espiras de la bobina inductora y  $S_a$  es la sección del circuito magnético.

Cuando se colocan dos sensores de manera simétrica con respecto al circuito magnético y al campo perturbador, la componente del campo perturbador se modifica de la misma manera por la presencia del circuito magnético.

Las mediciones de inducción realizadas mediante los dos sensores se escriben por tanto como:

$$\begin{aligned} B_{\text{sensor1}} &= A_1 \cdot B_0 + A_2 \cdot B_a \\ B_{\text{sensor2}} &= A_1 \cdot B_0 - A_2 \cdot B_a \end{aligned}$$

Conociendo  $A_2$ , es posible deducir  $B_a$  a partir de las mediciones realizadas mediante los dos sensores gracias a la resta que permite eliminar la componente del campo perturbador:

$$B_{\text{sensor1}} - B_{\text{sensor2}} = 2A_2 \cdot B_a$$

Entonces se puede determinar el valor del flujo que circula en el circuito magnético, que viene dado por la relación:

$$\phi_a = n \cdot B_a \cdot S_a$$

### Sensores de campo magnético

El sistema de medición comprende por lo menos un sensor de campo magnético.

Existen sensores de este tipo en el mercado y el experto en la materia puede elegir el modelo de sensor apropiado.

De manera ventajosa, los sensores son magnetómetros vectoriales de tipo "fluxgate" ("de saturación") de uno o tres ejes, adaptados para medir la componente del campo magnético según el o los ejes considerados.

Están disponibles magnetómetros de este tipo, por ejemplo, de Bartington Instruments, con la referencia Mag-03.

Cuando el sensor es un magnetómetro de un único eje, y se desea colocarlo directamente en el circuito magnético, se hace que su eje sea paralelo a la dirección principal de la inducción en el circuito magnético, con el fin de medir la componente tangencial del flujo.

Los sensores también pueden ser magnetómetros escalares, que miden el módulo del campo magnético. Entonces es necesario orientar estos sensores en una dirección paralela a la del flujo en el circuito magnético.

Según la geometría del circuito magnético, puede ser acertado emplear por lo menos dos sensores dispuestos de manera que se facilite o se haga más precisa la determinación del flujo remanente.

Así, por ejemplo, se pueden disponer dos sensores de manera simétrica en cada parte del circuito magnético (en este ejemplo en cada rama) de un transformador monofásico o trifásico de tres columnas.

En efecto, tal como se ha mencionado anteriormente, una colocación simétrica de los sensores permite prescindir de la influencia del campo magnético terrestre.

5 Al inducir éste un flujo magnético orientado de arriba abajo en el circuito magnético, la colocación de los sensores de manera que se obtengan componentes de signos opuestos para el flujo remanente permite eliminar el efecto del campo perturbador.

10 Por otro lado, en particular en los dispositivos complejos, el hecho de colocar el sensor directamente en el circuito magnético permite ignorar los fenómenos parásitos.

El número de sensores también puede variar según el método de cálculo del flujo remanente.

15 En principio, basta con un pequeño número de sensores, por ejemplo uno por cada parte del circuito magnético para un transformador.

No obstante, también es posible determinar el flujo remanente a partir de una pluralidad de mediciones puntuales del campo magnético, según el método descrito en el documento WO 02/101405.

20 En este caso, conviene colocar alrededor del circuito magnético una pluralidad de sensores de campo magnético.

Por otro lado, el o los sensores de campo magnético se pueden colocar directamente en el circuito magnético.

25 No obstante, una configuración de este tipo puede ser difícil de poner en práctica en determinados casos, ya que el entorno inmediato del circuito magnético puede ser desfavorable para la instalación y el funcionamiento de los sensores (por ejemplo, presencia de fluidos, alta temperatura, etc.).

30 En este caso, también es posible colocar el o los sensores en o en la proximidad del recinto que rodea el circuito magnético.

Cuando se conoce la distribución del campo magnético alrededor del circuito (por ejemplo, por medio de una cartografía teórica o experimental), se colocan el o los sensores en las ubicaciones en las que el campo magnético es más intenso.

35 En situaciones en las que no se conoce la distribución del campo magnético y/o las ubicaciones para colocar los sensores son limitadas, se realizan esfuerzos por colocar los pares de sensores de manera simétrica con respecto al campo perturbador.

