

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 946 009**

51 Int. Cl.:

**H02P 9/12** (2006.01)

**H02P 29/024** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.01.2018** **E 18382035 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.03.2023** **EP 3514945**

54 Título: **Procedimientos de detección de fallos en una máquina eléctrica, máquinas eléctricas y turbinas eólicas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**11.07.2023**

73 Titular/es:  
**GE RENEWABLE TECHNOLOGIES WIND B.V.**  
**(100.0%)**  
**Bergschot 69/2**  
**4817 PA Breda, NL**

72 Inventor/es:  
**URRESTY, JULIO CÉSAR**

74 Agente/Representante:  
**DE ROOIJ, Mathieu Julien**

**ES 2 946 009 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

Procedimientos de detección de fallos en una máquina eléctrica, máquinas eléctricas y turbinas eólicas

- 5 **[0001]** La presente divulgación se refiere a procedimientos de detección de fallos en una máquina eléctrica y se refiere además a máquinas eléctricas. La divulgación también se refiere a turbinas eólicas.

**Antecedentes**

- 10 **[0002]** Las máquinas eléctricas, tales como motores y generadores, en general, comprenden una estructura de rotor y una estructura de estátor. En el caso de generadores excitados por imanes permanentes (PMG), los imanes permanentes (PM), en general, están dispuestos en el rotor (aunque, de forma alternativa, también se podrían disponer en la estructura de estátor), mientras que los elementos de devanado (por ejemplo, bobinas) normalmente están provistos en el estátor (aunque, de forma alternativa, se podrían disponer en la estructura de rotor). En las máquinas eléctricas, las bobinas se pueden conectar en serie, en paralelo o en una combinación de ambas, algunas bobinas conectadas en serie en varios ramales paralelos, véase, por ejemplo el documento US2011/0316464 A1.

- 15 **[0003]** Los generadores de imanes permanentes, en general, se consideran fiables y requieren menos mantenimiento que otras tipologías de generadores. Se pueden usar generadores de imanes permanentes, por ejemplo, en turbinas eólicas, y también en turbinas eólicas marinas. Las turbinas eólicas de esta clase comprenden, en general, un rotor con un buje de rotor y una pluralidad de palas. El rotor se pone en rotación bajo la influencia del viento sobre las palas. La rotación del eje de rotor acciona el rotor de la máquina eléctrica como un generador, directamente ("directamente accionado") o bien a través del uso de una multiplicadora.

- 20 **[0004]** En las máquinas eléctricas, en particular, en los generadores de imanes permanentes que se pueden usar en turbinas eólicas, se pueden producir varios tipos de fallos. Los ejemplos de esos fallos son excentricidades del rotor, deformaciones del entrehierro entre el rotor y el estátor y fallos magnéticos, tales como desmagnetización o imane(s) roto(s)/desprendido(s).

- 25 **[0005]** El diagnóstico de fallos tiene un papel importante en una operación fiable de una máquina eléctrica.

**[0006]** La deformación del entrehierro y las excentricidades pueden provocar una mayor tensión estructural y problemas mecánicos que pueden ser fallos potencialmente catastróficos con costes operativos incrementados.

- 30 **[0007]** Un imán desprendido o roto puede provocar una pérdida de fuerza electromagnética.

**[0008]** Además, un imán desprendido o roto puede provocar la pérdida de piezas en el entrehierro entre el rotor y estátor y, por tanto, se pueden producir graves problemas mecánicos.

- 35 **[0009]** En el caso de generadores de imanes permanentes, se puede producir la desmagnetización debido a un cortocircuito en el estátor o a una conexión incorrecta de una bobina (entre otros), si no se detecta (y no se reemplaza) un polo desmagnetizado, la corriente en el estátor se puede incrementar para compensar la f.c.e (fuerza contraelectromotriz) reducida, que puede dar lugar a mayores pérdidas y mayores temperaturas. Por tanto, se puede reducir el rendimiento del generador.

- 40 **[0010]** Los fallos por excentricidad del rotor y deformación del entrehierro normalmente se miden por sensores de entrehierro colocados en un diente de estátor y un polo de rotor. Sin embargo, esos sensores requieren una integración más compleja en la máquina eléctrica, puesto que se necesitan colocar directamente en el entrehierro, véase, por ejemplo, "2-Pole turbo-generator eccentricity diagnosis by split-phase current signature analysis" [Diagnóstico de excentricidad en turbogeneradores de 2 polos por análisis de firma de corriente de fase dividida], C. Bruzzese, 2013, 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), XP032514154.

- 45 **[0011]** En las soluciones existentes, los fallos magnéticos se pueden detectar indirectamente monitorizando el voltaje de fase o corriente. La corriente incrementada para compensar la f.c.e reducida requiere usar un procesamiento de señales complejo para detectar un fallo magnético.

- 50 **[0012]** Además, es posible que esta solución de monitorización del voltaje de fase o corriente no detecte fallos incipientes, puesto que las señales de voltaje y corrientes del estátor (o rotor) no se ven afectadas directamente por el fallo magnético.

- 55 **[0013]** La presente divulgación proporciona ejemplos de procedimientos y dispositivos que resuelven al menos parcialmente algunas de las desventajas mencionadas anteriormente.

- 60

**Breve explicación**

[0014] La presente invención se define por un procedimiento de detección de fallos de acuerdo con la reivindicación 1 y una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 14.

5 [0015] En un primer aspecto, se proporciona un procedimiento de detección de fallos en una máquina eléctrica. La máquina eléctrica tiene un rotor y un estátor, teniendo uno del rotor y del estátor al menos dos bobinas conectadas en serie. El procedimiento comprende medir un voltaje en una única bobina de las dos bobinas conectadas en serie. El procedimiento comprende además determinar una condición de fallo en base a al menos el voltaje medido a lo largo del tiempo.

10 [0016] En este aspecto, se obtiene un procedimiento con una sensibilidad mejorada para la detección de fallos con respecto a las soluciones conocidas, puesto que el voltaje de una única bobina se ve afectado directamente por los fallos, en lugar de una medición indirecta de la corriente de fase total o del voltaje de fase total. El voltaje de una única bobina en bobinas conectadas en serie es menos sensible a las corrientes circulantes en las bobinas que compensan la f.c.e reducida.

15 [0017] Además, el uso de una medición de voltaje de una única bobina en lugar de monitorizar el voltaje de fase o corriente indirectamente requiere un procesamiento de señales más simple que las soluciones previas.

20 [0018] La sensibilidad potenciada también permite la detección de fallos incipientes (fallos magnéticos, excentricidad, deformación del entrehierro, etc.), lo que puede evitar fallos catastróficos potenciales y, por tanto, el coste operativo.

[0019] Gracias a este aspecto, no se necesitan sensores de entrehierro con una integración compleja en la máquina eléctrica para determinar un fallo por deformación del entrehierro.

25 **Breve descripción de los dibujos**

[0020] En lo que sigue, se describirán ejemplos no limitantes de la presente divulgación, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

30 la figura 1 ilustra una vista en perspectiva de una turbina eólica de acuerdo con un ejemplo;

la figura 2 representa esquemáticamente un rotor y un estátor de una máquina eléctrica de acuerdo con un ejemplo;

35 la figura 3 ilustra esquemáticamente un fallo por excentricidad del rotor de la máquina eléctrica de la figura 2;

la figura 4 ilustra esquemáticamente un fallo por deformación del entrehierro de la máquina eléctrica de la figura 2;

40 la figura 5 ilustra esquemáticamente dos ramales paralelos con dos bobinas conectadas en serie de la máquina eléctrica de la figura 2;

45 la figura 6 muestra un gráfico de una onda de voltaje en una única bobina de la figura 5 en un caso de fallo magnético;

la figura 7 muestra un gráfico de una descomposición de la onda de voltaje de la figura 6;

la figura 8 muestra una onda de voltaje en una única bobina de la figura 5 en un caso de fallo por excentricidad;

50 la figura 9 ilustra esquemáticamente un detalle de los dientes de estátor de la máquina eléctrica de la figura 2;

la figura 10 muestra un diagrama de flujo que representa un procedimiento de detección de fallos en una máquina eléctrica de acuerdo con un ejemplo.

