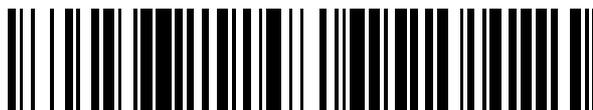


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 483 740**

51 Int. Cl.:

G01R 31/34 (2006.01)

H02P 29/00 (2006.01)

H02P 21/08 (2006.01)

H02P 21/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.03.2008 E 08742099 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.05.2014 EP 2127065**

54 Título: **Sistema y procedimiento de estimación indirecta de la resistencia de un rotor**

30 Prioridad:

16.03.2007 US 724904

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

07.08.2014

73 Titular/es:

**MOSAID TECHNOLOGIES INC. (100.0%)
11 Hines Road, Suite 203
Ottawa, ON K2K 2X1 , CA**

72 Inventor/es:

ARNET, BEAT, J.

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 483 740 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 de estimación indirecta de la resistencia de un rotor.

5 Campo de la invención

Un sistema y un procedimiento mejorados de estimación indirecta de la resistencia de un rotor para un motor de inducción de CA.

10 Antecedentes de la invención

Las mejoras en electrónica de potencia y el advenimiento de procesadores de señal digital (DSP) han permitido el uso de motores de inducción baratos y robustos en aplicaciones que estaban reservadas hasta ahora a motores de CC de escobillas (tales como accionamientos de tracción y accionamientos industriales de velocidad variable).
 15 Aprovechándose de las nuevas tecnologías de control y el nuevo hardware disponible, los motores de inducción de CA pueden conseguir las mismas prestaciones dinámicas que un motor de CC, al tiempo que exhiben una densidad de potencia más alta, un menor coste y un mantenimiento cero.

Los dos procedimientos de control avanzados más extendidos para motores de inducción son “control orientado al campo” (FOC) y “control de par directo” (DTC). El FOC se propuso en primer lugar hace más de treinta años (en 20 1971 por F. Blaschke), mientras que el DTC más “moderno” emergió una década después. La ventaja del DTC es su simplicidad, no requiriendo ningún regulador de corriente y siendo muy robusto a variaciones de parámetros. Sin embargo, el DTC presenta también algunos inconvenientes en comparación con el FOC, tal como alta ondulación de la corriente, dificultad para controlar el par y el flujo a bajas velocidades, alto ruido acústico a baja velocidad y falta
 25 de control directo de la corriente. Estas cuestiones son la razón por la cual el FOC es todavía ampliamente utilizado para tracción eléctrica, en donde las prestaciones a baja velocidad y el control de corriente preciso son características muy importantes.

En el FOC, las tres formas de onda de corriente trifásica y las formas de onda de voltaje se transforman en un marco dq de dos ejes (marco síncrono) que está girando a la frecuencia de las formas de onda eléctricas. Debido a esta transformación coordinada, las formas de onda de CA dan como resultado vectores CC (también denominados
 30 vectores espaciales). La ventaja de este enfoque es que es mucho más fácil controlar cantidades de CC que cantidades de CA. Por tanto, la implementación de un regulador de corriente digital es relativamente directa y puede ser muy robusta y dinámica.

Si el marco síncrono se alinea con el flujo de rotor (Ψ_r), entonces la componente de corriente alineada con el flujo (corriente directa, I_d) puede utilizarse para controlar el flujo de la máquina, mientras que la corriente en cuadratura (I_q) controla la magnitud del par del motor. Este desacoplamiento de par y flujo permite prestaciones de velocidad
 35 variable dinámicas que compite con un motor de CC, si no lo supera.

A fin de alinear el marco d-q con el flujo de rotor (giratorio), la posición instantánea del flujo de rotor (θ_r) con respecto a las fases de devanado de motor U, V, W necesita ser conocida, y en ello reside la dificultad del procedimiento FOC. Puesto que no es práctico medir directamente la posición del flujo del rotor, ésta tiene que estimarse
 40 indirectamente, y de aquí que el procedimiento se denomine frecuentemente control indirecto orientado al campo.

La técnica para estimar la posición (θ_r) del flujo del rotor se basa en integrar la frecuencia eléctrica (ω_s), que puede calcularse a partir de la frecuencia rotacional del rotor (ω) y la frecuencia de deslizamiento (ω_r):

$$\theta_r = \int \omega_s dt \quad \omega_s = \omega + \omega_r \quad \omega = Pp \cdot \Omega \quad (1)$$

50 Pp representa el número de pares de polos del motor, Ω es la velocidad mecánica.

$$\theta_r = Pp \int \Omega dt + \int \omega_r dt \quad (2)$$

55 Puesto que puede medirse la integral de la velocidad mecánica (por medio de un codificador de posición), el problema se reduce a la integración de la frecuencia de deslizamiento (estimada) ω_r . Muy frecuentemente ω_r se determina sobre la base de la siguiente ecuación:

$$\omega_r = \frac{Rr}{\Psi_r} \cdot Iq \quad (3)$$

60 Rr representa la resistencia del rotor.

La dificultad con la expresión anterior para el deslizamiento es el hecho de que éste depende de la resistencia del rotor, que cambia con la temperatura del rotor. En el uso típico de un motor de inducción, la temperatura del rotor experimenta una oscilación de temperatura grande y la resistencia del rotor variará en consecuencia. Si el deslizamiento no se estima correctamente, el marco síncrono (dq) ya no está alineado con el flujo del rotor y el FOC llega a "desintonizarse", degradando así las prestaciones del motor.

