(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 738 649**

(21) Número de solicitud: 201930913

(51) Int. Cl.:

G01R 31/34 (2010.01)
H02K 19/16 (2006.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

15.10.2019

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

24.01.2020

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (100.0%)
AVDA. RAMIRO DE MAEZTU Nº 7
28040 MADRID ES

(72) Inventor/es:

PLATERO GAONA, Carlos Antonio;
TIAN, Pengfei y
MARTÍNEZ CID, José María

(74) Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

(54) Título: **SISTEMA Y MÉTODO DE PROTECCIÓN ANTE FALTAS ENTRE ESPIRAS EN DEVANADOS DE EXCITACIÓN DE MAQUINAS SÍNCRONAS DE POLOS SALIENTES**

(57) Resumen:

Sistema y método de protección ante defectos entre espiras en el devanado de excitación de máquinas síncronas de polos salientes basado en el análisis de Fourier de la señal de flujo disperso, donde a partir de la relación de las amplitudes de los armónicos correspondiente a la frecuencia eléctrica de la máquina (f1) y a la frecuencia de giro (f1/p), se determina si hay defecto.

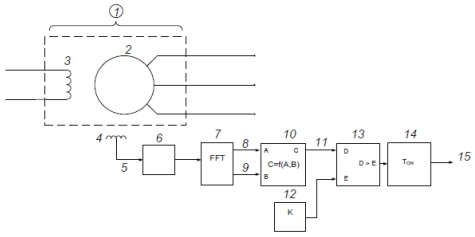

Figura 1

ES 2 738 649 A1

D E S C R I P C I Ó N

SISTEMA Y MÉTODO DE PROTECCIÓN ANTE FALTAS ENTRE ESPIRAS EN DEVANADOS DE EXCITACIÓN DE MAQUINAS SÍNCRONAS DE POLOS SALIENTES

OBJETO DE LA INVENCIÓN

La presente invención consiste en una nueva protección mediante la detección de faltas entre espiras en los devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes cuando la máquina está en funcionamiento.

Una clara aplicación son los sistemas de generación de energía eléctrica, en los que se utilizan generadores síncronos. Con el sistema objeto de la presente invención se pretende detectar el defecto entre espiras en los devanados de excitación en máquinas de polos salientes a través de la medida del flujo disperso en el exterior de la máquina.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Toda instalación eléctrica debe estar dotada de sistemas de protección que la hagan segura ante posibles cortocircuitos y otros defectos que puedan causar daños tanto a las propias instalaciones como a las personas.

En el caso de grupos de generación, dichas protecciones deben, además, garantizar el suministro de energía a la red del modo más fiable posible, tratando de discriminar los niveles de gravedad de las faltas que se produzcan.

Uno de los posibles defectos que se pueden presentar en las máquinas síncronas, es la falta entre espiras en los devanados de excitación.

Los devanados de excitación son alimentados por corriente continua. El defecto entre espiras en estos devanados puede no ser peligroso, admitiéndose en algunas máquinas un determinado porcentaje de espiras en cortocircuito.

Sin embargo, los defectos entre espiras pueden llegar a ser un problema serio

para las máquinas síncronas, ya que pueden dar lugar a altos excesos de corriente, oscilaciones pendulares, problemas térmicos y cortocircuitos en el devanado de excitación.

Por lo tanto, es una práctica usual la de comprobar el estado del devanado de excitación cuando la máquina está totalmente parada.

Uno de los métodos más utilizado es el conocido como equilibrio de polos (Pole drop test). Este ensayo consiste en alimentar el devanado de excitación con una tensión determinada y comprobar la tensión en cada uno de los polos que componen el devanado. Si alguna de las tensiones medidas es inferior a la del resto de los polos, esto indica que en el polo correspondiente existe un defecto entre espiras. Normalmente este ensayo se realiza con una fuente de tensión de corriente alterna, aunque también funciona con corriente continua.

Otro método es la aplicación de una onda de tensión con muchas frecuencias, y hacer un análisis de la respuesta en frecuencia del devanado. Se puede hacer con una onda cuadrada (tipo delta Dirac) o bien con una onda senoidal donde se varía la frecuencia. Para evaluar si el devanado tiene defecto o no hay que comparar el resultado del ensayo con otro ensayo en condiciones normales sin defecto. Otra posibilidad es realizar el ensayo polo a polo y compararlos, si algún polo tiene una respuesta en frecuencia distinto, indica que tiene un defecto.

