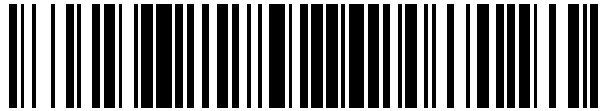


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 784 533**

21 Número de solicitud: 202030371

51 Int. Cl.:

**G01R 31/72** (2010.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

**30.04.2020**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**28.09.2020**

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
(100.0%)  
AVDA. RAMIRO DE MAEZTU, 7  
28040 MADRID ES**

72 Inventor/es:

**GUERRERO GRANADOS, Jose Manuel;  
MARTÍN SANTOS, Carolina;  
GÓMEZ MOURELO, Pablo y  
PLATERO GAONA, Carlos Antonio**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

54 Título: **SISTEMA Y MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN ARROLLAMIENTOS ELÉCTRICOS**

57 Resumen:

Sistema y método de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos.

Método y sistema de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos basados en el análisis de respuesta en frecuencia del arrollamiento eléctrico alimentando en sentido directo e inverso y posterior tratamiento de las frecuencias de resonancia del sistema ( $f_{R1}$  y  $f_{R2}$ ) en un dispositivo que compara estas con una base de datos de curvas de ensayos previos y que permite localizar el defecto en número de espira de falta ( $n$ ) y resistencia de defecto ( $R_f$ ).

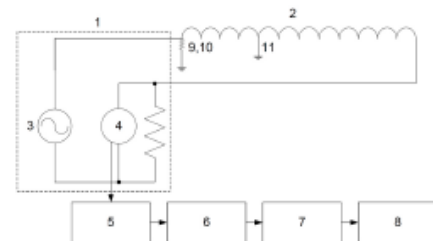


FIG. 1

**DESCRIPCIÓN**

**SISTEMA Y MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN  
ARROLLAMIENTOS ELÉCTRICOS**

5

**OBJETO DE LA INVENCIÓN**

La presente invención se refiere a un sistema y método de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos capaz de localizar este tipo de defecto estando en cualquier punto del circuito eléctrico, cuando el circuito eléctrico está desconectado de la red eléctrica.

El sistema y método de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos según la presente invención es de utilidad en el mantenimiento offline de máquinas eléctricas por su capacidad de localizar faltas a tierra y determinar la resistencia del defecto. La presente invención tiene aplicación, por ejemplo y sin carácter limitativo, en el sector de la generación eléctrica.

**ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN**

20

El diagnóstico de sistemas eléctricos es fundamental para un correcto funcionamiento, mantenimiento y reparación de máquinas eléctricas.

Los arrollamientos eléctricos están presentes en la mayoría de las máquinas eléctricas. En el ámbito de la generación, las máquinas de gran potencia pueden tener faltas a tierra, bifásicas o trifásicas que reduzcan la vida útil de la misma hasta el punto de inhabilitarla.

Los equipos de protección de máquinas síncronas, asíncronas y transformadores son de gran importancia. Existen muchos tipos de protecciones frente a fallos en estator, rotor, excentricidad, etc... No siendo así en el caso de la detección y localización de los defectos aquí tratados.

Una de las faltas más comunes en arrollamientos eléctricos de cualquier tipo de máquina son las faltas a tierra. Caracterizadas por cerrar un circuito entre un conductor en tensión y tierra. Este circuito crea una corriente de derivación o corriente residual que retorna por un segundo punto puesto a tierra como puede ser el caso de un sistema rígido puesto a tierra (TT), un sistema puesto a tierra mediante impedancia (IT) o una segunda falta a tierra, en caso de existir.

En el caso de que la falta a tierra tenga lugar, la corriente de derivación depende de la resistencia de defecto. A mayor resistencia de defecto, como un aislamiento deteriorado levemente, la corriente de defecto será baja. Sin embargo, si la resistencia de defecto es baja puede ocasionarse un corto circuito monofásico a tierra con elevada corriente.

Para arrollamientos eléctricos de máquinas eléctricas, en sus sistemas de detección frente a faltas a tierra, es habitual disponer de los siguientes medios para la detección y localización de dichas faltas:

- Detección por puente equilibrado de capacidades y resistencias puesto a tierra en el punto medio del bus de continua del rotor. Si existe un defecto, la corriente alterna retornará por el punto colocado a tierra, desequilibrará el sistema y producirá una tensión en la zona resistiva. Un relé de sobretensión midiendo en la resistencia disparará la protección en este caso.
- Detección por inyección de corriente alterna. Se establecen dos puntos a tierra con impedancias limitadoras que hagan este punto accesible. El sistema mide corriente en un lector puesto a tierra en serie con uno de estos puntos e inyecta corriente alterna. Se conoce el valor de corriente de inyección. Si la corriente aumenta significa que un tercer punto a tierra está apoyando al sistema y un relé de sobreintensidad colocado en serie con el inyector se dispara.

Como referente conviene tener en cuenta las siguientes patentes como método de protección de rotores de máquinas:

- ES2321270-B2 titulada: *“Sistema y método de detección de faltas a tierra*

*en sistemas de corriente continua alimentados mediante rectificadores.”*

Donde se expone un método de detección de falta a tierra en sistemas de corriente continua mediante medición de corriente o tensión.

- 5 - ES2547468-B2 titulada: *“Método para la detección de faltas a tierra en sistemas de corriente continua alimentados mediante un rectificador.”*

Donde se analiza la frecuencia de la onda leída en una resistencia conectada entre un punto neutro y tierra.

- 10 - US4667262-A titulada: *“Device for detecting a ground fault in the rotor winding of an electric machine.”* Donde se mide corriente de fuga en el bus de continua de la excitación de la máquina y se dispara la máquina en caso afirmativo.

- 15 - US4812751-A titulada: *“Apparatus for monitoring earth faults on the rotor winding of a generator.”* Donde se conmuta una resistencia de puesta a tierra entre el polo positivo y mediante el análisis de las ondas registradas se detecta la falta.

20 En la detección y localización de defectos también se pueden utilizar herramientas como el análisis de respuesta en frecuencia de un sistema mediante la inyección controlada de tensión en bornes de entrada y posterior lectura en bornes de salida. Con las variaciones en las funciones de transferencia es posible detectar donde hay posibles defectos. Este principio de funcionamiento es representativo para la invención aquí presentada.

25 Varios experimentos para la detección de defectos a tierra mediante análisis de respuesta en frecuencia se han llevado a cabo en diferentes artículos, sin embargo no para la localización:

- 30 - C. A. Platero, F. Blázquez, P. Frías and D. Ramírez, "Influence of Rotor Position in FRA Response for Detection of Insulation Failures in Salient-Pole Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 671-676, June 2011.

