



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 361 450**

51 Int. Cl.:  
**H02K 17/02** (2006.01)  
**G01P 3/44** (2006.01)  
**G01R 23/16** (2006.01)  
**G01R 23/20** (2006.01)  
**G01R 31/34** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08381014 .3**  
96 Fecha de presentación : **24.04.2008**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2112753**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **28.10.2009**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para determinar la velocidad de rotación del rotor de un motor de inducción eléctrica.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**17.06.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**17.06.2011**

73 Titular/es: **ADVANCED DIGITAL DESIGN, S.A.**  
**C.E.I. Aragón**  
**c/ María de Luna, 11**  
**50018 Zaragoza, ES**

72 Inventor/es: **Sanz Molina, Alfredo;**  
**García Ramos, José Ignacio;**  
**Romeral Martínez, José Luis;**  
**García Espinosa, Antonio y**  
**Ortega Redondo, Juan Antonio**

74 Agente: **Hernández Hernández, Carlos**

ES 2 361 450 T3

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

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo para determinar la velocidad de rotación del rotor de un motor de inducción eléctrica

5 Objeto de la invención

Esta invención está constituida por un procedimiento y dispositivo para determinar la velocidad de rotación del rotor de un motor de inducción eléctrica asíncrono que hace innecesario el uso de sensores costosos.

- 10 El dispositivo usado en esta invención no requiere el desmontaje del motor, la instalación de sensores u otras etapas para medir la velocidad, y por lo tanto el rendimiento real del motor.

Antecedentes de la invención

- 15 En los motores de inducción eléctrica asíncronos de gran tamaño es importante conocer la velocidad real de rotación y, por extensión, el rendimiento real proporcionado. En estos casos, la variación respecto a los parámetros proporcionados por el fabricante en las placas de especificación puede mostrar si el motor está funcionando según el diseño o si se han producido problemas que requieren atención y reparación.
- 20 Aunque esto no es una alta prioridad en los motores pequeños, es en los motores a escala grande donde, así como la importancia del rendimiento real obtenido, las reparaciones y el mantenimiento son más frecuentes. Estas reparaciones sólo deberían llevarse a cabo cuando sea necesario y no a efectos meramente experimentales.

Los siguientes parámetros se consideran como especificaciones del fabricante:

- 25
- Velocidad nominal  $f_n$ ,
  - Frecuencia principal de alimentación  $f_1$ ,
  - Número de pares de polos  $p$ ,
  - Velocidad mecánica nominal  $\omega_n$  del motor,
  - Rendimiento nominal  $\eta_n$ ,
- 30
- Factor de potencia  $\cos\theta$ ,
  - Potencia mecánica nominal  $P_n$ ,
  - Constante de linealidad  $K_m$  que relaciona el voltaje de alimentación  $U_1$  con la frecuencia de la red  $f_1$  según  $U_1=K_m f_1$ .

- 35 En cualquier caso, la relación entre la velocidad expresada en hercios  $f_1$  [Hz], en radianes por segundo  $\omega_s$  [rad/s] o en revoluciones por minuto  $n_s$  [rev/min] es de uno a uno, según las siguientes ecuaciones de dependencia:

$$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p}; n_s = \frac{60 f_1}{p}.$$

- 40 Hasta ahora, los cálculos de parámetros como la velocidad real de rotación o el rendimiento real del motor han requerido el uso de sensores conectados al motor. Un sensor de velocidad para calcular la velocidad y un sensor de par de torsión para medir la fuerza mecánica entregada por el motor a la velocidad de rotación mientras funciona.

Estos dispositivos son caros, ocupan espacio y a menudo deben ser insertados en lugares reservados para dispositivos que son movidos por el motor. Esto es incluso más problemático cuando un motor debe ser abierto para

- 45 llevar a cabo cualquier clase de reparación.

Esta invención evita el uso de estos dispositivos auxiliares y sólo lee la corriente de alimentación suministrada a cualquiera de los cableados del motor. En la práctica, los datos para la corriente se leen y obtienen en uno de los conductores principales de alimentación del motor, y son estos conductores principales los que alimentan al cableado del motor. Por lo tanto, en esta descripción, los términos conductor o conductores principales de alimentación y cableado del motor se usan de manera intercambiable. En ambos casos, como el cableado del motor es alimentado a través de los conductores principales de alimentación, las variables medidas tienen los mismos valores.