40 Esta solución a distancia del circuito magnético presenta la ventaja de no ser intrusiva, y de poder ponerse en práctica en dispositivos existentes sin modificación de los mismos.

El o los sensores se encuentran entonces a una cierta distancia del circuito magnético que es inferior a la dimensión del circuito, lo que permite una medición suficientemente precisa del campo magnético.

45 Los sensores se pueden instalar de manera permanente en el recinto.

Esto permite, dado el caso, realizar mediciones en tiempo real del estado magnético del circuito magnético cuando el dispositivo está bajo tensión, con fines de diagnóstico.

50 Otra aplicación posible de la invención es el control tras un procesamiento del transformador con el objetivo de anular o modificar el flujo remanente en el circuito magnético por medio de una fuente externa. Las mediciones realizadas por medio de los sensores permiten entonces verificar si el procesamiento ha permitido realmente obtener el flujo deseado en el circuito magnético.

55 La invención también se puede realizar para el control del arranque de una máquina rotativa, permitiendo medir el flujo remanente en una máquina no alimentada.

#### Sistema de adquisición

60 El sistema de adquisición está adaptado para recopilar datos procedentes de los diferentes sensores, registrarlos y transmitirlos al sistema de procesamiento.

#### Sistema de procesamiento

65 El sistema de procesamiento es normalmente un procesador dotado de medios para calcular, a partir de las señales adquiridas por el sistema de adquisición, el valor del flujo remanente en el circuito magnético.

En particular, el procesador puede estar adaptado para calcular, a partir de la señal asociada a cada sensor, el flujo remanente a partir de la función de transferencia de dicho sensor.

5 Los sistemas de adquisición y de procesamiento se pueden integrar en el dispositivo que se va a controlar, por ejemplo, en el caso del transformador descrito anteriormente, en una carcasa fija en el exterior del recinto, o bien instalar en un lugar a distancia.

10 La conexión entre los sensores y los sistemas de adquisición y de procesamiento se realiza mediante cualquier medio de conexión eléctrica apropiado.

Por último, resulta evidente que los ejemplos que acaban de facilitarse sólo son ilustraciones particulares, en ningún caso limitativas por lo que respecta a los campos de aplicación de la invención.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Procedimiento de control del instante de puesta bajo tensión de un dispositivo que comprende un circuito magnético (1) y por lo menos una bobina conductora (2), caracterizado por que comprende las etapas siguientes:
- adquirir por lo menos una medición del campo magnético generado por el flujo remanente en dicho circuito magnético (1) mediante por lo menos un sensor de campo magnético (10a, 10b, 10c) colocado en la proximidad del circuito magnético (1),
- 10 - procesar las mediciones de campo magnético adquiridas para deducir a partir de las mismas el flujo remanente en el circuito magnético (1),
- a partir del flujo remanente, determinar el instante óptimo de la puesta bajo tensión,
- 15 realizándose el conjunto de dichas etapas tras la puesta fuera de tensión del dispositivo.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que comprende una etapa previa de calibración del sensor (10a, 10b, 10c), en la que se establece la función de transferencia entre el valor del campo magnético medido por el sensor y el valor del flujo remanente en el circuito magnético (1).
- 20 3. Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado por que se coloca por lo menos un par de sensores en el circuito magnético de manera simétrica con respecto a dicho circuito magnético, y por que se determina la función de transferencia en función de los valores del campo magnético medido por dicho par de sensores y de la permeabilidad relativa del material que forma el circuito magnético.
- 25 4. Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado por que se coloca por lo menos un par de sensores en la proximidad del circuito magnético de manera simétrica con respecto a dicho circuito magnético, y por que la calibración del sensor comprende una etapa de determinación de la integral, en un periodo de la corriente, de la tensión en los bornes de la bobina al paso por cero de la corriente y una etapa de determinación, en la curva de histéresis de la inducción en el circuito magnético en función de la intensidad de la corriente que circula en la bobina antes de la puesta fuera de tensión, de la inducción al paso por cero de la corriente, y la determinación de la función de transferencia a partir de dichas etapas.
- 30 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que dicho dispositivo comprende un recinto (4) que rodea el circuito magnético (1) y la bobina (2), y por que se coloca por lo menos un sensor de campo magnético (10a, 10b, 10c) sobre una cara externa de dicho recinto (4).
- 35 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que dicho dispositivo comprende varias fases de alimentación, caracterizado por que comprende la realización del procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 para determinar el valor del flujo remanente en el circuito magnético para cada una de las fases de dicho dispositivo fuera de tensión, y calcular el instante óptimo de puesta bajo tensión para la fase que presenta el flujo remanente más elevado.
- 40 7. Aplicación del procedimiento según la reivindicación 6 para la puesta bajo tensión de un transformador trifásico, en la que se pone bajo tensión la fase de alimentación que presenta el flujo remanente más elevado en el instante óptimo determinado mediante dicho procedimiento para dicha fase de alimentación, y después se ponen simultáneamente bajo tensión las otras fases de alimentación en un instante en el que la tensión inducida por la puesta bajo tensión de la primera fase pasa por un valor nulo.
- 45 8. Sistema de control del instante de puesta bajo tensión de un dispositivo que comprende un circuito magnético (1) y por lo menos una bobina conductora (2), comprendiendo el sistema:
- por lo menos un sensor de campo magnético (10a, 10b, 10c),
- 50 - un sistema de adquisición de las mediciones de campo magnético procedentes de dicho sensor,
- un sistema de procesamiento de los datos adquiridos por el sistema de adquisición, para calcular el (los) flujo(s) remanente(s) en el circuito magnético y para determinar, a partir del flujo remanente, el instante óptimo de puesta bajo tensión,
- 55 caracterizado por que el sistema está configurado de tal manera que el conjunto de las etapas siguientes:
- adquirir por lo menos una medición del campo magnético generado por el flujo remanente en dicho circuito magnético (1) mediante el por lo menos un sensor de campo magnético (10a, 10b, 10c) colocado en la proximidad del circuito magnético (1),
- 60
- 65