55 **Descripción detallada de los ejemplos**

[0021] En estas figuras, los mismos signos de referencia se han usado para designar elementos coincidentes. En aras de claridad, algunas piezas no se han ilustrado.

60 [0022] La figura 1 ilustra una vista en perspectiva de un ejemplo de una turbina eólica 160. Como se muestra, la turbina eólica 160 incluye una torre 170 que se extiende desde una superficie de soporte 150, una góndola 161 montada en la torre 170 y un rotor 115 acoplado a la góndola 161. El rotor 115 incluye un buje 110 rotatorio y al menos una pala de rotor 120 acoplada a y que se extiende hacia afuera del buje 110. Por ejemplo, en el modo de realización ilustrado, el rotor 115 incluye tres palas de rotor 120. Sin embargo, en un modo de realización alternativo, el rotor 115 puede incluir más o menos de tres palas de rotor 120. Cada pala de rotor 120 se puede espaciar alrededor del buje 110 para facilitar la rotación del rotor 115 para posibilitar que la energía cinética se transfiera, a partir del viento, en

energía mecánica utilizable y, posteriormente, en energía eléctrica. Por ejemplo, el buje 110 se puede acoplar de forma rotatoria a un generador eléctrico. Este generador eléctrico es un ejemplo de máquina eléctrica 1, como se ilustra en la figura 2, situada dentro de la góndola 161 para permitir que se produzca energía eléctrica.

5 **[0023]** La figura 2 representa esquemáticamente un rotor 2 y un estátor 3 de una máquina eléctrica 1 de acuerdo con un ejemplo. Esta máquina eléctrica 1 puede ser un generador de turbina eólica de accionamiento directo que se puede disponer dentro de la góndola 161.

10 **[0024]** La máquina eléctrica 1 comprende el rotor 2 y el estátor 3 y el rotor 2 puede comprender una pluralidad de imanes m1, m2, m3, m4. En rotación, la pluralidad de imanes están dispuestos para orientarse de forma consecutiva hacia las bobinas a1, a2, a3, a4 del estátor 3 cuando el rotor se acciona. En el caso de un generador de turbina eólica, el rotor se pone en rotación por la rotación del rotor (que, a su vez, se rota bajo la acción del viento) para generar energía eléctrica.

15 **[0025]** De forma alternativa, se pueden disponer bobinas en el rotor 2 e imanes en el estátor 3. En este ejemplo, los imanes m1, m2, m3, m4 son imanes permanentes. En ejemplos alternativos, la máquina eléctrica puede ser un motor.

20 **[0026]** Uno del rotor 2 y del estátor 3 comprende dos bobinas conectadas en serie. Esto se puede ver en la figura 5, que ilustra esquemáticamente dos ramales paralelos b1, b2 de una fase con las respectivas dos bobinas de la máquina eléctrica de la figura 2 conectadas en serie. Como se muestra en la figura 5, las bobinas a1 y a2 están conectadas en serie entre sí y las bobinas a3 y a4 están conectadas en serie entre sí. Los dos ramales paralelos b1, b2 de la figura 5 pueden pertenecer a una fase a de la máquina eléctrica 1. Esta máquina eléctrica 1 puede comprender otras fases que, en aras de claridad, no se han ilustrado. En un ejemplo particular, la máquina eléctrica puede comprender otras dos fases, y, por tanto, tener tres fases. En otros ejemplos, se puede usar un número diferente de fases.

25 **[0027]** De acuerdo con un ejemplo ilustrado en la figura 2, la máquina eléctrica 1 puede comprender además un sensor 12, 14 para detectar un voltaje en una única bobina de las dos bobinas conectadas en serie y un controlador 11 para medir el voltaje a través del sensor 12, 14, y determinar una condición de fallo de la máquina eléctrica 1 en base a al menos el voltaje ea1, ea2, ea3, ea4 medido a lo largo del tiempo. Más adelante se describirán ejemplos de procedimientos para detectar un fallo.

30 **[0028]** En algunos ejemplos, el sensor 12, 14 puede ser cualquier dispositivo de detección adecuado que pueda detectar al menos una señal de voltaje o similar en una única bobina de la máquina eléctrica 1, tal como, por ejemplo, un voltímetro. El número de sensores 12, 14 puede variar dependiendo del caso, por ejemplo, una o más bobinas de la máquina eléctrica 1 pueden tener asociado a ellas un sensor 12, 14 de este tipo. A modo de ejemplo, en la figura 2, un primer sensor 12 está relacionado con la bobina a1 y un segundo sensor 14 está relacionado con la bobina a4.

35 **[0029]** En otros ejemplos, el controlador 11 puede ser un dispositivo de control que pueda al menos leer y recibir una señal de voltaje o similar a través de un dispositivo de detección como el sensor 12, 14.

40 **[0030]** El controlador 11 puede comprender un procesador y una memoria; la memoria puede almacenar instrucciones que comprenden funcionalidad para ejecutar un procedimiento de detección de una condición de fallo de acuerdo con cualquiera de los ejemplos que se divulgan en el presente documento. El procesador puede ejecutar instrucciones almacenadas por la memoria.

45 **[0031]** El controlador 11 se puede asociar y, por tanto, recibir y/o procesar señales de uno o más sensores 12, 14.

**[0032]** En algunos ejemplos, el controlador 11 y el sensor 12, 14 pueden estar en comunicación de datos.

50 **[0033]** Esta comunicación de datos puede ser, por ejemplo, por cable o inalámbrica. Todavía en otros ejemplos, el controlador 11 y sensor 12, 14 se pueden formar de forma solidaria.

55 **[0034]** Aunque el voltaje ea1 medido pertenece a la bobina a1 y el voltaje ea4 pertenece a la bobina a4 de acuerdo con las figuras 2 y 5, la operación de medición de voltaje se puede realizar de forma alternativa en cualquiera de las bobinas, por ejemplo, ea1, ea2, ea3 o ea4, incluso una pluralidad de únicas bobinas. En consecuencia, se puede adaptar una conexión por cable o inalámbrica del sensor 12, 14 y del controlador 1 a la bobina a1, a2, a3 o a4 específica.

60 **[0035]** En la figura 5, una corriente de fase se ha indicado como la y las corrientes circulantes en los ramales paralelos b1, b2 se han indicado como la<sub>bucle</sub>.

65 **[0036]** En un ejemplo de la máquina eléctrica 1 según la figura 2, el rotor 2 puede comprender una pluralidad de imanes m1, m2, m3, m4 y el estátor 3 puede comprender un primer par de bobinas a1, a2 conectadas en serie y un segundo par de bobinas a3, a4 conectadas en serie, en la que el segundo par de bobinas a3, a4 se puede disponer respectivamente en una posición azimutal diferente que el primer par de bobinas a1, a2, y puede comprender un primer sensor 12 asociado con una de las bobinas a1, a2 del primer par de bobinas, y un segundo sensor 14 asociado

a una de las bobinas a3, a4 del segundo par de bobinas a3, a4. Por ejemplo, cada bobina a1, a2, a3, a4 se puede disponer a las doce, tres, seis y nueve en punto (figura 2). En otras palabras, el ángulo azimutal entre los primer y segundo pares de bobinas puede ser de 180° en este ejemplo. También en este ejemplo, el ángulo azimutal entre las únicas bobinas puede ser de 90°. Al medir voltajes en, por ejemplo, una diferencia de ángulos de 90° o 180°, se puede obtener una visión general del rendimiento del rotor y/o estátor o una visión general del entrehierro alrededor del perímetro de la máquina eléctrica.