- S. M. Islam and G. Ledwich, "Locating transformer faults through sensitivity analysis of high frequency modeling using transfer function approach," *Conference Record of the 1996 IEEE International*

*Symposium on Electrical Insulation*, Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 38-41 vol.1.

Y además conviene tener en consideración la patente US6417672-B1 titulada:  
 5 “*Detection of Bridge Tap Using Frequency Domain Analysis.*” En esta invención se localizan faltas en el funcionamiento de equipos mediante la evaluación de la señal emitida y recibida por dos aparatos colocados en los extremos de la línea de transmisión donde se coloque. Dependiendo de la tipología de la función de transferencia se pueden detectar distintos tipos de falta.

10

Considerando la técnica anterior y los problemas que ocasionan las faltas a tierra en circuitos eléctricos, es conveniente desarrollar nuevos sistemas y métodos de detección de faltas a tierra, capaces de detectar qué resistencia de falta tiene la falta a tierra en cuestión y en qué espira se produce dicha falta (en caso de falta  
 15 en arrollamientos eléctricos), puesto que eso agilizaría las tareas de reparación y/o mantenimiento. Para ello, en la invención aquí expuesta se considera un sistema y un método que mediante la medida de la respuesta en frecuencia es capaz de proceder no solo a la detección del defecto si no a la localización del mismo y a la definición de los parámetros de falta (espira donde se encuentra la  
 20 falta,  $n$ , y la resistencia de defecto entre conductor y tierra,  $R_f$ ).

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención pretende abordar todas las limitaciones, desventajas e  
 25 inconvenientes de los sistemas y métodos de localización de faltas a tierra de la técnica anterior, descritos anteriormente.

En un primer aspecto de la invención, se divulga un método de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos. El método de la presente invención  
 30 comprende las siguientes etapas:

- calcular un ángulo de una función de transferencia en alimentación directa  $\tau_t(f)$ , como  $\tau_t(f) = \theta_{U_{2t}}(f) - \theta_{U_1}(f)$ , para lo cual  $\theta_{U_{2t}}(f)$  y  $\theta_{U_1}(f)$  se calculan con las siguientes sub-etapas:

- aplicar una tensión de entrada “U<sub>1</sub>” con el ángulo  $\theta_{U_1}(f)$  a frecuencia variable “f” en alimentación directa sobre unos extremos de un arrollamiento eléctrico;
- medir la tensión de salida “U<sub>2</sub>” y el ángulo  $\theta_{U_{2t}}(f)$  de la tensión de salida “U<sub>2</sub>” sobre una resistencia conectada entre uno de los extremos del arrollamiento eléctrico y tierra;
- calcular un ángulo de una función de transferencia en alimentación inversa  $\tau_b(f)$ , como  $\tau_b(f) = \theta_{U_{2b}}(f) - \theta_{U_1}(f)$ , para lo cual  $\theta_{U_{2b}}(f)$  y  $\theta_{U_1}(f)$  se calculan con las siguientes sub-etapas:
  - aplicar una tensión de entrada “U<sub>1</sub>” con el ángulo  $\theta_{U_1}(f)$  a frecuencia variable “f” en alimentación inversa sobre los extremos del arrollamiento eléctrico;
  - medir la tensión de salida “U<sub>2</sub>” y el ángulo  $\theta_{U_{2b}}(f)$  de la tensión de salida “U<sub>2</sub>” sobre una resistencia conectada entre el otro extremo del arrollamiento eléctrico y tierra;
- calcular una frecuencia de resonancia  $f_R$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_t(f)$  sea cero;
- comparar la frecuencia de resonancia  $f_R$  con una frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada y correspondiente al arrollamiento eléctrico sin fallo;
- calcular una frecuencia de resonancia directa  $f_{R1}$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_t(f)$  sea cero (esto implícitamente conlleva la alimentación directa); y calcular una frecuencia de resonancia inversa  $f_{R2}$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_b(f)$  sea cero (esto implícitamente conlleva la alimentación inversa);
- calcular unas resistencias de defecto  $R_f$  ( $f_{R1}$ ) para la frecuencia de resonancia directa  $f_{R1}$  para cada espira “n”, y unas resistencias de defecto  $R_f$  ( $f_{R2}$ ) para la frecuencia de resonancia inversa  $f_{R2}$  para cada espira complementaria “N-n+1” mediante una casación de curvas modelo previamente calculadas que relacionan para cada espira “n” con defecto del arrollamiento eléctrico, una frecuencia de resonancia con una resistencia de defecto;
- calcular la resistencia de defecto  $R_f$  como una cualquiera de las

resistencias de defecto seleccionadas entre  $R_f(f_{R1})$  y  $R_f(f_{R2})$  para las que se cumple que:

$$|R_f(f_{R1}, n) - R_f(f_{R2}, N - n + 1)| \leq Tol$$

siendo:

5  $R_f(f_{R1}, n)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira n de un arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación directa;

$R_f(f_{R2}, N-n+1)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira complementaria a n de un arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación inversa;

10 Tol: es un valor de tolerancia predeterminado;

- calcular la espira con defecto “n” a partir de la casación de curvas anterior una vez conocido el valor de la resistencia de defecto  $R_f$  y teniendo en cuenta que la relación  $R_f(f_{R1}, n)$  es única. En dicha casación de pares valores de frecuencia de resonancia para una misma resistencia de defecto,  $R_f$ , la curva casada correspondiente a una resistencia de defecto determinada para una frecuencia de resonancia en alimentación directa,  $f_{R1}$ , demarca a su vez la espira de defecto, n al ser característica única de la falta producida,  $R_f(f_{R1}, n)$ . Alternativamente, se puede calcular la espira con defecto “n” a partir de la casación de curvas anterior una vez conocido el valor de la resistencia de defecto  $R_f$  y teniendo en cuenta que la relación  $R_f(f_{R2}, N-n+1)$  también es única. Es decir, se puede hallar en alimentación inversa, obteniendo directamente N-n+1 para una resistencia de defecto única para alimentación directa e inversa, pero para un punto de corte con la curva característica de N-n+1 en una frecuencia de resonancia  $f_{R2}$ .  
25 Después deshaciendo el cambio conocido el número de espiras totales del arrollamiento, N.

Un ejemplo no limitativo de una forma de realización de la etapa anterior se puede observar gráficamente en la Figura 4.