Breve resumen de la invención

Por tanto, es un objetivo de esta invención proporcionar un sistema y un procedimiento mejorados de estimación indirecta de la resistencia de un rotor para un motor de inducción de CA.

Es un objetivo adicional de esta invención proporcionar un sistema y un procedimiento mejorados de estimación indirecta de la resistencia de un rotor de este tipo que no requieran ningún sensor especializado tales como sensores de par o de voltaje.

Es un objetivo adicional de esta invención proporcionar un sistema y un procedimiento mejorados de estimación indirecta de la resistencia de un rotor de este tipo que sean compatibles con patrones de conmutación inversores regulares y hardware inversor estándar.

Es un objetivo adicional de esta invención proporcionar un sistema y un procedimiento mejorados de estimación indirecta de la resistencia de un rotor de este tipo que sean aplicables cuando el motor esté girando y durante cambios de velocidad.

Es un objetivo adicional de esta invención proporcionar un sistema y un procedimiento mejorados de estimación indirecta de la resistencia de un rotor de este tipo que se liguen directamente al marco de un FOC, requiriendo únicamente un mínimo software adicional.

Es un objetivo adicional de esta invención proporcionar un sistema y un procedimiento mejorados de estimación indirecta de la resistencia de un rotor de este tipo que no dependan de un modelo de motor complejo o un conocimiento preciso de otros parámetros del motor.

La invención resulta de la constatación de que un sistema y un procedimiento de estimación indirecta de la resistencia de un rotor verdaderamente mejorados, simples y todavía altamente efectivos para un motor de inducción de CA pueden efectuarse con la utilización del regulador de corriente de marco síncrono convencional ordenando primero a la corriente en cuadratura y luego a la corriente directa o de magnetización que se ajusten sustancialmente a cero, haciendo que la corriente de estator se haga cero, mientras que, en cambio, la corriente inducida fluye en el rotor; el voltaje del estator al tratar de mantener la corriente del estator a cero desciende correspondientemente al descenso de la corriente inducida del rotor. En cualquier momento seleccionado a lo largo del voltaje descendente del estator puede medirse un incremento de tiempo o voltaje para definir un incremento de voltaje o de tiempo que puede aplicarse a una tabla almacenada de resistencias de rotor correspondientes que corresponden al incremento de voltaje o de tiempo.

Sin embargo, en otras formas de realización la presente invención no necesita conseguir todos estos objetivos y las reivindicaciones de la misma no deberán limitarse a estructuras o procedimientos capaces de lograr estos objetivos.

La invención ofrece un sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor para un motor de inducción de CA que incluye un regulador de corriente de marco síncrono, sensible a órdenes de corriente directa y en cuadratura y a corrientes de devanado de motor de marco fijo percibidas, para proporcionar voltajes directos y en cuadratura y convertirlo en voltajes de marco fijo, ajustadas para el ángulo de flujo del rotor, a fin de accionar la etapa de potencia del motor; y un circuito de control para hacer que progrese sucesivamente la orden de cuadratura hacia cero y la orden de corriente directa hacia un valor predeterminado, haciendo que el voltaje en cuadratura del estator descienda como una representación del descenso de la corriente del rotor. Hay un dispositivo de almacenamiento para almacenar al menos una diferencia de tiempo/voltaje de descenso del voltaje del estator y una resistencia de rotor de referencia correspondiente; y un circuito de medición, sensible al voltaje descendente del estator que alcanza umbrales espaciados, define una diferencia de voltaje/tiempo para recuperar del dispositivo de almacenamiento la resistencia asociada del rotor.

En una forma de realización preferida se incluye además un circuito de normalización para normalizar el descenso del voltaje en cuadratura del estator con respecto a la velocidad del motor. Puede estar incluido además un circuito lógico para calcular la frecuencia de deslizamiento (ω_r) a partir de la resistencia recuperada del rotor. El circuito lógico puede calcular además la frecuencia eléctrica (ω_s) a partir de la frecuencia de deslizamiento (ω_r). El circuito lógico puede calcular además la posición de rotor estimada (θ_r) a partir de la frecuencia eléctrica (ω_s). El dispositivo de almacenamiento puede almacenar diferencias de tiempo y resistencias de rotor de referencia correspondientes. El dispositivo de almacenamiento puede almacenar diferencias de voltaje y resistencias de rotor de referencia correspondientes. Los umbrales espaciados pueden ser tiempos. Los umbrales espaciados pueden ser niveles de

voltaje. La diferencia definida puede ser un voltaje. La diferencia definida puede ser un tiempo. El valor predeterminado puede ser sustancialmente cero. El dispositivo de almacenamiento puede incluir una tabla de búsqueda que tiene una pluralidad de diferencias de tiempo/voltaje y resistencias de rotor de referencia correspondientes. Puede haber un conjunto de tablas de búsqueda, una para cada uno de entre una pluralidad de rangos de velocidad del motor.

Esta invención ofrece también un sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor para un motor de inducción de CA que emplea un regulador de corriente de marco síncrono, sensible a órdenes de corriente directa y en cuadratura y a corrientes de devanado de motor de marco fijo detectadas, para proporcionar voltajes directos y en cuadratura y convertirlos en voltajes de marco fijo, ajustados para el ángulo de flujo del rotor, con el fin de accionar la etapa de potencia del motor. El sistema incluye un procesador configurado para hacer que progrese sucesivamente la orden de cuadratura hacia cero y la orden de corriente directa hacia un valor predeterminado, haciendo que el voltaje en cuadratura del estator descienda como una representación del descenso de la corriente del rotor, para almacenar al menos una diferencia de tiempo/voltaje de descenso del voltaje del estator y una resistencia de rotor de referencia correspondiente, y para definir, en respuesta a que el voltaje descendente del estator alcance unos umbrales espaciados, una diferencia de voltaje/tiempo para recuperar del dispositivo de almacenamiento la resistencia asociada del rotor.