**[0037]** De acuerdo con algunos ejemplos de la máquina eléctrica 1, el estátor 3 puede estar en forma de anillo y comprender una pluralidad de dientes 31, en el que cada diente 31 está devanado con una única bobina. La figura 9 ilustra esquemáticamente un detalle de los dientes de estátor 31 de la máquina eléctrica 1 de la figura 2. La cantidad de bobinas se puede adaptar a las necesidades particulares y cada una de las bobinas está devanada alrededor de su diente 31 correspondiente, aunque en la figura 9 solo se ilustra la bobina a1. Aunque en este ejemplo el estátor se muestra que está radialmente fuera del rotor, también son posibles disposiciones alternativas, por ejemplo, el rotor radialmente fuera del estátor, y el rotor y el estátor orientados axialmente hacia sí.

**[0038]** De acuerdo con un aspecto, una turbina eólica 160 comprende una torre 170 y un generador, en la que el generador puede comprender un controlador 11 para controlar la operación del generador y un sensor 12, 14 para detectar un voltaje en una única bobina de dos o más bobinas conectadas en serie. El generador es un ejemplo de la máquina eléctrica 1. El controlador 11 se puede configurar para medir un voltaje en la única bobina a través del sensor 12, 14 y determinar una condición de fallo en base a al menos un voltaje ea1, ea2, ea3, ea4 medido a lo largo del tiempo.

**[0039]** De forma alternativa, el controlador 11 se puede configurar como una pieza separada del generador de modo que el controlador 11 pueda operar de forma remota. El controlador 11 se puede conectar por cable o de forma inalámbrica al generador.

**[0040]** En algunos ejemplos, la turbina eólica 160 puede comprender además un estátor 3 que tenga una pluralidad de bobinas a1, a2, a3, a4 y al menos dos de las bobinas estén conectadas en serie, en la que cada bobina a1, a2, a3, a4 se pueda devanar alrededor de un diente 31 del estátor 3.

**[0041]** En lo que sigue, se proporcionarán ejemplos de operación de las máquinas eléctricas 1 descritas anteriormente en relación con ejemplos de procedimientos de detección de fallos 200.

**[0042]** La figura 10 muestra un diagrama de flujo que representa un procedimiento de detección de fallos 200 en una máquina eléctrica 1 de acuerdo con un ejemplo.

**[0043]** La máquina eléctrica 1 del procedimiento de detección de fallos 200 puede tener un rotor 2 y un estátor 3, teniendo uno del rotor 2 y del estátor 3 al menos dos bobinas a1, a2, a3, a4 conectadas en serie. El rotor 2, el estátor 3 y las bobinas a1, a2, a3, a4 ya se han descrito, por lo que no se proporcionarán más detalles sobre ellos.

**[0044]** De acuerdo con un aspecto, el procedimiento de detección de fallos 200 de acuerdo con la figura 10 comprende medir 201 un voltaje ea1, ea2, ea3, ea4 en una única bobina de las dos bobinas conectadas en serie y determinar 202 una condición de fallo en base a al menos el voltaje ea1, ea2, ea3, ea4 medido a lo largo del tiempo. Como se menciona anteriormente, la única bobina puede ser cualquiera de a1, a2, a3 o a4 y cualquier bobina de las fases de la máquina eléctrica 1. Por este procedimiento ilustrativo de detección de fallos 200, se puede determinar un fallo debido a que el voltaje ea1 inducido en la única bobina a1 (o cualquier otra única bobina de la fase) se puede ver directamente afectado.

**[0045]** De acuerdo con este aspecto, el voltaje se detecta por el sensor 12, 14 y se mide por el controlador 11 a través de ese sensor 12, 14. El controlador 11 determina la condición de fallo en base al voltaje a lo largo del tiempo. La condición de fallo puede describir una condición de fallo negativo o una condición sin fallo, es decir, la máquina eléctrica 1 funciona apropiadamente. De otro modo, la condición de fallo puede describir una condición de fallo de la máquina eléctrica 1. Se exponen algunos ejemplos de condición de fallo:

De acuerdo con un ejemplo del procedimiento de detección de fallos 200, la condición de fallo se puede relacionar con una desmagnetización del imán m1, m2, m3, m4. La desmagnetización puede ser total o al menos parcial.

**[0046]** De acuerdo con otro ejemplo del procedimiento de detección de fallos 200, la condición de fallo se puede relacionar con un imán roto. De forma alternativa, la condición de fallo se puede relacionar con un imán desprendido, por ejemplo, del rotor 2.

**[0047]** La desmagnetización y el imán roto o desprendido se pueden considerar algunos ejemplos de fallos magnéticos.

**[0048]** De acuerdo con otro ejemplo del procedimiento de detección de fallos 200, la condición de fallo se puede relacionar con una excentricidad relativa entre el rotor 2 y el estátor 3 de la máquina eléctrica 1. La figura 3 ilustra esquemáticamente un fallo por excentricidad del rotor 2 de la máquina eléctrica 1 de la figura 2. En una condición de

operación, el rotor 2 puede rotar alrededor de un eje de rotación RR que sea sustancialmente concéntrico con respecto al estátor 3.

5 **[0049]** En la figura 3 se han referenciado diferentes distancias  $d_1$  y  $d_2$  entre las superficies del rotor 2 y del estátor 3 que se orientan hacia sí. Dicha diferencia se puede deber a colocaciones incorrectas del eje de rotación del rotor RR y del eje central del estátor CS, es decir, el eje de rotación del rotor RR y el eje central del estátor no coinciden. De esta manera, en la figura 3,  $d_1$  es más corta que  $d_2$ , pero  $d_2$  puede ser más corta que  $d_1$ , en particular, cuando el rotor 2 gira  $180^\circ$  alrededor de su eje de rotación RR.

10 **[0050]** Una máquina eléctrica 1 sin ninguna excentricidad sustancial comprendería un estátor 3, coincidiendo su eje central CS con el eje de rotación RR del rotor y, por lo tanto, tendría una sola distancia entre superficies orientadas del rotor y estátor.

15 **[0051]** La excentricidad del rotor 2 se puede definir con respecto a cualquier parte del estátor 3, no solo la posición ilustrada en la figura 3.

20 **[0052]** De acuerdo con todavía otro ejemplo del procedimiento de detección de fallos 200, la condición de fallo se puede relacionar con una deformación del entrehierro. La figura 4 ilustra esquemáticamente un fallo por deformación del entrehierro de la máquina eléctrica 1 de la figura 2.

25 **[0053]** Más en particular, esa deformación del entrehierro se puede provocar por cualquier deformación en al menos una pieza del rotor 2. Esa deformación puede producir diferentes entrehierros  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  y  $g_4$  definidos entre diferentes partes del rotor 2 y del estátor 3. En la figura 4,  $g_1$  y  $g_3$  tienen sustancialmente la misma longitud, mientras que  $g_2$  y  $g_4$  tienen sustancialmente la misma longitud. Esta disposición puede variar y todos los entrehierros pueden diferir entre sí. Además, la cantidad global de entrehierros también puede variar.

30 **[0054]** El procedimiento de detección de fallos 200 de acuerdo con algunos ejemplos puede comprender medir el voltaje  $ea_1$ ,  $ea_2$  en una única bobina  $a_1$  o  $a_2$  del primer par de bobinas y el voltaje  $ea_3$ ,  $ea_4$  en una única bobina  $a_3$  o  $a_4$  del segundo par de bobinas y mapear una forma de entrehierro entre el rotor 2 y el estátor 3 en base a los voltajes  $ea_1$ ,  $ea_2$ ,  $ea_3$ ,  $ea_4$  medidos. Este ejemplo del procedimiento se puede implementar cuando el rotor 2 comprende una pluralidad de imanes  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  y el estátor 3 comprende un primer par de bobinas  $a_1$ ,  $a_2$  conectadas en serie y un segundo par de bobinas  $a_3$ ,  $a_4$  conectadas en serie, en el que el segundo par de bobinas  $a_3$ ,  $a_4$  se puede disponer en una posición azimutal diferente con respecto al rotor 2 que el primer par de bobinas  $a_1$ ,  $a_2$ . Estas posiciones se pueden predefinir y se pueden distribuir alrededor del rotor 2 o del estátor 3, de esta manera se puede producir un mapeo exacto de la forma de entrehierro.