30

En una realización de la invención, la etapa de comparar la frecuencia de resonancia  $f_R$  con una frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada

adicionalmente comprende emitir una señal de aviso cuando la frecuencia de resonancia  $f_R$  es igual a la frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada. La señal de aviso es una señal de arrollamiento eléctrico sano. Alternativamente, la etapa de comparar la frecuencia de resonancia  $f_R$  con una frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada adicionalmente comprende emitir una señal de aviso cuando la frecuencia de resonancia  $f_R$  es diferente a la frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada. En este caso, la señal de aviso es una señal de falla de arrollamiento eléctrico.

10 En otro aspecto de la invención, se divulga un sistema de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos. El sistema de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos comprende:

- un equipo de medida de respuesta en frecuencia conectable a un arrollamiento eléctrico configurado para alimentar el arrollamiento eléctrico con alimentación directa e inversa; el equipo de medida de respuesta en frecuencia a su vez comprende:

- un dispositivo de inyección de tensión de entrada "U<sub>1</sub>" con ángulo  $\theta_{U_1}(f)$  a frecuencia variable "f" configurado para llevar a cabo una alimentación sobre los extremos de un arrollamiento eléctrico; y,

- un equipo de medida de una tensión de salida "U<sub>2</sub>" con ángulo  $\theta_{U_{2t}}(f)$  sobre una resistencia de valor predeterminado, donde la resistencia está conectada entre un extremo del arrollamiento eléctrico y tierra;

- un subsistema de extracción de frecuencia de resonancia configurado para:

- calcular un ángulo de una función de transferencia en alimentación directa  $\tau_t(f)$  y un ángulo de una función de transferencia en alimentación inversa  $\tau_b(f)$ :

$$\tau_t(f) = \theta_{U_{2t}}(f) - \theta_{U_1}(f)$$

$$\tau_b(f) = \theta_{U_{2b}}(f) - \theta_{U_1}(f)$$

donde:

30  $\tau_t$ : es el ángulo de la función de transferencia en alimentación directa;

$\tau_b$ : es el ángulo de la función de transferencia en alimentación inversa;

$\theta_{U1}$ : es el ángulo de la tensión de inyección;

$\theta_{U2i}$ : es el ángulo de la tensión de salida de alimentación directa;

5  $\theta_{U2b}$ : es el ángulo de la tensión de salida de alimentación inversa;

f: es la frecuencia de inyección de tensión en la entrada;

o calcular una frecuencia de resonancia  $f_R$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_t(f)$  sea cero;

10 o comparar la frecuencia de resonancia  $f_R$  con una frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada (y correspondiente al arrollamiento eléctrico sin fallo);

o calcular una frecuencia de resonancia directa  $f_{R1}$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_t(f)$  sea cero; y calcular una frecuencia de resonancia inversa  $f_{R2}$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_b(f)$

15 sea cero;

• un subsistema de comparación con curvas modelo de resistencia de defecto frente a frecuencia de resonancia configurado para calcular unas resistencias de defecto  $R_f(f_{R1})$  para la frecuencia de resonancia directa  $f_{R1}$  para cada espira "n", y unas resistencias de defecto  $R_f(f_{R2})$  para la frecuencia de resonancia inversa  $f_{R2}$  para cada espira complementaria "N-n+1" mediante una casación de curvas modelo previamente calculadas que relacionan para cada espira "n" con defecto del arrollamiento eléctrico, una frecuencia de resonancia con una resistencia de defecto;

20

• un subsistema de cálculo de la espira de defecto y la resistencia de defecto, el cual está configurado para:

25

o calcular la resistencia de defecto  $R_f$  como una cualquiera de las resistencias de defecto seleccionadas entre  $R_f(f_{R1})$  y  $R_f(f_{R2})$  para las que se cumple que:

$$|R_f(f_{R1}, n) - R_f(f_{R2}, N - n + 1)| \leq Tol$$

siendo:

30

$R_f(f_{R1}, n)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira n de un arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación directa;

$R_f(f_{R2}, N-n+1)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira complementaria a  $n$  de un arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación inversa;

Tol: es un valor de tolerancia predeterminado;

- 5           ○ calcular la espira con defecto “ $n$ ” a partir de la casación de curvas anterior una vez conocido el valor de la resistencia de defecto  $R_f$  y teniendo en cuenta que la relación  $R_f(f_{R1}, n)$  es única.

10           En una realización de la invención, el sistema de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos adicionalmente comprende un dispositivo de emisión de aviso del estado del arrollamiento eléctrico. El estado puede ser de arrollamiento sano o de falta/fallo en la espira “ $n$ ” calculada por el subsistema de cálculo de la espira de defecto y la resistencia de defecto.

15           En esta invención se dispone de dos tipos de medición de tensión: alimentación directa al arrollamiento eléctrico y alimentación inversa sobre una resistencia/impedancia de salida calibrada. Esto permite obtener las funciones de transferencia (relación salida-entrada) correspondientes a  $U_{2t}$  y  $U_{2b}$  respectivamente. Con el ángulo (también llamado argumento) de las funciones  
20           de transferencia se obtienen las frecuencias de resonancia directa e inversa del sistema,  $f_{R1}$  y  $f_{R2}$ .

25           Se define la frecuencia de resonancia del sistema como aquella frecuencia que hace el ángulo de las funciones de transferencia nulo para una determinada frecuencia de tensión de inyección en la entrada del dispositivo de análisis en frecuencia.

30           Con datos de ensayos previos se obtienen unas curvas modelo de resistencia de defecto,  $R_f$ , en función de frecuencia de resonancia del sistema, que pueden ser como ejemplo no limitativo las mostradas en la Figura 4. Cada arrollamiento eléctrico tendrá tantas curvas como espiras tenga el arrollamiento estando organizadas como la de la espira de falta ( $n$ ) y su complementaria ( $N-n+1$ ).

Las curvas son utilizadas una vez se tienen  $f_{R1}$  y  $f_{R2}$  para obtener la resistencia de defecto  $R_f$ , que es característica del fallo. En aclaración, se añade que una falta tanto en alimentación directa como en alimentación inversa tiene la misma resistencia de defecto. Esta premisa delimita una pareja de curvas correspondiente a la espira  $n$  y  $N-n+1$  como curvas que cortan en  $f_{R1}$  y  $f_{R2}$  para la misma resistencia de defecto, siendo el único caso posible para esta falta. Una vez se halla la intersección de las curvas se extraen los parámetros  $R_f$  y  $n$  de las gráficas. Finalmente se emite un aviso de falta. En caso de arrollamiento eléctrico sano, la frecuencia de resonancia del sistema es única y previamente localizada; si se emite este valor se procede al aviso de arrollamiento sano.

