

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 383 843**

51 Int. Cl.:
G01M 13/04 (2006.01)
G01H 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **08770017 .5**
96 Fecha de presentación: **03.06.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2156159**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **24.02.2010**

54 Título: **Sistema y procedimiento para la detección de fallos de cojinetes utilizando la supresión de ruido de la corriente del estator**

30 Prioridad:
04.06.2007 US 932742 P

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
26.06.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
26.06.2012

73 Titular/es:
**EATON CORPORATION
EATON CENTER 1111 SUPERIOR AVENUE
CLEVELAND, OH 44114, US**

72 Inventor/es:
**ZHOU, Wei;
LU, Bin;
HABETLER, Thomas;
HARLEY, Ronald y
THEISEN, Peter**

74 Agente/Representante:
Isern Jara, Jorge

ES 2 383 843 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

Sistema y procedimiento para la detección de fallos de cojinetes utilizando la supresión de ruido de la corriente del estator

5

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La presente invención se refiere en general a motores y, más particularmente a un sistema y procedimiento para la detección de condiciones incipientes indicativas de fallos de motor.

10

Los motores trifásicos de inducción consumen un gran porcentaje de la capacidad de electricidad generada. Muchas aplicaciones para este "caballo de labor" de la industria son ventiladores y bombas industriales. Por ejemplo, en una fábrica integrada típica de papel, los motores de bajo voltaje y medio voltaje pueden comprender cerca del 70% de la totalidad de cargas eléctricas. Debido a la prevalencia de estos motores en la industria, es muy importante que el motor trifásico sea fiable. Las encuestas de fiabilidad en la industria sugieren que los fallos de motor se encuentran típicamente en una de cuatro categorías principales. De modo específico, los fallos de motor resultan de manera típica de fallos de cojinetes, fallos de espiras del estator, fallos de las barras del rotor u otros fallos de tipo general. Dentro de estas cuatro categorías, los fallos de cojinetes, de estator y de rotor representan aproximadamente el 85% de todos los fallos de motor.

20

Se cree que este porcentaje se podría reducir significativamente si los equipos impulsados estuvieran mejor alineados cuando se instalan y permanecieran alineados con independencia de cambios en las condiciones operativas. No obstante, los motores fueron acoplados frecuentemente a cargas de bombas desalineadas o cargas con desequilibrios en rotación y fallos prematuramente debido a los esfuerzos impartidos en los cojinetes del motor. Además, la detección manual de las condiciones que provocan dichos fallos es difícil, como mínimo, porque el proceder de este modo requiere que el motor funcione. Por lo tanto, el operario debe desmontar habitualmente el motor del lugar de trabajo para llevar a cabo una revisión de mantenimiento y el diagnóstico. No obstante, el desmontar el motor del lugar de trabajo es poco deseable en muchas aplicaciones, porque los periodos de paro del motor pueden ser extremadamente costosos.

30

Por su parte, algunos dispositivos de detección han sido diseñados para generar realimentación con respecto a un motor en funcionamiento. La realimentación es revisada por un operario para determinar las condiciones operativas del motor. No obstante, la mayor parte de sistemas que controlan motores en funcionamiento proporcionan simplemente realimentación de fallos que probablemente ya han averiado el motor. Por lo tanto, si bien se envía al operario realimentación operativa, habitualmente es demasiado grande para tomar acciones preventivas.

35

Se han inventado algunos sistemas para proporcionar al operario una realimentación de aviso de fallos temprana o anticipada. Por ejemplo, se ha utilizado el control de la vibración para proporcionar información sobre desalineaciones o fallos basados en desequilibrios. No obstante, cuando tiene lugar una resonancia mecánica, las vibraciones de la máquina se amplifican. Debido a esta amplificación, son posibles falsos positivos indicativos de diferentes asimetrías mecánicas. Además, los sistemas de control basados en las vibraciones requieren típicamente sistemas de control muy especializados e invasivos para su despliegue dentro del sistema del motor.

40

Teniendo en cuenta los inconvenientes del control basado en vibraciones, se han desarrollado técnicas de control basadas en las corrientes para proporcionar una técnica más económica, no invasiva, para la detección de fallos de los cojinetes. También existen limitaciones e inconvenientes en los presentes sistemas de detección de fallos basados en la corriente. Es decir, en la detección de fallos de cojinetes basada en la corriente puede ser un reto el extraer una característica o "firma" de los fallos, a partir de la corriente del estator del motor. Para diferentes tipos de fallos de cojinetes, las características de los fallos pueden tener formas distintas. De acuerdo con procesos generales de desarrollo de fallos, los fallos de cojinetes se pueden facilitar en defectos de punto único o defectos de tipo generalizado. La mayor parte de técnicas de detección de fallos de cojinetes basadas en la corriente que se utilizan en la actualidad, están dirigidas a la detección de defectos de punto único y se basan en la localización y proceso de las frecuencias de fallos de cojinetes características en la corriente del estator. No obstante, estas técnicas pueden no ser adecuadas para detectar fallos por mal estado general. Es decir, los fallos por mal estado general muestran superficies de cojinetes degradadas pero no necesariamente defectos claros y, por lo tanto, pueden no existir en la corriente del estator frecuencias características de fallos. Dado que muchos fallos de cojinetes se desarrollan inicialmente en forma de fallos generalizados de cojinetes, especialmente en una etapa temprana, sería ventajoso para las técnicas de detección de fallos de cojinetes basadas en la corriente, el tener la capacidad de detectar dichos fallos de cojinetes de tipo generalizado.

45

50

55

60

Por lo tanto, sería deseable diseñar una técnica de detección de fallos de cojinetes basada en la corriente que supere los inconvenientes antes mencionados. Una técnica de detección de fallos de cojinetes basada en la corriente que permite la detección de fallos generalizados de los cojinetes sería ventajosa al proporcionar detección en una etapa temprana de fallos de cojinetes.

65

Se hace referencia al documento US 2003/067277 A1 que describe un procedimiento y sistema para la detección temprana de fallos incipientes en un motor eléctrico. En primer lugar, se miden los valores de la corriente y el voltaje para una o más fases del motor eléctrico durante el funcionamiento del motor. Se determina entonces un conjunto de predicciones de corriente mediante un predictor neural basado en la corriente de red, basado en los valores de voltaje medidos y en una estimación de valores de velocidad del motor eléctrico. A continuación, se genera un conjunto de residuales al combinar el conjunto de predicciones de corriente con los valores de corriente medidos. Finalmente, se lleva a cabo una determinación de si existe o no un fallo incipiente eléctrico, mecánico y/o electromecánico, basado en el resultado de la comparación del conjunto de indicadores de fallo y un conjunto de valores base predeterminados.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

De acuerdo con la presente invención, se da a conocer un sistema y un procedimiento, tal como se define en las reivindicaciones independientes respectivamente. Se describen en las reivindicaciones dependientes realizaciones preferentes de la invención.

La presente invención da a conocer un sistema y procedimiento para la detección de fallos mecánicos de motor inminentes mediante la supresión de ruidos de la corriente. Los datos de la corriente son descompuestos en una componente sin fallos (es decir, ruido) y una componente de fallo y la supresión de ruidos es llevada a cabo para aislar la componente de fallo de la corriente y generar un identificador de fallo.

De acuerdo con un aspecto de la invención, un controlador configurado para detectar indicios de fallos mecánicos inminentes del motor incluye un procesador programado para recibir un conjunto de datos de la corriente de un motor durante un funcionamiento normal conocido, definir un ruido de base basándose en el conjunto de datos de corriente captados del motor con funcionamiento normal conocido y recibir de manera repetida datos de corriente de funcionamiento en tiempo real del motor en funcionamiento. El procesador está programado además para eliminar el ruido base de los datos de corriente en funcionamiento para identificar cualesquiera componentes de fallo presentes en los datos de corriente en funcionamiento y generar un índice de fallo para los datos de corriente de funcionamiento basándose en cualesquiera componentes de fallo aislados.

De acuerdo con otro aspecto de la invención, se da a conocer un procedimiento no invasivo para la detección de fallos inminentes de cojinetes en máquinas eléctricas que comprende las etapas de captar una serie de datos de corriente de estator de una máquina eléctrica durante el funcionamiento, aplicar cada uno de los juegos de datos de corriente del estator a un filtro de datos de la corriente en tiempo real para generar una corriente de estator con supresión de ruidos y determinando un índice de fallo a partir de la corriente de estator con supresión de ruidos para cada uno de los conjuntos de datos de corriente de estator. El método comprende también las etapas de controlar un valor del índice de fallo para la serie de datos de corriente de estator y generar un aviso si el valor de índices de fallos supera un límite de control.

De acuerdo con otro aspecto de la invención, un sistema para controlar la corriente para la predicción de fallos de cojinetes incluye, como mínimo, un sensor de corriente no invasivo configurado para captar datos de corriente de estator de un motor en funcionamiento y un procesador conectado para recibir los datos de corriente del estator desde, como mínimo, un sensor de corriente no invasivo. El procesador está programado para recibir un primer conjunto de datos de corriente de estator desde el, como mínimo, un sensor de corriente, comprendiendo el primer conjunto de datos de corriente de estator datos de corriente de base que representan el funcionamiento normal del motor. El procesador está programado también para definir una componente sin fallo a partir de los datos de corriente de la línea base, recibir respectivamente datos de corriente de funcionamiento en tiempo real desde el motor en funcionamiento y eliminar la componente sin fallo de los datos de corriente operativa en tiempo real para aislar datos de corriente residual. El procesador está programado además para procesar los datos de corriente residual para identificar posibles fallos de cojinetes; generar un índice de fallo para cualesquiera fallos de cojinete identificados y generar un aviso si el índice de fallos supera un umbral de índice de fallo.

Otras varias características y ventajas de la presente invención quedarán evidentes de la presente descripción detallada y de los dibujos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Los dibujos muestran realizaciones preferentes que se prevén actualmente para llevar a cabo la invención.

En los dibujos:

La figura 1 es una representación esquemática de un conjunto de motor previsto para llevar a cabo la invención.

La figura 2 es un diagrama de bloques de un controlador, de acuerdo con la invención.