Todos estos métodos necesitan que la máquina esté fuera de servicio para verificar si hay defecto entre espiras en el devanado de excitación.

Además, conviene tener en cuenta una serie de patentes y artículos relacionadas con la invención:

PCT/US2010/021948 (25.01.2010) ES2426970 T3 (28.10.2013) General Electric Company (100.0%) ROBUST ON-LINE STATOR TURN FAULT IDENTIFICATION SYSTEM. Esta patente no detecta defectos entre espiras en el rotor.

P201431921 (23.12.2014) ES2534950 A1 (30.04.2015) UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (100.0%) Sistema y método de protección ante faltas entre espiras en máquinas síncronas. Esta patente se basa en el cálculo de la corriente teórica de excitación, y sólo se puede utilizar con máquinas de las que

se disponen de ensayos previos.

M. Cuevas, R. Romary, J. Lecointe, F. Morganti and T. Jacq, "Noninvasive Detection of Winding Short-Circuit Faults in Salient Pole Synchronous Machine With Squirrel-Cage Damper," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 5988-5997, Nov.-Dec. 2018. En este documento para detectar la falta entre espiras, se mide el flujo disperso correspondiente con la frecuencia de giro, a partir de lo cual resulta muy difícil determinar si hay defecto porque esta componente del flujo disperso correspondiente con la frecuencia de giro depende mucho del punto de operación de la máquina.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente invención se refiere a un sistema y método de protección diseñados para detectar defectos entre espiras del devanado de excitación de máquinas síncronas de polos salientes con la máquina en operación. La máquina dispone de p pares de polos.

Cuando el generador está en funcionamiento o incluso en vacío con tensión en el devanado de inducido, aparece un flujo de dispersión fuera de la máquina. Este flujo de dispersión tiene una amplitud variable, que depende de varios factores tales como la tensión, la potencia activa, la potencia reactiva y por lo tanto de la corriente de excitación. También depende del punto donde se mida.

En caso de funcionamiento normal, es decir sin defectos en los devanados, la frecuencia fundamental de este flujo disperso corresponde con la frecuencia eléctrica (f1) de la máquina (Normalmente 50 Hz o 60 Hz) aunque hay otros armónicos de menor amplitud.

Sin embargo, en caso de defectos entre espiras en el devanado de excitación, aparece una componente en el flujo relacionada con la frecuencia de giro de la máquina (f1/p).

El principal problema que presenta el analizar esta componente del flujo disperso correspondiente con la frecuencia de giro de la máquina (f1/p) es precisamente que depende de multitud de factores tales como; la tensión, la potencia activa, la potencia reactiva y la corriente de excitación, además del número de espiras en cortocircuito que haya en el rotor. Por lo tanto, es muy difícil de evaluar si la

máquina tiene o no defectos en el rotor.

En este sentido, tal y como fue comentado, el equipo de investigadores (M. Cuevas, R. Romary, J. Lecointe, F. Morganti and T. Jacq) han realizado ensayos, y determinan que hay defecto si la componente de frecuencia correspondiente con la velocidad de giro, supera un cierto umbral. Sin embargo, como ha sido señalado su valor depende del punto de operación, por lo que el valor de esta componente es muy variable y resulta muy complicado determinar si existe o no cortocircuito en los devanados de excitación.

Tras multitud de ensayos en laboratorio con una máquina síncrona de polos salientes, donde se pueden realizar defectos en el rotor, hemos corroborado que el flujo disperso depende del punto de operación de la máquina. En el caso de operación de la máquina absorbiendo energía reactiva (subexcitada), el valor del flujo disperso es mucho más pequeño que en el caso de operación generando energía reactiva (sobreexcitada).

En el caso de tener faltas entre espiras en el rotor aparece una componente de flujo disperso correspondiente con la frecuencia de giro de la máquina, es decir tantas veces más lenta como número de pares de polos tenga la máquina. Esta componente del flujo disperso también varia notablemente con el punto de operación de la máquina y con el porcentaje de espiras en cortocircuito. Por tanto, realizar un diagnóstico de la máquina basado en la amplitud de esta componente del flujo disperso es muy difícil, como ya se ha explicado.