- procesar las mediciones de campo magnético adquiridas para deducir a partir de las mismas el flujo remanente en el circuito magnético (1), a partir del flujo remanente,
- determinar el instante óptimo de la puesta bajo tensión,

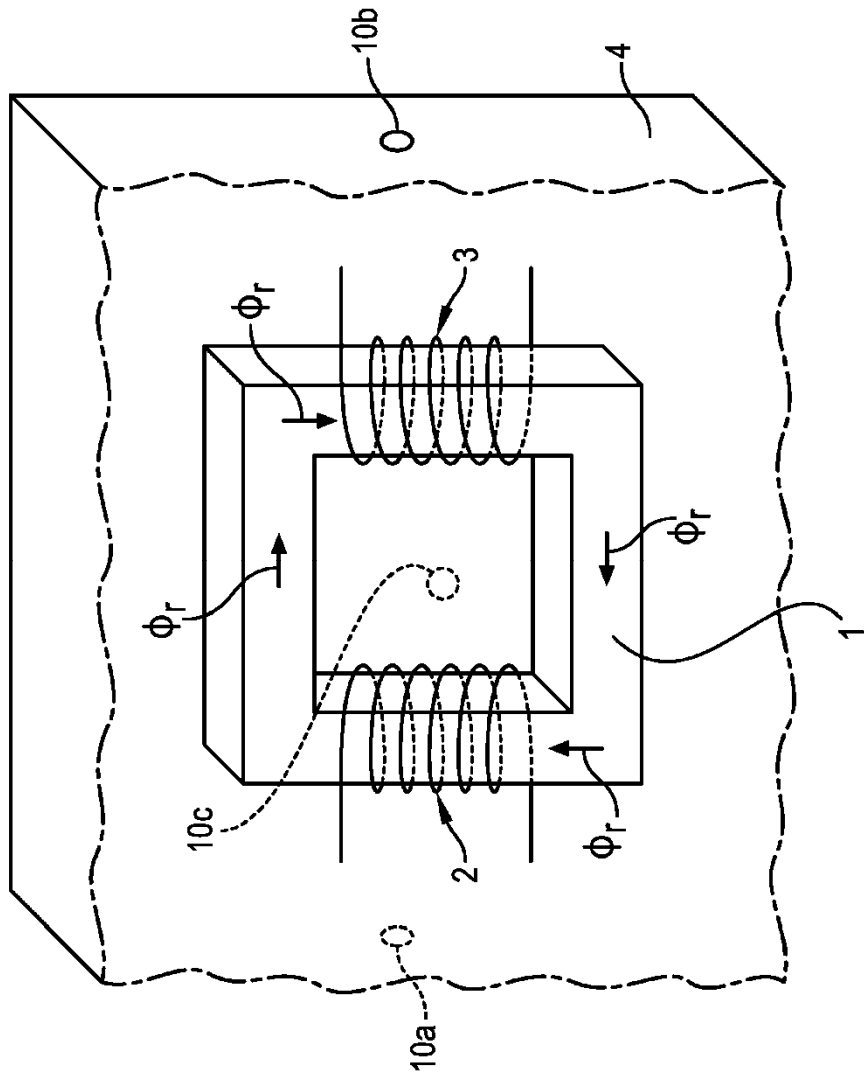
5

se realiza tras la puesta fuera de tensión del dispositivo.

10

9. Transformador que comprende un circuito magnético (1), por lo menos una bobina conductora primaria (2) y una bobina conductora secundaria (3), estando dicho circuito magnético y dichas bobinas conductoras rodeados por un recinto (4), caracterizado por que comprende, en el circuito magnético y/o sobre o en la proximidad de una cara externa del recinto (4), por lo menos un sensor de campo magnético (10a, 10b, 10c) que pertenece a un sistema según la reivindicación 8.