En una forma de realización preferida el procesador puede configurarse adicionalmente para normalizar el descenso del voltaje en cuadratura del estator con respecto a la velocidad del motor. El procesador puede configurarse además para calcular la frecuencia de deslizamiento (ω_r) a partir de la resistencia de rotor recuperada; para calcular la frecuencia eléctrica (ω_s) a partir de la frecuencia de deslizamiento (ω_r) y para estimar la posición del rotor (θ_r) a partir de una frecuencia eléctrica (ω_s). Las diferencias de tiempo pueden almacenarse con resistencias de rotor de referencia correspondientes y los umbrales espaciados pueden ser voltajes. Las diferencias de voltaje pueden almacenarse con resistencias de rotor de referencia correspondientes y los umbrales espaciados pueden ser tiempos. El valor predeterminado puede ser sustancialmente cero. El procesador puede configurarse para almacenar una tabla de búsqueda que tiene una pluralidad de diferencias de tiempo/voltaje y resistencias de rotor de referencia correspondientes. El procesador puede configurarse para almacenar un conjunto de tablas de búsqueda, una para cada uno de entre una pluralidad de rangos de velocidad del motor.

Esta invención ofrece también un procedimiento de estimación indirecta de la resistencia de un rotor para un motor de inducción de CA que emplea un regulador de corriente de marco síncrono, sensible a órdenes de corriente directa y en cuadratura y a corrientes de devanado de motor de marco fijo detectadas, para proporcionar voltajes directos y en cuadratura y convertirlos en voltajes de marco fijo, ajustados para el ángulo de flujo del rotor, a fin de accionar la etapa de potencia del motor, cuyo procedimiento incluye hacer que progrese sucesivamente la orden de cuadratura hacia cero y la orden de corriente directa hacia un valor predeterminado, haciendo que descienda el voltaje en cuadratura del estator como una representación del descenso de la corriente del rotor; definir, en respuesta a que el voltaje descendente del estator alcance unos umbrales espaciados, una diferencia de voltaje/tiempo+, y recuperar de un dispositivo de almacenamiento la resistencia del rotor asociada con la diferencia de voltaje/tiempo.

En una forma de realización preferida, el procedimiento de estimación indirecta de la resistencia de un rotor puede incluir además normalizar el descenso del voltaje en cuadratura del estator con respecto a la velocidad del motor. El procedimiento puede incluir además calcular la frecuencia de deslizamiento (ω_r) a partir de la resistencia de rotor recuperada; calcular la frecuencia eléctrica (ω_s) a partir de la frecuencia de deslizamiento (ω_r); y estimar la posición del rotor (θ_r) a partir de la frecuencia eléctrica (ω_s). Las diferencias de tiempo pueden almacenarse con resistencias de rotor de referencia correspondientes y los umbrales espaciados pueden ser voltajes. Las diferencias de voltaje pueden almacenarse con resistencias de rotor de referencia correspondientes y los umbrales espaciados pueden ser tiempos. El valor predeterminado puede ser sustancialmente cero.

Breve descripción de las diversas vistas de los dibujos

Otros objetivos, características y ventajas se les ocurrirán a los expertos en la materia a partir de la siguiente descripción de una forma de realización preferida y los dibujos que se acompañan, en los que:

la figura 1 es un diagrama de bloques esquemático de un control de motor de inducción de CA;

la figura 2 es un diagrama de bloques esquemático del inversor de fuente de voltaje de la figura 1;

la figura 3 ilustra el desplazamiento del deslizamiento característico de par con la temperatura del rotor;

la figura 4 es un diagrama esquemática del controlador de par, el regulador de corriente de marco síncrono y una etapa de potencia con más detalle y un sistema de estimación indirecta de la resistencia del rotor según esta invención;

la figura 5 es un diagrama esquemático más detallado de una forma de realización del sistema de estimación

indirecta de la resistencia del rotor de la figura 4;

la figura 6 es un circuito equivalente de un motor de inducción de CA;

5 la figura 7 muestra el circuito equivalente de la figura 6 cuando la corriente del rotor se ajusta a cero;

la figura 8 muestra el circuito equivalente de la figura 6 cuando la corriente del estator se ajusta a cero;

10 la figura 9 es una ilustración combinación de las condiciones de corriente de estator y de rotor cuando la corriente de estator i_{dq} se ajusta a cero;

la figura 10 ilustra el ajuste de i_d a cero con i_q ya en cero;

15 la figura 11 ilustra la respuesta de V_d y V_q a las corrientes en la figura 10 y el descenso de V_q a la misma tasa que la corriente del rotor;

las figuras 12 y 13 son vistas similares a las figuras 10 y 11 durante un cambio de velocidad rápido, que ilustra el cambio de forma debido al cambio de velocidad;

20 la figura 14 ilustra la forma de realización de una medición de tiempo o voltaje entre dos umbrales de voltaje o tiempo para recuperar un valor de resistencia de rotor almacenado correspondiente;

la figura 15 es un diagrama de flujo del procedimiento de estimación indirecta de la resistencia del rotor de esta invención; y

25 la figura 16 es un diagrama de flujo para mostrar la estimación indirecta de la resistencia del rotor de esta invención en un sistema de control de motor.