Se ha podido comprobar que, si se realiza una relación entre las componentes del flujo disperso de frecuencia de giro y de frecuencia eléctrica, esta relación se mantiene prácticamente constante independientemente del punto de operación de la máquina, y esta relación depende casi exclusivamente de la severidad de la falta, es decir del número de espiras que están en cortocircuito.

Por tanto, el diagnóstico de la máquina se puede realizar de una forma mucho más fiable, independientemente del punto de operación para lo que la invención se basa en relacionar las dos componentes del flujo, en lugar de basarse solamente en la amplitud de la componente correspondiente a la frecuencia de giro. Para ello, al igual que en estado de la técnica, la invención emplea un equipo

de medida del flujo disperso fuera de la máquina que realiza la medida de dicho flujo disperso, y emplea un equipo calculador de la transformada de Fourier, configurado para obtener los diferentes armónicos; entre ellos los correspondientes a la frecuencia eléctrica y a la frecuencia de giro. Posteriormente mediante un calculador matemático, se genera una señal a partir de los diferentes armónicos de flujo disperso. Por último emplea un comparador, de la salida del calculador matemático con un umbral para determinar si hay defecto. La novedad del sistema de la invención consiste en incorporar una nueva estructura del equipo calculador y del comparador, que se han configurado para determinar si existe defecto entre espiras en el devanado de excitación mediante la relación de los valores de las amplitudes de los armónicos correspondientes a la frecuencia de giro y a la frecuencia eléctrica de la máquina.

En la realización preferente de la invención, el calculador está configurado para determinar si existe defecto mediante la resta de las amplitudes de los armónicos correspondientes a la frecuencia de giro y a la frecuencia eléctrica de la máquina, que es comparada con un umbral previamente establecido.

Una de las posibles relaciones entre ambas componentes del flujo disperso que prevé la invención consiste en pasarlas a decibelios y restarlas, aunque pueden existir otras, para determinar si existe defecto.

Además, se prevé que la invención comprenda un temporizador para evitar que se produzca un disparo no deseado.

El método de la invención comprende las fases que permiten realizar las diferentes etapas operativas que fueron descritas anteriormente del funcionamiento del sistema.

La configuración y método descritos son capaces de funcionar con la máquina en marcha y analizando una sola variable física, el flujo disperso. Lo que constituye una gran ventaja frente al estado de la técnica.

Además, la invención resuelve el problema de detectar faltas internas sin necesidad de desmontar ninguna pieza de la máquina.

Otra ventaja de la invención consiste en que el método propuesto es independiente del punto de operación de la máquina.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

A continuación, se describe de manera muy breve dos figuras que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

La Figura 1 muestra los elementos del sistema de protección de faltas entre espiras para un devanado de excitación, basado en el análisis de las componentes del flujo disperso mediante una función matemática. Estos son:

1. Máquina síncrona de polos salientes con p pares de polos.
2. Devanado Inducido de la máquina síncrona
3. Devanado de excitación de la máquina síncrona
4. Sensor de flujo
5. Señal de flujo disperso
6. Equipo de medida de flujo disperso
7. Equipo calculador de transformada de Fourier
8. Armónico de flujo correspondiente a la frecuencia eléctrica f1.
9. Armónico de flujo correspondiente a la frecuencia de giro f1/p.
10. Calculador matemático
11. Señal de salida del calculador matemático
12. Umbral para determinar que existe defecto
13. Comparador
14. Temporizador ajustable
15. Señal de disparo

La Figura 2 muestra los elementos del sistema de protección de faltas entre espiras para el devanado de excitación basado en el análisis de las componentes del flujo disperso mediante la resta de las dos componentes expresadas en decibelios.

Los elementos son idénticos, salvo que el calculador matemático corresponde con la resta de las dos componentes expresadas en decibelios.

REALIZACIÓN PREFERENTE

Se procede a continuación a hacer una descripción de una de las posibles realizaciones de esta invención con carácter ilustrativo y no limitativo.

Esta realización preferente se basa en la resta de las señales de flujo de las componentes de flujo disperso de frecuencia eléctrica (f1) y frecuencia de giro (f1/p) expresadas en decibelios [dB]. Esta realización preferente se corresponde con la figura 2.