- 55 Una vez que se conoce la velocidad de rotación real del rotor del motor, es posible determinar el rendimiento a través de la relación que expresa el cociente entre la energía mecánica entregada al eje y la energía eléctrica

suministrada:

$$\eta = \frac{T\omega_{rm}}{\sqrt{3}U_l I_l \cos \theta} = \frac{T\omega_{rm}}{3U_f I_f \cos \theta}$$

5 en la que  $U_l$  es el voltaje de alimentación,  $I_l$  es la intensidad de alimentación,  $U_f$  e  $I_f$  son el voltaje y la corriente de fase, respectivamente,  $T$  el par de torsión del eje,  $\cos \theta$  es el factor de potencia y  $\omega_{rm}$  es la velocidad de rotación del rotor medida en radianes por segundo. Aunque ambas variables,  $U_l$  e  $I_l$ , son conocidas; el par de torsión  $T$  debería determinarse a través de experimentos o curvas de trabajo  $T-\omega$  una vez que se conoce la velocidad de rotación.

10 Ha habido resultados variados obtenidos a partir de estudios sobre daño a motores eléctricos. Estos estudios analizan el efecto de la excentricidad sobre la corriente del cableado, puesto que se generan armónicos que únicamente están asociados con la excentricidad, cuya amplitud es proporcional al fallo mecánico que causa el dicho armónico.

15 Aunque la excentricidad es un defecto que está presente en mayor medida cuando, por ejemplo, los cojinetes del motor están dañados, el mecanizado de las piezas no es perfecto y siempre existe un grado de desalineación que causa variaciones en las separaciones del entrehierro, o anisotropía, heterogeneidad del material; todas estas siempre están presentes en mayor o menor medida.

20 En los estudios mencionados anteriormente, la presencia de estos armónicos sólo tiene importancia cuando se produce daño, así que el problema puede ser cuantificado; mientras que en el caso de esta invención, su existencia es importante aunque no estén causados por daño que deba ser rectificado. Por otra parte, los estudios sobre daño del motor hacen uso de dispositivos que miden la velocidad real del rotor, ya que es esta velocidad la que nos conduce a la localización exacta del armónico que ha de ser cuantificado en amplitud,  $f_{ecc}$ , asociado con la excentricidad del rotor.

25 Esta localización se lleva a cabo usando la relación

$$f_{ecc} = f_1 \left[ 1 \pm k \left( \frac{1-s}{p} \right) \right] = [f_1 \pm k \cdot f_m]$$

30 en la que  $f_1$  es la frecuencia principal de alimentación del motor,  $k$  es un número entero,  $s$  es el deslizamiento,  $p$  el número de pares de polos.

Una vez que se obtienen todas las variables usando los dispositivos de lectura, se establece la ecuación y nos permite fijar la frecuencia con la que pueden localizarse los armónicos  $f_{ecc}$  que están asociados con la excentricidad.

35 Cuando es la velocidad real  $f_m$  la que se requiere y la frecuencia asociada con la excentricidad  $f_{ecc}$  también es desconocida, la relación previa no nos permite resolver el problema porque existen más cantidades desconocidas que ecuaciones que vinculen las variables implicadas, y por lo tanto, hasta ahora, el uso de sensores ha sido esencial.

40 La solicitud de patente WO2006131878 desvela un dispositivo y un procedimiento para medir sin sensores una frecuencia mecánica del rotor de un rotor de una máquina asíncrona, en la que el rotor tiene un defecto predeterminado y la máquina asíncrona tiene un número fijo de pares de polos. La máquina asíncrona comprende una unidad de determinación de corriente para determinar una corriente del estator del estator, en el que la corriente del estator tiene una frecuencia del estator. Una unidad de procesamiento forma un espectro de corriente del estator de la corriente del estator. Una unidad analizadora analiza el espectro de corriente de estator y determina un pico inverso y una frecuencia inversa correspondiente en el espectro de corriente del estator, en el que el pico inverso es el pico que tiene la segunda amplitud más alta en el espectro de corriente del estator en el intervalo de frecuencia de la frecuencia del estator. Una unidad de cálculo calcula una frecuencia mecánica del rotor del rotor a partir de la suma de la frecuencia de estator dividida por el número de pares de polos y la frecuencia inversa, si el deslizamiento de la máquina asíncrona es inferior al 50%, o a partir de la diferencia de la frecuencia de estator dividida por el número de pares de polos y la frecuencia inversa, si el deslizamiento es superior al 50%.