Otra forma de explicar el método de la presente invención se detalla a continuación. La presente invención contempla medir las tensiones de salida del arrollamiento eléctrico y realizar un análisis de respuesta en frecuencia obteniendo las funciones de transferencia directa e inversa. Posteriormente se obtiene la frecuencia de resonancia del sistema y se compara con la frecuencia de resonancia del sistema en condiciones sanas de operación ( $f_{Rh}$ ). Si estas son iguales:

$$f_R = f_{Rh}$$

El aviso en el dispositivo emisor de aviso de falta o sano se declara como sano.

En caso de que se encuentren dos frecuencias de resonancia distintas a la frecuencia de resonancia del sistema en condiciones sanas de operación, se procede a la retención de ambos datos ( $f_{R1}$  para el caso directo y  $f_{R2}$  para el caso inverso). Se procede a la casación de pares de curvas mediante la introducción de las frecuencias en las curvas modelo y se obtienen tantas  $R_f$  como curvas haya. Estos valores se introducen en un cálculo de tolerancias en el que, como para un defecto dado la resistencia de defecto es constante:

$$|R_f(f_{R1}, n) - R_f(f_{R2}, N - n + 1)| \leq Tol$$

donde:

$R_f(f_{R1}, n)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira  $n$  del rotor del arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a

alimentación directa;

$R_f(f_{R2}, N-n+1)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira complementaria a  $n$  del arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación inversa;

5 Tol: es la tolerancia del sistema de comparación;

Además, la invención contempla una etapa de extracción de la espira con defecto,  $n$ , y la resistencia de defecto,  $R_f$ , que una vez localizadas se envía a un emisor de aviso de falta.

10

En la misma realización, la invención contempla adicionalmente una etapa previa de obtención de las funciones de transferencia del arrollamiento, al menos en ángulo, tanto en alimentación directa como inversa.

15 Con las funciones de transferencia, las siguientes etapas son utilizadas para localizar la falta a tierra:

- una etapa de búsqueda de la frecuencia de resonancia del sistema donde a determinada frecuencia de inyección de tensión de entrada, las funciones de transferencia con alimentación directa e inversa son nulas en argumento;

20

- una etapa de comparación de la frecuencia de resonancia obtenida con la frecuencia de resonancia natural del sistema sano. Si esta frecuencia es igual, la invención contempla una etapa de emisión de señal sana;

25

- una etapa de obtención de frecuencia de resonancia con alimentación directa ( $f_{R1}$ ) e inversa ( $f_{R2}$ ) si la frecuencia de resonancia vista en las anteriores funciones de transferencia difiere de los valores de frecuencia de resonancia natural del sistema sano;

30

- una etapa de casación de curvas modelo obtenidas de ensayos previos donde se relacionan distintas resistencias de defecto con sus frecuencias de resonancia para cada espira con defecto,  $n$ . En esta etapa se recopilan las posibles resistencias de defecto de todas las curvas que contemplen un posible valor real positivo para las frecuencias de resonancia obtenidas en la etapa anterior.

- una etapa de cálculo de tolerancias donde mediante la expresión:

$$|R_f(f_{R1}, n) - R_f(f_{R2}, N - n + 1)| \leq Tol$$

donde:

5  $R_f(f_{R1}, n)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira n del arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación directa;

$R_f(f_{R2}, N-n+1)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira complementaria a n arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación inversa;

Tol: es la tolerancia del sistema de comparación;

10 y sabiendo que la resistencia de defecto,  $R_f$ , tiene que ser única para cada falta. Entonces, tanto para  $f_{R1}$  como para  $f_{R2}$  las curvas complementarias n y N-n+1 tendrán la misma resistencia de defecto;

- una etapa de extracción de espira de defecto una vez se cumple la etapa previa de cálculo de tolerancias. Viene seguida de una etapa de extracción de resistencia de defecto asociada al par de curvas que resultan de la etapa de casación;

- una etapa de emisión de falta que emite una señal con los datos de la espira con defecto, n, y la resistencia de defecto de la falta en cuestión.

## 20 BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

A continuación, se describen de manera muy breve una serie de figuras que ayudan a comprender mejor la invención, que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención y se presentan como unos ejemplos no limitativos de ésta.

La figura 1 es una vista esquemática de la conexión de alimentación directa del dispositivo para el barrido en frecuencia y posterior análisis de frecuencias de resonancia del sistema con falta;

30

La figura 2 es una vista esquemática de la conexión de alimentación inversa del dispositivo para el barrido en frecuencia y posterior análisis de frecuencias de resonancia del sistema con falta;

5 La Fig. 3 es una vista esquemática de cada etapa del método de la invención; y

La Fig. 4 es una representación gráfica de las curvas modelo que se usan para la localización de faltas a tierra de la invención.

## 10 REFERENCIAS NUMÉRICAS DE LAS FIGURAS

- (1) Equipo de medida de respuesta en frecuencia;
- (2) Bobinado de un rotor de un generador síncrono;
- (3) Fuente de corriente alterna de frecuencia variable;
- 15 (4) Equipo de medida de tensión en alimentación directa sobre una resistencia de  $50 \Omega$ ;
- (5) Subsistema de extracción de frecuencia de resonancia del sistema;
- (6) Subsistema de comparación con curvas modelo de resistencia de defecto frente a frecuencia de resonancia del sistema;
- 20 (7) Subsistema de cálculo de la espira de defecto y la resistencia de defecto del sistema;
- (8) Subsistema de emisión de aviso de falta o estado sano;
- (9) Resistencia de defecto,  $R_f$ ;
- (10) Falta en la espira  $n=1$ ;
- 25 (11) Falta en la espira  $n$ ;
- (12) Equipo de medida de tensión en alimentación inversa sobre una resistencia de  $50 \Omega$ ;
- (13) Falta en la espira  $n'=N$  con alimentación inversa ( $n=1$ );
- (14) Falta en la espira  $n'=N-n+1$  con alimentación inversa ( $n$ );
- 30 (15) Argumento de la función de transferencia con alimentación directa;
- (16) Argumento de la función de transferencia con alimentación inversa;
- (17) Etapa de búsqueda de la frecuencia de resonancia del sistema  $f_R$ ;
- (18) Etapa de comparación de  $f_R$  obtenida con la frecuencia de resonancia del

sistema en estado sano  $f_{Rh}$ ;

(19) Etapa de emisión de señal sana;

(20) Etapa de obtención de frecuencia de resonancia con alimentación directa,  
 $f_{R1}$ ;

5 (21) Etapa de obtención de frecuencia de resonancia con alimentación inversa,  
 $f_{R2}$ ;

(22) Etapa de casación de curvas modelo con  $f_{R1}$  y  $f_{R2}$ ;

(23) Etapa de cálculo de tolerancias;

(24) Etapa de extracción de la espira de defecto,  $n$ ;

10 (25) Etapa de resistencia de defecto,  $R_f$ ;

(26) Etapa de emisión de señal de falta;

(27) Frecuencia de resonancia.