Para esta realización preferente se debe instalar un sensor de flujo (4) en la parte exterior de la máquina síncrona de polos salientes (1). La señal de este sensor (5) irá conectado a un equipo de medida de flujo disperso (6).

Además, comprende un equipo calculador de transformada de de Fourier (7), que realiza un análisis de la señal medida de flujo disperso, descomponiendo dicha señal en diferentes componentes. De las cuales se van a utilizar la correspondiente a la frecuencia eléctrica (8) y la correspondiente a la frecuencia de giro (9). Estas dos señales irán a un calculador matemático (10).

Los armónicos correspondientes a la frecuencia eléctrica (8) y a la frecuencia de giro (9) se transformarán en decibelios, dentro del calculador (10) obteniendo dos medidas:

- Medida de frecuencia eléctrica de la máquina A_{f1} [dB]
- Medida a la frecuencia de giro de la máquina $A_{f1/p}$ [dB].

Posteriormente se realiza la diferencia de ambas medidas, obteniendo $\triangle$ [dB] también expresado en decibelios, que es la salida (11) del calculador, según la siguiente expresión.

$$\triangle = A_{f1} - B_{f1/p}[dB]$$

La señal de salida (11) del calculador (10) es $\triangle$, y se mantiene prácticamente constante independientemente del punto de operación, y sólo depende de la

severidad del defecto, es decir del porcentaje de espiras del devanado del rotor que está en cortocircuito.

La señal (11) es comparada con un umbral (12), previamente establecido, en un comparador (13). Este umbral depende del porcentaje de espiras que se permite que estén en cortocircuito, lo cual se establece por el fabricante de la máquina. La salida del comparador pasa a un temporizador ajustable (14) para generar la señal de disparo (15), de manera que la temporización evita un disparo no deseado.

Los elementos de la figura 1 son idénticos a los descritos para la figura 2, con la diferencia de que el calculador matemático (10) en lugar de expresar las dos componentes (8 y 9) en decibelios y a continuación restarlas, las expresa en cualquier otra variable y las relaciona para determinar si hay defecto, de forma equivalente a la descripción realizada.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de protección ante faltas entre espiras en los devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes basado en la medida del flujo de dispersión fuera de la máquina, que comprende:

   - un equipo de medida (6) del flujo disperso fuera de la máquina;
   - un equipo calculador de la transformada de Fourier (7) para las señales de flujo disperso mediadas, configurado para obtener los diferentes armónicos;
   - un calculador matemático (10), de generación de una señal a partir de los diferentes armónicos de flujo disperso;
   - un comparador (13), de la salida del calculador matemático (10) con un umbral (12) para determinar si hay defecto.

   caracterizado por que, dicho equipo calculador y el comparador están configurados para determinar si existe defecto entre espiras en el devanado de excitación mediante la relación de los valores de las amplitudes de los armónicos correspondientes a la frecuencia de giro y a la frecuencia eléctrica de la máquina.

2. Sistema de protección ante faltas entre espiras en devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes basado en la reivindicación 1, ***caracterizado por que*** el calculador está configurado para determinar si existe defecto mediante la resta de las amplitudes de los armónicos correspondientes a la frecuencia de giro y a la frecuencia eléctrica de la máquina, que es comparada con un umbral previamente establecido.

3. Sistema de protección ante faltas entre espiras en devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes basado en la reivindicación 2, ***caracterizado por que*** el calculador está configurado

para determinar si existe defecto mediante la resta de las amplitudes de los armónicos correspondientes a la frecuencia de giro y a la frecuencia eléctrica de la máquina, expresadas en decibelios.

4. Sistema de protección ante faltas entre espiras en devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes basado en las reivindicaciones 1 y 2, ***caracterizado por que*** comprende un temporizador ajustable (14).

5. Método de protección ante faltas entre espiras en los devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes, que comprende:

- una etapa de medida del flujo disperso fuera de la máquina;
- una etapa de cálculo de la transformada de Fourier de las señales de flujo disperso en la que se obtienen los diferentes armónicos de la señal de flujo disperso medida;
- una etapa de cálculo matemático, que genera una señal a partir de los diferentes armónicos de flujo disperso;
- una etapa comparadora de la salida de la etapa de cálculo matemático, con un umbral previamente establecido para determinar si hay defecto.

caracterizado por que, comprende determinar si existe defecto entre espiras en el devanado de excitación mediante la relación de los valores de las amplitudes de los armónicos correspondientes a la frecuencia de giro y a la frecuencia eléctrica de la máquina.

