

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 880 694**

51 Int. Cl.:

G01R 31/34

(2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.11.2019** **E 19206751 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.05.2021** **EP 3657188**

54 Título: **Método y dispositivo de monitorización del estado para una máquina eléctrica de imanes permanentes**

30 Prioridad:

02.11.2018 NO 20181409

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

25.11.2021

73 Titular/es:

KONGSBERG MARITIME AS (100.0%)
Strandpromenaden 50
3183 Horten, NO

72 Inventor/es:

SWIDER, KRZYSZTOF;
SOLÅS, LEIF RUNE y
OKSAVIK, THOMAS

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 880 694 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y dispositivo de monitorización del estado para una máquina eléctrica de imanes permanentes

Área de la invención

5 La presente invención se refiere en general a máquinas eléctricas, y más particularmente a un método de monitorización del estado y a un dispositivo para máquina eléctrica de imanes permanentes. También se refiere a un sistema de máquina eléctrica que comprende tal dispositivo. Más específicamente, la invención se basa en señales proporcionadas por bobinas de búsqueda dispuestas en dientes del estator, y en el uso de un filtro analítico de paso de banda de Hilbert en el procesamiento de señales procedentes de dichas bobinas de búsqueda.

Antecedentes de la invención

10 En el caso de las máquinas mecánicas, las soluciones tradicionales de monitorización del estado de los equipos se han utilizado con éxito durante más de 40 años. La gama desarrollada de técnicas de monitorización se limita a las tareas a las que se dedicaron. En los últimos años, las actividades de investigación en el área marina han dado como resultado una nueva clase de máquinas eléctricas - de Imanes Permanentes (PM). Las máquinas de PM no tienen una construcción clásica que incluya mecanismo de engranajes de árbol ejemplar, conectado a un motor, etc. Por lo
15 tanto, las técnicas de monitorización estándar no son adecuadas. Las máquinas eléctricas de imanes permanentes requieren una nueva técnica de diagnóstico combinada para la monitorización que pueda proporcionar una solución para la detección de fallos, el diagnóstico de fallos y el pronóstico de fallos.

Técnica anterior

20 La solicitud de patente US 2013/0033215 A1 "Apparatus and method for permanente magnet electric machine condition monitoring" ("*Aparato y método para la monitorización del estado de la máquina eléctrica de imanes permanentes*") presenta un aparato y un método para determinar el estado de una máquina eléctrica. La solución según la solicitud de patente '215 se basa en la Transformada de Parker donde se estiman las Revoluciones por Minuto (RPM) en base a muchas señales de la bobina de búsqueda. La patente de EE.UU. 2013/0033215 A1 presenta
25 2 algoritmos para la estimación de fase/posición instantánea del rotor; uno para señales digitales y otro para señales analógicas utilizando una Transformación de Park que "transforma" corrientes y tensiones trifásicas en u e l de un solo fasor. A partir de estos fasores se estima la fase instantánea (posición del rotor). Tanto a la hora de estimar la excentricidad de la máquina eléctrica como de problemas con los imanes en el rotor, se necesitan más de dos bobinas de búsqueda. Los problemas con la solución según la solicitud de patente '215 son que se complica por el número de bobinas de búsqueda necesarias. La cantidad de bobinas de búsqueda también aumenta el costo tanto en lo que
30 respecta a la fabricación como al funcionamiento de la solución.

La solicitud de patente de EE.UU. 2013/0108488 A1 "Permanent magnet motor pump" ("*Bomba de motor de imanes permanentes*") presenta una invención relativa a una bomba de motor encapsulada sin sellado, más particularmente a una bomba de motor encapsulada anticorrosión y sin sellados que incluye un dispositivo de monitorización de cojinetes.

35 La solicitud de patente de EE.UU. 2013/0325373 A1 "Detecting faults in wind turbines" ("*Detección de fallos en turbinas eólicas*") presenta turbinas eólicas que generan electricidad sostenible. La confiabilidad de tales turbinas eólicas puede ser una correlación directa con la instalación y el mantenimiento adecuados de las turbinas. Esta confiabilidad se puede mejorar mediante el uso de varios métodos de monitorización de estado para garantizar la funcionalidad del dispositivo. Además, se enseña esta técnica en los documentos "Demagnetization Modeling and Fault Diagnostic Techniques in Permanent Magnet Machines Under Stationary and Nonstationary Conditions: An Overview" ("*Modelado de desmagnetización y técnicas de diagnóstico de fallos en máquinas de imanes permanentes en condiciones estacionarias y no estacionarias: una descripción general*"), por Fiaz et al, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, EE.UU. vol. 53, no. 3, 1 Mayo de 2017, páginas 2772-2785; "Detection and análisis of winding and demagnetization faults in PMSM based marine propulsión motors" ("*Detección y análisis de fallos de bobinado y desmagnetización en motores de propulsión marinos basados en PMSM*"), por Ahsanullah et al, IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE (IEMDC), IEEE, 21 de mayo de 2017, páginas 1-7; "Torque Ripple-Based interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Rotor Demagnetization Fault Detection and Current Regulation" ("*Detección de fallos de desmagnetización de rotor de máquina síncrona de imanes permanentes interior basado en ondulación de par y regulación de corriente*"), por Zhu et al, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, EE.UU., vol. 53, no. 3, 1 mayo de 2017, páginas 2795-2804; y "SEIG-based wind turbine condition monitoring using stray flux instantaneous frequency estimation" ("*Monitorización de estado de turbinas eólicas basado en SEIG usando estimación de frecuencia instantánea de flujo parásito*"), por Mohamed et al, IEEE 24th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE), IEEE, ("24^º SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA INDUSTRIAL (ISIE), IEEE"), 3 de junio de 2015, páginas 861-866.
55

Las soluciones de monitorización de la técnica anterior en la presente área presentan uno o más de los problemas enumerados a continuación: soluciones complejas, caras tanto en lo que respecta a la fabricación como a la operación/mantenimiento, y que requieren una pluralidad de bobinas de búsqueda.