Descripción detallada de la invención

30 Aparte de la forma de realización o formas de realización preferidas descritas a continuación, esta invención es capaz de otras formas de realización y de ponerse en práctica o llevarse a cabo de diversas maneras. Así, debe entenderse que la invención no está limitada en su aplicación a los detalles de construcción y a las disposiciones de componentes expuestas en la siguiente descripción o ilustradas en los dibujos. Aunque sólo se describa aquí una forma de realización, las reivindicaciones de la memoria no deben limitarse a esa forma de realización. Además, las reivindicaciones de la memoria no deben leerse de forma restrictiva a menos que haya una evidencia clara y convincente que manifieste cierta exclusión, restricción o desreivindicación.

40 En la figura 1 se muestra un control 10 de motor de inducción de CA que incluye un inversor de fuente de voltaje (VSI) 12 que deriva potencia de una fuente de CC, tal como una batería 14, para accionar un motor de inducción de CA 16. El VSI 12 recibe una realimentación de medición de corriente por la línea 26 y una realimentación de medición de posición por la línea 27. El VSI 12 puede incluir un bloque de control de motor 18, figura 2, que recibe una orden de par, y un regulador de corriente 24 que responde a los puntos de ajuste de corriente directa y en cuadratura i_d , i_q en las líneas 20 y 22 y a una medición de corriente suministrada por la línea 26 y una medición de posición suministrada por la línea 27 para proporcionar señales de control por las líneas 28 a la etapa de potencia 30, que acciona entonces el motor de CA. El VSI 12 proporciona potencia trifásica al motor 16 por las líneas 15 y mide la corriente en dos de las tres líneas a través de las líneas 26. El deslizamiento ω_{r1} , figura 3, para mantener un par máximo 32 cuando el motor está frío es diferente del deslizamiento ω_{r2} requerido para un par máximo 34 cuando el motor está a temperatura elevada. La invención aplica un procedimiento de transitorios aplicando primero corriente de estator al motor a deslizamiento cero (frecuencia síncrona) y ajustando a continuación bruscamente la corriente de estator sustancialmente a cero. Las corrientes en un motor crean un campo magnético que no puede descender instantáneamente, puesto que es una forma de almacenamiento de energía. Como consecuencia, cuando la corriente del estator se conmuta a cero, las corrientes comienzan a fluir en el rotor. Esto hace que descienda el campo magnético en el motor, puesto que la energía está siendo transformada en calor debido a la resistencia del rotor. El descenso del flujo es exponencial, con una constante de tiempo que es inversamente proporcional a la resistencia del rotor. Por tanto, el tiempo de descenso es una medida de la resistencia del rotor, que puede utilizarse para estimar mejor el deslizamiento y mejorar el cálculo del ángulo de flujo del rotor.

60 Esta invención resulta de la constatación de que el campo magnético en el motor induce un voltaje en los terminales del motor, que es proporcional a la derivada del vector de flujo. Por tanto, este voltaje desciende a la misma tasa que el campo magnético. Por tanto, el descenso del flujo puede observarse midiendo el voltaje en los terminales del motor. Por tanto, esta invención utiliza el voltaje del estator a la salida del regulador 24 de corriente de marco síncrono existente, figura 2, para determinar el tiempo de descenso del flujo, lo que permite a su vez una estimación de la resistencia del rotor. De nuevo, la estimación de resistencia de rotor se utiliza para mejorar el cálculo del ángulo de flujo del rotor.

La presente invención magnetiza el motor y conmuta la corriente de magnetización en el rotor a fin de observar el tiempo de descarga. Sin embargo, a diferencia de la técnica anterior, la presente invención propone trabajar "sobre la marcha" mientras el motor está girando e incluso durante variaciones de velocidad rápidas. Por tanto, es muy adecuada para aplicaciones de vehículos híbridos, especialmente en el contexto de motores y generadores en híbridos paralelos. Otras ventajas de la solución propuesta son que no se requieren sensores de voltaje ni conmutadores adicionalmente para desconectar los cables de fase durante el ensayo. Como resultado, la solución propuesta no requiere ningún cambio de hardware y no añade costes al controlador del motor. Y puede implementarse completamente en el software, si se desea.

El bloque 18 de control del motor, figura 4, incluye un controlador de flujo 40 y un controlador de par 42 que responde a la orden de par para producir corrientes I_d e I_q en las líneas 20 y 22 que van al regulador de corriente de marco síncrono 24. El regulador 24 de corriente de marco síncrono incluye un regulador de corriente 44, un convertidor 46 de marco síncrono a marco fijo y un convertidor 48 de marco fijo a marco síncrono. La etapa de potencia 30 incluye un conjunto de conmutadores 50 y un condensador 52 de filtro y un control 54 modulado en anchura de impulso.

En funcionamiento, se mide la corriente en dos de las líneas de potencia 15, por ejemplo las corrientes I_u , I_w en el dominio de marco fijo. Éstas se convierten pasando del dominio de marco fijo al dominio síncrono por el convertidor 48 para proporcionar corrientes medidas I_d , I_q al regulador de corriente 44. La transformación en el convertidor 48 se ajusta utilizando la entrada del ángulo de flujo θ_r del rotor por la línea 58. Con esta entrada medida I_d , I_q y la entrada ordenada I_d^* , I_q^* , el regulador de corriente 44 produce voltajes V_d , V_q que suministra al convertidor 46. El convertidor 46 utiliza también el ángulo de flujo θ_r del rotor al convertir volviendo del marco síncrono (dq) a la forma UVW de marco fijo. Estas salidas se proporcionan al controlador 54 modulado en anchura de impulso, que acciona los conmutadores 50 en la forma convencional para suministrar potencia al motor 16 por las líneas 15. Todo esto se conoce convencionalmente.