La figura 3 es un diagrama de bloques de un controlador para configurar un filtro Wiener, de acuerdo con una realización de la invención.

5 La figura 4 es un diagrama de bloques de un controlador para llevar a cabo la detección de fallos utilizando supresión de ruido de corriente, de acuerdo con una realización de la invención.

La figura 5 es una representación gráfica de datos de un índice de fallos representado con respecto a umbrales de índice de fallos, de acuerdo con una técnica de control de proceso estadístico, de acuerdo con una realización de la invención.

10 La figura 6 es un diagrama de bloques de un controlador, de acuerdo con otra realización de la invención.

La figura 7 es un diagrama de flujo que muestra una técnica para la detección de fallos utilizando la supresión de ruido en la corriente.

15 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA REALIZACIÓN PREFERENTE

Las realizaciones de la invención que se explican a continuación se refieren a la detección de condiciones anormales para determinar de forma predictiva fallos potenciales de un motor. Se utiliza el análisis de las características de la corriente (CSA) para revisar los datos en bruto recibidos de una serie de sensores de un controlador que monitoriza un motor en funcionamiento. El sistema, que está preferentemente dispuesto dentro del controlador, descompone la corriente detectada/controlada en un componente sin fallos y un componente con fallos, y lleva a cabo una operación de supresión de ruidos para aislar el componente de fallo de la corriente y generar un identificador de fallo. Entonces, el operador del sistema de motor controlado es alertado de forma proactiva de un fallo potencial antes de que ocurra el fallo.

Haciendo referencia a continuación a la figura 1, un conjunto de motor, tal como un motor de inducción, está configurado para la impulsión de una carga. El conjunto del motor 10 comprende un motor 12 que recibe potencia del suministro de potencia 14. El conjunto del motor 10 incluye también un controlador 16 (es decir, un sistema de control de la corriente) utilizado para supervisar y también para controlar el funcionamiento del motor 10 como respuesta a las informaciones del operador o condiciones de fallo del motor. El motor 12 y el controlador 16 están típicamente acoplados a dispositivos electrónicos, tales como un controlador de potencia o arrancador 17, y se encuentran en serie con la alimentación del motor para controlar la potencia al motor 12. El controlador 16 comprende un procesador 18 que, tal como se describirá en mayor detalle con respecto a la figura 2, implementa un algoritmo para determinar la presencia de condiciones mecánicas no deseadas y avisar de forma predictiva al operador de un fallo potencial antes de que ocurra el fallo. El controlador 16 comprende, además, unos sensores de corriente 22. De acuerdo con una realización a título de ejemplo de la invención, se comprende que los sensores de corriente 22 son sensores del tipo existente utilizados para controlar la entrada de corriente al motor, y controlan de manera general el funcionamiento del motor. Es decir, no se necesita un conjunto separado de sensores de corriente para captar datos de corriente para su utilización en el sistema/técnica de supresión de ruidos de la invención (que se describe en detalle más adelante). De este modo, la captación de datos de corriente a través de los sensores de corriente 22 para su utilización en un sistema/técnica de supresión de ruidos se comprende que forma un sistema/técnica de control de corriente "sin sensores", para determinar predictivamente fallos potenciales del motor. Tal como es conocido de manera general, los datos de la corriente pueden ser captados desde únicamente dos de las fases de un motor trifásico, dado que los datos del momento para la tercera fase se pueden extrapolar de los datos de la corriente de las dos fases controladas. Si bien la presente invención será descrita con respecto a un motor trifásico, la presente invención es aplicable de manera equivalente a otros motores. Además, si bien se ha mostrado incluyendo un par de sensores de corriente 22, también se prevé que se pueda utilizar un sensor de corriente único para captar solamente una fase de corriente.

En una realización de la invención, los sensores de corriente 22 captan datos de corriente del estator desde un motor de inducción. Los datos de corriente del estator captados de los sensores 22 son comunicados al procesador 18, en el que se analiza la corriente utilizando el análisis de las características de la corriente (CSA) para detectar fallos incipientes (es decir, inminentes) del motor, tales como fallos de los cojinetes. Dado que la identificación de las frecuencias de fallo características no es una solución viable para la detección de todos los tipos de fallos de cojinetes (por ejemplo, fallos de tipo generalizado), de acuerdo con una realización de la invención, el procesador 18 es programado para tratar el problema de la detección de fallos como un problema de relación baja de señal a ruido (SNR). El procesador 18 es programado, por lo tanto, para descomponer la corriente del estator en componentes de ruido y componentes de fallo (es decir, la señal de fallo de cojinetes). Los componentes de ruido son los componentes dominantes en la corriente del estator, e incluyen el suministro de frecuencias fundamentales y armónicos, armónicos de excentricidad, armónicos de ranura, armónicos de saturación y otras componentes de fuentes desconocidas, incluyendo ruidos del medio ambiente. Dado que estos componentes dominantes existen antes y después de la presencia de un fallo de cojinetes, una gran cantidad de la información que contienen no está relacionada con el fallo. En este sentido, se pueden tratar como "ruido" para el problema de detección de fallo de cojinetes. Puesto que el "ruido" podría ser 10^4 veces más intenso que la señal de fallo del cojinete (es decir, decenas de amperios con respecto a miliamperios), la detección de la señal de fallo de cojinetes constituye un problema de

SNR baja. Para resolver el problema de SNR baja, el procesador 18 implementa una técnica/proceso de supresión de ruidos para detectar la señal de fallo de cojinetes. Las componentes de ruido en la corriente del estator son estimadas y, a continuación, suprimidas por sus estimaciones en tiempo real, proporcionando de esta manera un indicador de fallo para los componentes restantes.

5 Si bien el procesador 18 se ha mostrado como incluido en un controlador independiente 16, se reconocerá también que el procesador 18 podría estar incluido en el control de potencia/arrancador 17. De manera adicional, se reconocerá que el procesador 18 podría estar incluido en otro dispositivo de control de potencia, tal como un medidor, revelador o dispositivo de impulsión. Es decir, se comprende que el controlador 18 podría comprender un
10 dispositivo de control de potencia existente, tal como un medidor, revelador, arrancador o impulsión de motor y que el procesador 18 podría estar integrado en el mismo.

Haciendo referencia, a continuación, a la figura 2, se ha mostrado un diagrama de bloques más detallado del controlador 16. Tal como se ha indicado con respecto a la figura 1, el controlador 16 comprende un procesador 18 y sensores de corriente 22. Además, el conjunto revelador 16 comprende un filtro de ranura 24, un filtro de paso bajo 26 y un convertidor analógico a digital (A/D) 28. Un filtro de ranura 24, un filtro de paso bajo 26, y un convertidor A/D
15 funcionan recibiendo datos en bruto generados por los sensores de corriente 22, y preparan los datos en bruto para procesar por el procesador 18. Es decir, como los filtros 24 y 26 son utilizados para eliminar la frecuencia fundamental (por ejemplo, 60 Hz en US y 50 Hz en Asia) y armónicos de baja frecuencia, dado que estos contenidos de armónicos no están relacionados con fallos de cojinetes. Eliminando estas frecuencias (especialmente la
20 componente de frecuencia base) de los datos de corriente medidos se pueden mejorar notablemente la resolución de la conversión analógica a digital y la SNR, dado que la frecuencia de 60 Hz tiene una gran magnitud en el espectro de frecuencia de la señal de corriente. Si bien el controlador 16 se ha mostrado incluyendo los filtros 24, 26, también se prevé, no obstante, que se podrían pasar datos de corriente directamente desde los sensores 22 al
25 convertidor A/D 28.

Tal como se ha mostrado en la figura 2, el procesador 18 funciona, por lo menos en parte, como sistema de supresión de ruido que descompone la corriente de estator en componentes de ruido y componentes de fallo. De este modo, el procesador 18 incluye un retardo de entrada 30 y un predictor de corriente 32, estando configurado el
30 predictor de corriente para la predicción de componentes de ruido presentes en la corriente de estator. Restando la predicción de los componentes de ruido de los valores de corriente de estator adquiridos repetidamente en tiempo real se obtienen componentes de fallo que son inyectadas en la corriente de estator por los fallos de los cojinetes. Se prevé que el predictor de corriente 32 pueda estar configurado como filtro Wiener (respuesta de impulsos infinita (IIR) o respuesta de impulsos fija (FIR)), un algoritmo de descenso más rápido, un algoritmo de media de cuadrados
35 mínimos (LMS), un algoritmo de cuadrados recursivos mínimos (LRS), u otro filtro digital.

Haciendo referencia a continuación a la figura 3, en una realización a título de ejemplo de la invención, el procesador 34 incluye un filtro Wiener 36 que proporciona la supresión de ruido en la corriente de estator y el aislamiento de una
40 señal de fallo en el mismo. Para proporcionar una supresión de ruido exacta en al corriente de estator, el procesador 34 está programado para configurar el filtro Wiener 36 para definir de manera exacta (es decir, estimada) la mayor parte de componentes de ruido de la corriente de estator, de manera que la señal de fallo de la corriente del estator no está incluido en su salida. En la configuración del filtro Wiener 36, el procesador 34 analiza los datos de corriente del estator asociados con condiciones de cojinetes en buen estado. Estos datos de corriente de estator asociados con las condiciones de cojinetes en buen estado pueden incluir un primer juego de datos de corriente de estator que
45 se captan, por ejemplo, dentro de un corto periodo de tiempo dispuesto en la instalación de un cojinete o al inicio de un proceso de control del estado de un cojinete, asegurando de esta manera que no se incluyan componentes de fallo de cojinetes en la corriente de estator. Por lo tanto, el primer juego de datos de corriente de estator comprende datos de corriente de línea base que contienen esencialmente datos puros de ruido que no incluyen información de fallos.
50

El primer conjunto de datos de corriente momentánea o datos de corriente de base, son recibidos por el procesador 34 y son implementados para configurar el filtro Wiener 36. De manera más específica, los datos de corriente de base son utilizados para asignar coeficientes en el filtro Wiener 36. El procesador 34 asigna coeficientes al filtro Wiener 36, de manera que el error de predicción $e(n)$ del filtro se hace mínimo en el sentido de los mínimos
55 cuadrados. Tal como se ha mostrado en la figura 3, los datos de corriente base se describen del modo siguiente:

$$x(n) = d_1(n) + d(n) + v_1(n) \quad [\text{Ecn. 1}],$$

siendo $d_1(n)$ la componente de ruido, $d(n)$ la señal de fallo, y $v_1(n)$ el ruido de medición. Tal como se ha indicado, los datos de corriente de base carecen de señal de fallo, y por esta razón, Ecn. 1 se reduce a $x(n) = d_1(n) + v_1(n)$.
60

En la configuración del filtro Wiener 36, el procesador 34 asigna los coeficientes del filtro utilizando el método del error de mínimos cuadrados (MMSE). En la implementación/aplicación del método MMSE, el procesador 34

soluciona para los coeficientes $w(k)$, $k=0, 1, \dots, p$, para hacer mínimo el error de predicción de mínimos cuadrados ξ , de acuerdo con:

$$\xi = E \left\{ e(n)^2 \right\} = E \left\{ \left| x(n) - \sum_{k=0}^p w(k)x(n-n_0-k) \right|^2 \right\} \quad [\text{Ecn. 2}],$$

5 en la que $E\{ \}$ es el valor esperado, n_0 es el retraso de la entrada $x(n)$, $w(k)$, $k = 0, 1, \dots, p$ son los coeficientes del filtro Wiener p y p es el orden del filtro.