35 **[0055]** En algunos ejemplos, el procedimiento de detección de fallos 200 se implementa en una máquina eléctrica 1 que tiene al menos dos pares de bobinas conectadas en serie, por ejemplo,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ ,  $a_4$ , donde el segundo par de bobinas  $a_3$ ,  $a_4$  conectadas en serie está dispuesto en un ángulo azimutal de sustancialmente  $90^\circ$  o  $180^\circ$  desde el primer par de bobinas  $a_1$ ,  $a_2$ . Este rasgo característico se puede ver, por ejemplo, en la figura 2 y en la figura 5. Con dicha disposición, el mapeo de la forma de entrehierro se puede definir en las posiciones de doce, tres, seis y nueve en punto (es decir, ángulos azimutales de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ ).

40 **[0056]** En un ejemplo, cuando la máquina eléctrica 1 comprende una pluralidad de imanes  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ , el procedimiento de detección de fallos 200 puede comprender además calcular un valor de entrehierro local en base al voltaje medido a lo largo del tiempo y en base a al menos una de una velocidad de rotor y de una temperatura del imán.

45 **[0057]** En algunos otros ejemplos, cuando la máquina eléctrica 1 comprende una pluralidad de imanes  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ , el procedimiento de detección de fallos 200 puede comprender además calcular un valor de entrehierro local en base al voltaje medido a lo largo del tiempo y a una velocidad de rotor. El valor de entrehierro local se puede calcular también en base a la temperatura del imán.

50 **[0058]** El valor de entrehierro se puede calcular por el controlador 11.

55 **[0059]** La medición de la tensión puede variar si se lleva a cabo a una temperatura del imán predefinida (nominal) o a una temperatura del imán diferente, por ejemplo, menor que la predefinida, debido a que el flujo magnético de un imán puede variar dependiendo de la temperatura del imán.

60 **[0060]** Un voltaje inducido en una bobina es un derivado de un flujo magnético y el flujo magnético puede variar dependiendo, entre otros, de la velocidad del rotor.

65 **[0061]** Por lo tanto, al tener en cuenta el voltaje medido a lo largo del tiempo y al menos uno de la temperatura del imán y de la velocidad de rotor, se puede lograr un cálculo exacto del valor de entrehierro. Teniendo en cuenta el voltaje medido, la temperatura del imán y la velocidad de rotor, el cálculo de un valor de entrehierro puede ser incluso más exacto.

5 **[0062]** El voltaje ea1 medido puede comprender una onda como se ilustra en la figura 6. La figura 6 muestra un gráfico de una onda de voltaje en una única bobina a1 de la figura 5 en un caso de fallo magnético. En la figura 6, la f.c.e (fuerza contraelectromotriz) se representa como una función a lo largo del tiempo.

**[0063]** Para determinar la condición de fallo de la máquina eléctrica 1, se pueden implementar algunos enfoques alternativos en el controlador.

10 **[0064]** De acuerdo con un enfoque, el procedimiento puede comprender además, en algunos ejemplos, realizar un procesamiento de datos sobre la onda del voltaje medido a lo largo del tiempo. El procesamiento de datos se puede realizar por el controlador 11 en base a los datos de voltaje de la única bobina medidos a través del sensor 12.

15 **[0065]** El procesamiento de datos se puede basar de forma ilustrativa en una transformada de Fourier, por ejemplo, una transformada rápida de Fourier. De esa manera, se puede producir una representación en el dominio de frecuencia. La figura 7 muestra un gráfico de una descomposición de la onda de voltaje de la figura 6.

20 **[0066]** De forma alternativa, se pueden implementar otros algoritmos para descomponer la onda para convertir el voltaje ea1 medido (señal) desde su dominio de tiempo original en una representación en el dominio de frecuencia. La representación en el dominio de frecuencia obtenida por cualquier algoritmo alternativo puede ser igual o similar a la de la figura 7.

**[0067]** Si el controlador 11 lleva a cabo un procesamiento de datos, puede producir algunos valores como se representa en el gráfico de la figura 7.

25 **[0068]** En un ejemplo, el procedimiento de detección de fallos 200 puede comprender además buscar subarmónicos en una onda procesada con datos del voltaje ea1 medido. Esta acción se puede realizar por el controlador 11.

30 **[0069]** Aún en otro ejemplo, el procedimiento de detección de fallos 200 puede comprender además comparar subarmónicos en la onda procesada con datos y subarmónicos de una onda de referencia para determinar un tipo de fallo. La comparación se puede realizar por el controlador 11.

35 **[0070]** Algunos subarmónicos ilustrativos de una onda de referencia asociados con fallos ilustrativos se pueden almacenar en la memoria del controlador 11. El controlador puede comparar subarmónicos en la onda procesada con datos con dichos subarmónicos ilustrativos para buscar cualquier coincidencia exacta o al menos parcial. En caso de una coincidencia exacta o al menos parcial, el controlador 11 puede determinar un tipo o tipos de fallo que están asociados a esos subarmónicos.

40 **[0071]** De acuerdo con otro enfoque para determinar la condición de fallo, el procedimiento de detección de fallos 200 puede comprender, de acuerdo con algunos ejemplos, buscar una variación de amplitud en la onda del voltaje medido con respecto a una onda de voltaje de referencia. Como se menciona anteriormente, el voltaje medido puede comprender una onda. Esta variación de amplitud se puede buscar por el controlador 11.

45 **[0072]** En algunos ejemplos, el procedimiento puede comprender además comparar variaciones de amplitud en la onda del voltaje ea1 medido y en la onda de voltaje de referencia para determinar un tipo de fallo. La comparación se puede realizar por el controlador 11. La memoria del controlador 11 puede almacenar algunas formas de onda de voltaje de referencia que están asociadas con tipos de fallos específicos.

**[0073]** La variación de amplitud puede ser una reducción de amplitud o una ondulación de amplitud, por ejemplo.

50 **[0074]** La figura 6 es un ejemplo de una reducción de amplitud. Dicha reducción de amplitud se puede detectar comparando al menos uno de cada máximo y mínimo del voltaje ea1 medido con al menos uno del resto de máximos y mínimos del voltaje ea1. El controlador 11 puede buscar datos del voltaje medido en busca de una reducción de amplitud. Cuando se encuentra dicha reducción, a continuación, el controlador 11 puede determinar que la máquina eléctrica no funciona apropiadamente. En el gráfico de la figura 6, se encuentra una reducción de amplitud de aproximadamente entre 4 y 4,5 segundos.

55 **[0075]** A modo de ejemplo, si el controlador 11 detecta una reducción de amplitud como la de la figura 6, puede determinar un fallo magnético debido a que el voltaje ea1 inducido en la única bobina a1 (o cualquier otra única bobina de la fase) se ve afectado de una manera particular, puesto que el imán desmagnetizado está orientado hacia la bobina a1 cuando se reduce la amplitud del voltaje.

60 **[0076]** La figura 8 muestra una onda de voltaje en una única bobina de la figura 5 que se puede producir en el caso de una excentricidad. La figura 8 es un ejemplo de ondulación de amplitud, es decir, la amplitud de la línea del gráfico se incrementa y disminuye formando picos y valles. Si el controlador 11 detecta una ondulación de amplitud como la de la figura 8, puede determinar una condición de fallo por excentricidad según la figura 3, debido a que, cuando la distancia d2 se define cerca de la bobina a3, el voltaje ea1 inducido puede ser mayor en la bobina a1.

5 **[0077]** De acuerdo con un ejemplo del procedimiento de detección de fallos 200, este procedimiento se puede implementar en un ejemplo de máquina eléctrica 1 que es de un tipo trifásico y comprende dos ramales paralelos por fase, y cada ramal comprende dos bobinas conectadas en serie. El procedimiento se puede llevar a cabo en cada una de las fases o al menos en una de las fases.