La patente US5742522 desvela una invención en la que durante una fase de aprendizaje se monitoriza una señal de corriente del motor, y se usa el par de torsión estimado del motor para transformar la señal de corriente en unos

- espectros de tiempo-frecuencia que incluyen una pluralidad de segmentos representativos de buenos modos de funcionamiento. Se estima un parámetro representativo y un límite respectivo de cada segmento. La señal de corriente es monitorizada durante una fase de prueba para obtener datos de prueba, y los datos de prueba se comparan con el parámetro representativo y el límite respectivo de cada segmento respectivo para detectar la presencia de una avería en un motor. Las frecuencias a las que es probable que ocurran averías de barras rotas en un motor pueden estimarse usando el par de torsión estimado del motor, y una función de ponderación puede resaltar tales frecuencias durante la estimación del parámetro. La señal de corriente puede subdividirse además en los segmentos monitorizando bandas laterales de las componentes de frecuencia de franjas del espectro de corriente de cada segmento. La estimación del parámetro y el límite de cada segmento puede incluir calcular una media del segmento (el parámetro representativo) y la varianza para cada componente de frecuencia en cada segmento representativo; calcular una distancia de Mahalanobis modificada para cada franja de cada segmento respectivo; y para cada segmento respectivo, usar distancias de Mahalanobis modificadas respectivas para calcular un radio respectivo alrededor de una media de segmento respectivo para definir el límite respectivo.
- 15 Esta invención establece un procedimiento de evaluación de la velocidad real  $f_{rm}$ , y por extensión, el rendimiento real del motor  $\eta_m$ . Igualmente, este procedimiento puede llevarse a cabo mediante un dispositivo considerado como parte de la invención.

Descripción de la invención

- 20 Un primer aspecto de la invención está constituido por un procedimiento para determinar la velocidad de rotación del rotor en motores de inducción eléctrica asíncronos. La velocidad nominal  $f_n$  es uno de los parámetros proporcionados por el fabricante en la placa (nombre común para esta clase de datos en las especificaciones de un modelo de motor particular); y la frecuencia principal de alimentación  $f_1$ , puede medirse por una lectura externa al motor.

El procedimiento consta del siguiente conjunto de fases:

- **Primera fase I** que a su vez consta de las siguientes sub-fases:
    - a) la medición de intensidad  $I_i=I_i(t)$  de cualquiera de las fases de cableado de la bobina del estator del motor,
    - b) la transformación de la señal definida en el dominio del tiempo  $I_i(t)$  en el dominio de la frecuencia  $I_w(w)$ , para determinar la frecuencia con la mayor densidad de energía,  $f_1$ , que corresponde a la frecuencia principal de alimentación del motor.
- Se obtienen dos datos en esta primera fase: en primer lugar el espectro real que muestra la función definida por el valor  $I_i(t)$  de la corriente en el dominio del tiempo a través de la función asociada  $I_w(f)$  que es nada menos que la misma función tal como se expresa en el dominio de la frecuencia después de aplicar preferentemente la transformada de Fourier; y, analizando esta función  $I_w(f)$ , en segundo lugar, obtenemos  $f_1$ , la frecuencia principal de alimentación del motor. Son igualmente válidos otros modos de transformación al dominio de la frecuencia como aquellos basados en ondículas, o DFT ("Transformada Discreta de Fourier")
- **La segunda fase II** consta del establecimiento de frecuencias  $f_{min}$  y  $f_{max}$  que fijan un intervalo en el que es posible localizar el armónico causado por la excentricidad  $f_{ecc}$ ; es decir,  $f_{ecc} \in [f_{min}, f_{max}]$ . Dado que  $f_{ecc}$  es una cantidad desconocida, el procedimiento define una ventana en la que el único armónico presente es  $f_{ecc}$ .
  - **Por último, una tercera fase III** que a su vez está constituida por las siguientes sub-fases:
    - a) el valor de la frecuencia del único armónico presente se determina en la señal  $I_w(f)$  en el intervalo  $[f_{min}, f_{max}]$ , es decir, el valor de  $f_{ecc}$ ,
    - b) el valor para la velocidad de rotación  $f_{rm}$  del motor se obtiene usando la ecuación  $f_{rm}=f_1-f_{ecc}$ .

Una vez que se llega a este punto, la ecuación que conecta la velocidad de rotación real  $f_{rm}$  y el armónico asociado con la excentricidad se determina totalmente gracias a la localización de  $f_{ecc}$  en la ventana.