10 Los coeficientes se hallan al hacer las derivadas parciales de ξ con respecto a $w(k)$ igual a cero, del modo siguiente:

$$\frac{\partial \xi}{\partial w(k)} = E \frac{\partial e^2(n)}{\partial w(k)} = E \left\{ 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w(k)} \right\} = 0; \quad k = 0, 1, \dots, p. \quad [\text{Ecn. 3}].$$

15 Sustituyendo:

$$\frac{\partial e(n)}{\partial w(k)} = -x(n-n_0-k) \quad [\text{Ecn. 3a}],$$

en la Ecn. 3, ello proporciona:

$$E \{ e(n)x(n-n_0-k) \} = 0; \quad k = 0, 1, \dots, p \quad [\text{Ecn. 4}],$$

20 que es conocido como el principio de ortogonalidad o el teorema de proyección. Sustituyendo la ecuación:

$$e(n) = x(n) - \sum_{j=0}^p w(j)x(n-n_0-j) \quad [\text{Ecn. 4a}]$$

25 en la Ecn. 4 resulta:

$$E \left\{ \left[x(n) - \sum_{j=0}^p w(j)x(n-n_0-j) \right] x(n-n_0-k) \right\} = 0; \quad k = 0, 1, \dots, p \quad [\text{Ecn. 5}]$$

30 o, de modo equivalente:

$$\sum_{j=0}^p w(j) E \{ x(n-n_0-j)x(n-n_0-k) \} = E \{ x(n)x(n-n_0-k) \}; \quad k = 0, 1, \dots, p \quad [\text{Ecn. 6}]$$

Suponiendo que la señal $x(n)$ es (WSS) estacionaria en sentido amplio, entonces:

$$E\{x(n-j)x(n-k)\} = r_x(k-j) \quad \text{[Ecn. 7]}$$

5 La Ecn. 6 queda, por lo tanto, simplificada a:

$$\sum_{j=0}^p w(j)r_x(k-j) = r_x(n_0+k); \quad k = 0,1,\dots,p \quad \text{[Ecn. 8]}$$

10 En forma matricial, la Ecn. 8 puede ser escrita del modo siguiente:

$$\begin{bmatrix} r_x(0) & r_x(1) & \dots & r_x(p) \\ r_x(1) & r_x(0) & \dots & r_x(p-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_x(p) & r_x(p-1) & \dots & r_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(0) \\ w(1) \\ \vdots \\ w(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x(n_0) \\ r_x(n_0+1) \\ \vdots \\ r_x(n_0+p) \end{bmatrix}, \quad \text{[Ecn. 9],}$$

o indicada del modo siguiente:

$$15 \quad \mathbf{R}_x \mathbf{w} = \mathbf{r}. \quad \text{[Ecn. 10].}$$

Las secuencias de correlación de la Ecn. 9 pueden ser estimadas por los promedios de tiempo cuando se implementa este método. Para registros de datos finitos (es decir, número finito de puntos de datos de corriente del estator $x(n)$, $0 \leq n \leq N-1$, las secuencias de autocorrelación pueden ser estimadas por:

$$20 \quad \hat{r}_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n-k) \quad \text{[Ecn. 11]}$$

La matriz R_x es una matriz simétrica de Toeplitz y se puede solucionar de manera eficiente por el algoritmo de Recursión de Levinson-Durbin.

25 Tal como se ha mostrado en la figura 3, la salida del filtro Wiener 36 es una predicción $g(n)$ de la corriente del estator, con la predicción del error $e(n)$ del filtro, definida como los datos de corriente de base medida, $x(n)$, menos la corriente de estator de predicción $g(n)$. Tal como se ha indicado anteriormente, los coeficientes del filtro Wiener 36 son asignados de manera que el error de predicción $e(n)$ se hace mínimo en el sentido de los cuadrados mínimos (es decir, $e(n) \approx 0$). De este modo, dado que los datos de corriente de base están compuestos esencialmente solo de un componente de ruido $d_1(n) + v_1(n)$, la corriente de estator de predicción $g(n)$ debe estar formada también esencialmente, solo de una componente de ruido, formando una componente de ruido de predicción $d_1^{\wedge}(n) + v_1^{\wedge}(n)$, que se puede utilizar en el control continuado en tiempo real del estado del cojinete para cancelación del ruido en datos de corriente de estator captados de manera repetida y para identificación de señales de fallos de cojinetes.

35 Tal como se ha indicado en lo anterior, al configurar el filtro Wiener 36 (es decir, ajustar los coeficientes del filtro Wiener) partiendo de las muestras previas de la corriente de estator (es decir, los datos de corriente de base), el procesador 34 puede detectar de manera precisa las situaciones de fallo en el sistema motor al estimar los componentes de ruido en la corriente de estator captada adicionalmente en tiempo real. Dado que los componentes de ruido dominante (senoidal) en la corriente de estator, esencialmente no cambian a carga

5 constante, ni en magnitud ni en frecuencia, pueden ser, por lo tanto, objeto de predicción en las muestras más recientes (es decir, en muestras en tiempo real) de la corriente de estator que está siendo controlada. Por lo tanto, en la operación de control del motor de inducción 12 (figura 1), se captan conjuntos adicionales de datos de corriente de estator por los sensores 22 y son recibidos por el procesador 34 para llevar a cabo en ellos una supresión de ruido de corriente de estator. Los conjuntos adicionales de datos de corriente de estator son definidos por:

$$x(n) = d_1(n) + d(n) + v_1(n), \quad [\text{Ecn. 11a}],$$

10 Siendo $d_1(n)$ la componente de ruido, $d(n)$ la señal de fallo, y $v_1(n)$ el ruido de medición, tal como se ha indicado en lo anterior en la Ecn. 1. Tal como se ha mostrado en la figura 4, en el control de datos de corriente a partir del motor inductor, la corriente de estator se hace pasar por el retraso de entrada 30, que proporciona un retraso z de n_0 muestras, y a través del filtro Wiener 36, para suprimir las componentes de ruido estimadas $\hat{d}_1(n) + \hat{v}_1(n)$ de las mismas y producir una corriente de estator con supresión de ruido. De la figura 4 se puede apreciar que, si el filtro Wiener 36 tiene un buen rendimiento (es decir, $\hat{d}_1(n) + \hat{v}_1(n)$ es próximo a $d_1(n) + v_1(n)$), la parte restante, $y(n)$, de la corriente de estator después de supresión de ruido (es decir, datos de corriente residual) será la señal de fallo $d(n)$. Es decir, cuando se desarrolla un fallo de cojinete, el filtro Wiener 36 efectúa la predicción y cancela solamente las componentes de ruido en la corriente de estator y mantiene cualesquiera datos de corriente residual restantes intactos durante el proceso de supresión del ruido, del que se identifican los componentes de fallo $d(n)$.
 15 Se observará que los componentes de fallo $d(n)$ están formados por una serie de características de fallo procedentes de un espectro de frecuencias de fallo. Es decir, una serie de frecuencias de fallo que tienen una serie de amplitudes de fallo, comprenden los componentes de fallo, y el efecto colectivo de estas frecuencias y amplitudes, está comprendida en los componentes de fallo aislados para facilitar la detección del fallo. Dado que las frecuencias de la señal de fallo y las magnitudes de las componentes de fallo son pequeñas en caso de fallos de cojinetes de tipo generalizado, la suma de estos factores en la componente $d(n)$ de fallo colectivo, permite una intensidad incrementada de la señal de fallo y mejora de la detección del fallo de los cojinetes.
 20
 25

A partir de las componentes de fallo restantes en la corriente de estator con supresión de ruido, se determina un índice de fallo (es decir, indicador de fallo) por el procesador 34. En una realización a título de ejemplo, el índice de fallos calculado como la raíz cuadrada mínima (RMS) de la corriente de estator con supresión de ruido. Tomando el valor RMS de los componentes de fallo aislados, proporciona una señal de fallo más grande que se puede controlar, permitiendo el reconocimiento mejorado de fallos de componentes. El procesador 34 es programado además, para analizar el índice de fallo para determinar si el índice de fallo supera un cierto umbral. Si el índice de fallo supera el umbral, entonces, el procesador 34 genera un aviso (es decir, un aviso audible o visual) para informar al operario que una componente de fallo de la corriente del estator ha superado una magnitud deseada. Entonces, el operador puede interrumpir el funcionamiento del motor en el momento conveniente para evaluar adicionalmente los cojinetes. De manera alternativa, o de forma adicional a ello, la información de fallo y su gravedad pueden ser comunicados también a un sistema de control centralizado (no mostrado), tal como un Sistema de Gestión de Mantenimiento por Ordenador (CMMS) o sistema de control distribuido (DCS).
 30
 35
 40