Objetos de la presente invención

El objeto general de la invención es proporcionar un método, un dispositivo y una máquina eléctrica capaces de resolver uno o más de los problemas con soluciones según el estado de la técnica en general, y según los problemas identificados anteriormente en particular.

- 5 Otro objeto es proporcionar una solución más sencilla y rentable.

Más específicamente, un objeto de la presente invención es proporcionar una monitorización del estado de una máquina eléctrica basada en menos bobinas de búsqueda que las soluciones de la técnica anterior.

Incluso más específicamente, un objeto de la presente invención es proporcionar una estimación de RPM (Revoluciones Por Minuto) basada en una sola bobina de búsqueda.

- 10 Otro objeto específico es proporcionar una solución para la visualización de problemas con imanes en el rotor basada en una sola bobina de búsqueda.

Otro objeto más es proporcionar una solución para la visualización de la excentricidad basada en dos bobinas de búsqueda.

Compendio de la invención

- 15 Los objetivos y ventajas se logran mediante un método, un dispositivo y una máquina eléctrica como se define en las reivindicaciones independientes. Las realizaciones preferidas también se definen en las reivindicaciones dependientes.

Un primer aspecto de la invención es un método de monitorización del estado de una máquina eléctrica de imanes permanentes, donde la máquina eléctrica comprende un rotor con varios imanes permanentes y un estator con dientes de estator, y donde al menos una primera bobina de búsqueda está dispuesta en un primero de los dientes del estator. El método comprende las siguientes etapas:

- 20 El método comprende las siguientes etapas:

I) Etapas iniciales:

- establecer una línea de base de estado basada en una de las siguientes: i) una línea de base de estado predefinida, y ii) un estado actual para la máquina eléctrica de PM en funcionamiento sin fallos, donde el estado actual se establece mediante las etapas siguientes de procesamiento previo, filtrado, extracción, y establecimiento del estado actual;

II) Etapas operativas:

- procesar previamente una señal de bobina de búsqueda analógica procedente de cada bobina de búsqueda aplicando un filtro antisolapamiento que proporciona una señal de bobina de búsqueda antisolapamiento, y convertir la señal de la bobina de búsqueda antisolapamiento en una señal de bobina de búsqueda digital;
- 30 - filtrar la señal de la bobina de búsqueda digital mediante un filtro analítico de paso de banda de Hilbert, proporcionando una señal de la bobina de búsqueda analítica;
- extraer características de la señal de la bobina de búsqueda analítica;
- establecer un estado actual basado en las características extraídas;
- 35 - monitorizar el estado de la máquina eléctrica de imanes permanentes basado en el estado actual y en la línea de base del estado.

Preferiblemente, la señal de la bobina de búsqueda digital $s[n]$ se filtra mediante el filtro analítico de paso de banda de Hilbert que proporciona la señal analítica (compleja) $u[n] = H \{s[n]\}$ donde H tiene una respuesta de frecuencia dada por la ecuación:

$$H(f) = \begin{cases} 2 & \text{para } 0 \leq f \leq f_c \\ 0 & \text{para } f < 0 \\ 0 & \text{para } f > f_c \end{cases} ; f \in [-0.5, 0.5)$$

- 40 donde F es una frecuencia normalizada dada por la siguiente ecuación

$$f = \frac{F}{F_s}; \quad f \in [-0.5, 0.5)$$

donde F_s es una frecuencia de muestreo [Sa/s] y f_c es una frecuencia de corte normalizada.

- Opcionalmente, la etapa de extraer características para la primera bobina de búsqueda comprende las siguientes etapas: calcular la amplitud instantánea como el valor absoluto de la señal de la bobina de búsqueda analítica, estimar la frecuencia instantánea basada en la señal de la bobina de búsqueda analítica y acumular la fase instantánea basada

en la frecuencia instantánea. La frecuencia instantánea se estima preferiblemente en base a una señal de bobina u_1 de búsqueda analítica incluso si debiesen estar disponibles más señales de bobina de búsqueda

$$f_{inst}[n] = \frac{\text{Im} \left(\ln \left(\frac{u_1[n]}{u_1[n-1]} \right) \right)}{2\pi n_m},$$

- 5 donde Im significa la parte imaginaria, ln significa logaritmo natural, n es un tiempo discreto [Sa] y n_m significa el número de imanes en el rotor, y donde la fase instantánea se obtiene a partir de la frecuencia instantánea de la siguiente manera:

$$\varphi[n] = \begin{cases} 0 & \text{para } n = -1 \\ 2\pi \text{fr} \left(f_{inst}[n] + \frac{\varphi[n-1]}{2\pi} \right) & \text{para } n = 0, 1, \dots \end{cases}$$

donde fr () significa la función de fracción.

- 10 Opcionalmente, cuando la máquina eléctrica comprende una segunda bobina de búsqueda dispuesta en un segundo de los dientes del estator, y dispuesta en un ángulo de 90 grados con la primera bobina de búsqueda, donde la etapa de extraer características para la segunda bobina de búsqueda comprende solo la siguiente etapa: calcular la amplitud instantánea como el valor absoluto de la señal de la bobina de búsqueda analítica.

- 15 Opcionalmente, la etapa de extraer características comprende calcular una señal de salida compleja basada en las amplitudes instantáneas de la primera y segunda señales de la bobina de búsqueda y la fase instantánea de la segunda señal de la bobina de búsqueda. Preferiblemente, la señal de salida se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$w[n] = (a_1[n] + j \cdot a_2[n])e^{j(\varphi[n])};$$

donde $j = \sqrt{-1}$ y donde a_1 y a_2 son las amplitudes instantáneas de la primera y segunda señales de la bobina de búsqueda, y $\varphi[n]$ es la fase instantánea de la primera señal de la bobina de búsqueda.