10 **[0078]** En algunos ejemplos del procedimiento de detección de fallos 200 el fallo se puede relacionar con el rotor 2 de la máquina eléctrica 1, es decir, un procedimiento de detección de fallos 200 en un rotor 2 de una máquina eléctrica 1. Por ejemplo, el procedimiento también se puede relacionar con un fallo magnético del rotor 2, la excentricidad del rotor 2 con respecto al estátor 3 o una deformación del entrehierro como se ilustra en la figura 4.

15 **[0079]** Cuando se determina una condición de fallo relacionada con un fallo magnético, tal como una desmagnetización de un imán m1, m2, m3, m4 siguiendo el procedimiento de detección de fallos 200, se puede calcular un grado de fallo magnético (o específicamente un grado de desmagnetización) por el controlador 11 y, en base al grado de fallo magnético, se puede limitar una salida de la máquina eléctrica 1 (por ejemplo, generador) hasta que se repare(n) o reemplace(n) el/los imán/imanes defectuoso(s).

20 **[0080]** Cuando se determina una condición de fallo relacionada con una excentricidad relativa entre el rotor 2 y el estátor 3 de la máquina eléctrica 1 o relacionada con una deformación del entrehierro siguiendo el procedimiento de detección de fallos 200, se puede calcular un valor de fatiga en al menos una pieza defectuosa de la máquina eléctrica 1. Si el valor de fatiga excede un valor de fatiga de referencia, se puede reducir la vida útil de diseño esperada de la pieza defectuosa.

25 **[0081]** Esta descripción escrita usa ejemplos para divulgar la invención, incluyendo los modos de realización preferentes, y también para permitir que cualquier experto en la técnica ponga en práctica la invención, incluyendo fabricar y usar cualquier dispositivo o sistemas y realizar cualquier procedimiento incorporado. El alcance patentable de la invención se define por las reivindicaciones y puede incluir otros ejemplos se les ocurran a los expertos en la técnica.

30 **[0082]** Se pueden mezclar y equiparar aspectos de los diversos modos de realización descritos, así como otros equivalentes conocidos para cada uno de dichos aspectos, por un experto en la técnica, para construir modos de realización y técnicas adicionales de acuerdo con los principios de esta solicitud. Si los signos de referencia relacionados con los dibujos están colocados entre paréntesis en una reivindicación, son exclusivamente para intentar incrementar la inteligibilidad de la reivindicación y no se interpretarán como limitantes del alcance de la reivindicación.

35

**REIVINDICACIONES**

1. Un procedimiento de detección de fallos (200) en una máquina eléctrica (1) que tiene un rotor (2) y un estátor (3), en la que el estátor está radialmente fuera o dentro del rotor,  
 5 en la que el rotor (2) comprende una pluralidad de imanes (m1, m2, m3, m4) y el estátor (3) comprende una fase con un primer ramal y un segundo ramal dispuesto en paralelo con el primer ramal, incluyendo un primer par de bobinas (a1, a2) conectadas en serie en el primer ramal, y un segundo par de bobinas (a3, a4) conectadas en serie en el segundo ramal, el procedimiento comprendiendo:  
 10           medir (201) un voltaje en una única bobina de uno de los pares de bobinas conectadas en serie;  
               determinar (202) una condición de fallo en base a al menos el voltaje (ea1, ea2, ea3, ea4) medido a lo largo del tiempo.  
 15
2. El procedimiento (200) de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la condición de fallo está relacionada con la desmagnetización de un imán (m1, m2, m3, m4).
3. El procedimiento (200) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 2, en el que la condición de fallo está relacionada con un imán (m1, m2, m3, m4) roto.  
 20
4. El procedimiento (200) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 3, en el que la condición de fallo está relacionada con una excentricidad relativa entre el rotor (2) y el estátor (3) de la máquina eléctrica (1).
5. El procedimiento (200) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 4, en el que la condición de fallo está relacionada con una deformación del entrehierro.  
 25
6. El procedimiento (200) de acuerdo con la reivindicación 5, en el que el segundo par de bobinas (a3, a4) está dispuesto en una posición azimutal diferente con respecto al rotor (2) que el primer par de bobinas (a1, a2), el procedimiento comprendiendo:  
 30           medir el voltaje en una única bobina del primer par de bobinas (a1, a2) y en una única bobina del segundo par de bobinas (a3, a4);  
               mapear una forma del entrehierro entre el rotor (2) y el estátor (3) en base a los voltajes (ea1, ea2, ea3, ea4) medidos.  
 35
7. El procedimiento (200) de acuerdo con la reivindicación 5, el procedimiento comprendiendo además:  
 40           calcular un valor de entrehierro local en base al voltaje (ea1, ea2, ea3, ea4) medido a lo largo del tiempo y en base a al menos una de una velocidad de rotor y una temperatura del imán.
8. El procedimiento (200) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 7, en el que el voltaje (ea1, ea2, ea3, ea4) medido comprende una onda y el procedimiento comprende además:  
 45           realizar un procesamiento de datos sobre la onda del voltaje (ea1, ea2, ea3, ea4) medido a lo largo del tiempo.
9. El procedimiento (200) de acuerdo con la reivindicación 8, en el que el procedimiento comprende además:  
 50           buscar subarmónicos en una onda procesada con datos del voltaje (ea1, ea2, ea3, ea4) medido.
10. El procedimiento (200) de acuerdo con la reivindicación 9, en el que el procedimiento comprende además:  
 55           comparar subarmónicos en la onda procesada con datos y subarmónicos de referencia para determinar un tipo de fallo.
11. El procedimiento (200) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 7, en el que el voltaje medido comprende una onda y el procedimiento comprende además:  
 60           buscar una variación de amplitud en una onda del voltaje (ea1, ea2, ea3, ea4) medido con respecto a una onda de voltaje de referencia.
12. El procedimiento (200) de acuerdo con la reivindicación 11, en el que el procedimiento comprende además:  
 65           comparar variaciones de amplitud en el voltaje (ea1, ea2, ea3, ea4) medido y variaciones de amplitud en la onda de voltaje de referencia para determinar un tipo de fallo.

13. El procedimiento (200) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 12, en el que el fallo de la máquina eléctrica (1) está relacionado con el rotor (2) de la máquina eléctrica (1).
- 5 14. Una turbina eólica (160) que comprende una torre (170) y un generador,
- 10           teniendo el generador un rotor (2) y un estátor (3), en el que el estátor está radialmente fuera o dentro del rotor,
- 15           en la que el rotor (2) comprende una pluralidad de imanes (m1, m2, m3, m4) y el estátor (3) comprende una fase con un primer y un segundo ramal dispuesto en paralelo con el primer ramal, incluyendo un primer par de bobinas (a1, a2) conectadas en serie en el primer ramal, y un segundo par de bobinas (a3, a4) conectadas en serie en el segundo ramal,
- 20           y en la que el generador comprende además un controlador (11) para controlar la operación del generador y un sensor (12, 14) para detectar un voltaje en una única bobina de dos o más bobinas (a1, a2, a3, a4) conectadas en serie, en la que el controlador (11) está configurado para llevar a cabo un procedimiento de detección de fallos de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 - 11.
15. La turbina eólica (160) de acuerdo con la reivindicación 14, en la que cada bobina (a1, a2, a3, a4) está devanada alrededor de un único diente (31) del estátor (3).