En una realización a título de ejemplo de la invención se aplica una técnica de Control de Proceso Estadístico (SPC) para analizar una serie de índices de fallo y ajustar un "umbral" basado en ellos. Con respecto al análisis de las componentes de fallo presentes en la corriente de estator para detectar fallos de cojinetes de tipo generalizado, es difícil relacionar estas componentes de fallo de la corriente del estator con la gravedad de los fallos de los cojinetes. Es decir, la falta de ecuaciones adecuadas para describir características de fallos en la corriente de estator inyectada por fallos generalizados de cojinetes y lo reducido de las características de fallo de cojinetes en la corriente de estator hace difícil predefinir niveles de gravedad de fallos. Por esta razón se aplica una técnica SPC para establecer un umbral de aviso basado en las estadísticas de la señal de fallo en el proceso de control de corriente específica en vez de predeterminar un umbral universal predefinido para todas las aplicaciones. La técnica SPC distingue cambios anormales en la corriente de estator con supresión de ruido (e índices de fallos resultantes) que son provocados por un fallo de cojinetes, con respecto a cambios ambientales.
 45
 50

Haciendo referencia a la figura 5, se ha mostrado la aplicación de la técnica SPC a los índices de fallos generados obtenidos a través de la supresión del ruido de la corriente del estator. Cada índice de fallo es representado en un gráfico X 35, mostrando los valores individuales 37 del índice de fallo, y un gráfico mR 38 (es decir, "escala móvil") para controlar diferencias 39 entre los valores de los índices de fallo. Las mediciones individuales 37 son representadas sobre el gráfico X 35, y las diferencias 39 (es decir, escala móvil) son representadas sobre el gráfico mR 38. Basándose en los valores representados, se determinan valores de control límite superior e inferior 41, 43 a partir del gráfico X , y un límite de control 45 se determina para el gráfico mR . Para la detección de fallos de cojinetes, dado que el SPC es aplicado a corrientes de estator con supresión de ruidos, un índice de fallo que quede por debajo de un límite de control más bajo indica un mejor estado de los cojinetes y, por lo tanto, no es objeto de preocupación. En estas condiciones, el límite de control superior 41 del gráfico X 35 y/o el límite de control superior 45 del gráfico mR 38 comprende el límite de control relevante (es decir, el umbral aviso de índice
 55
 60

de fallo) para determinar que se ha superado un umbral. En una realización, los límites de control superiores 41, 45 pueden ser ajustados a tres desviaciones estándar a partir del valor de índice de fallo medio 47 y en tres desviaciones estándar con respecto al valor de diferencia medio entre índices de fallo captados de forma adyacente 49, respectivamente.

Después del cálculo de los límites de control 41, 45 mediante la técnica SPC, los índices de fallo son analizados con respecto a estos límites de control. La detección de la variación incontrolada en los índices de fallo es indicativa de un estado de cojinetes deteriorados. Es decir, si los índices de fallo analizados empiezan a superar frecuentemente los índices de control 41, 45, esta variación indica un estado de cojinetes deteriorados (es decir, fallo de cojinetes incipiente). Por lo tanto, al determinar si existe un estado de cojinetes deteriorado que necesita generación de un aviso o alerta, se examina el porcentaje de índice de fallo que supera el límite de control superior 41, 45. Si este porcentaje supera un porcentaje predeterminado, entonces se determina que existe un estado de deterioro de cojinetes y se genera un aviso. Por ejemplo, si el porcentaje de índices de fallo que queda fuera (es decir, que supera), los límites de control 41, 45 se encuentran por encima del 10%, entonces se genera un aviso. De esta manera se utiliza una técnica SPC para controlar los índices de fallo obtenidos en tiempo real y analizar los valores de índice de fallo para determinar si se ha sobrepasado un "umbral", permitiendo, por lo tanto, la determinación de que existe una situación de cojinetes deteriorados o de fallo de cojinete.

Haciendo referencia a continuación a la figura 6, en otra realización de la invención, la información de fallo $d(n)$ en la corriente de estator aislada por la técnica de supresión de ruido del ordenador 40 se puede considerar como el error de predicción $e(n)$ de un filtro de predicción de error (PEF) 42. Es decir, cuando se desarrolla un fallo de cojinetes y la situación del sistema varía, el error de predicción aumenta. Tal como se ha mostrado en la figura 6, si el sistema/técnica de supresión de ruido es considerado como un PEF 42, entonces, el comportamiento del sistema puede ser medido por la predicción de error del filtro. Es decir, para tener un buen comportamiento, el error de predicción debe ser significativamente más grande para un estado de fallo de cojinetes que para un estado de cojinetes en buenas condiciones. Como consecuencia, el error de predicción mostrado en la figura 6 se hace más grande cuando el sistema entra en un estado de fallo de cojinetes desde un estado de cojinetes en buen estado.

En el examen del PEF 42 para evaluar un error de predicción, se puede indicar una ecuación general que describe el error de predicción, junto con ecuaciones específicas para el rendimiento del filtro para una situación de cojinetes en buen estado y para el comportamiento del filtro una situación de fallo de cojinetes. Por definición, una ecuación general para el error de predicción de cuadrados mínimos del filtro es la siguiente:

$$\xi = E \left\{ \left| x(n) - \sum_{k=0}^p w(k)x(n - n_0 - k) \right|^2 \right\} \quad \text{[Ecn. 12]}$$

Este es el mismo error que en la ecuación 2, que se hizo mínimo para encontrar los coeficientes del filtro Wiener. Después de su desarrollo, la ecuación anterior puede ser descrita nuevamente de la forma siguiente:

$$\xi = \left[r_x(0) - \sum_{k=0}^p w(k)r_x(n_0 + k) \right] + \sum_{k=0}^p w(k) \left[\sum_{j=0}^p w(j)r_x(k-j) - r_x(n_0 + k) \right] \quad \text{[Ecn. 13]}$$

Dado que el PEF 42 está diseñado para minimizar el error en la ecuación 12 utilizando datos de cojinetes en buen estado, este error de predicción es pequeño para una situación de cojinetes en buen estado. En realidad, para una situación de cojinetes en buen estado, dado que $w(k)$, $k=0, 1, \dots, p$, son soluciones de la ecuación 8, el segundo término de la parte de la derecha de la ecuación 13 es cero. Por lo tanto, el error de predicción para una situación de cojinetes en buen estado es:

$$\xi_{\min} = r_x(0) - \sum_{k=0}^p w(k)r_x(n_0 + k) \quad \text{[Ecn. 14]}$$

En esta situación, dado que $x(h)=d_1(h)+v_1(h)$, por lo tanto, se deduce:

$$\begin{aligned}
 r_x(k) &= E\{x(n)x(n+k)\} = E\{[d_1(n) + v_1(n)][d_1(n+k) + v_1(n+k)]\} \\
 &= E\{d_1(n)d_1(n+k)\} + E\{d_1(n)v_1(n+k)\} + E\{v_1(n)d_1(n+k)\} + E\{v_1(n)v_1(n+k)\}
 \end{aligned}$$

[Ecn. 15]

Dado que $d_1(n)$ y $v_1(n)$ son conjuntamente estacionarias en sentido amplio (WSS), la ecuación 15 resulta:

5

$$r_x(k) = r_{d_1}(k) + 2r_{d_1v_1}(k) + r_{v_1}(k)$$

[Ecn. 16]

Dado que la medición de ruido $v_1(n)$ es al azar, el espectro de potencia está distribuido sobre un rango amplio de frecuencia, su autocorrelación entre el tipo de impulsos y sus correlaciones cruzadas con otras señales son cero, (es decir, las secuencias de autocorrelación de una señal son la inversa de la transformada de Fourier de su espectro de potencia por definición). Por lo tanto, resulta de la ecuación 16 que:

10

$$r_x(0) = r_{d_1}(0) + r_{v_1}(0), \quad r_x(k) = r_{d_1}(k), k \neq 0.$$

[Ecn. 17]

15 Sustituyendo la ecuación 17 en la ecuación 14 se obtiene:

$$\xi_{\min} = r_{d_1}(0) + r_{v_1}(0) - \sum_{k=0}^p w(k)r_{d_1}(n_0 + k)$$

[Ecn. 18]

20 Para investigar adicionalmente el comportamiento del sistema, las componentes de ruido (incluyendo la fundamental y las armónicas, las armónicas de excentricidad, las armónicas de ranura, etc.) se describe del modo siguiente:

$$d_1(n) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(\omega_m n + \varphi_m),$$

[Ecn. 19]

25 en la que $A_m, \omega_m, \varphi_m, m=1, \dots, M$, son las amplitudes, las frecuencias y los ángulos de las componentes de ruido M en la corriente del estator. Para calcular las secuencias de autocorrelación de la señal $d_1(n)$, se define la siguiente relación:

$$r_{d_1}(k) = E\{d_1(n)d_1(n+k)\} = E\left\{\left[\sum_{m=1}^M A_m \sin(\omega_m n + \varphi_m)\right] \left[\sum_{j=1}^M A_j \sin[\omega_j(n+k) + \varphi_j]\right]\right\}$$

$$= E\left\{\sum_{m=1}^M A_m^2 \sin(\omega_m n + \varphi_m) \sin[\omega_m(n+k) + \varphi_m]\right\} + E\left\{\sum_{m=1}^M A_m \sum_{j=1, j \neq m}^M A_j \sin(\omega_m n + \varphi_m) \sin[\omega_j(n+k) + \varphi_j]\right\}$$

[Ecn. 20]

La ecuación 20 es reducida, a continuación, reconociendo las siguientes relaciones

$$E\left\{\sum_{m=1}^M A_m^2 \sin(\omega_m n + \varphi_m) \sin[\omega_m(n+k) + \varphi_m]\right\}$$

$$= \sum_{m=1}^M \frac{A_m^2}{2} E\{\cos(\omega_m k) - \cos(2\omega_m n + \omega_m k + 2\varphi_m)\} = \sum_{m=1}^M \frac{A_m^2}{2} \cos(\omega_m k)$$

[Ecn. 21]

5

y

$$E\left\{\sum_{m=1}^M A_m \sum_{j=1, j \neq m}^M A_j \sin(\omega_m n + \varphi_m) \sin[\omega_j(n+k) + \varphi_j]\right\}$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M A_m \sum_{j=1, j \neq m}^M A_j \left\{E\{\cos[(\omega_j - \omega_m)n + \omega_j k + (\varphi_j - \varphi_m)]\} - E\{\cos[(\omega_j + \omega_m)n + \omega_j k + (\varphi_j + \varphi_m)]\}\right\} = 0$$