- Realizaciones particulares de procedimientos de evaluación de parámetros que dan origen a diferentes maneras de usar el procedimiento de la invención pueden encontrarse en las reivindicaciones subordinadas 2 a 6 y se consideran incluidas en esta descripción por referencia.

Un segundo aspecto de la invención es un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 7 que, usando la evaluación de la velocidad de acuerdo con cualquiera de los ejemplos para uso de la invención, permite la medición de la

velocidad de rotación real y, por extensión, el rendimiento. Este dispositivo no requiere modificaciones en el motor ni en los dispositivos mecánicos movidos por el motor, más bien simplemente la lectura de la corriente en el cableado del motor.

- 5 Este único requisito significa que el dispositivo puede, por ejemplo, ser instalado en el cuadro de distribución ocupando un mínimo de espacio. Si se sitúa en uno de los conductores principales de alimentación del cableado del motor, puede tener una pantalla de visualización en la que pueden verse valores como la velocidad real o el rendimiento del motor, así como otros valores derivados que pueden calcularse de acuerdo con el primero.
- 10 El dispositivo para determinar la velocidad de rotación de un rotor de motor eléctrico consta al menos de:
- medios para leer la señal de intensidad de los conductores principales de alimentación,
  - medios para transformar la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia,
  - una unidad de cálculo.
- 15 • medios para generación del valor numérico de la velocidad.

Los medios para leer la señal de intensidad pueden estar integrados en la misma carcasa que el dispositivo de manera que el dispositivo permitirá que la línea de alimentación lo atraviese.

- 20 Los medios para transformar la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, en el ejemplo preferido, funcionarán digitalmente, necesitando un convertidor analógico-digital para llevar a cabo la transformada sobre un conjunto discreto de valores.

- 25 En la realización preferida de la invención, la transformación tendrá lugar usando la transformada de Fourier. Para el caso discretizado, habrá un espacio finito para funciones de la base de Fourier, dando origen a un espectro de trabajo finito.

- 30 El espacio truncado de Fourier permite trabajar sobre vectores de valores tanto en el dominio del tiempo como el dominio de la frecuencia, interrelacionados eficazmente a través de la transformada rápida de Fourier (FFT).

- Estas operaciones serán emprendidas preferentemente por la unidad de cálculo. Diferentes maneras de emplear la invención conducen a diferentes maneras de distribuir la carga computacional. Es posible que las transformadas que permiten que las funciones temporales sean expresadas en el dominio de la frecuencia se lleven a cabo en dispositivos dedicados a esta tarea, lo que significa que la unidad de cálculo estaría dedicada totalmente a la aplicación de las diferentes etapas del procedimiento; por ejemplo, el cálculo de máximos o la evaluación de expresiones. Realizaciones particulares pueden encontrarse en las reivindicaciones subordinadas 8-13, que se consideran incluidas en esta descripción por referencia.
- 35

- 40 Los medios de salida para los valores calculados pueden suministrar resultados a modo de una línea de referencia así que pueden ser tratados desde una unidad central. Alternativamente, pueden mostrarse como un valor numérico en una simple pantalla de visualización.

- 45 El dispositivo puede no usar una unidad programable, aunque usará una unidad de cálculo integrada. Es igualmente posible que cualquiera de los componentes, como el convertidor analógico-digital, la unidad de cálculo que calcula la señal en el dominio de la frecuencia, o la unidad que determina la velocidad estén formados por dispositivos que usan lógica cableada; es decir, estos dispositivos sólo realizan operaciones lógicas para las que han sido diseñados específicamente.

- 50 Esto se posibilita mediante el uso de tecnologías FPGA (matriz de puertas programable in situ), constituidas por una matriz de puertas configurables o ASIC; es decir, crear un circuito integrado de aplicación específica, que significa cualquier circuito integrado realizado para medir para un uso específico, en lugar de usarse para propósitos generales.

- 55 El producto constituido por el programa que permite la aplicación del procedimiento al dispositivo cuando se usa una unidad programable también se considera parte de la invención, tal como se expone en las reivindicaciones 14 y 15, que se consideran incluidas en esta descripción por referencia.

Descripción de los dibujos

Esta descripción está acompañada por un conjunto de planos. Estos son ilustrativos de la realización preferida de la invención pero no son restrictivos de ningún modo.

- 5 La Figura 1 muestra un diagrama de una realización de la invención en el que se muestran los elementos básicos del dispositivo para determinar la velocidad real y el rendimiento real de un motor eléctrico asíncrono.  
La Figura 2 muestra un diagrama de una realización de la invención en el que se muestran los componentes del dispositivo de ejemplo representado en el diagrama de la figura anterior.