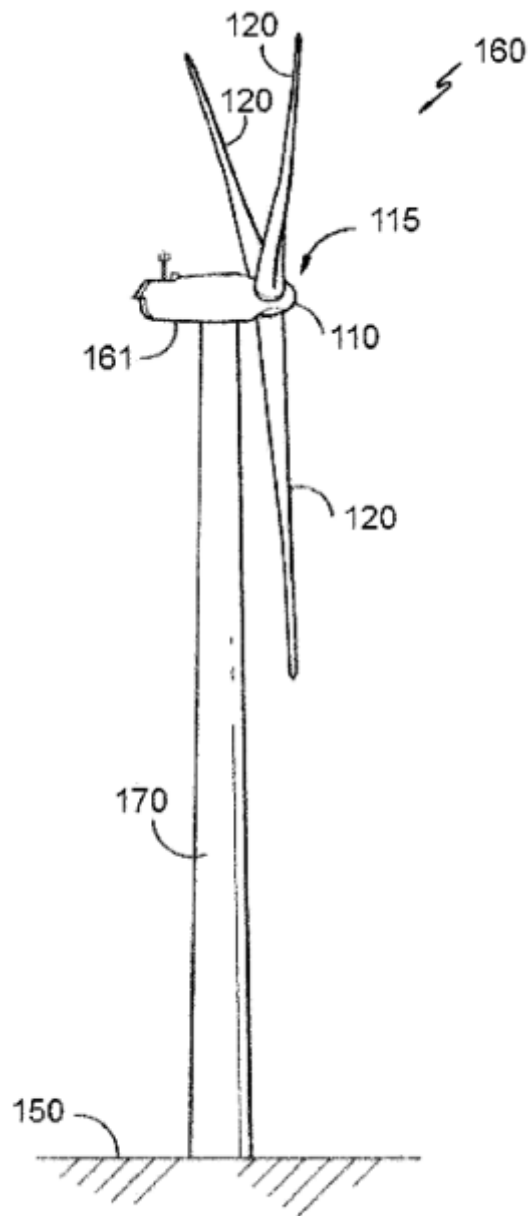


Figura 1

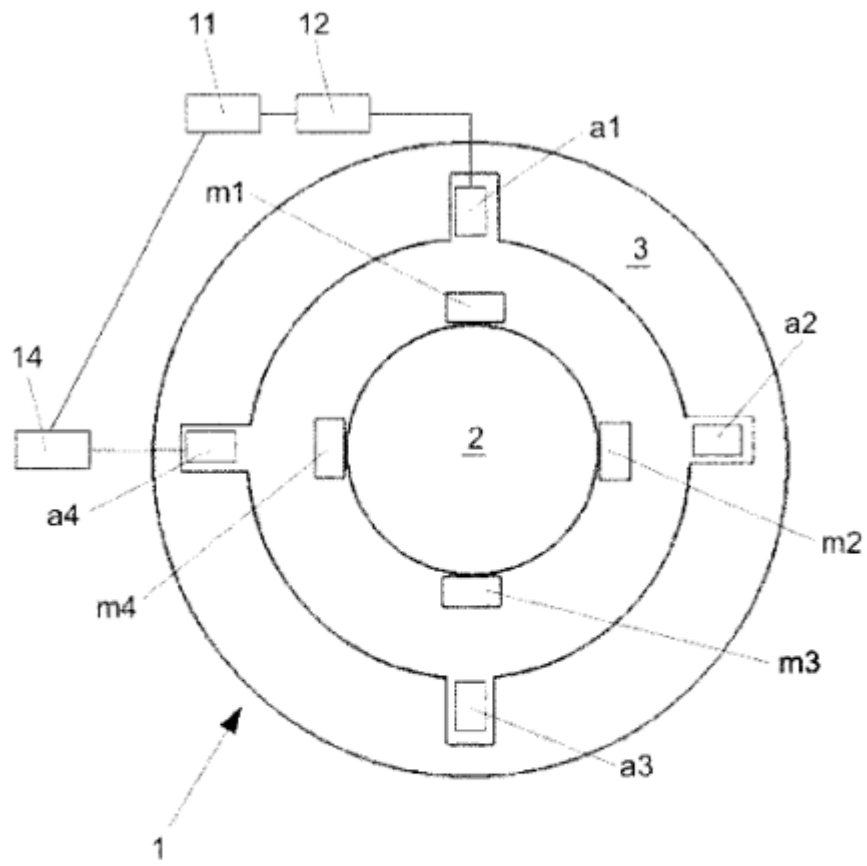


Figura 2

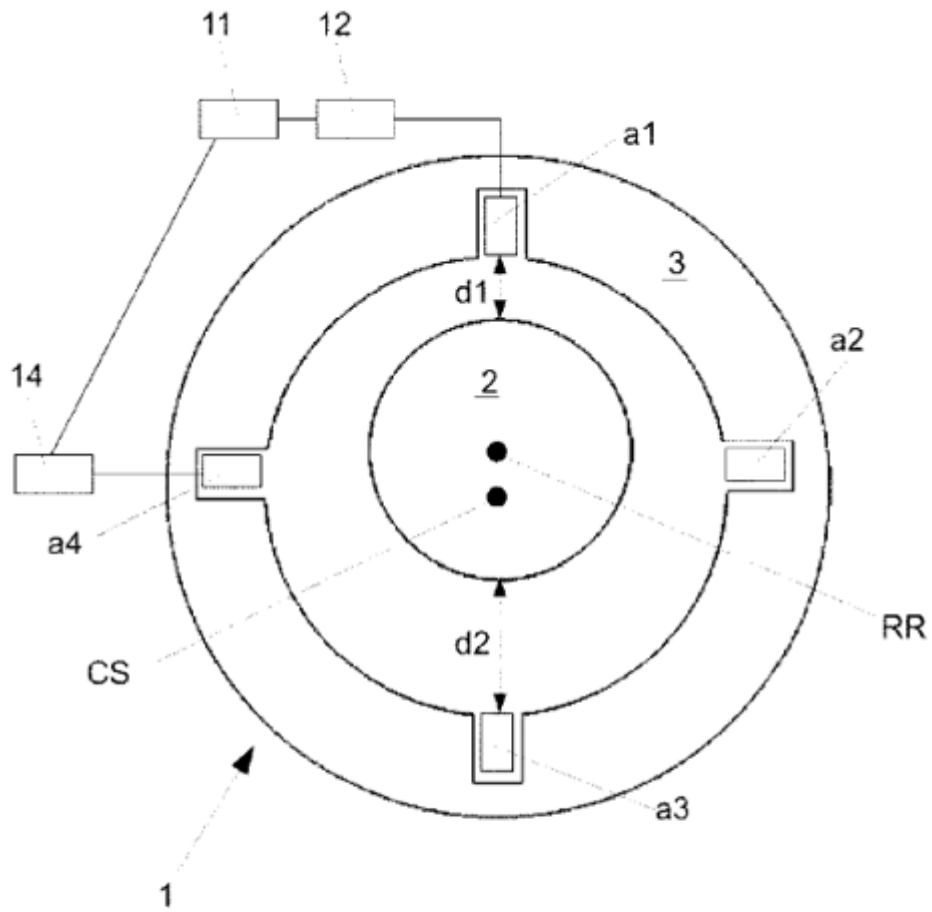


Figura 3