- 20 Preferiblemente, la etapa de monitorización comprende presentar una vista del estado actual y una vista correspondiente de la línea de base del estado en un sistema de coordenadas común dispuesto para inspección visual. La etapa de presentar puede comprender mostrar la amplitud instantánea en función de la fase instantánea para el estado actual y la línea base del estado correspondiente en un diagrama de ojo común.

Preferiblemente, la etapa de monitorización comprende presentar la señal de salida compleja $w[n]$ como gráfico 2D.

- 25 La etapa de monitorización puede comprender las siguientes etapas:

- calcular las desviaciones entre el estado actual y la línea de base del estado; y al menos una de las siguientes etapas:
- presentar las desviaciones dispuestas para la evaluación manual; y
- evaluar automáticamente las desviaciones.

- 30 La etapa de evaluar automáticamente las desviaciones se puede computarizar.

- 35 Otro aspecto de la invención es un dispositivo de monitorización del estado para una máquina eléctrica de imanes permanentes, donde la máquina eléctrica comprende un rotor con varios imanes permanentes y un estator con dientes de estator, y donde al menos una primera bobina de búsqueda está dispuesta en un primero de los dientes del estator, donde el dispositivo está dispuesto para realizar el método descrito anteriormente. El dispositivo comprende al menos la primera bobina de búsqueda, medios para recibir una señal de la bobina de búsqueda procedente de la al menos primera bobina de búsqueda, medios para convertir una señal de la bobina de búsqueda analógica procedente de la bobina de búsqueda, en una señal de la bobina de búsqueda digital, medios para filtrar la señal de la bobina de búsqueda digital por un filtro analítico de paso de banda de Hilbert, a una señal analítica, medios para extraer amplitud, frecuencia instantánea y fase instantánea de la señal analítica, y medios para monitorizar el estado.

- 40 Los medios del dispositivo pueden comprender preferiblemente un ordenador y un monitor para la presentación.

Otro aspecto más de la invención es un sistema de máquina eléctrica de imanes permanentes, que comprende una máquina eléctrica de imanes permanentes que comprende un rotor con varios imanes permanentes, un estator con dientes de estator y un dispositivo de monitorización del estado como se describe anteriormente.

Opcionalmente, el dispositivo de monitorización del estado comprende solo una bobina de búsqueda, y la bobina de búsqueda está dispuesta alrededor de uno de los dientes del estator. Opcionalmente, el dispositivo de monitorización del estado comprende dos bobinas de búsqueda dispuestas en dientes de estator separados de manera que los ejes centrales de las dos bobinas de búsqueda sean ortogonales.

5 Breve descripción de las figuras

Las características anteriores y adicionales de la invención se exponen con particularidad en las reivindicaciones adjuntas y junto con las ventajas de las mismas resultarán más claras a partir de la consideración de la siguiente descripción detallada de una realización ejemplar de la invención dada con referencia a los dibujos adjuntos.

10 La invención se describirá con más detalle a continuación en relación con realizaciones ejemplares que se muestran esquemáticamente en los dibujos, en los que:

- La Figura 1 presenta un estator de una máquina eléctrica de imanes permanentes según la invención, donde se montan dos bobinas de búsqueda sobre dientes colocados a 90 grados entre sí.
- La Figura 2 presenta un diagrama de bloques de un algoritmo según la invención.
- La Figura 3 presenta un ejemplo de visualización en forma de un "diagrama de ojo" donde la amplitud instantánea estimada se presenta como una función de la fase instantánea estimada.
- La Figura 4 presenta un ejemplo de visualización en forma de diagrama 2D de una señal compleja basada en dos señales de bobina de búsqueda.
- La Figura 5 ejemplos de visualización del estado de una máquina eléctrica, aquí un Motor de PM, como sigue: (a) línea de base, (b) problema con el imán y (c) problema con la excentricidad.

20 Descripción de formas de realización preferidas de la invención

Varios aspectos de la descripción se describen de forma más completa a continuación con referencia a los dibujos adjuntos. Sin embargo, esta descripción puede realizarse de muchas formas diferentes y no debe interpretarse como limitada a ninguna estructura o función específica presentada a lo largo de esta descripción. Más bien, estos aspectos se proporcionan para que esta descripción sea exhaustiva y completa, y transmita completamente el alcance de la descripción a los expertos en la técnica. Basándose en las enseñanzas de la presente memoria, un experto en la técnica debería apreciar que el alcance de la descripción está destinado a cubrir cualquier aspecto de la descripción descrita en la presente memoria, ya sea implementado independientemente o combinado con cualquier otro aspecto de la descripción. Por ejemplo, se puede implementar un aparato o se puede poner en práctica un método usando cualquier número de los aspectos expuestos en la presente memoria. Además, el alcance de la descripción está destinado a cubrir tal aparato o método que se implementa usando otra estructura, funcionalidad o estructura y funcionalidad además de, o distintos de, los diversos aspectos de la descripción expuestos en la presente memoria o distintos de ellos. Debe entenderse que cualquier aspecto de la descripción descrita en la presente memoria puede estar incluido en uno o más elementos de una reivindicación.

35 La invención se describirá adicionalmente en relación con realizaciones ejemplares que se muestran esquemáticamente en los dibujos.

En la presente descripción, se presentan un método y un dispositivo para la monitorización del estado de una máquina eléctrica de imanes permanentes (PM). También se presenta una máquina eléctrica que comprende tal dispositivo. La monitorización del estado en este contexto incluye la monitorización de la intensidad del campo magnético de un imán individual. También puede incluir la monitorización del equilibrio o deformación del rotor en la máquina eléctrica.