#### **DESCRIPCIÓN DE UNA FORMA DE REALIZACIÓN DE LA INVENCION.**

15

Se procede a continuación a hacer una descripción de una forma de realización de la invención con ayuda de las figuras 1 a 4.

20

La Figura 1 representa un ejemplo no limitativo del sistema de localización de faltas a tierra en el caso de alimentación directa para la localización de una falta de un arrollamiento eléctrico, el cual es un rotor de un generador síncrono. En la figura 1 se han representado dos faltas a tierra, las cuales no pueden suceder simultáneamente, sin embargo, se representa a modo de explicación, pues esta puede ocurrir en cualquier espira, ya sea esta desde la 1 (siendo esta la primera

25 (10)) hasta la N (siendo N la última espira del rotor (2)). Se denomina "n" a la espira aleatoria donde puede ocurrir un defecto a tierra (11) con o sin resistencia de defecto (9) en alimentación directa. En esta realización con carácter no limitativo de la invención, el sistema de localización de faltas a tierra consta de:

30

- un equipo de medida de respuesta en frecuencia (1) conectado a un bobinado de un rotor de generador síncrono (2). Dentro del equipo se dispone de una fuente de corriente alterna de frecuencia variable (3) y de un equipo de medida (4) de tensión en alimentación directa sobre una resistencia de  $50 \Omega$ .

- un subsistema de extracción de frecuencia de resonancia del sistema (5);
- un subsistema de comparación con curvas modelo de resistencia de defecto frente a frecuencia de resonancia del sistema (6);
- 5     • un subsistema de cálculo de la espira de defecto y la resistencia de defecto del sistema (7); y
- finalmente un subsistema de emisión de aviso de falta o estado sano (8).

La Figura 2 representa un ejemplo no limitativo del sistema de localización de  
 10 faltas a tierra en el caso de alimentación inversa para la localización de una falta  
 en un rotor de un generador síncrono. En la figura 2 se han representado dos  
 faltas a tierra (13,14), las cuales no es posible que se sucedan simultáneamente,  
 sin embargo se utiliza para la exposición a la explicación de que pueda ser esta  
 en cualquier espira. Se denomina  $n'=N-n+1$  a la espira aleatoria donde puede  
 15 ocurrir un defecto a tierra (14) con o sin resistencia de defecto (9) en  
 alimentación inversa. En esta realización con carácter no limitativo de la  
 invención, el sistema de localización de falta a tierra en arrollamientos eléctricos  
 consta de:

- un equipo de medida de respuesta en frecuencia (1) conectado a un  
 20 bobinado de un rotor de generador síncrono (2). Dentro del equipo se  
 dispone de una fuente de corriente alterna de frecuencia variable (3) y de  
 un equipo de medida de tensión en alimentación inversa sobre una  
 resistencia de  $50 \Omega$  (12).
- un subsistema de extracción de frecuencia de resonancia del sistema (5);
- 25     • un subsistema de comparación con curvas modelo de resistencia de  
 defecto frente a frecuencia de resonancia del sistema(6);
- un subsistema de cálculo de la espira de defecto y la resistencia de  
 defecto del sistema (7); y
- finalmente un subsistema de emisión de aviso de falta o estado sano (8).

30 La Figura 3 muestra el método de localización de faltas a tierra arrollamientos  
 eléctricos de la presente invención. El método según se describe en la figura 3  
 comprende las siguientes etapas:

- Inserción del argumento de la función de transferencia con alimentación directa (15) y argumento de la función de transferencia con alimentación inversa (16) de los respectivos ensayos a frecuencia variable realizados por ejemplo en las figuras 1 y 2;
  - 5     • una etapa de búsqueda de la frecuencia de resonancia del sistema (17) donde el ángulo de la función de transferencia es nulo;
  - una etapa de comparación de  $f_R$  obtenida con la frecuencia de resonancia del sistema en estado sano (18) donde si la frecuencia de resonancia del sistema es la misma que en previos registros sanos, se emite un aviso de sistema sano mediante una etapa de emisión de señal sana (19);
  - 10    • una etapa de obtención de frecuencia de resonancia con alimentación directa,  $f_{R1}$  (20) y una etapa de obtención de frecuencia de resonancia con alimentación inversa,  $f_{R2}$  (21);
  - cuando ambas frecuencias de resonancia son obtenidas se procede a una etapa de casación de curvas modelo con  $f_{R1}$  y  $f_{R2}$  (22) donde se calculan las distintas resistencias de falta;
  - 15    • una etapa de cálculo de tolerancias (23) donde se procede a comparar las resistencias de falta obtenidas y se selecciona la cual sea más próxima a 0, ya que para una falta determinada solo existe una resistencia de defecto ya sea con alimentación directa o inversa;
  - 20    • una etapa de extracción de la espira de defecto,  $n$  (24) y una etapa de resistencia de defecto,  $R_f$  (25); y
  - una etapa de emisión de señal de falta (26).
- 25    La Figura 4 muestra un conjunto de curvas modelo obtenida a partir de ensayos previos. Este comprende curvas de distintas resistencias de defecto (9) en función de la frecuencia de resonancia donde se producen (27) para cada espira en concreto de un arrollamiento eléctrico. Introduciendo las frecuencias de resonancia,  $f_{R1}$  y  $f_{R2}$ , obtenidas de las funciones de transferencia se obtiene un
- 30    par de curvas único entre la espira con defecto,  $n$ , y su complementaria,  $N-n+1$  para una misma resistencia de defecto,  $R_f$ .