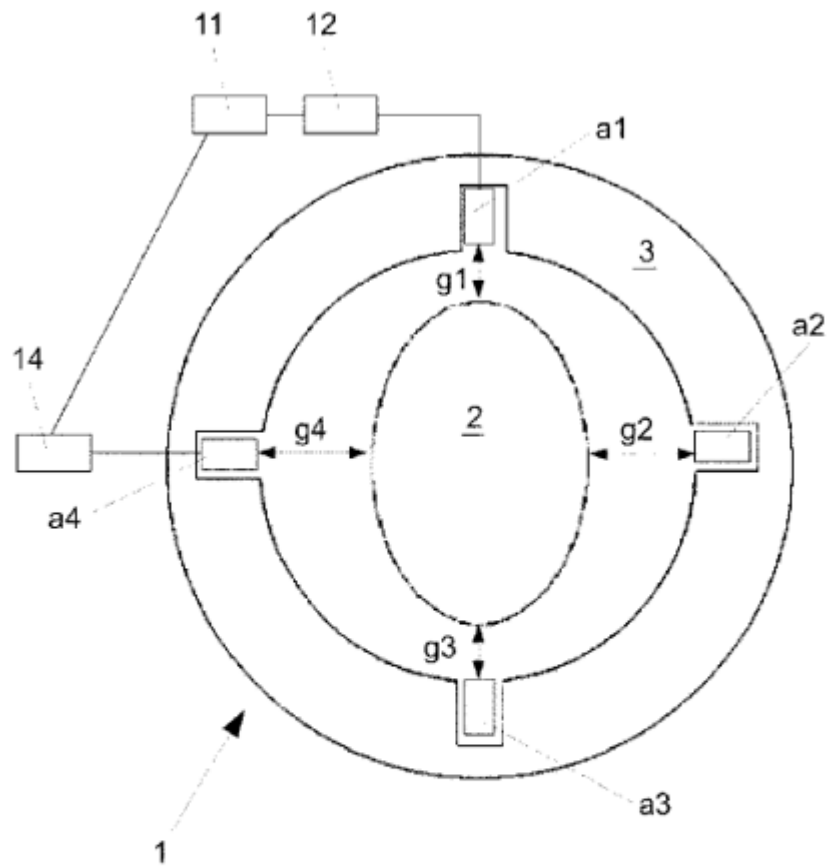


Figura 4

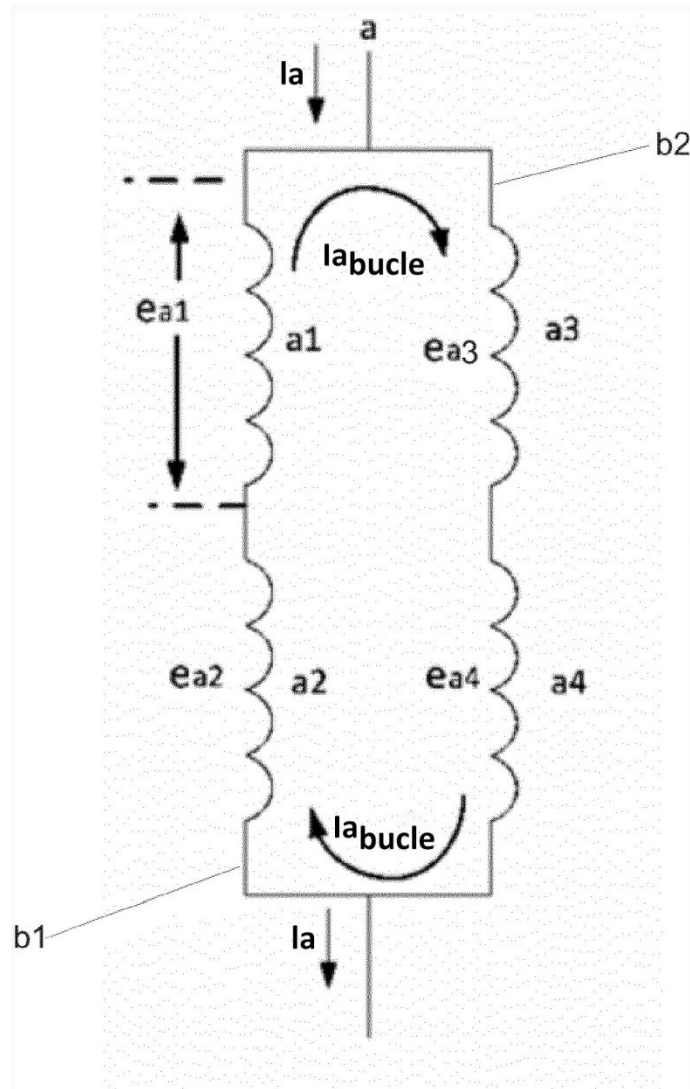


Figura 5

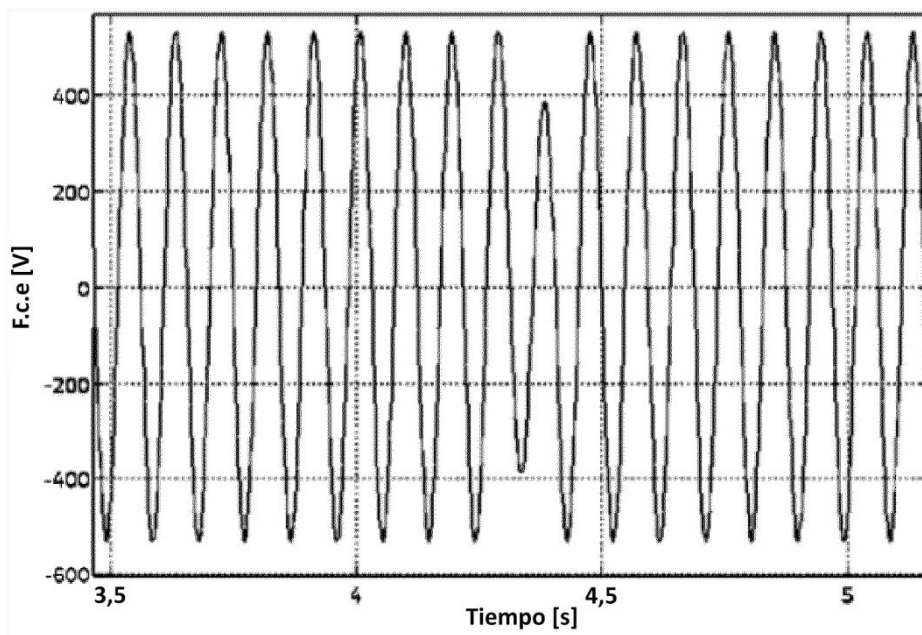
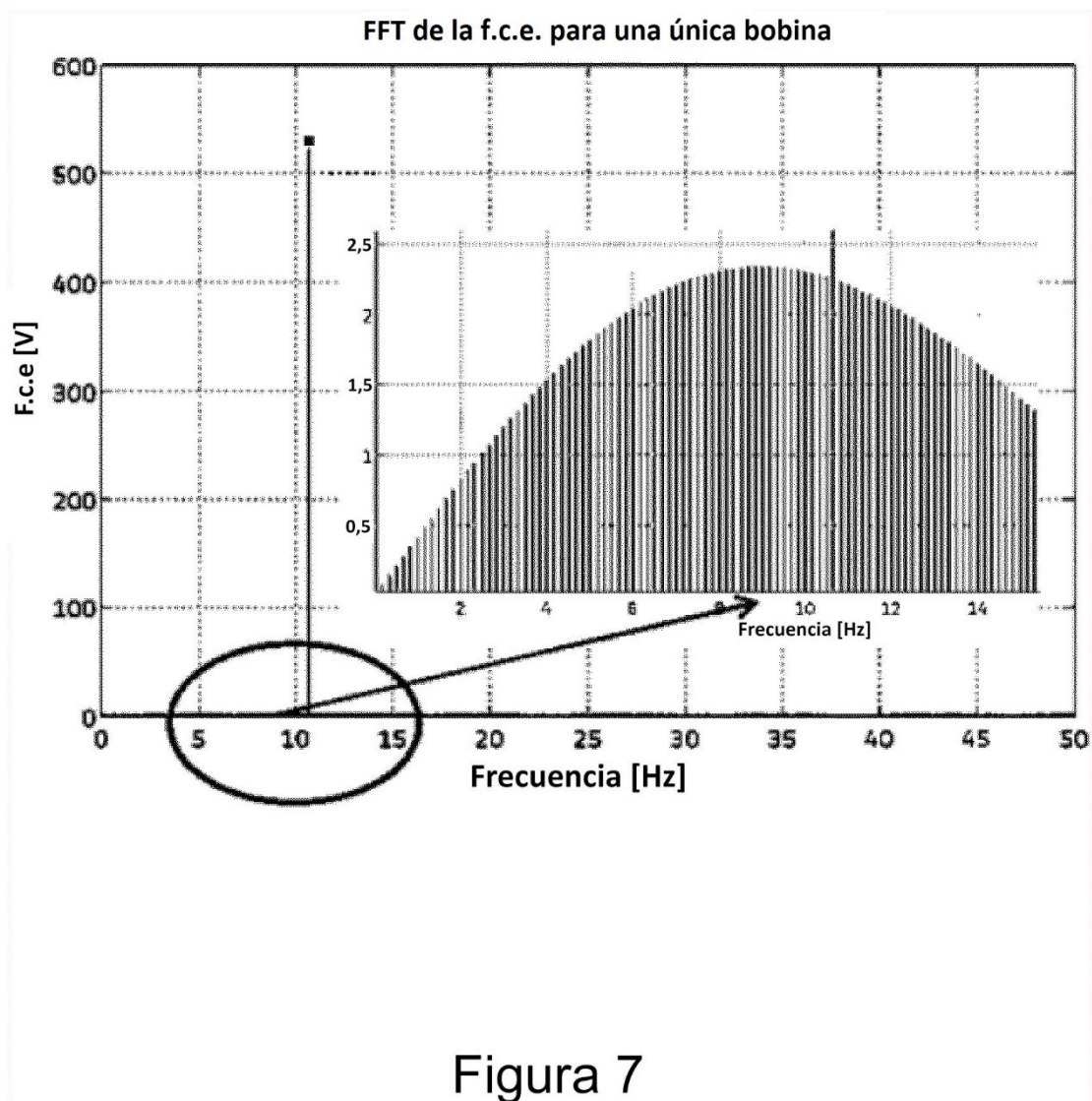