[Ecn. 22]

10

Por lo tanto, las secuencias de autocorrelación de la señal $d_1(n)$ son:

$$r_{d_1}(k) = \sum_{m=1}^M \frac{A_m^2}{2} \cos(\omega_m k)$$

[Ecn. 23]

15 Sustituyendo la ecuación 23 en la ecuación 18, facilita el error de predicción del filtro 42 para una situación de cojinetes en buen estado del modo siguiente:

$$\xi_{\min} = \sum_{m=1}^M \frac{A_m^2}{2} \left\{1 - \sum_{k=0}^p w(k) \cos[\omega_m(n_0 + k)]\right\} + r_{v_1}(0)$$

[Ecn. 24]

20 De modo similar, para una situación de cojinetes en fallo, el error de predicción de mínimos cuadrados puede ser calculado a partir de la ecuación 13. Para mayor comodidad se repite la ecuación 13 de la forma siguiente:

$$\xi = \left[r_x(0) - \sum_{k=0}^p w(k)r_x(n_0 + k) \right] + \sum_{k=0}^p w(k) \left[\sum_{j=0}^p w(j)r_x(k-j) - r_x(n_0 + k) \right] \quad [\text{Ecn. 25}]$$

5 No obstante, a diferencia de la situación de buen estado de los cojinetes, el segundo término del lado de la derecha de la ecuación 25 para una situación de fallo de cojinetes no es cero debido a la presencia de la señal de fallo en la corriente del estator, que es $x(n)=d_1(n)+d(n)+v_1(n)$. Se deduce que:

$$r_x(k) = E\{x(n)x(n+k)\} = E\{[d_1(n) + d(n) + v_1(n)][d_1(n+k) + d(n+k) + v_1(n+k)]\} \quad [\text{Ecn. 26}]$$

10 Suponiendo que $d_1(n)$, $d(n)$ y $v_1(n)$ son conjuntamente WSS, entonces la ecuación 26 resulta:

$$r_x(k) = r_{d_1}(k) + r_d(k) + r_{v_1}(k) + 2r_{d_1v_1}(k) + 2r_{d_1d}(k) + 2r_{dv_1}(k) \quad [\text{Ecn. 27}]$$

15 Para la situación de cojinetes en buen estado se supone que el ruido de medición $v_1(n)$, es una señal de banda amplia y no correlacionada con $d_1(n)$ y $d(n)$, se deduce entonces que:

$$r_x(0) = r_{d_1}(0) + r_d(0) + r_{v_1}(0) + 2r_{d_1d}(0) \quad [\text{Ecn. 28}]$$

y que:

$$r_x(k) = r_{d_1}(k) + r_d(k) + 2r_{d_1d}(k), k \neq 0 \quad [\text{Ecn. 29}]$$

20 Si las componentes de ruido se describen en la siguiente forma:

$$d_1(n) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(\omega_m n + \varphi_m) \quad [\text{Ecn. 29a}]$$

25 tal como se ha indicado en la ecuación 19, entonces los componentes en fallo se pueden describir como:

$$d(n) = \sum_{q=1}^Q B_q \sin(\omega_q n + \varphi_q) \quad [\text{Ecn. 30}]$$

30 en la que A_q , ω_q , φ_q , $q=1, \dots, Q$, son las amplitudes, las frecuencias y los ángulos de las componentes de fallo Q en la corriente de estator inyectada por un fallo de cojinetes. Las secuencias de autocorrelación de $d(n)$ se pueden calcular, por lo tanto, según las ecuaciones 20 a 23, con el siguiente resultado:

$$r_d(k) = \sum_{q=1}^Q \frac{B_q^2}{2} \cos(\omega_q k) \quad [\text{Ecn. 31}]$$

Para $\omega_q \neq \omega_m$, $q=1, 2, \dots, Q$, $m = 1, 2, \dots, M$, siguiendo las mismas etapas que en las ecuaciones 20 a 23, la secuencia de correlación cruzada entre las componentes de ruido y las componentes de fallo resultan:

$$r_{d_1d}(k) = 0, k : \text{entero} \quad [\text{Ecn. 32}]$$

De este modo, combinando las ecuaciones 25 a 32, el error de predicción para una situación de cojinetes en fallo se puede obtener del modo siguiente:

$$\xi = \xi_{\min} + \sum_{q=1}^Q \frac{B_q^2}{2} \left\{ 1 - \sum_{k=0}^p w(k) \cos[\omega_q(n_0 + k)] \right\} + \sum_{q=1}^Q \frac{B_q^2}{2} \left\{ \sum_{k=0}^p w(k) \left[\sum_{j=0}^p w(j) \cos(\omega_q(k-j)) - \cos(\omega_q(n_0 + k)) \right] \right\}$$

[Ecn. 33]

en la que ξ_{\min} es el error de predicción para una situación de cojinetes en buen estado expresada en la ecuación 24.

De manera ventajosa, se observará que el método de supresión de ruido indicado anteriormente considera un efecto colectivo de los componentes en fallo para facilitar la detección del fallo. Es decir, dado que las frecuencias de la señal de fallo ω_q 's y las magnitudes de los componentes de fallo B_q 's son pequeñas para fallos generalizados de cojinetes, la suma de estos factores en este componente de fallo combinado $d(n)$, junto con el ángulo de contacto φ_q del cojinete, permite una mayor intensidad de la señal de fallo y una mejor detección del fallo de los cojinetes. Se observará además que si la señal de fallo $d(n)$ es una señal de banda ancha, entonces tiene el mismo efecto que el ruido de medición en banda ancha $v_1(n)$, y dado que la potencia de la señal en banda ancha persiste en el error de predicción (tanto para un estado satisfactorio de los cojinetes como para un estado de cojinetes en fallo), la presencia de la señal de fallo tiene como resultado un aumento del error de predicción.

De manera adicional, aunque $\omega_q = \omega_m$ y que existe un incremento menor en el error de predicción, (dado que el tercer término del lado de la derecha de la ecuación 33 es cero, mientras que el segundo término no es cero), la información de fallo se conserva todavía en el error de predicción resultante. Es decir, aunque los componentes del fallo y los componentes de ruido tienen frecuencias comunes, tal como en el caso en el que el fallo de los cojinetes aumentan la excentricidad dinámica del motor, la información de fallo se conserva todavía en el error de predicción resultante. Las características anteriores, proporcionan, por lo tanto, una técnica de detección mejorada basada en la corriente, para detectar fallos de cojinetes de tipo generalizado.

Haciendo referencia a continuación a la figura 7, se ha mostrado un diagrama de flujo que muestra una técnica basada en la corriente para detectar fallos generalizados de cojinetes. La técnica empieza en la captación y recepción de un primer conjunto de datos de corriente del estator $x(n)$ de una máquina eléctrica, tal como un motor de inducción trifásico, para producir datos de corriente base 48. El primer conjunto de datos de corriente del estator que son captados/recibidos está formado por datos de corriente de estator asociados a una situación de cojinetes en buen estado, que se sabe que carece de cualquier señal de fallo de cojinetes.

De los datos de corriente de base, se configura un filtro de datos de corriente (es decir, sistema de supresión de ruido) para conseguir en la supresión de ruido de la corriente del estator, a efectos de aislar cualquier componente de fallo presente en la misma. En una realización a título de ejemplo, el filtro de datos de corriente es un filtro Wiener que está diseñado para suprimir la componente de ruido de la corriente de estator basándose en el filtrado de los datos de corriente de estator recibidos por una estimación de la componente de ruido en la corriente del estator. Para conseguir una supresión de ruido exacta en la corriente del estator, el filtro Wiener está configurado de manera que puede estimar de manera precisa la mayor parte de componentes de ruido en la corriente del estator y de manera tal que la señal de fallo en la corriente del estator no está incluida en su salida. En la configuración del filtro Wiener, los datos de corriente de base son utilizados para asignar los coeficientes en el filtro Wiener, de manera que no está incorporado en los coeficientes información de fallos de cojinetes. El filtro Wiener está diseñado de manera que el error de predicción del mismo es minimizado en el sentido de los cuadrados

mínimos, es decir, los coeficientes son asignados utilizando el método de la media de errores de cuadrados mínimos (MMSE). Al configurar el filtro Wiener basándose en los datos de corriente base (es decir, datos puros de corriente de ruido) esto significa que la salida del filtro Wiener es una componente de ruido de predicción $g(n)$ de la corriente del estator que es esencialmente igual a los datos de corriente base, de manera que el error de predicción se hace mínimo, es decir $e(n) = x(n) - g(n)$.

Después de configurar el filtro Wiener, la técnica continua captando y recibiendo, como mínimo, un conjunto de datos de corriente 52 del estator. Los datos adicionales de corriente del estator son captados/recibidos después de un periodo de utilización de la máquina eléctrica y son controlados para detectar señales de fallos de cojinetes presentes en la corriente del estator. Los conjuntos adicionales de datos de corriente del estator son pasados al filtro de datos 54 de la corriente para llevar a cabo en los mismos una supresión de componentes de ruido. La componente de ruido estimada proporcionada por el filtro de datos de corriente es suprimida de la corriente de estator 56 para aislar cualquier componente de fallo presente en la corriente de estator, es decir, dado que las componentes de ruido (senoidal) en la corriente de estator esencialmente no cambian a cargas constantes, ni en magnitud ni en frecuencia, la componente de ruido de predicción salida del filtro de datos de corriente (y basada en los datos de corriente de base) puede ser suprimida de las muestras más recientes de la corriente de estator (es decir, la corriente de estator captada adicionalmente) para determinar con exactitud un componente de fallo en la corriente de estator. Suponiendo que el filtro de datos de corriente estaba configurado de manera apropiada y tiene un buen rendimiento, la parte restante de la corriente de estator después de la supresión de ruidos representará de manera exacta la señal de fallo $d(h)$.