10 Explicación detallada de la invención

La Figura 1 muestra un diagrama de un ejemplo de realización de la invención. Este diagrama muestra un motor eléctrico asíncrono (2) alimentado con una línea trifásica (L) compuesta de tres conductores principales ( $L_1, L_2, L_3$ ).

- 15 El motor (2) está alimentado eléctricamente. Parte de la energía se usa para aplicar un trabajo mecánico a través de su eje (2.1) a una carga (3). La relación entre la energía mecánica producida y la energía eléctrica suministrada es la que define el rendimiento real del motor  $\eta_{rm}$  bajo las condiciones de funcionamiento determinadas por la curva T- $\omega$ .

- 20 El dispositivo (1) de la invención sólo requiere una lectura de la corriente  $I_l$  en uno de los conductores principales ( $L_1$ ) del cableado. Esta lectura puede llevarse a cabo fuera de la carcasa del motor (2), por ejemplo en el cuadro de distribución (C).

- 25 El dispositivo (1) en este ejemplo está equipado con un medidor de corriente (1.1) que genera la función  $I_l(t)$ , la función analógica que corresponde a la señal con el valor de intensidad según el tiempo.

Esta señal analógica es transformada en una señal muestreada usando un convertidor analógico-digital (1.2).

- 30 La señal muestreada es operable usando algoritmos de cálculo numérico. En particular, la unidad de cálculo (1.3), en esta realización, aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) para obtener  $I_w(f)$ , el valor que corresponde a la corriente en el dominio de la frecuencia.

Esta misma unidad de cálculo puede ejecutar un programa que realiza las siguientes tareas:

- 35 • lectura de un vector de valores que corresponden a una muestra digital de la señal de intensidad,  
• aplicación de la transformada al dominio de la frecuencia según su serie de Fourier truncada.  
• cálculo de la frecuencia de la alimentación  $f_1$  analizando el armónico asociado con la densidad de energía máxima,  
• cálculo de los valores  $f_{min}, f_{max}$   
40 • evaluación del máximo de la función transformada en el intervalo  $[f_{min}, f_{max}]$ , valor asociado con la variable  $f_{ecc}$ ,  
• cálculo de la velocidad real de rotación del rotor usando la fórmula

$$f_{rm} = f_1 - f_{ecc}$$

- 45 En particular, el programa usa los siguientes valores de entrada obtenidos de la información de la placa de especificaciones conocida para el motor:

- 50 • Número de pares de polos  $p$ ,  
• Velocidad mecánica nominal  $\omega_n$  del motor,  
• Rendimiento nominal  $\eta_n$ ,  
• Factor de potencia  $\cos\theta$ ,  
• Potencia mecánica nominal  $P_n$ ,  
• Constante de linealidad  $K_m$  que relaciona el voltaje de alimentación  $U_l$  con la frecuencia de la red  $f_1$  según  $U_l = K_m f_1$ .

55

El programa informático calcula las frecuencias  $f_{min}$  y  $f_{max}$  que establece el intervalo en el que el armónico es calculable debido a la excentricidad  $f_{ecc}$  usando las siguientes fases:

- a) cálculo de la velocidad síncrona del motor  $\omega_s$  según el número de pares de polos  $p$  del motor y la

frecuencia de la red  $f_1$

$$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p}$$

b) cálculo del voltaje de alimentación del motor,  $U_1$ , según la siguiente ecuación

$$U_1 = K_m \cdot f_1$$

- 5 c) estimación de la velocidad  $\hat{\omega}_{rm}$  como el valor que especifica  $\hat{\omega}_{rm} = \min\{(\omega_s - \omega_1), (\omega_s - \omega_2)\}$  con  $\omega_1, \omega_2$  siendo las raíces reales de la ecuación de segundo grado

$$\eta_n \sqrt{3} U_1 I_l \cos(\theta) = \left[ \frac{\frac{P_n}{\omega_n}}{\omega_s - \omega_n} \hat{\omega}_{rm} + \frac{\frac{P_n}{\omega_n}}{\omega_s - \omega_n} \hat{\omega}_s \right] \hat{\omega}_{rm}$$

d) estimación del deslizamiento  $\hat{s}$  usando

$$\hat{s} = (\omega_s - \hat{\omega}_{rm}) / \omega_s$$

- 10 e) estimación de la frecuencia de excentricidad  $\hat{f}_{ecc}$  usando la ecuación

$$\hat{f}_{ecc} = f_1 \left[ 1 - \left( \frac{1 - \hat{s}}{p} \right) \right]$$

f) determinación del valor de  $f_{min}$ , como

$$f_{min} = \hat{f}_{ecc} - d_1 \hat{f}_{ecc}$$

y el valor de  $f_{max}$  como

15  $f_{max} = \hat{f}_{ecc} + d_2 \hat{f}_{ecc}$

en la que  $d_1$  y  $d_2$  son parámetros preestablecidos que determinan la anchura del intervalo de búsqueda  $[f_{min}, f_{max}]$  del valor real  $f_{ecc}$ .