Figura 6



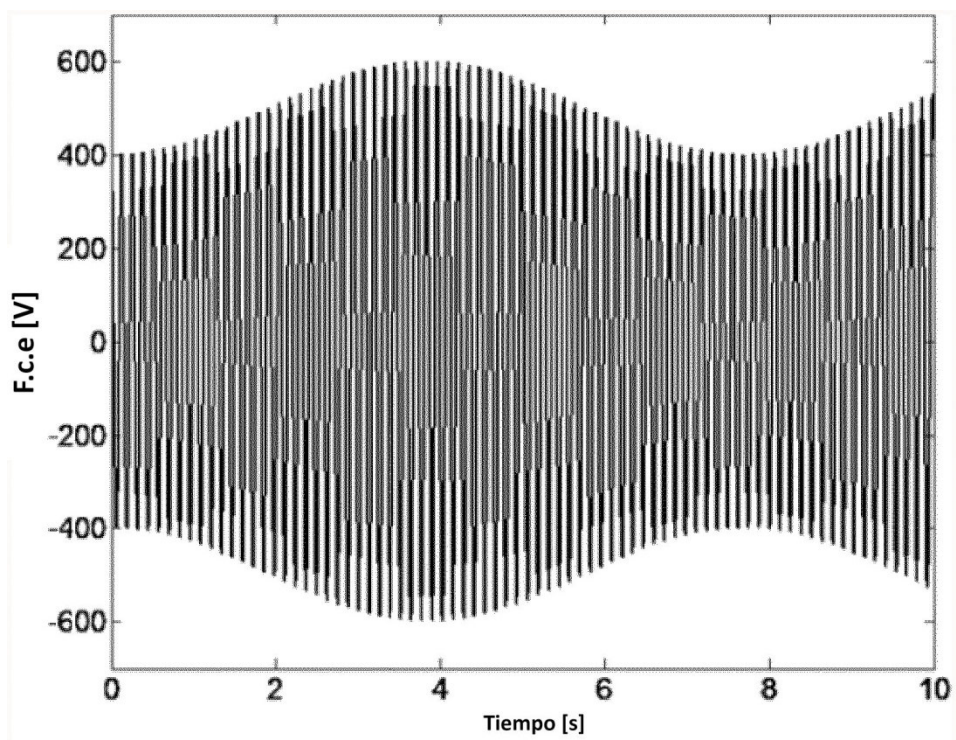


Figura 8

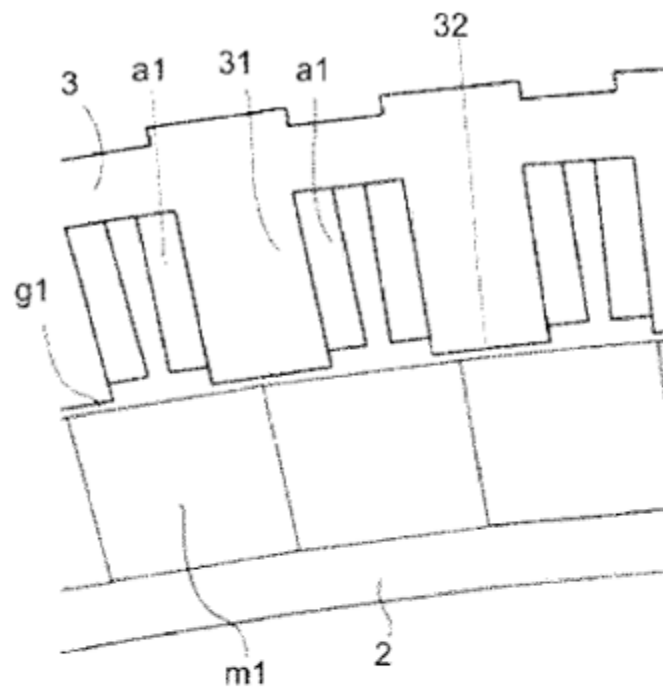


Figura 9

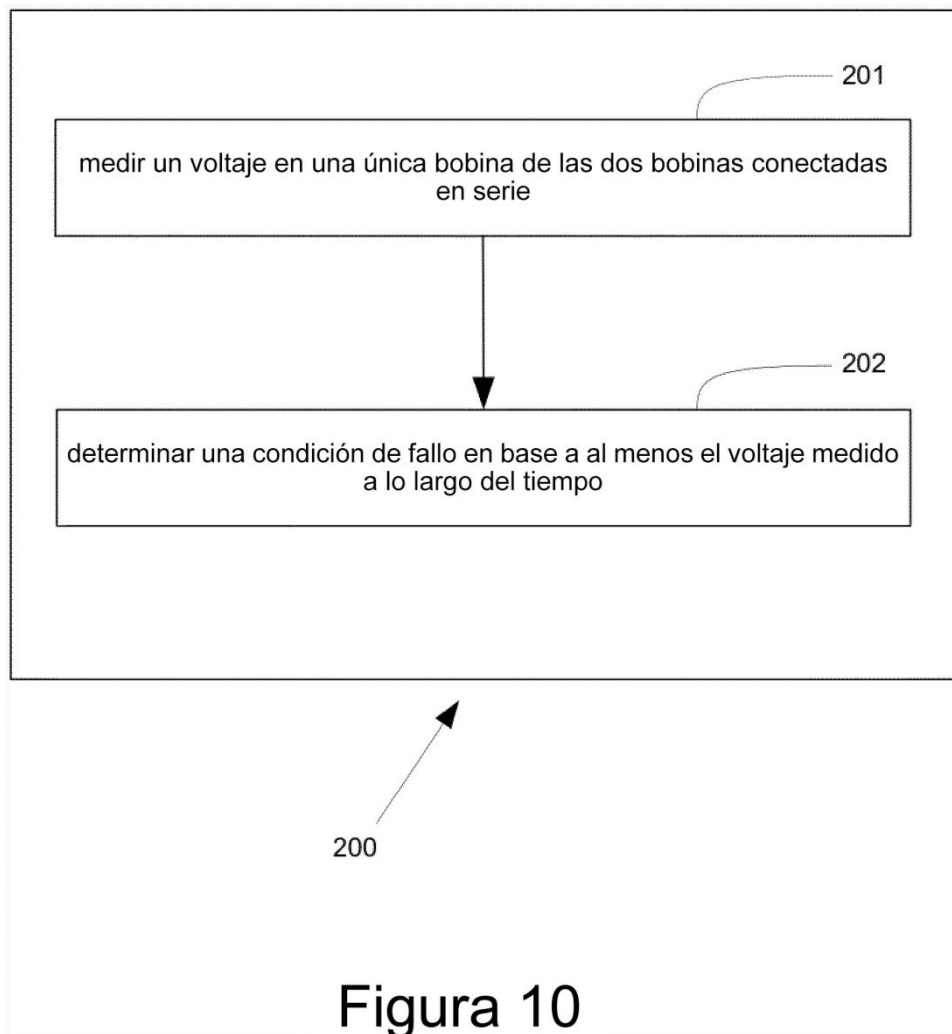


Figura 10