A partir de la componente de fallo restante de la corriente de estator con supresión de ruido, se determina un índice de fallo (es decir, indicador de fallo) 58. En una realización a título de ejemplo, el indicador de fallo es calculado como valor RMS de la corriente de estator con supresión de ruido. Tomando el valor RMS de la componente de fallo aislada, se consigue una señal más grande que puede ser controlada, permitiendo un reconocimiento mejorado de fallos de cojinetes. Después del cálculo, el índice de fallo es comparado a índices de fallo calculados de manera adicional para generar un umbral de índice de fallos 59 y determinar si el indicador de fallos supera dicho umbral de índice de fallos 60. Si el indicador de fallos no supera dicho umbral 62 de índice de fallos, entonces la técnica sigue continuando en la recepción y control de datos adicionales de corriente de estator 64. No obstante, si el indicador de fallo supera el umbral de índice de fallo 66, entonces se genera un aviso 68 tal como un aviso audible o visual, para informar al operador que una componente de fallo de la corriente de estator ha superado la magnitud deseada. El operador puede entonces interrumpir el funcionamiento de la máquina eléctrica para examinar adicionalmente si existen fallos en los cojinetes.

En una realización a título de ejemplo de la técnica 46, el umbral del índice de fallo es determinado en 59 mediante una técnica de Control de Proceso Estadístico (SPC). El umbral de índice de fallo (es decir, límite de control) es determinado para un gráfico X y un gráfico mR (rango móvil). Cuando tiene lugar el cálculo de los umbrales de índice de fallo mediante la técnica SPC, los índices de fallo son analizados con respecto a estos umbrales 60. Si una cantidad o porcentaje predeterminados de los índices de fallo quedan fuera de los umbrales de índice de fallo 66, se determina que existe una situación de cojinetes deteriorados y se genera un aviso 68. Por ejemplo, si el porcentaje de índices de fallo que queda fuera de los límites de control es superior a 10%, entonces se puede generar un aviso. Por lo tanto, se utiliza una técnica SPC para controlar los índices de fallo obtenidos en tiempo real y analizar los valores del índice de fallo para determinar si se ha superado un "umbral", permitiendo de este modo la determinación de que existe una situación de cojinetes deteriorados o fallo de cojinetes.

De acuerdo con realizaciones de la invención, el procedimiento de supresión de ruido indicado anteriormente es capaz de aislar componentes de fallo en la corriente de estator para detectar fallos incipientes de los cojinetes sin necesidad de determinar parámetros de la máquina, dimensiones de los cojinetes, valores nominales o distribuciones de espectro de corriente de estator. El análisis de la corriente de estator con supresión de ruido (y los índices de fallo generados a partir del mismo) mediante la utilización de técnica SPC elimina la necesidad de conocer dichos parámetros de máquina, dimensiones de cojinetes, valores nominales o distribución del espectro de corriente del estator. Es decir, dado que el procedimiento de supresión de ruido determina límites de control y umbrales de aviso de índice de fallo mediante una técnica SPC basada en valores de índice de fallo captados en vez de hacerlo en un conjunto de ecuaciones predefinidas que describen características de fallo en la corriente de estator, esta información no es necesaria para el análisis de componentes de fallo en la corriente de estator. Dado que la determinación/captación de parámetros de máquina, dimensiones y cojinetes, valores nominales o distribuciones de espectro de corriente de estator pueden ser difíciles y requieren mucho tiempo, el que no exista la necesidad de dicha información en las realizaciones del sistema y método de la invención tiene como resultado una detección de fallos de cojinetes más eficaz basada en la corriente.

Una contribución técnica para el procedimiento y aparato que se dan a conocer es que proporciona una técnica implementada por ordenador para detectar fallos mecánicos de motor inminentes por la supresión de ruido de la corriente. Los datos de la corriente son descompuestos en una componente sin fallo (es decir, ruido) y una componente de fallo y se lleva a cabo la supresión de ruido para aislar la componente de fallo de la corriente y generar un índice de fallo.

5 Por lo tanto, de acuerdo con una realización de la presente invención, un controlador configurado para detectar indicios de fallos mecánicos incipientes de motor incluye un procesador programado para recibir un conjunto de datos de corriente del motor durante el funcionamiento normal conocido, definir un ruido de base basado en el conjunto de datos de corriente captados del motor, que se sabe que funciona normalmente y recibir repetidamente datos de corriente de funcionamiento en tiempo real del motor que está en funcionamiento. El procesador es programado además para eliminar el ruido de base de los datos de corriente de funcionamiento para identificar cualesquiera componentes de fallo presentes en los datos de corriente de funcionamiento y generar un índice de fallo para los datos de corriente de funcionamiento basándose en cualesquiera componentes de fallo aislados.

10 De acuerdo con otra realización de la presente invención, un procedimiento no invasivo para detectar fallos inminentes de cojinetes en máquinas eléctricas incluye las etapas de captar una serie de conjuntos de datos de corriente de estator de la máquina eléctrica durante el funcionamiento, aplicando cada uno de los conjuntos de datos de corriente de estator a un filtro de datos de corriente en tiempo real para generar una corriente de estator con supresión de ruido y determinar un índice de fallo a partir de la corriente de estator con supresión de ruido para cada uno de los conjuntos de datos de corriente de estator. El procedimiento comprende también las etapas de control de un valor del índice de fallo para la serie de conjuntos de datos de corriente de estator y generar un aviso si el valor de un número predeterminado de índices de fallo supera un límite de control.

20 De acuerdo con otra realización de la presente invención, un sistema de control de la corriente para la predicción de fallos de cojinetes incluye, como mínimo, un sensor de corriente no invasivo, configurado para captar datos de corriente de estator de un motor en funcionamiento y un procesador conectado para recibir los datos de corriente de estator desde el, como mínimo, un sensor de corriente no invasivo. El procesador es programado para recibir un primer conjunto de datos de corriente de estator desde el, como mínimo, un sensor de corriente, comprendiendo el primer conjunto de datos de corriente de estator datos de corriente base representativos de funcionamiento normal del motor. El procesador está también programado para recibir una componente sin fallo a partir de los datos de corriente base, recibir repetidamente datos de corriente de funcionamiento en tiempo real del motor en funcionamiento y eliminar la componente sin fallo de los datos de corriente de funcionamiento en tiempo real para aislar datos de corriente residual. El procesador está programado además para procesar los datos de corriente residual para identificar posibles fallos de cojinetes; generar un índice de fallo para cualesquiera fallos de cojinetes identificados y generar un aviso si el índice de fallo supera un umbral de índice de fallo.

30 La presente invención ha sido descrita en términos de una realización preferente y se admite que los equivalentes, alternativas y modificaciones, a parte de los que se han citado de manera expresa, son posibles y se encuentran dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

35

REIVINDICACIONES

1. Sistema (10) para el control de corriente para la predicción de fallos de cojinetes que comprende:
 5 como mínimo, un sensor de corriente no invasivo (22), configurado para captar datos de corriente de estator de un motor en funcionamiento (12); y
 un procesador (18) conectado para recibir los datos de corriente de estator del, como mínimo, un sensor de corriente no invasivo (22), estando el procesador (18) programado para :
 10 recibir un primer conjunto de datos de corriente de estator desde el, como mínimo, un sensor de corriente (22), comprendiendo el primer conjunto de datos de corriente de estator datos de corriente base representativos de funcionamiento normal del motor;
 definir una componente sin fallo de los datos de corriente base;
 recibir repetidamente datos de corriente de funcionamiento en tiempo real del motor en funcionamiento (12);
 15 eliminar la componente sin fallo de los datos de corriente de funcionamiento en tiempo real para aislar datos de corriente residual;
 procesar los datos de corriente residual para identificar posibles fallos de cojinetes;
 generar un índice de fallo para cualesquiera fallos de cojinetes identificados; y
 generar un aviso si el índice de fallo supera un umbral de índice de fallo.
- 20 2. Sistema (10) para el control de corriente, según la reivindicación 1, en el que el procesador (18) está programado además para:
 analizar una serie de índices de fallo generados; y
 aplicar una técnica de control de proceso estadístico a la serie de índices de fallo para determinar el umbral del índice de fallo.
- 25 3. Sistema (10) para el control de corriente, según la reivindicación 1, en el que el procesador (18) está programado además para configurar un filtro Wiener (36) basado en los datos de corriente de base, estando configurado el filtro Wiener (36) para definir la componente sin fallo a partir de los datos de corriente de base.
- 30 4. Sistema (10) para el control de corriente, según la reivindicación 1, en el que el procesador (18) está programado además para calcular el valor de la raíz de los mínimos cuadrados de los datos de corriente residual para determinar el índice de fallo.
- 35 5. Sistema (10) para el control de corriente, según la reivindicación 1, en el que el procesador (18) está programado además para detectar fallos generalizados de cojinetes a partir del índice de fallos.
6. Procedimiento no invasivo de detección de fallos inminentes de cojinetes en máquinas eléctricas que comprende:
 40 captación de una serie de conjuntos de datos de corriente de estator de la máquina eléctrica (12) durante el funcionamiento;
 captación de datos de corriente de estator de base antes de la captación de la serie de conjuntos de datos de corriente de estator, los datos de corriente de estator de base captados de la máquina eléctrica (12) en condiciones de funcionamiento normal;
 definir una componente sin fallo a partir de los datos de corriente de base;
 45 recibir repetidamente datos de corriente en funcionamiento en tiempo real del motor en funcionamiento (12);
 eliminar la componente sin fallo de los datos de corriente en funcionamiento en tiempo real para aislar datos de corriente residual;
 procesar los datos de corriente residual para identificar posibles fallos de cojinetes; generar un índice de fallos para cualesquiera datos de cojinete identificados; y
 50 generar un aviso si el índice de fallo supera un umbral de índice de fallo.
7. Procedimiento, según la reivindicación 6, que comprende además:
 analizar una serie de índices de fallo generados; y
 55 aplicar una técnica de control de proceso estadístico a la serie de índices de fallo para determinar el umbral de índice de fallo.
8. Procedimiento, según la reivindicación 6, que comprende además:
 configurar un filtro Wiener (36) basado en los datos de corriente de base, cuyo filtro Wiener (36) está configurado para definir el componente sin fallo a partir de los datos de corriente de base.
- 60 9. Procedimiento, según la reivindicación 6, que comprende además:
 calcular el valor de la raíz de los cuadrados mínimos de los datos de corriente residual para determinar el índice de fallo.
- 65 10. Procedimiento, según la reivindicación 6, que comprende además:
 detectar fallos de cojinetes generalizados a partir del índice de fallo.