Conforme a esta invención, se emplea un sistema 60 de estimación indirecta de la resistencia de un rotor que vigila una orden de par en la línea 62 y el voltaje de magnetización V_q en la línea 64 para producir una estimación de la resistencia del rotor en la línea 66. El sistema 60 de estimación indirecta de la resistencia del rotor incluye también un dispositivo de conmutación 68 que ajusta sucesivamente I_q^* y a continuación I_d^* a cero para realizar su operación de estimación. Un bloque calculador de ángulo de flujo 67 utiliza la posición 69 del árbol y la estimación de resistencia del rotor para calcular el ángulo de flujo, que se utiliza a su vez para la transformación coordinada. Aunque la orden de cuadratura I_q se hace progresar hacia cero, la orden directa I_d puede hacerse progresar hacia un valor predeterminado (S), en donde S podría ser cero, sustancialmente cero o algún otro valor tal como $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$,... del valor inicial.

En una forma de realización, el sistema 60 de estimación indirecta de la resistencia del rotor, figura 5, puede incluir un circuito de control 70 que, en ausencia de una orden de par en la línea 62, activa los conmutadores 68 para aplicar un cero, primero para inducir I_q^* a cero en la línea 22, y entonces, después de un periodo de tiempo de asentamiento adecuado, para ajustar I_d^* a cero en la línea 20. El voltaje del estator representado por el voltaje V_q descenderá ahora a la misma tasa que la corriente de rotor I_d . Un circuito de normalización 72 normaliza V_q para la velocidad y proporciona el voltaje normalizado V_{qn} al circuito de medición 74. Normalizando la medición basada en la medición de velocidad, puede eliminarse la dependencia de la velocidad respecto de la derivada del vector de flujo:

$$V_{qn}(t) = V_q(t) \cdot \frac{\Omega_{ref}}{\Omega(t)} \quad (4)$$

El circuito de medición 74 mide entonces el tiempo transcurrido entre dos voltajes umbral espaciados a medida que desciende V_{qn} , y este tiempo se utiliza entonces para recuperar del almacén 76 una resistencia de rotor de referencia correspondientes R_r que se proporciona por la línea 66 como la resistencia de rotor estimada. Alternativamente, el circuito de medición 74 podría medir el cambio de voltaje entre dos tiempos o umbrales de tiempo espaciados y utilizar el voltaje delta o el incremento de voltaje para recuperar del almacén 76 la resistencia de referencia del rotor. Puede proporcionarse también un circuito lógico. El circuito lógico 78 puede calcular primero:

$$\omega_r = \frac{R_r}{\Psi_r} \cdot I_q \quad (5)$$

donde R_r es la resistencia del rotor, I_q es la corriente en cuadratura y Ψ_r es el flujo del rotor, para obtener la frecuencia de deslizamiento ω_r . ω_r puede utilizarse entonces junto con la frecuencia rotacional del rotor Ω para obtener la frecuencia eléctrica ω_s . La frecuencia eléctrica ω_s se integra entonces

$$\theta_r = \int \omega_s dt \quad (6)$$

ES 2 483 740 T3

para obtener el ángulo de flujo θ_r del rotor. Los circuitos mostrados en la figura 5 pueden implementarse también utilizando un DSP. El almacén 76 puede contener simplemente:

5 $dT = 100 \text{ ms} \rightarrow R_r = 1 \text{ ohmio}$. Sobre la base de la medición real, la resistencia del rotor se estimaría por medio de un simple escalado: $dT = 200 \text{ ms} \rightarrow R_r = 1 \text{ ohmio} \cdot 100 \text{ ms} / 200 \text{ ms}$. No obstante, podría utilizarse una tabla de búsqueda que contenga una pluralidad de entradas, por ejemplo:

10	dT	Rr
	50 ms	0,5 ohmios
	100 ms	1 ohmio
	150 ms	1,33 ohmios
	200 ms	2 ohmios

Esta tabla podría ser incluso tridimensional dependiendo de la velocidad.

15 1000 rpm:

20	dT	Rr
	50 ms	0,5 ohmios
	100 ms	1 ohmio
	150 ms	1,33 ohmios
	200 ms	2 ohmios

2000 rpm:

25	dT	Rr
	50 ms	0,6 ohmios
	100 ms	1,2 ohmios
	150 ms	1,5 ohmios
30	200 ms	2,3 ohmios

Una comprensión más completa de la invención puede obtenerse utilizando un circuito equivalente 90 de motor de inducción de CA, figura 6, que incluye una porción de rotor 92 y una porción de estator 94. La porción de rotor 92 se representa con una resistencia de rotor 96 y la porción de estator 94 incluye una resistencia de rotor 98 y una inductancia de fuga 100 y una inductancia de magnetización 102. En el primer paso de funcionamiento del conmutador 68, la corriente de rotor I_r se ajusta a cero (ajustando el deslizamiento a cero), figura 7, mientras que la corriente de estator I_s fluye todavía y el voltaje de estator V_s aparece a través de los terminales. En la figura 8, la corriente de estator se fuerza a cero por la acción del regulador de corriente 44, y así el campo de colapsamiento inducirá una corriente I_r 104 sólo en el rotor. A medida que desciende esta corriente I_r 104, el regulador de corriente 44 mantiene la corriente del estator a cero haciendo que la salida del regulador de corriente V_q^* disminuya o descienda a la misma tasa que la corriente 104. Es este voltaje descendente fácilmente disponible V_q^* el que la invención utiliza para determinar la resistencia del rotor sin detener el funcionamiento del motor y sin ningún hardware añadido.