## REIVINDICACIONES

1. Método de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos, caracterizado por que comprende las siguientes etapas:
- 5
- calcular (15) un ángulo de una función de transferencia en alimentación directa  $\tau_t(f)$ , como  $\tau_t(f) = \theta_{U_{2t}}(f) - \theta_{U_1}(f)$ , para lo cual  $\theta_{U_{2t}}(f)$  y  $\theta_{U_1}(f)$  se calculan con las siguientes sub-etapas:
    - aplicar una tensión de entrada “U<sub>1</sub>” con el ángulo  $\theta_{U_1}(f)$  a frecuencia variable “f” en alimentación directa sobre unos
    - 10 extremos de un arrollamiento eléctrico;
    - medir la tensión de salida “U<sub>2</sub>” y el ángulo  $\theta_{U_{2t}}(f)$  de la tensión de salida “U<sub>2</sub>” sobre una resistencia conectada entre uno de los extremos del arrollamiento eléctrico y tierra;
  - calcular (16) un ángulo de una función de transferencia en alimentación inversa  $\tau_b(f)$ , como  $\tau_b(f) = \theta_{U_{2b}}(f) - \theta_{U_1}(f)$ , para lo
  - 15 cual  $\theta_{U_{2b}}(f)$  y  $\theta_{U_1}(f)$  se calculan con las siguientes sub-etapas:
    - aplicar una tensión de entrada “U<sub>1</sub>” con el ángulo  $\theta_{U_1}(f)$  a frecuencia variable “f” en alimentación inversa sobre los extremos del arrollamiento eléctrico;
    - 20 • medir la tensión de salida “U<sub>2</sub>” y el ángulo  $\theta_{U_{2b}}(f)$  de la tensión de salida “U<sub>2</sub>” sobre una resistencia conectada entre el otro extremo del arrollamiento eléctrico y tierra;
    - calcular (17) una frecuencia de resonancia  $f_R$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_t(f)$  sea cero;
    - 25 • comparar (18) la frecuencia de resonancia  $f_R$  con una frecuencia de resonancia  $f_{R1}$  predeterminada (y correspondiente al arrollamiento eléctrico sin fallo);
    - calcular (20) una frecuencia de resonancia directa  $f_{R1}$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_t(f)$  sea cero; y calcular (21) una frecuencia
    - 30 de resonancia inversa  $f_{R2}$  modificando la frecuencia f hasta que  $\tau_b(f)$  sea cero;
    - calcular (22) unas resistencias de defecto  $R_f$  ( $f_{R1}$ ) para la frecuencia

de resonancia directa  $f_{R1}$  para cada espira "n", y unas resistencias de defecto  $R_f(f_{R2})$  para la frecuencia de resonancia inversa  $f_{R2}$  para cada espira complementaria "N-n+1" mediante una casación de curvas modelo previamente calculadas que relacionan para cada espira "n" con defecto del arrollamiento eléctrico, una frecuencia de resonancia con una resistencia de defecto;

5

- calcular (23) la resistencia de defecto  $R_f$  como una cualquiera de las resistencias de defecto seleccionadas entre  $R_f(f_{R1})$  y  $R_f(f_{R2})$  para las que se cumple que:

$$|R_f(f_{R1}, n) - R_f(f_{R2}, N - n + 1)| \leq Tol$$

10

siendo:

$R_f(f_{R1}, n)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira n de un arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación directa;

$R_f(f_{R2}, N-n+1)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira complementaria a n de un arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación inversa;

15

Tol: es un valor de tolerancia predeterminado;

- calcular (24) la espira con defecto "n" a partir de la casación de curvas anterior una vez conocido el valor de la resistencia de defecto  $R_f$  y teniendo en cuenta que la relación  $R_f(f_{R1}, n)$  es única.

20

2. Método de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos, según la reivindicación 1, caracterizado por que la etapa de comparar la frecuencia de resonancia  $f_R$  con una frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada adicionalmente comprende emitir (19) una señal de aviso cuando la frecuencia de resonancia  $f_R$  es igual a la frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada.

25

3. Método de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos, según la reivindicación 1, caracterizado por que la etapa de comparar la frecuencia de resonancia  $f_R$  con una frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada adicionalmente comprende emitir (26) una señal de aviso cuando la

30

frecuencia de resonancia  $f_R$  es diferente a la frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada.

4. Sistema de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos, caracterizado por que comprende:

5

- un equipo de medida de respuesta en frecuencia (1) conectable a un arrollamiento eléctrico (2) configurado para alimentar el arrollamiento eléctrico con alimentación directa e inversa; el equipo de medida de respuesta en frecuencia (1) a su vez comprende:

10

- un dispositivo (3) de inyección de tensión de entrada "U<sub>1</sub>" con ángulo  $\theta_{U_1}(f)$  a frecuencia variable "f" configurado para llevar a cabo una alimentación sobre los extremos de un arrollamiento eléctrico (2); y,

15

- un equipo de medida (4, 12) de una tensión de salida "U<sub>2</sub>" con ángulo  $\theta_{U_{2t}}(f)$  sobre una resistencia de valor predeterminado, donde la resistencia está conectada entre un extremo del arrollamiento eléctrico y tierra;

- un subsistema de extracción de frecuencia de resonancia (5) configurado para:

20

- calcular un ángulo de una función de transferencia en alimentación directa  $\tau_t(f)$  y un ángulo de una función de transferencia en alimentación inversa  $\tau_b(f)$ :

$$\tau_t(f) = \theta_{U_{2t}}(f) - \theta_{U_1}(f)$$

$$\tau_b(f) = \theta_{U_{2b}}(f) - \theta_{U_1}(f)$$

donde:

25

$\tau_t$ : es el ángulo de la función de transferencia en alimentación directa;

$\tau_b$ : es el ángulo de la función de transferencia en alimentación inversa;

$\theta_{U_1}$ : es el ángulo de la tensión de inyección;

$\theta_{U_{2t}}$ : es el ángulo de la tensión de salida de alimentación directa;

30

$\theta_{U_{2b}}$ : es el ángulo de la tensión de salida de alimentación inversa;

f: es la frecuencia de inyección de tensión en la entrada;

- 5

  - calcular una frecuencia de resonancia  $f_R$  modificando la frecuencia  $f$  hasta que  $\tau_t(f)$  sea cero;
  - comparar la frecuencia de resonancia  $f_R$  con una frecuencia de resonancia  $f_{Rh}$  predeterminada (y correspondiente al arrollamiento eléctrico sin fallo);
  - calcular una frecuencia de resonancia directa  $f_{R1}$  modificando la frecuencia  $f$  hasta que  $\tau_t(f)$  sea cero; y calcular una frecuencia de resonancia inversa  $f_{R2}$  modificando la frecuencia  $f$  hasta que  $\tau_b(f)$  sea cero;
- 10