FIG. 1







**FIG. 3**

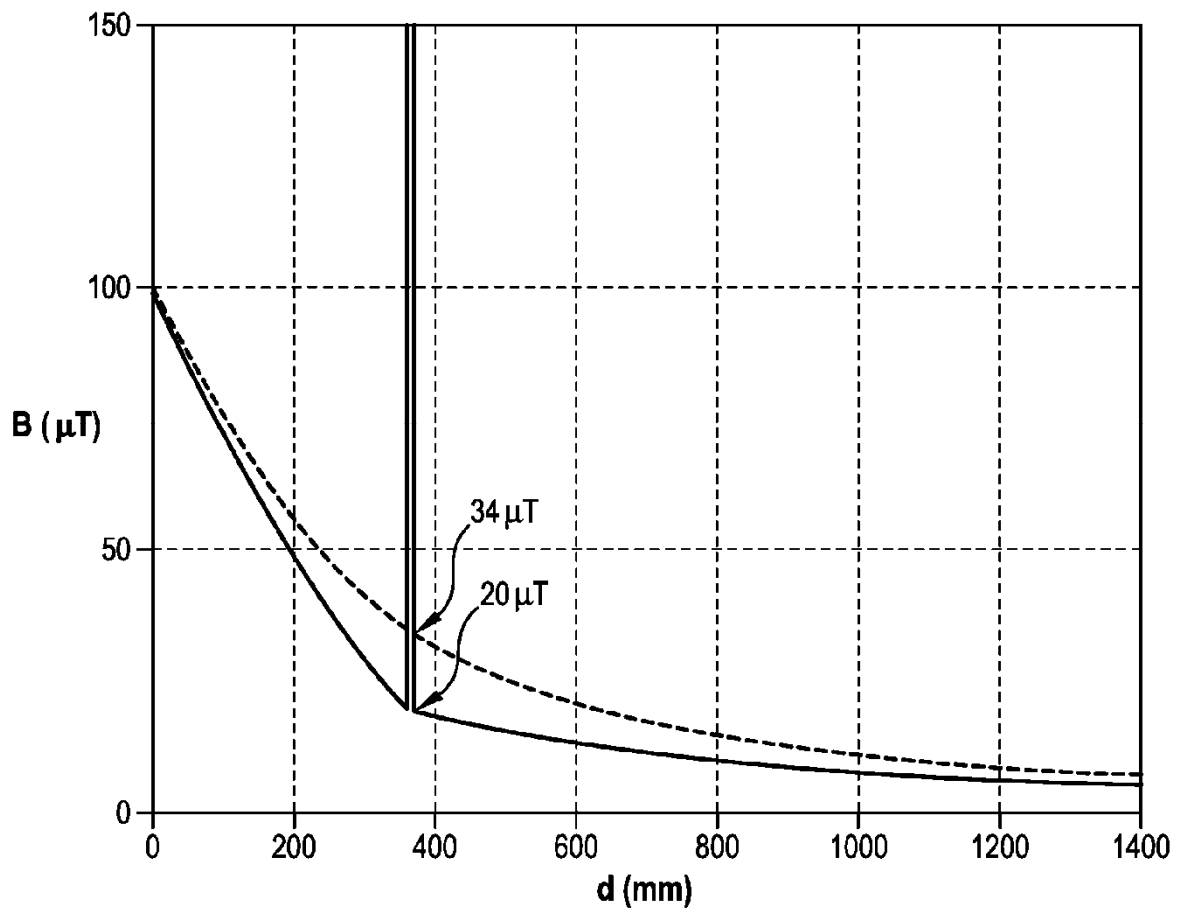