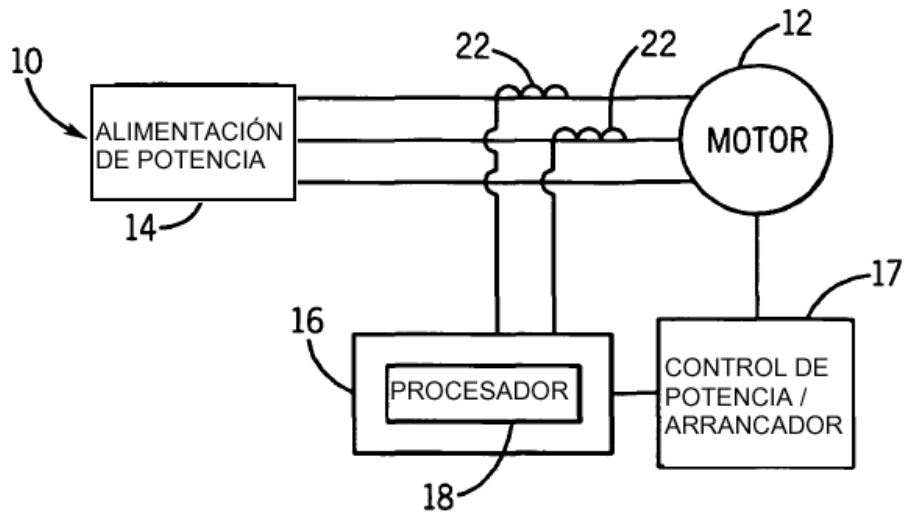


FIG. 1

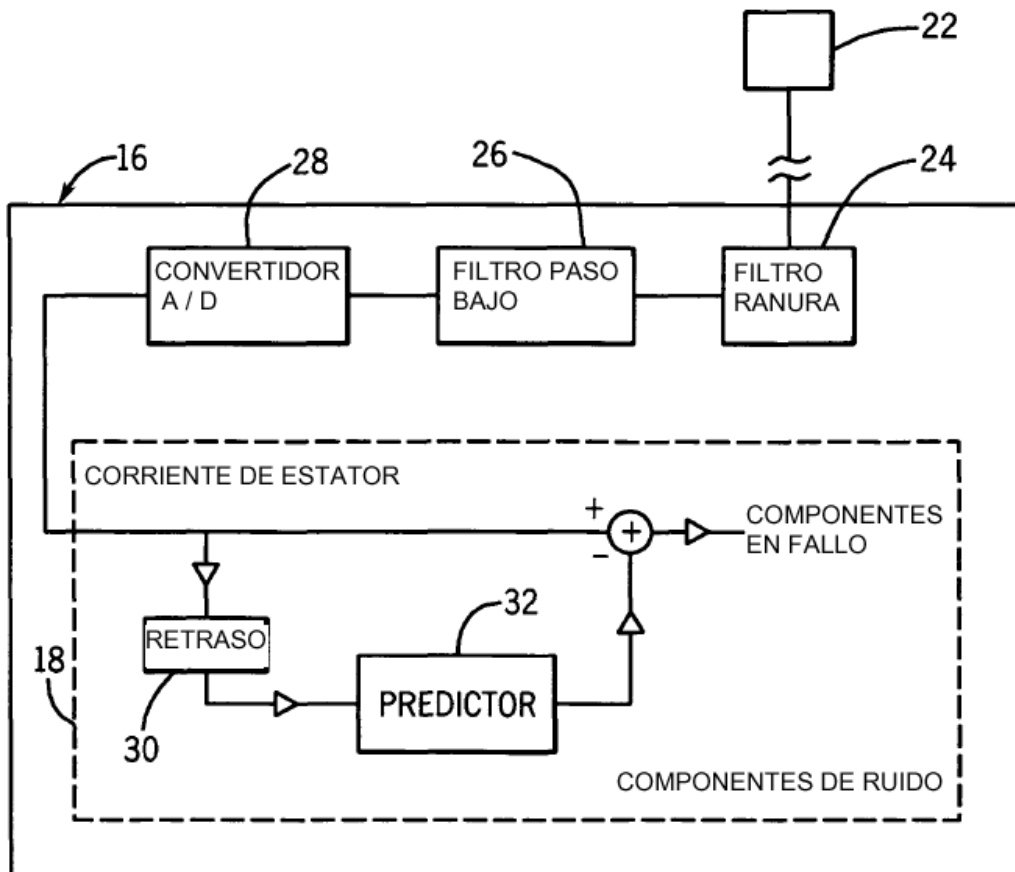


FIG. 2

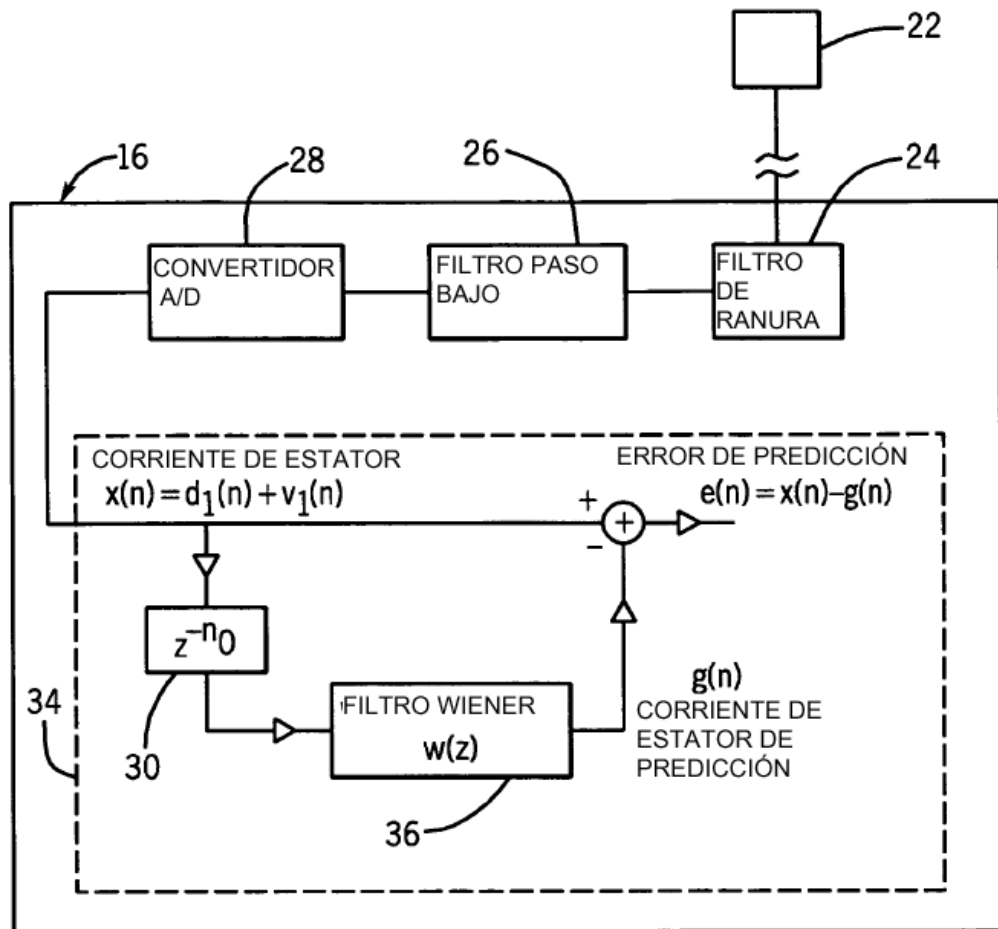


FIG. 3

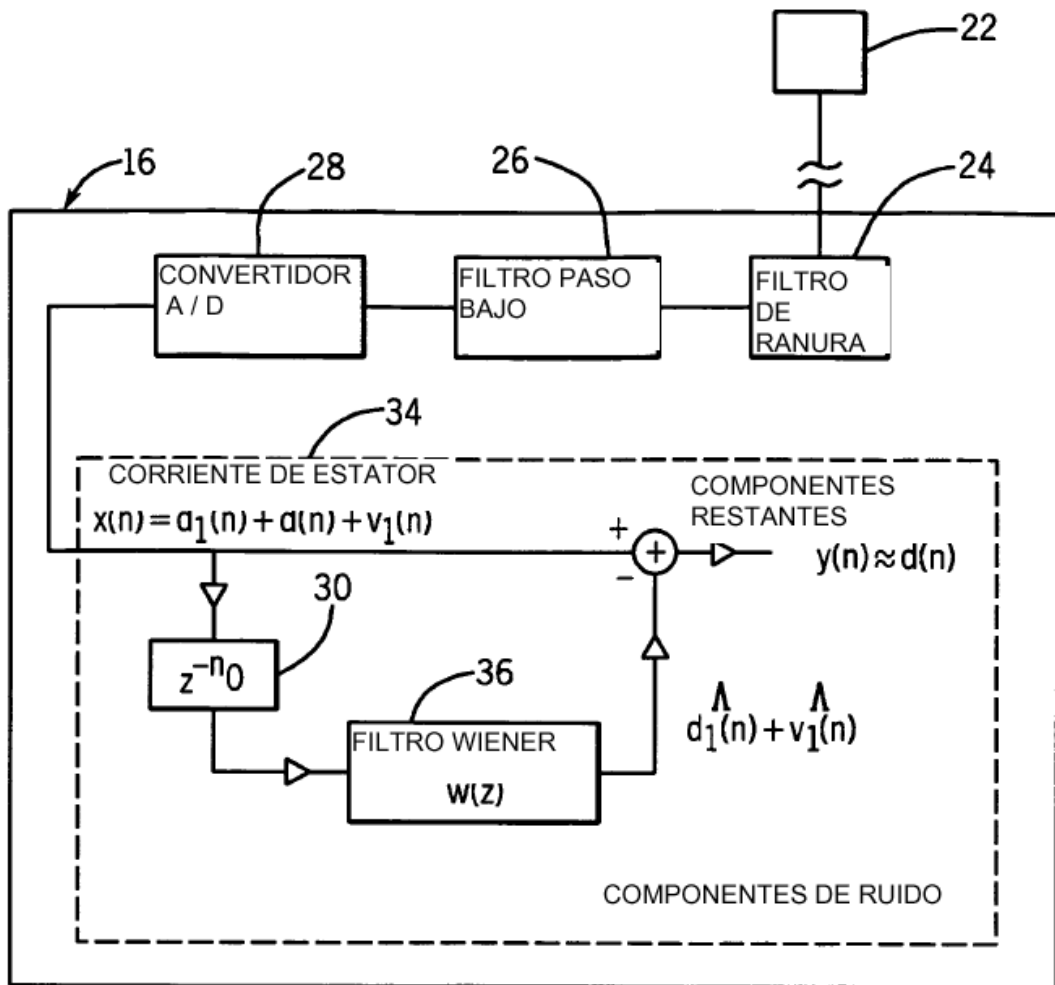