40 La Figura 1 presenta un estator de una máquina eléctrica de imanes permanentes según la invención. Dos bobinas de búsqueda están dispuestas sobre dos dientes del estator colocados con una separación angular de 90 grados. Las bobinas de búsqueda se ven afectadas por el campo magnético de un imán que pasa. Este campo magnético induce una tensión en cada una de las bobinas de búsqueda, y estas tensiones pueden ser captadas por un sistema de adquisición de datos conectado. Al medir y adquirir las tensiones inducidas, un dispositivo/sistema de monitorización puede monitorizar la intensidad de campo de los imanes individuales del rotor que depende directamente de la magnetización.

La Figura 1 presenta una solución con dos bobinas de búsqueda. Las soluciones con una sola bobina de búsqueda también son relevantes para ciertas realizaciones de la invención. También se incluyen realizaciones con más de dos bobinas de búsqueda.

50 La Figura 2 representa una realización de un algoritmo comprendido por el método según la invención. El método se basa en las señales de la bobina de búsqueda y proporciona monitorización de la condición/estado, es decir, monitorización del estado del imán, excentricidad y otros modos de fallo de la máquina eléctrica de imanes permanentes.

Más concretamente, la Figura 1 presenta un diagrama de bloques del algoritmo, donde:

$s_1(t)$ - señal de bobina de búsqueda analógica procedente del sensor 1,

$s_2(t)$ - señal de bobina de búsqueda analógica procedente del sensor 2,

α - ángulo entre los sensores de la bobina de búsqueda,

5 $s_1[n]$ - señal de bobina de búsqueda digital,

$s_2[n]$ - señal de bobina de búsqueda digital,

$u_1[n]$ - señal analítica,

$u_2[n]$ - señal analítica,

$a_1[n]$ - amplitud instantánea,

10 $a_2[n]$ - amplitud instantánea,

$f_{inst}[n]$ - frecuencia instantánea,

$\phi[n]$ - fase instantánea,

$w[n]$ - señal compleja,

F_s - frecuencia de muestreo,

15 F_c - frecuencia de corte normalizada

El algoritmo propuesto proporciona la extracción de características de la máquina eléctrica a partir de las señales ($s_1(t)$ y $s_2(t)$) de la bobina de búsqueda. Las señales de la bobina de búsqueda contienen información sobre el estado del imán y las fuerzas/interacciones entre los imanes y los devanados del estator de la máquina eléctrica. El campo magnético de cada imán se mide indirectamente a partir de la tensión inducida por la bobina que el campo atraviesa la ubicación de los sensores. Desafortunadamente, es muy difícil extraer esta información de los datos sin procesar de las bobinas de búsqueda. Debido a que este sensor es una bobina que mide tensiones inducidas, también capta ruido eléctrico del resto de la máquina. Este enfoque basado en la teoría de las señales complejas permite la extracción de amplitud y frecuencia de la señal real. Cabe señalar que la información sobre la intensidad del campo de los imanes está en las amplitudes ($a_1[n]$ y $a_2[n]$) de las señales de la bobina de búsqueda. La información sobre la velocidad de rotación del rotor está representada por la frecuencia instantánea ($f_{inst}[n]$) de la señal ($s_1(t)$ o $s_2(t)$) de la bobina de búsqueda. El algoritmo se puede ver como tres etapas:

1. Procesamiento previo de datos (que comprende antialiasing y conversión de AD) y extracción de características: en esta etapa, la información sobre la amplitud y la frecuencia se extrae en función de las señales $s_1(t)$ y $s_2(t)$ de la bobina de búsqueda haciendo uso de una transformada de filtro analítico de paso de banda de Hilbert. La frecuencia y la fase instantáneas se estiman en función de la señal de la bobina de búsqueda procedente de una sola bobina de búsqueda.

2. Visualización: en esta etapa, una señal compleja $w[n]$ se representa en un diagrama 2D y la amplitud instantánea en función de la fase instantánea se representa en un "diagrama de ojo".

3. Pronóstico de estado y detección de fallos: en esta etapa, el estado se evalúa en función de las discrepancias del comportamiento de línea de base esperado/predefinido. Esto puede realizarse manualmente mediante inspección visual o automáticamente, p. ej., mediante el uso de un algoritmo de aprendizaje de máquina (MLA).

Con más detalle, el algoritmo se puede describir como sigue. El algoritmo funciona en base a dos señales $s_1(t)$ y $s_2(t)$ de bobina de búsqueda analógicas. Suponemos que el ángulo α entre los sensores es igual a 90 grados. Para una solución basada en solo 2 señales de bobina de búsqueda, esta condición debe cumplirse.

40 En una primear etapa, ambas señales $s_1(t)$ y $s_2(t)$ se convierten en señales digitales (con respecto a la teoría de muestreo), ello significa

$$s_1[n] = s_1(t)|_{t=n/F_s}; \quad n = 0, 1, \dots$$

$$s_2[n] = s_2(t)|_{t=n/F_s}; \quad n = 0, 1, \dots$$

$$s_1[n] = s_1(t)|_{t=n/F_s}; \quad n = 0, 1, \dots (1)$$

$$45 \quad s_2[n] = s_2(t)|_{t=n/F_s}; \quad n = 0, 1, \dots (2)$$

donde $s_1[n]$ y $s_2[n]$ son las señales digitales, F_s es la frecuencia de muestreo [S_a/s] y n es el tiempo discreto [S_a]. En la siguiente etapa, ambas señales digitales $s_1[n]$ y $s_2[n]$ son filtrados por el filtro de Hilbert analítico de paso de banda, con una respuesta de frecuencia dada por la ecuación:

$$H(f) = \begin{cases} 2 & \text{para } 0 \leq f \leq f_c \\ 0 & \text{para } f < 0 \\ 0 & \text{para } f > f_c \end{cases} ; f \in [-0.5, 0.5] \quad (3)$$

donde f es una frecuencia normalizada dada por la ecuación (4) a continuación, y f_c es una frecuencia de corte normalizada.