- 20 Además de poder realizar estas tareas usando un programa ejecutable desde la unidad de cálculo, también puede conseguirse lo mismo usando un dispositivo de lógica cableada o una combinación de un programa y lógica cableada.

- 25 Los valores estimados son valores que permiten la definición de la ventana en la que se encuentra el valor real del armónico  $f_{ecc}$ . Por lo tanto, estas estimaciones no conducen a valores finales que también son estimados, más bien son parte de las fases intermedias del cálculo. El valor final del armónico asociado a la excentricidad,  $f_{ecc}$ , se mide sobre el valor de la intensidad en el dominio de la frecuencia, las estimaciones son meramente una herramienta que permite la definición de la ventana de búsqueda en la que se localiza el único armónico presente  $f_{ecc}$ .

- 30 Los valores  $d_1$  y  $d_2$  se toman en el ejemplo preferido para que tengan igual valor. El ejemplo toma que  $d_1 = d_2 = d = 0,1$ .

- 35 Una vez que se conoce la velocidad real del motor, en este caso expresada en radianes por segundo  $\omega_{rm}$ , es posible calcular el rendimiento real del motor,  $\eta_{rm}$  en cada punto de funcionamiento del motor usando la ecuación de segundo grado en  $\omega_{rm}$ :

$$\eta_{rm} = \frac{\left[ -\frac{\frac{P_n}{\omega_n}}{\omega_s - \omega_n} \omega_{rm} + \frac{\frac{P_n}{\omega_n}}{\omega_s - \omega_n} \omega_s \right] \omega_{rm}}{\sqrt{3} U_1 I_l \cos(\theta)}$$

en la que se halla que  $\sqrt{3}U_f I_f \cos \theta = 3U_f I_f \cos \theta$ .

5

La ecuación de segundo grado puede dar dos raíces reales positivas:  $\omega_1, \omega_2$ . Hablando en términos físicos, sólo es correcta la más cercana a la velocidad síncrona,  $\omega_s$ [rad/s].

La elección de la raíz correcta puede calcularse como la velocidad que satisface el criterio del mínimo, es decir:

$$\omega_{rm} = \min\{(\omega_s - \omega_1), (\omega_s - \omega_2)\}$$

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para determinar la velocidad de rotación de rotores en motores de inducción eléctrica asíncronos,  $f_{rm}$ , en el que los siguientes datos del motor son conocidos:

5

- Número de polos  $p$ ,
- Velocidad mecánica nominal  $\omega_n$  del motor,
- Rendimiento nominal  $\eta_n$ ,
- Factor de potencia  $\cos\theta$ ,
- 10 • Potencia mecánica nominal  $P_n$ ,
- Constante de linealidad  $K_m$  que relaciona el voltaje de alimentación  $U_l$  con la frecuencia de la red  $f_1$  según  $U_l = K_m f_1$ .

que comprende el siguiente conjunto de fases:

15

- **primera fase I** que a su vez comprende las siguientes sub-fases:
  - a) la medición de intensidad  $I_l = I_l(t)$  de cualquiera de las fases de cableado de la bobina del estator del motor,
  - 20 b) la transformación de la señal definida en el dominio del tiempo  $I_l(t)$  en el dominio de la frecuencia  $I_w(t)$ , para determinar la frecuencia con la mayor densidad de energía,  $f_1$ , que corresponde a la frecuencia principal de alimentación del motor,
- **segunda fase II** consta del establecimiento de frecuencias  $f_{min}$  y  $f_{max}$  que fijan un intervalo en el que es posible localizar el armónico causado por la excentricidad  $f_{ecc}$ ; es decir,  $f_{ecc} \in [f_{min}, f_{max}]$ , se calcula a su vez, usando las siguientes sub-fases:

25

$$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p}$$

a) cálculo de la velocidad síncrona del motor  $\omega_s$  según el número de pares de polos  $p$  del motor y la frecuencia principal de alimentación  $f_1$  por medio de la fórmula