FIG. 4

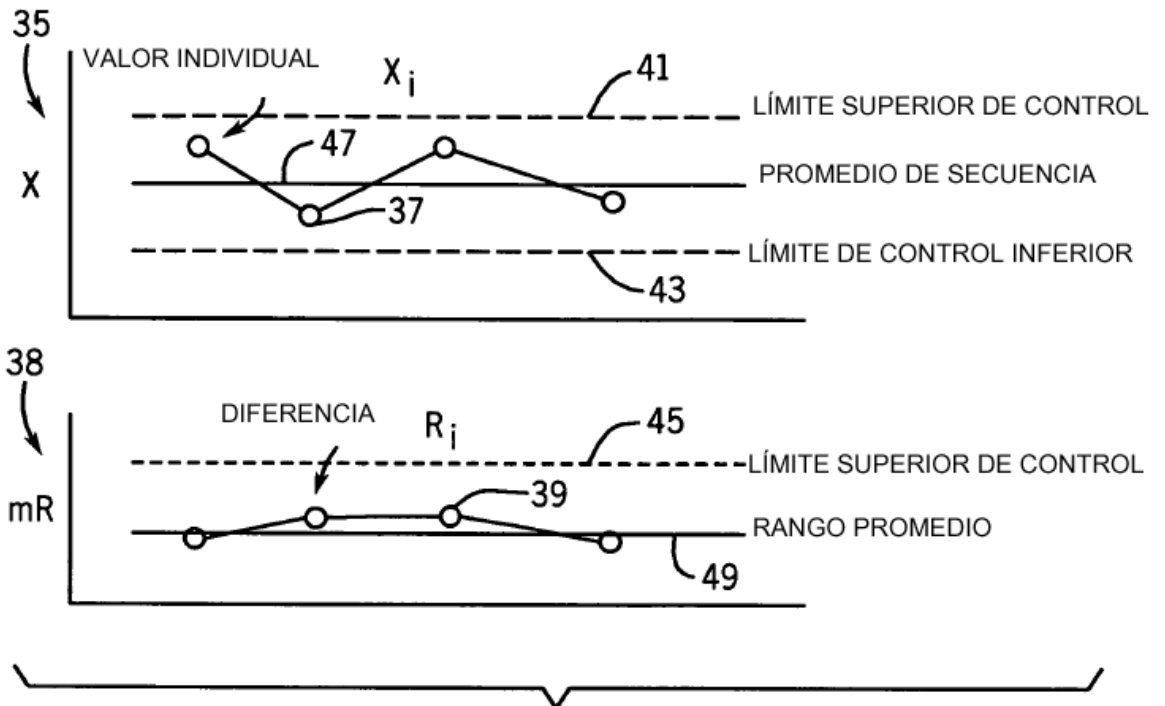


FIG. 5

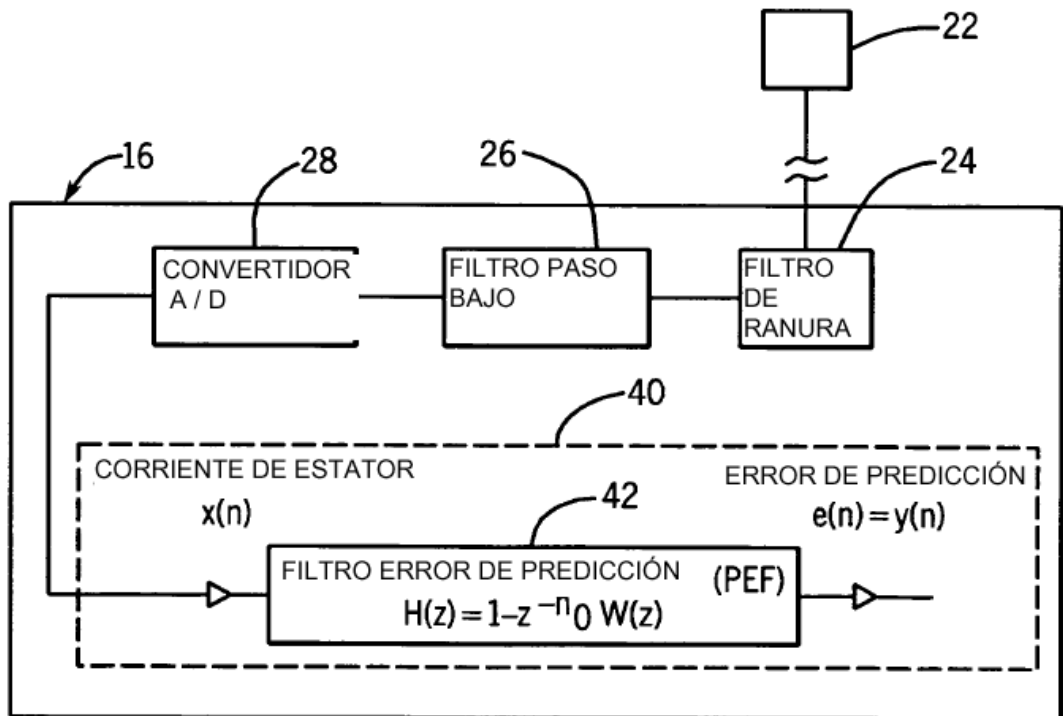


FIG. 6

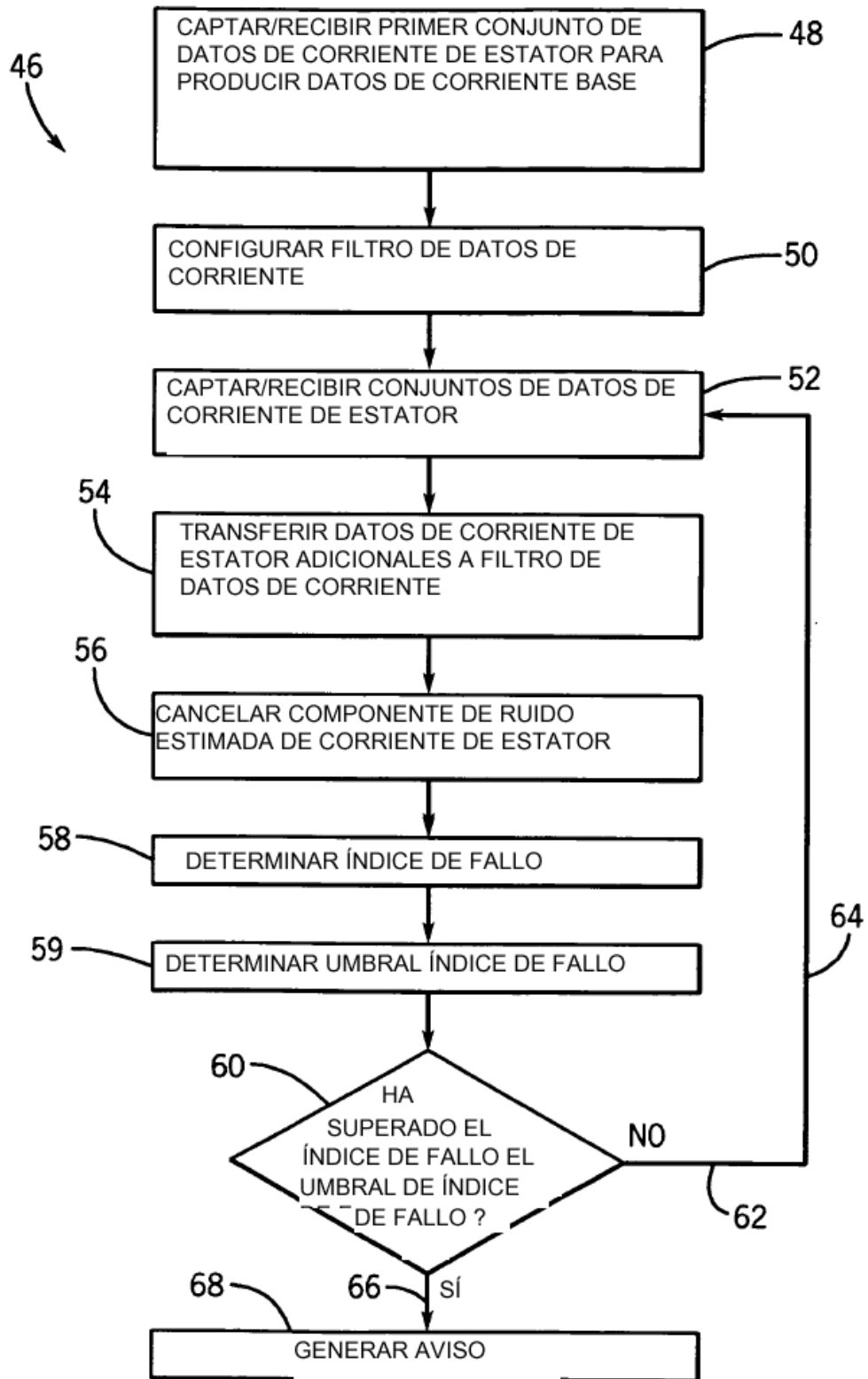


FIG. 7