  - un subsistema de comparación con curvas modelo de resistencia de defecto frente a frecuencia de resonancia (6) configurado para calcular unas resistencias de defecto  $R_f(f_{R1})$  para la frecuencia de resonancia directa  $f_{R1}$  para cada espira “n”, y unas resistencias de defecto  $R_f(f_{R2})$  para la frecuencia de resonancia inversa  $f_{R2}$  para cada espira complementaria “N-n+1” mediante una casación de curvas modelo previamente calculadas que relacionan para cada espira “n” con defecto del arrollamiento eléctrico, una frecuencia de resonancia con una resistencia de defecto;
- 15

  - un subsistema de cálculo de la espira de defecto y la resistencia de defecto (7), el cual está configurado para:
    - calcular la resistencia de defecto  $R_f$  como una cualquiera de las resistencias de defecto seleccionadas entre  $R_f(f_{R1})$  y  $R_f(f_{R2})$  para las que se cumple que:
 
$$|R_f(f_{R1}, n) - R_f(f_{R2}, N - n + 1)| \leq Tol$$

siendo:

      - 25

$R_f(f_{R1}, n)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira n de un arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación directa;

$R_f(f_{R2}, N-n+1)$ : es la resistencia de defecto calculada para la curva de la espira complementaria a n de un arrollamiento eléctrico a una frecuencia de resonancia a alimentación inversa;

30

Tol: es un valor de tolerancia predeterminado;
    - calcular la espira con defecto “n” a partir de la casación de curvas

anterior una vez conocido el valor de la resistencia de defecto  $R_f$  y teniendo en cuenta que la relación  $R_f(f_{R1},n)$  es única.

5. Sistema de localización de faltas a tierra en arrollamientos eléctricos, según la reivindicación 1, caracterizado por que comprende un dispositivo de emisión de aviso (8) de falta/sano del arrollamiento eléctrico.