6. Método de protección ante faltas entre espiras en devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes basado en la reivindicación 5, ***caracterizado por que*** determina si existe defecto mediante la resta de las amplitudes de los armónicos correspondientes a la frecuencia de giro y a la frecuencia eléctrica de la máquina.

7. Método de protección ante faltas entre espiras en devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes basado en la reivindicación 6, ***caracterizado por que*** determina si existe defecto mediante la resta de las amplitudes de los armónicos correspondientes a la frecuencia de giro y a la frecuencia eléctrica de la máquina expresadas en decibelios.

8. Sistema de protección ante faltas entre espiras en devanados de excitación de máquinas síncronas de polos salientes basado en las reivindicaciones 4 y 5, ***caracterizado por que*** comprende una etapa de temporización ajustable.

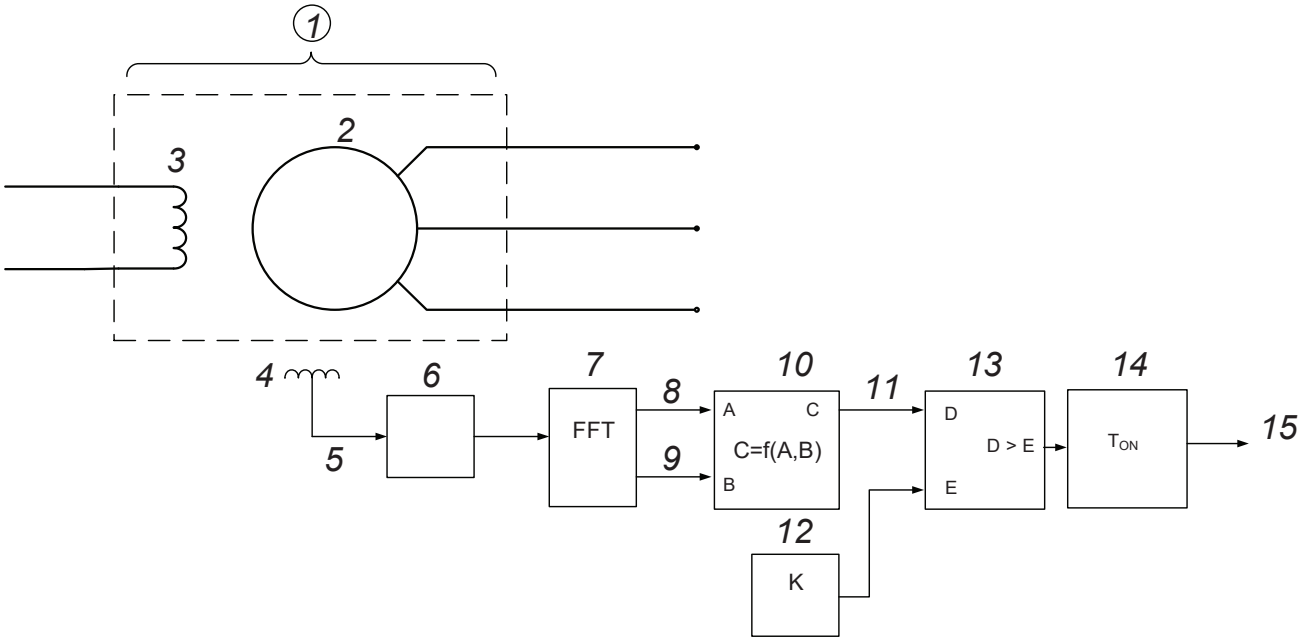

Figura 1

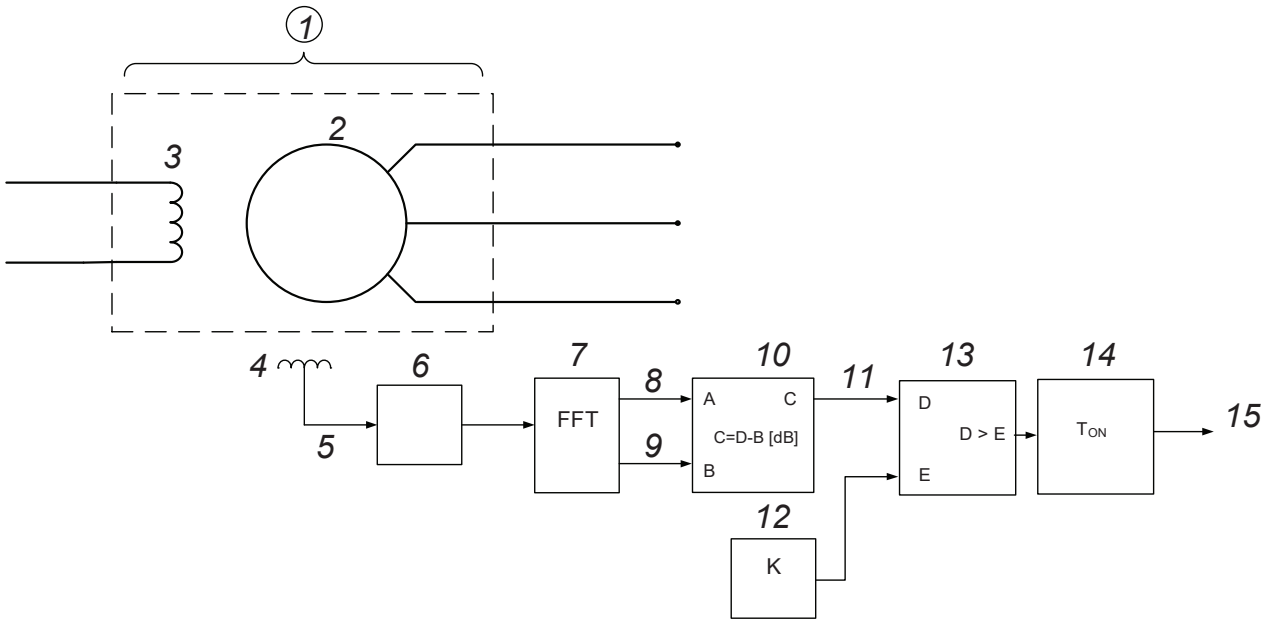

Figura 2

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 201930913

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 15.10.2019

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) **Int. Cl. :** ***G01R31/34*** (2020.01)
H02K19/16 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	J. S. HSU et al. "Shaft signals of salient-pole synchronous machines for eccentricity and shorted-field-coil detections," IEEE Transactions on Energy Conversion, Sept. 1994, Vol. 9, Páginas 572-578 [en línea] [recuperado el 30/12/2019]., <DOI: 10.1109/60.326478>	1-8