$$f = \frac{F}{F_s}; \quad f \in [-0.5, 0.5] \quad \text{Ec. (4)}$$

En las salidas de ambos filtros analíticos, las señales analíticas complejas $u_1[n]$ y $u_2[n]$ se reciben:

$$u_1[n] = H\{s_1[n]\}, \quad \text{Ec. (5)}$$

$$u_2[n] = H\{s_2[n]\}, \quad \text{Ec. (6)}$$

Las amplitudes instantáneas (envolventes) se calculan en base a las señales analíticas de la siguiente manera:

$$a_1[n] = |u_1[n]| \quad (7)$$

$$a_2[n] = |u_2[n]| \quad (8)$$

Además, se estima la frecuencia instantánea, con base en la señal $u_1[n]$ de acuerdo con la Ec. 9 a continuación. Esto implica que la frecuencia instantánea se estima en base a una señal de bobina de búsqueda incluso si deberían estar disponibles más señales de bobina de búsqueda.

$$f_{inst}[n] = \frac{\text{Im} \left(\ln \left(\frac{u_1[n]}{u_1[n-1]} \right) \right)}{2\pi n_m} \quad \text{Ec. (9)}$$

donde Im significa la parte imaginaria del número complejo, $\ln$ significa logaritmo natural y n_m significa el número de imanes en el rotor. La fase instantánea se obtiene a partir de la frecuencia instantánea de la siguiente manera:

$$\varphi[n] = \begin{cases} 0 & \text{para } n = -1 \\ 2\pi \text{fr} \left(f_{inst}[n] + \frac{\varphi[n-1]}{2\pi} \right) & \text{para } n = 0, 1, \dots \end{cases} \quad \text{Ec. (10)}$$

donde $\text{fr}()$ significa la función de fracción. Finalmente, la señal de salida según la Ec. 11 a continuación se utiliza para la visualización:

$$w[n] = (a_1[n] + j \cdot a_2[n])e^{j(\varphi[n])}; \quad \text{Ec. (11)}$$

donde $j = \sqrt{-1}$

La última etapa es el pronóstico del estado y la detección de fallos. Primero, se establece la línea de base del estado. Para la máquina eléctrica de imanes permanentes, la línea de base de estado tiene una forma circular simétrica (gráfico 2D) o un patrón regular en el "diagrama de ojo". Se indica un fallo cuando se detecta una desviación de la línea de base. Las desviaciones pueden, por ejemplo, ser el resultado de una pérdida de intensidad magnética o una excentricidad. Ambos casos se muestran en la Figura 2 como se detalla a continuación.

La Figura 3 presenta un ejemplo de visualización en forma de un "diagrama de ojo" donde la amplitud instantánea estimada se presenta como una función de la fase instantánea estimada. El diagrama de ojo se crea tomando la señal en el dominio del tiempo y superponiendo la forma de onda en una ventana de tiempo definida por valores de fase instantánea.

- 5 La Figura 4 presenta un ejemplo de visualización en forma de diagrama 2D de una señal compleja basada en dos señales de bobina de búsqueda.

La Figura 5 ejemplos de visualización de la salud de una máquina eléctrica, aquí un Motor de PM, como sigue: (a) línea de base, (b) problema con el imán y (c) problema con la excentricidad.

Aplicabilidad industrial

- 10 La invención descrita es adecuada en una variedad de aplicaciones para máquinas eléctricas. La invención es una solución rentable para proporcionar un control del estado de tales máquinas eléctricas.

REIVINDICACIONES

1. Un método de control del estado para una máquina eléctrica de imanes permanentes, donde la máquina eléctrica comprende un rotor con varios imanes permanentes y un estator con dientes de estator, y donde al menos una primera bobina de búsqueda está dispuesta en el primero de los dientes del estator. donde el método comprende las siguientes etapas:

I) Etapas iniciales:

- establecer una línea de base de estado basada en uno de los siguientes: i) una línea de base de estado predefinida, y ii) un estado actual para la máquina eléctrica de PM en funcionamiento sin fallos, donde el estado actual se establece mediante las etapas siguientes de procesamiento previo, filtrado y extracción y establecimiento del estado actual;

II) Etapas operativas:

- procesar previamente una señal de bobina de búsqueda analógica procedente de cada bobina de búsqueda aplicando un filtro antisolapamiento que proporciona una señal de bobina de búsqueda antisolapada, y convertir la señal de bobina de búsqueda antisolapamiento en una señal de bobina de búsqueda digital;
- filtrar la señal de la bobina de búsqueda digital mediante un filtro analítico de paso de banda de Hilbert, que proporciona una señal de bobina de búsqueda analítica;
- extraer características a partir de la señal de la bobina de búsqueda analítica;
- establecer un estado actual basado en las características extraídas;
- monitorizar la salud de la máquina eléctrica de imanes permanentes en función del estado actual y la línea de base del estado.

2. Método según la reivindicación 1, donde la señal $s[n]$ de la bobina de búsqueda digital se filtra mediante el filtro de Hilbert analítico de paso de banda que proporciona la señal analítica (compleja) $u[n] = H\{s[n]\}$ donde H tiene una respuesta de frecuencia dada por la ecuación:

$$H(f) = \begin{cases} 2 & \text{para } 0 \leq f \leq f_c \\ 0 & \text{para } f < 0 \\ 0 & \text{para } f > f_c \end{cases} ; f \in [-0.5, 0.5)$$

donde f es una frecuencia normalizada dada por la siguiente ecuación

$$f = \frac{F}{F_s}; \quad f \in [-0.5, 0.5)$$

donde F_s es una frecuencia de muestreo [Sa/s].

3. Método según una de las reivindicaciones anteriores, donde la etapa de extraer características para la primera bobina de búsqueda comprende las siguientes etapas:

- calcular la amplitud instantánea como el valor absoluto de la señal de la bobina de búsqueda analítica,
- estimar la frecuencia instantánea en base a la señal de la bobina de búsqueda analítica; y
- acumular la fase instantánea en base a la frecuencia instantánea.