45 La figura 9 representa el caso del progreso gradual de la corriente del estator ($i_q=0$, $i_d>0$) hacia cero ($i_q=i_d=0$) a $t=0,1$. La línea de trazos muestra la corriente de estator (I_s) y la línea continua representa la corriente de rotor (I_r). La corriente del rotor es cero antes del progreso gradual de corriente del estator (debido a que $i_q=0$). Sin embargo, cuando i_d se ajusta a cero, la corriente de magnetización se conmuta al rotor ($I_r \neq 0$). A medida que se va descargando la inductancia de magnetización, desciende la corriente del rotor. Las figuras 10 y 11 muestran la misma simulación en el marco síncrono (dq). V_q/V_q es la salida del regulador de corriente. Puede verse la manera en que desciende V_q a la misma tasa que la corriente del rotor. Por tanto, la forma de realización preferida de la invención utiliza esta cantidad para determinar el tiempo/voltaje de descenso del flujo del rotor y, a partir de éste, el valor real de la resistencia del rotor. A corriente de fase cero ($I_d=I_q=0$), el voltaje de los terminales es igual a la derivada del flujo del rotor. Esta derivada es proporcional a la velocidad del rotor. Cuanto más rápido gira el motor, mayor es el voltaje inducido y más precisa es la medición. Las figuras 12 y 13 ilustran el mismo progreso gradual de la corriente que el simulado en las figuras 10 y 11, pero aquí durante un rápido cambio de velocidad. Así, la curva V_q adopta una forma diferente debido a su dependencia de la velocidad. La dependencia de la velocidad puede eliminarse normalizando la medición sobre la base de una medición de velocidad como se ha explicado previamente.

60 La ventaja de utilizar el regulador de corriente para forzar las corrientes de fase a cero es doble: no se requieren conmutadores externos para desconectar completamente las fases del motor y una medición indirecta del voltaje de fase puede obtenerse a partir de las salidas de los reguladores de corriente sin necesidad de sensores de voltaje físicos.

65 Aunque la curva V_q normalizada se asemeja a un descenso exponencial natural, en realidad es enteramente no

lineal debido a la saturación de la inductancia de magnetización. Si se conoce un modelo preciso de la inductancia de magnetización, una regresión de mínimos cuadrados u otro ajuste de curvas pueden utilizarse para identificar directamente la resistencia del rotor. Sin embargo, la forma de realización preferida está basada en un enfoque mucho más simple: en lugar de buscar una determinación absoluta de la resistencia del rotor, se mide el cambio relativo obtenido en un ensayo de laboratorio controlado. Pueden utilizarse varias mediciones relativamente simples para determinar el cambio relativo de la resistencia del rotor a partir de una condición de referencia conocida. La mayoría de ellas caen en una de las dos categorías siguientes (ilustradas a continuación):

- Medición de diferencia de tiempo (Δt) entre dos umbrales de voltaje
- Medición de diferencia de voltaje (ΔV) entre dos umbrales de tiempo

La forma de realización preferida de esta invención, figura 14, utiliza una medición de tiempo entre dos umbrales de voltaje (V_{qnh} , V_{qnl}) en el voltaje de terminal normalizado en velocidad. El tiempo medido (Δt) se compara con una medición de referencia (Δt_{ref} , Rr_{ref}) tomada en una configuración de dinamómetro instrumentado. La relación de las dos mediciones de tiempo puede utilizarse para determinar la resistencia del rotor:

$$Rr = Rr_{ref} \cdot \frac{\Delta t_{ref}}{\Delta t} \quad (7)$$

Si se conoce la temperatura del rotor a la cual se tomaron los datos de referencia, es posible determinar la temperatura del rotor a partir de la resistencia estimada del rotor (utilizando el coeficiente de resistencia por temperatura). Esta información puede utilizarse para proteger el rotor contra sobrecalentamiento; reduciendo la tasa de la corriente del rotor por encima de una cierta temperatura del rotor si las mediciones van más allá de los límites típicos determinados durante la operación comisionada, puede detectarse un fallo de motor y la parada del accionamiento por razones de seguridad.

En la figura 15 se muestra un procedimiento de implementar esta invención, en donde, en primer lugar, I_q se ajusta a cero e I_d se ajusta al valor mínimo requerido para el ensayo, 120. A continuación, es necesario esperar hasta que el flujo se haya estabilizado (es decir, $im=id$) 122. La duración del estado "Estabilizar Flujo" puede ser fijo o adaptativo. Una vez que se estabiliza el flujo, I_d se hace progresar hacia cero 124. Esto induce un pequeño transitorio de voltaje (provocado por la inductancia de fuga y la respuesta del regulador de corriente) que debe ignorarse. Por tanto, se inserta un estado en blanco (de duración fija) antes de detectar el voltaje (V_q) 126. Después, se introduce el estado "Detectar Voltaje Alto" 128, que espera hasta que el valor de velocidad normalizado cae por debajo del primer umbral de detección ($V_{qhi_{ref}}$), en cuyo punto se reajusta 130 el temporizador y se introduce 132 el estado "Detectar Voltaje Bajo". En el estado "Detectar Voltaje Bajo", se incrementa el temporizador hasta que el valor de velocidad normalizado de V_q cae por debajo del segundo umbral ($V_{qlo_{ref}}$) 134. En este punto, se detiene el temporizador y su valor es utilizado para calcular la resistencia de rotor 136, como se ha explicado anteriormente.