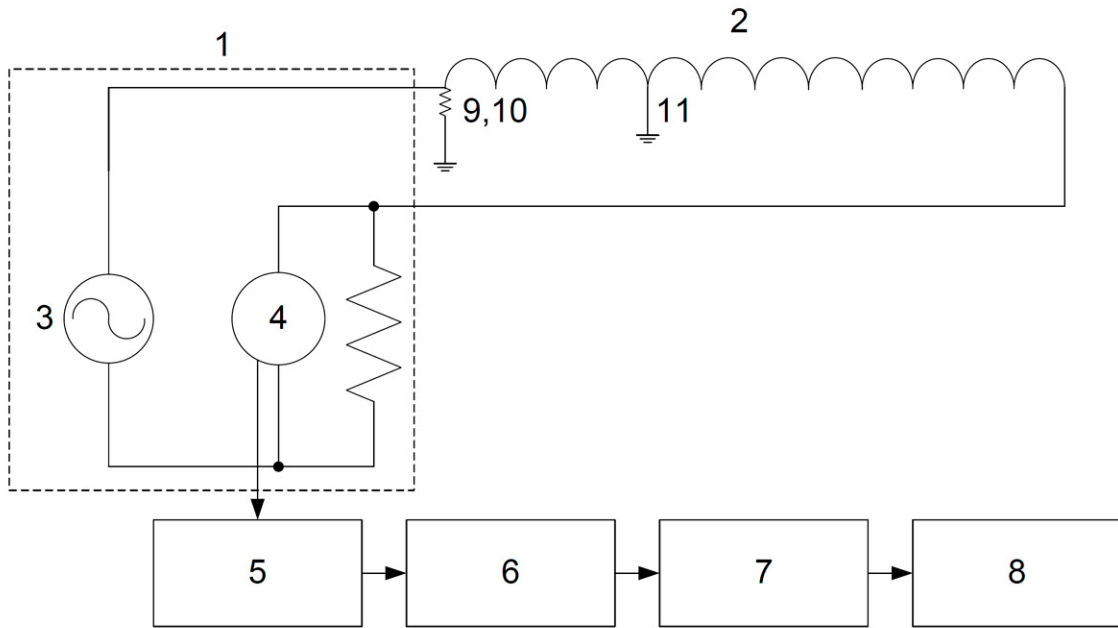


FIG. 1

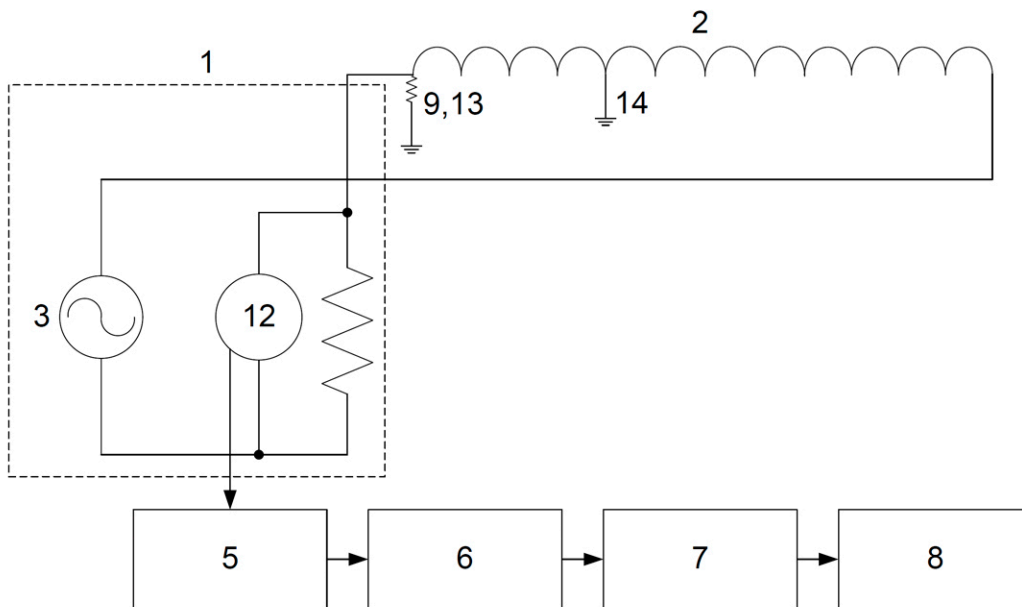


FIG. 2

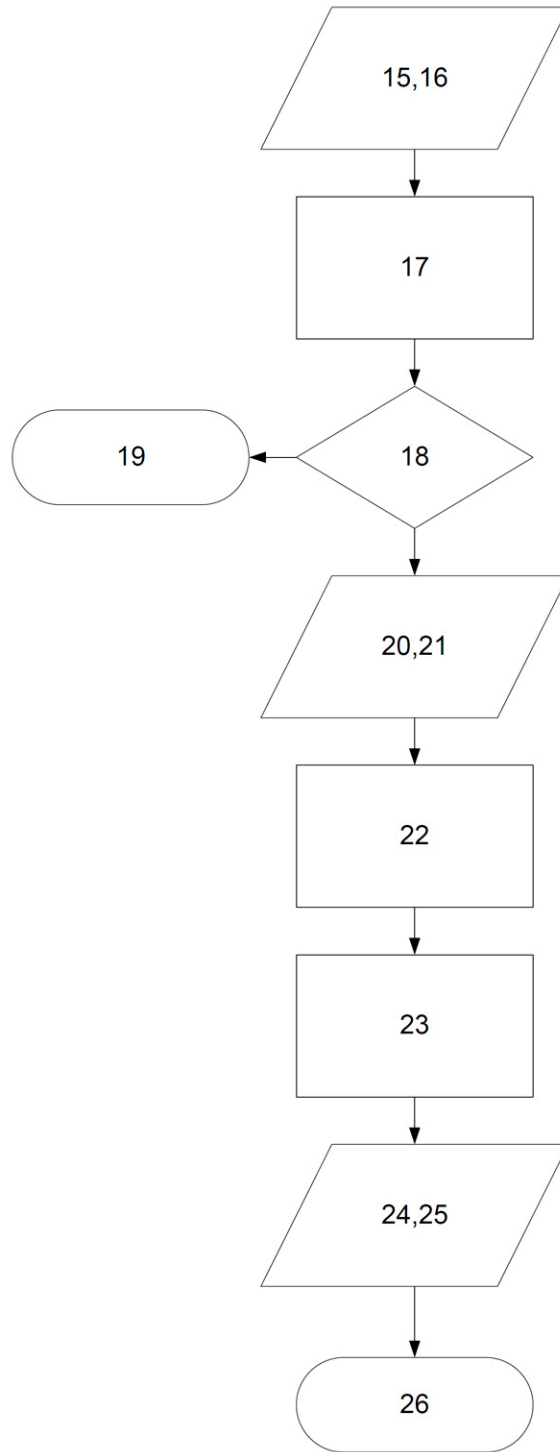


FIG. 3

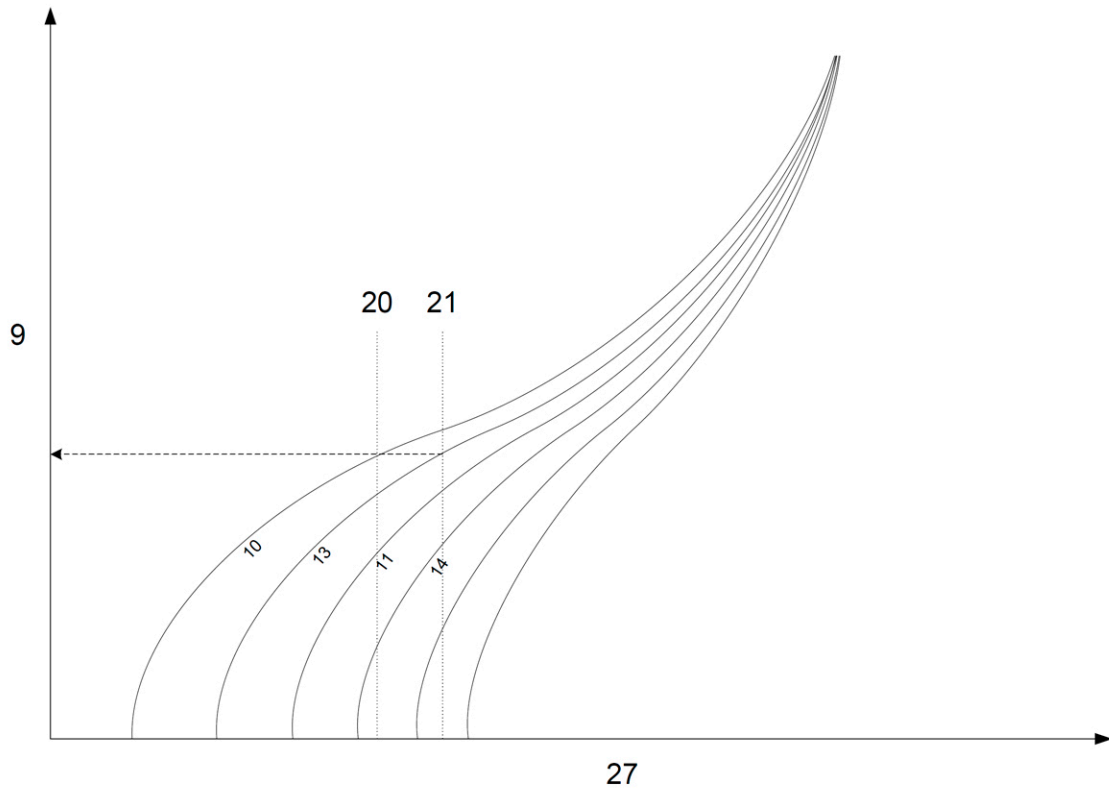


FIG. 4



- ②<sup>1</sup> N.º solicitud: 202030371  
②<sup>2</sup> Fecha de presentación de la solicitud: 30.04.2020  
③<sup>2</sup> Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤<sup>1</sup> Int. Cl.: **G01R31/72** (2020.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ <sup>6</sup> Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	BLÁNQUEZ F. R. et al. "Evaluation of the Applicability of FRA for Inter-Turn Fault Detection in Stator Windings" 2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 20130827 IEEE., 27/08/2013, Páginas 177 - 182 [en línea] [recuperado el 15/09/2020]., <DOI: doi:10.1109/DEMPED.2013.6645714>	1-5
A	MAREK FLORKOWSKI et al. "Detection of Winding Faults in Electrical Machines Using the Frequency Response Analysis Method" MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, 20041001 IOP, BRISTOL, GB. , 01/10/2004, Vol. 15, N° 10, Páginas 2067 - 2074 [en línea] [recuperado el 15/09/2020]. , ISSN 0957-0233, <DOI: doi:10.1088/0957-0233/15/10/017>	1-5

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  
18.09.2020

Examinador  
M. P. López Sabater

Página  
1/2

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

G01R

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, NPL, Internet.