4. Método según la reivindicación 3, donde la frecuencia instantánea se estima en base a una señal de bobina u_i de búsqueda analítica incluso si debiesen estar disponibles más señales de bobina de búsqueda

$$f_{inst}[n] = \frac{\text{Im} \left(\ln \left(\frac{u_1[n]}{u_1[n-1]} \right) \right)}{2\pi n_m},$$

donde Im significa la parte imaginaria, ln significa logaritmo natural, y $norte$ es un tiempo discreto [Sa], y n_{metro} significa el número de imanes en el rotor, y donde la fase instantánea se obtiene a partir de la frecuencia instantánea de la siguiente manera:

$$\varphi[n] = \begin{cases} 0 & \text{para } n = -1 \\ 2\pi \text{fr} \left(f_{inst}[n] + \frac{\varphi[n-1]}{2\pi} \right) & \text{para } n = 0, 1, \dots \end{cases}$$

donde fr () significa la función de fracción.

5. Método para evaluar la salud de una máquina eléctrica de imanes permanentes según una de las reivindicaciones anteriores, donde la máquina eléctrica comprende una segunda bobina de búsqueda dispuesta en un segundo de los

dientes del estator, y dispuesta en un ángulo de 90 grados con la primera bobina de búsqueda, donde la etapa de extraer características para la segunda bobina de búsqueda comprende la siguiente etapa:

- calcular la amplitud instantánea como el valor absoluto de la señal de la bobina de búsqueda analítica.

5 6. Método según la reivindicación 5, donde la etapa de extraer características comprende además calcular una señal de salida compleja basada en las amplitudes instantáneas de la primera y segunda señales de la bobina de búsqueda y la fase instantánea de la segunda señal de la bobina de búsqueda.

7. Método según la reivindicación 6, donde la señal de salida se calcula según la siguiente ecuación:

$$w[n] = (a_1[n] + j \cdot a_2[n])e^{j(\phi[n])}; \quad \text{donde } j = \sqrt{-1}$$

10 y donde a_1 y a_2 son las amplitudes instantáneas de la primera y segunda señales de la bobina de búsqueda, y $\phi[n]$ es la fase instantánea de la primera señal de la bobina de búsqueda.

8. Método según una de las reivindicaciones anteriores, donde la etapa de monitorización comprende las siguientes etapas:

- presentar una vista del estado actual y una vista correspondiente de la línea de base del estado en un sistema de coordenadas común dispuesto para inspección visual.

15 9. Método según la reivindicación 8, en el que la etapa de presentación comprende visualizar la amplitud instantánea en función de la fase instantánea para el estado actual y la línea base del estado correspondiente en un diagrama de ojo común.

10. Método según una de las reivindicaciones 7 a 9, donde la etapa de monitorización comprende además presentar la señal de salida compleja $w[n]$ como diagrama 2D.

20 11. Método según la reivindicación 2, donde la etapa de monitorización comprende las siguientes etapas:

- calcular las desviaciones entre el estado actual y la línea de base del estado; y al menos una de las siguientes etapas:

- i) presentar las desviaciones dispuestas para la evaluación manual; y

- ii) evaluar automáticamente las desviaciones.

25 12. Método según la reivindicación 11, donde la etapa de evaluar automáticamente las desviaciones está computarizada.

13. Un dispositivo de control de la salud para una máquina eléctrica de imanes permanentes, donde la máquina eléctrica comprende un rotor con varios imanes permanentes y un estator con dientes de estator, y donde al menos una primera bobina de búsqueda está dispuesta en el primero de los dientes del estator, donde el dispositivo está dispuesto para realizar el método según una de las reivindicaciones anteriores, y donde el dispositivo comprende:

30 - la al menos la primera bobina de búsqueda;
 - medios para recibir una señal de bobina de búsqueda desde la al menos primera bobina de búsqueda;
 - medios para convertir una señal de bobina de búsqueda analógica procedente de la bobina de búsqueda en una señal de bobina de búsqueda digital;
 - medios para filtrar la señal de la bobina de búsqueda digital mediante un filtro analítico de paso de banda de Hilbert,
 35 a una señal analítica;
 - medios para extraer amplitud, frecuencia instantánea y fase instantánea de la señal analítica; y
 - medios para controlar el estado.

14. Dispositivo de monitorización del estado según la reivindicación 13, en el que el medio comprende un ordenador y un monitor.

40 15. Un sistema de máquina eléctrica de imanes permanentes, que comprende:

- una máquina eléctrica de imanes permanentes que comprende un rotor con varios imanes permanentes, un estator con dientes de estator; y
 - un dispositivo de monitorización del estado según una de las reivindicaciones 13 a 14.

45 16. Sistema según la reivindicación 15, en el que el dispositivo de monitorización del estado comprende solo una bobina de búsqueda, y la bobina de búsqueda está dispuesta alrededor de uno de los dientes del estator.

17. Sistema según la reivindicación 15, en el que el dispositivo de monitorización del estado comprende dos bobinas de búsqueda dispuestas en dientes de estator separados de manera que los ejes centrales de las dos bobinas de búsqueda sean ortogonales.