La figura 16 ilustra la manera en que la detección de la resistencia del rotor puede vincularse a un algoritmo de control del motor tal como para vehículos híbridos. Siempre que la solicitud de par difiera de cero, se introduce el estado "Accionamiento Activo" 140 y se den órdenes a las corrientes I_d/I_q de acuerdo con el par deseado. Si la solicitud de par tiende a cero, y la velocidad es demasiado baja para la detección de la resistencia del rotor, se introduce el estado "Accionamiento Pasivo" 142. Si la velocidad es suficientemente grande, el control continúa hacia el estado "Detección de resistencia de rotor" 144, que aplica el progreso gradual de la corriente I_d y detecta el voltaje de fase. Si se solicita el par motor mientras se está en el estado "Detectar Resistencia de Rotor", se aborta el algoritmo de detección y el control continúa inmediatamente hacia el estado "Accionamiento Activo".

Aunque se muestran características específicas de la invención en algunos dibujos y no en otros, esto es por conveniencia solamente, ya que cada característica puede combinarse con cualquiera o con todas las demás características de acuerdo con la invención. Las palabras "que incluye", "que comprende", "que tiene" y "con", tal como se utilizan aquí, deben interpretarse ampliamente y de manera exhaustiva y no se limitan a ninguna interconexión física. Además, cualquier forma de realización descrita en la presente solicitud no debe tomarse como la única forma de realización posible.

Además, cualquier enmienda presentada durante la prosecución de la solicitud de esta patente no es una exclusión de ningún elemento de las reivindicaciones presentada en la solicitud depositada: los expertos en la materia no pueden esperar razonablemente redactar una reivindicación que abarque literalmente todos los equivalentes posibles, muchos equivalentes serán imprevisibles en el momento de la enmienda y están más allá de una interpretación equitativa de lo que debe abandonarse (si lo hay), la lógica que subyace a la enmienda puede guardar no más que una relación tangencial con muchos equivalentes, y/o hay muchas otras razones por las que no puede esperarse que el solicitante describa ciertos sustitutivos insustanciales para cualquier elemento de las reivindicaciones enmendado.