FIG. 4

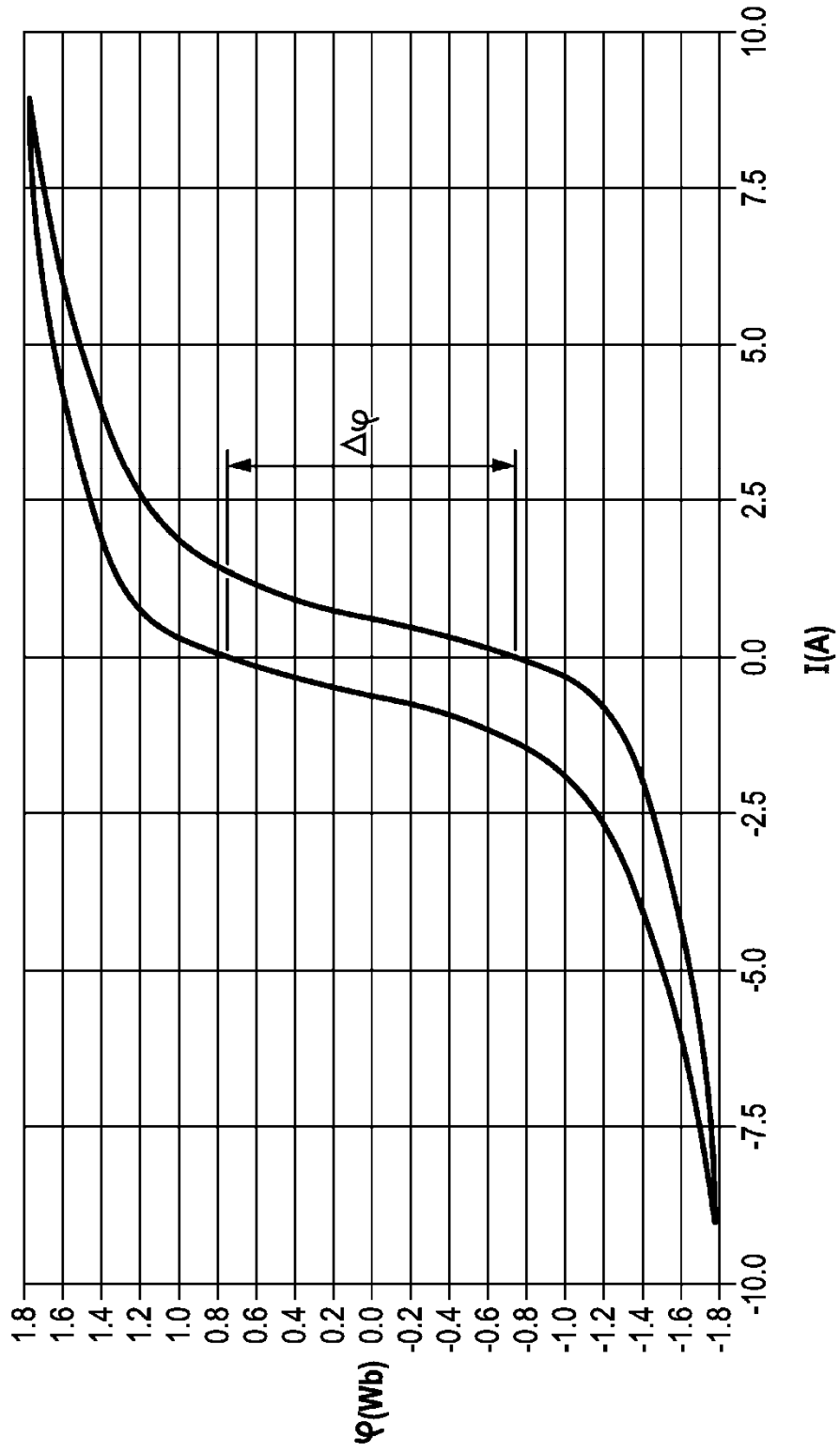


FIG. 5