30

$$U_l = K_m \cdot f_1$$

c) estimación de la velocidad  $\hat{\omega}_{rm}$  como el valor que especifica  $\hat{\omega}_{rm} = \min\{(\omega_s - \omega_1), (\omega_s - \omega_2)\}$  con  $\omega_1, \omega_2$  siendo las raíces reales de la ecuación de segundo grado

$$\eta_n \sqrt{3} U_l I_l \cos(\theta) = \left[ \frac{\frac{P_n}{\omega_n}}{\omega_s - \omega_n} \hat{\omega}_{rm} + \frac{\frac{P_n}{\omega_n}}{\omega_s - \omega_n} \hat{\omega}_s \right] \hat{\omega}_{rm}$$

d) estimación del deslizamiento  $\hat{s}$  usando

35

$$\hat{s} = (\omega_s - \hat{\omega}_{rm}) / \omega_s$$

e) estimación de la frecuencia de excentricidad  $\hat{f}_{ecc}$  usando la ecuación

$$\hat{f}_{ecc} = f_1 \left[ 1 - \left( \frac{1 - \hat{s}}{p} \right) \right]$$

f) determinación del valor de  $f_{min}$ , como

$$f_{min} = \hat{f}_{ecc} - d_1 \hat{f}_{ecc}$$

40

y el valor de  $f_{max}$  como

$$f_{max} = \hat{f}_{ecc} + d_2 \hat{f}_{ecc}$$

en la que  $d_1$  y  $d_2$  son parámetros preestablecidos que determinan la anchura del intervalo de búsqueda  $[f_{min}, f_{max}]$  del valor real  $f_{ecc}$ .

- **tercera fase III**, que a su vez consta de las siguientes sub-fases:  
 b) el valor de la frecuencia del único armónico presente se determina en la señal  $I_w(f)$  en el intervalo  $[f_{\min}, f_{\max}]$ , es decir, el valor de  $f_{ecc}$ ,  
 c) el valor para la velocidad de rotación  $f_{rm}$  del rotor se obtiene usando la ecuación  $f_{rm}=f_1-f_{ecc}$ .

5

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque**  $d_1$  y  $d_2$  son iguales, es decir,  $d_1=d_2=d$ .

10 3.

Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, **caracterizado porque**  $d=0,1$ .

4. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones previas, **caracterizado porque** no importa que las velocidades calculadas o medidas en las diferentes expresiones se tomen en hercios  $f_1$ [Hz], en radianes por segundo  $\omega_s$ [rad/s] o en revoluciones por minuto  $n_s$ [rev/min] siempre que se tengan en cuenta las siguientes relaciones dependientes

15

$$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p}; n_s = \frac{60 f_1}{p}$$

5. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones previas, **caracterizado porque** el rendimiento real del motor,  $\eta_{rm}$ , se determina para cada punto de funcionamiento del motor como:

20

$$\eta_{rm} = \frac{\left[ \frac{P_n}{\omega_n} \omega_{rm} + \frac{P_n}{\omega_s - \omega_n} \omega_s \right] \omega_{rm}}{\sqrt{3} U_l I_l \cos(\theta)}$$

6. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** la evaluación de la señal de intensidad  $I_w(f)$  en el dominio de la frecuencia se lleva a cabo numéricamente, preferentemente usando la transformada rápida de Fourier.

25

7. Dispositivo para determinar la velocidad de rotación del rotor de un motor eléctrico que comprende:  
 • medios para leer la señal de intensidad  $I_l=I_l(t)$  para el cableado del motor,  
 • medios para transformar la señal del dominio del tiempo  $I_l=I_l(t)$  al dominio de la frecuencia  $I_w(t)$ ,  
 • una unidad de cálculo para calcular 3 etapas:

30

**primera etapa I** que determina la frecuencia de la señal de  $I_w(t)$  con la mayor densidad de energía  $f_1$ , que corresponde a la frecuencia principal de alimentación del motor,

**segunda etapa II** que consta del establecimiento de frecuencias  $f_{\min}$  y  $f_{\max}$  que fijan un intervalo en el que es posible localizar el armónico causado por la excentricidad  $f_{ecc}$  del motor; es decir,  $f_{ecc} \in [f_{\min}, f_{\max}]$ , se calcula a su vez, usando las siguientes sub-etapas:

35

- cálculo de la velocidad síncrona del motor  $\omega_s$  según el número de pares de polos  $p$  del motor y la frecuencia principal de alimentación  $f_1$ , por medio de la fórmula

$$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p}$$

- cálculo del voltaje de alimentación del motor,  $U_l$ , según la siguiente ecuación

$$U_l = K_m \cdot f_1$$

40

- estimación de la velocidad  $\hat{\omega}_{rm}$  como el valor que especifica  $\hat{\omega}_{rm} = \min\{(\omega_s - \omega_1), (\omega_s - \omega_2)\}$  con  $\omega_1, \omega_2$  siendo las raíces reales de la ecuación de segundo grado

$$\eta_n \sqrt{3} U_l I_l \cos(\theta) = \left[ \frac{\frac{P_n}{\omega_n}}{\omega_s - \omega_n} \hat{\omega}_{rm} + \frac{\frac{P_n}{\omega_n}}{\omega_s - \omega_n} \hat{\omega}_s \right] \hat{\omega}_{rm}$$

- estimación del deslizamiento  $\hat{s}$  usando  $\hat{s} = (\omega_s - \hat{\omega}_{rm}) / \omega_s$
- estimación de la frecuencia de excentricidad  $\hat{f}_{ecc}$  usando la ecuación

5

$$\hat{f}_{ecc} = f_1 \left[ 1 - \left( \frac{1 - \hat{s}}{p} \right) \right]$$

- determinación del valor de  $f_{min}$  como

$$f_{min} = \hat{f}_{ecc} - d_1 \hat{f}_{ecc}$$

y el valor de  $f_{max}$  como

$$f_{max} = \hat{f}_{ecc} + d_2 \hat{f}_{ecc}$$

10

en la que  $d_1$  y  $d_2$  son parámetros preestablecidos que determinan la anchura del intervalo de búsqueda  $[f_{min}, f_{max}]$  del valor real  $f_{ecc}$ .

**tercera fase III**, que a su vez consta de las siguientes sub-fases:

15

- el valor de la frecuencia del único armónico presente se determina en la señal  $I_w(f)$  en el intervalo  $[f_{min}, f_{max}]$ , es decir, el valor de  $f_{ecc}$ ,
- el valor para la velocidad de rotación  $f_m$  del motor se obtiene usando la ecuación  $f_m = f_1 - f_{ecc}$ .
- medios para generación del valor numérico de la velocidad  $f_m$ .

20

8. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** los medios de transformación de la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia usan un convertidor analógico-digital así como una unidad de cálculo de transformada.

25

9. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 8, **caracterizado porque** la implementación de la transformada es Fourier, basada en ondículas o DFT.

10. Dispositivo de acuerdo con las reivindicaciones 7 y 8, **caracterizado porque** la unidad de cálculo está equipada con una entrada para la señal de intensidad en el dominio de la frecuencia y una salida con el valor que representa la velocidad.

30

11. Dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, **caracterizado porque** la unidad de cálculo es programable.

35

12. Dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, **caracterizado porque** cualquiera de los componentes del convertidor analógico-digital, la unidad de cálculo que calcula la señal en el dominio de la frecuencia o la unidad que determina la velocidad están constituidos por dispositivos que usan lógica cableada.

40

13. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 12, **caracterizado porque** la integración conduce a un dispositivo ASIC.

45

14. Producto que está constituido por un programa informático para determinar la velocidad de rotación del rotor de un motor eléctrico, en el que el dicho producto que está constituido por el programa informático contiene un recurso que puede usarse como ordenador que está equipado con medios para leer un código ejecutable para:

- la lectura de un vector de valores que corresponden a una muestra digitalizada de la señal de intensidad,
- la aplicación de la transformada al dominio de la frecuencia según un desarrollo en serie de Fourier

- truncada.
  - el cálculo de la frecuencia principal de alimentación  $f_1$  usando análisis del armónico asociado con la densidad de energía máxima,
  - el cálculo de los valores  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$
- 5
- la evaluación del máximo de la función transformada en el intervalo  $[f_{\min}, f_{\max}]$
  - el cálculo de la velocidad usando la fórmula  $f_{rm}=f_1-f_{ecc}[\text{Hz}]$  o sus equivalentes a la escala apropiada de acuerdo con la reivindicación 5.
- 15.
- 10 El producto que está constituido por un programa informático de acuerdo con la reivindicación 3, en el que la transformada al dominio de la frecuencia se lleva a cabo usando un algoritmo de transformada rápida de Fourier, DFT, o basada en ondículas.