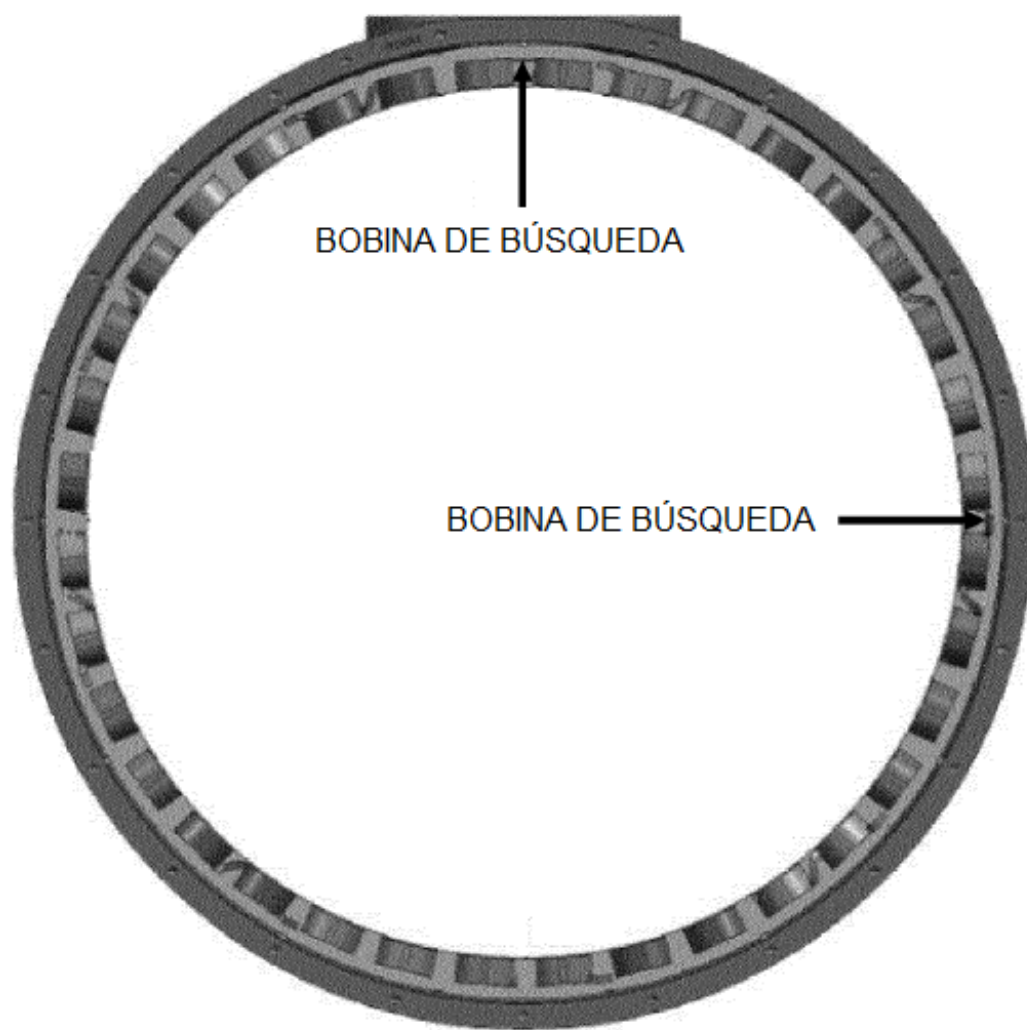


Fig. 1

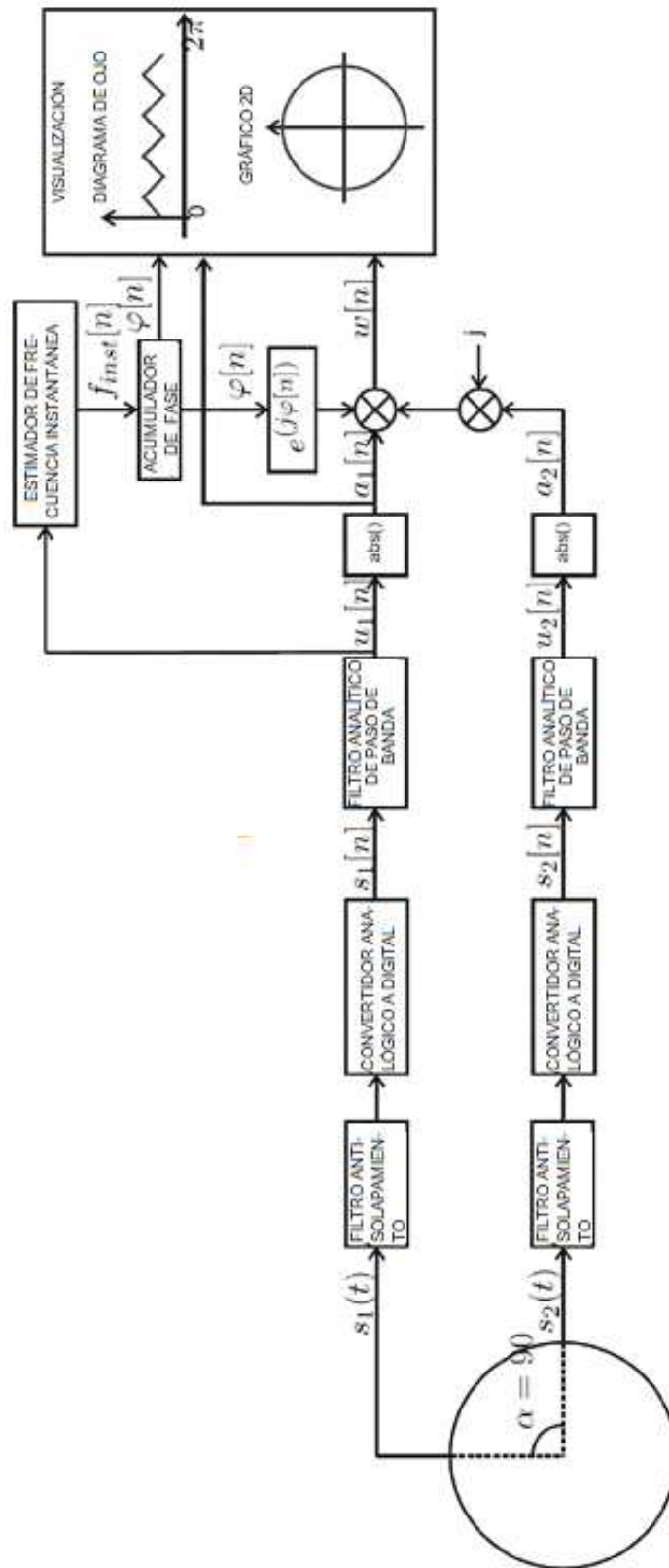


Fig. 2

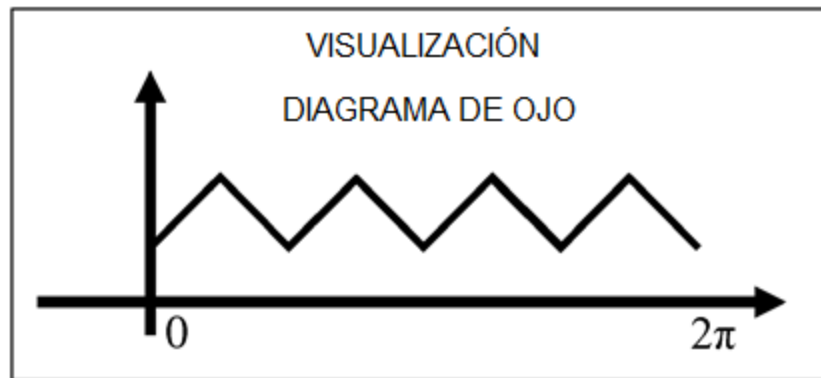


Fig. 3

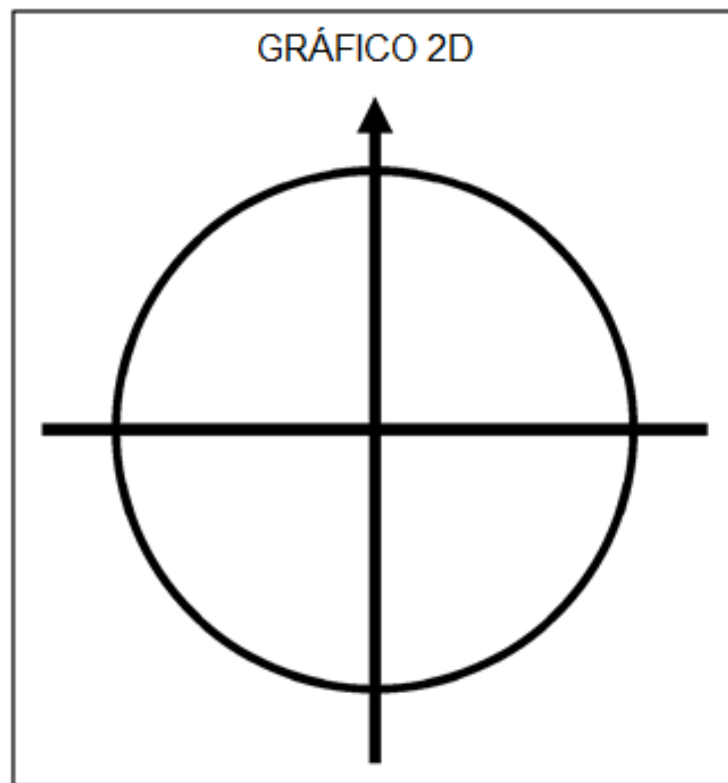