A	CAPOLINO GERARD-ANDRE et al. "State of the Art on Stray Flux Analysis in Faulted Electrical Machines". 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 20190422 IEEE. , 22/04/2019, Vol. 1, Páginas 181 - 187 [en línea] [recuperado el 30/12/2019]. , <DOI: doi:10.1109/WEMDCD.2019.8887805>	1-8
A	YUN JANGHO et al. "Reliable Flux-Based Detection of Field Winding Failures for Salient Pole Synchronous Generators". IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 20190901 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US. , 01/09/2019, Vol. 34, Páginas 1715 - 1718 [en línea] [recuperado el 27/12/2019]. , ISSN 0885-8969, <DOI: doi:10.1109/TEC.2019.2917622>	1-8
A	CN 106772037 A (NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIV) 31/05/2017, Todo el documento.	1-8
A	SOTTILE et al. "Condition monitoring of brushless three-phase synchronous generators with stator winding or rotor circuit deterioration". CONFERENCE RECORD OF THE 2001 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE. 36TH IAS ANNUAL MEETING. CHICAGO, IL, SEPT. 30-OCT. 4, 2001; IEEE, US. Páginas 1587 – 1594, vol.3 [en línea] [recuperado el 27/12/2019] <DOI: 10.1109/IAS.2001.955747>	1-8

Categoría de los documentos citados
X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica
O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones ☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe	Examinador	Página
03.01.2020	M. P. López Sabater	1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01R, H02K

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, IEEE, Elsevier, Internet