Fig. 4

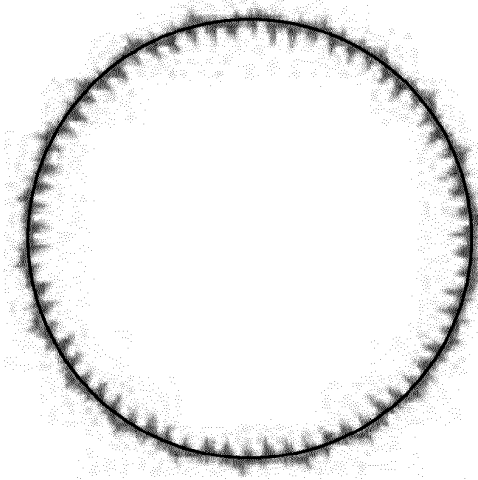


Fig. 5a

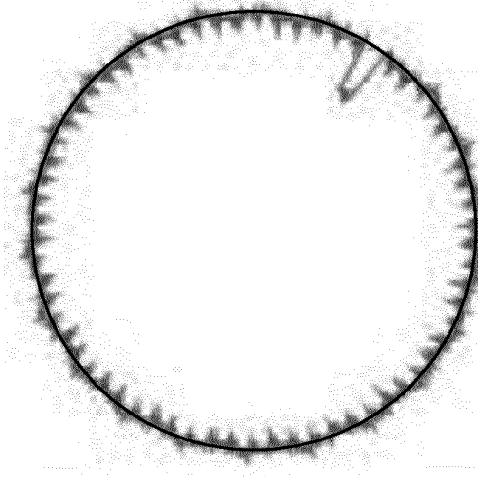


Fig. 5b

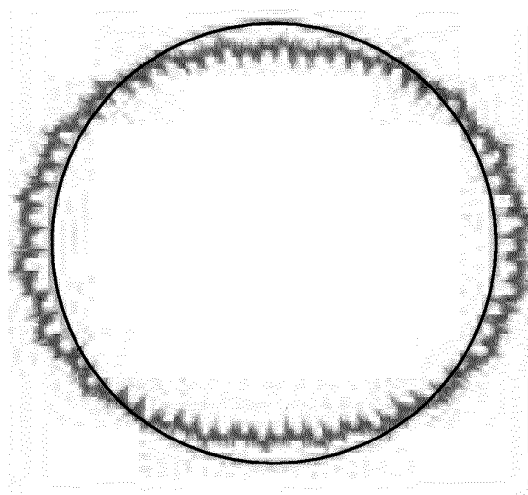


Fig. 5c