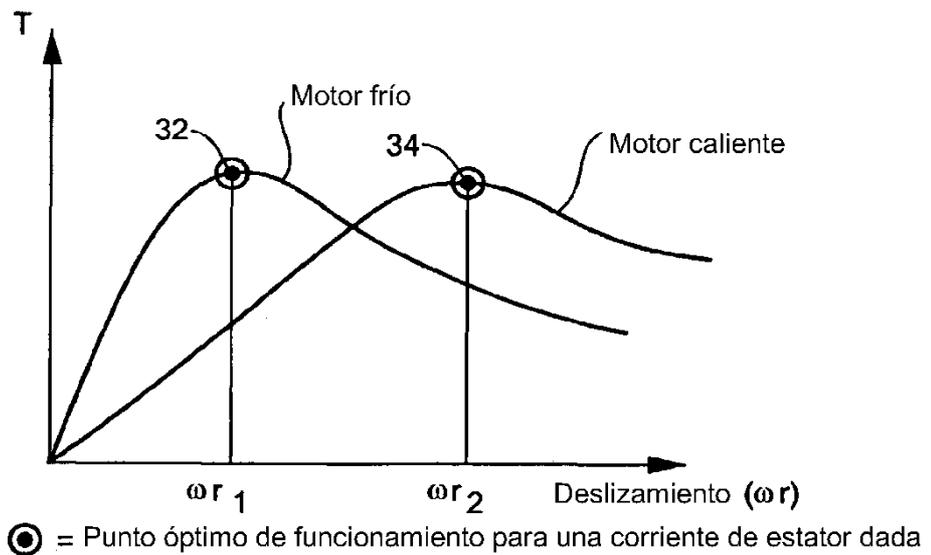
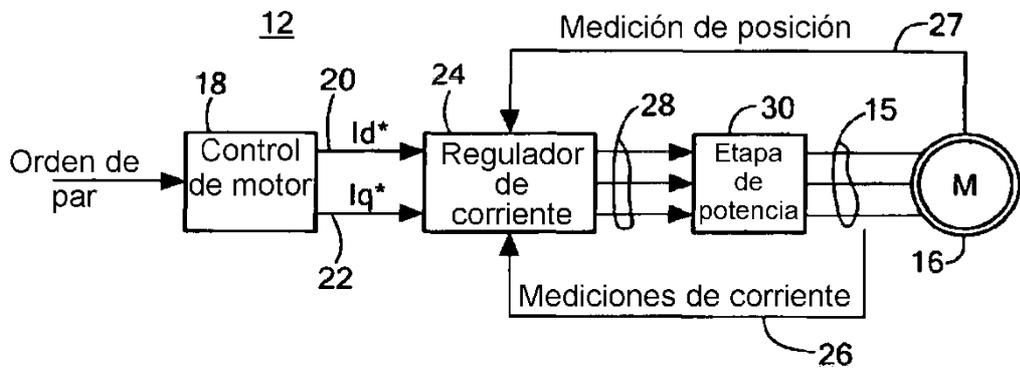
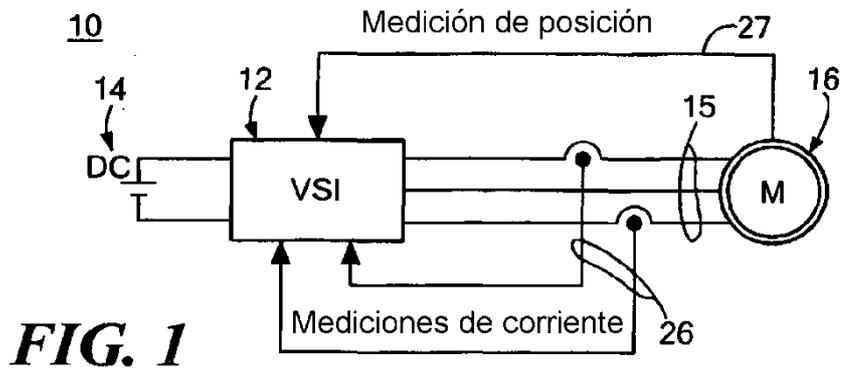
Otras formas de realización se les ocurrirán a los expertos en la materia y están dentro de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor para un motor de inducción de CA, que comprende:
 - 5 un regulador de corriente de marco síncrono, sensible a órdenes de corriente directa y en cuadratura y a corrientes de devanado de motor de marco fijo detectadas, para proporcionar voltajes directos y en cuadratura y convertirlos en voltajes de marco fijo, ajustados para el ángulo de flujo del rotor, para accionar la etapa de potencia del motor;
 - 10 un circuito de control para hacer que progrese sucesivamente dicha orden de cuadratura hacia cero y dicha orden de corriente directa hacia un valor predeterminado, haciendo que descienda el voltaje en cuadratura del estator como una representación del descenso de la corriente del rotor;
 - 15 un dispositivo de almacenamiento para almacenar al menos una diferencia de tiempo/voltaje de descenso del voltaje del estator y una resistencia de rotor de referencia correspondiente; y
 - 20 un circuito de medición, sensible a que el voltaje descendente del estator alcance unos umbrales espaciados, para definir una diferencia de voltaje/tiempo para recuperar de dicho dispositivo de almacenamiento la resistencia asociada del rotor.
2. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 1, que incluye además un circuito de normalización para normalizar el descenso del voltaje en cuadratura del estator con respecto a la velocidad del motor.
- 25 3. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 1, que incluye además un circuito lógico para calcular una frecuencia de deslizamiento (ω_r) a partir de dicha resistencia recuperada del rotor, para calcular la frecuencia eléctrica (ω_s) a partir de dicha frecuencia de deslizamiento (ω_r), y para calcular la posición estimada (θ_r) del rotor a partir de dicha frecuencia eléctrica (ω_s).
- 30 4. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 1, en el que dicho circuito lógico calcula además la temperatura estimada del rotor a partir de la resistencia estimada del rotor y la utiliza para proteger el motor contra sobrecalentamiento.
- 35 5. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 1, en el que dicho dispositivo de almacenamiento almacena las diferencias de tiempo y resistencias de rotor de referencia correspondientes, y dichos umbrales espaciados son niveles de voltaje.
- 40 6. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 1, en el que dicho dispositivo de almacenamiento almacena las diferencias de voltaje y resistencias de rotor de referencia correspondientes, y dichos umbrales espaciados son tiempos.
7. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 1, en el que dicho valor predeterminado es sustancialmente cero.
- 45 8. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 1, en el que dicho dispositivo de almacenamiento incluye una tabla de búsqueda que tiene una pluralidad de diferencias de tiempo/voltaje y de resistencias de rotor de referencia correspondientes.
- 50 9. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 1, en el que dicho dispositivo de almacenamiento incluye un conjunto de tablas de búsqueda, una para cada uno de entre una pluralidad de rangos de velocidad del motor.
- 55 10. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor para un motor de inducción de CA que emplea un regulador de corriente de marco síncrono, sensible a órdenes de corriente directa y en cuadratura y a corrientes de devanado de motor de marco fijo detectadas, para proporcionar voltajes directos y en cuadratura y convertirlos en voltajes de marco fijo, ajustados para el ángulo de flujo del rotor, para accionar la etapa de potencia del motor, incluyendo dicho sistema un procesador configurado para:
 - 60 hacer progresar sucesivamente la orden de cuadratura hacia cero y dicha orden de corriente directa hacia un valor predeterminado, haciendo que descienda el voltaje en cuadratura del estator como una representación del descenso de la corriente del rotor;
 - 65 almacenar al menos una diferencia de tiempo/voltaje de descenso del voltaje de estator y una resistencia de rotor de referencia correspondiente; y
 - definir, en respuesta a que el voltaje descendente del estator alcance unos umbrales espaciados, una diferencia

de voltaje/tiempo para recuperar de dicho dispositivo de almacenamiento la resistencia asociada del rotor.

- 5 11. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 10, en el que dicho procesador está configurado además para normalizar el descenso del voltaje en cuadratura del estator con respecto a la velocidad del motor.
- 10 12. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 10, en el que dicho procesador está configurado además para calcular una frecuencia de deslizamiento (ω_r) a partir de la resistencia recuperada del rotor; para calcular la frecuencia eléctrica (ω_s) a partir de la frecuencia de deslizamiento (ω_r) y para estimar la posición (θ_r) del rotor a partir de una frecuencia eléctrica (ω_s).
- 15 13. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 10, en el que se almacenan las diferencias de tiempo con las resistencias de rotor de referencia correspondientes y los umbrales espaciados son voltajes.
- 20 14. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 10, en el que se almacenan las diferencias de voltaje con resistencias de rotor de referencia correspondientes y los umbrales espaciados son tiempos.
- 25 15. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 10, en el que dicho valor predeterminado es sustancialmente cero.
- 30 16. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 10, en el que dicho procesador está configurado para almacenar una tabla de búsqueda que tiene una pluralidad de diferencias de tiempo/voltaje y de resistencias de rotor de referencia correspondientes.
17. Sistema de estimación indirecta de la resistencia de un rotor según la reivindicación 10, en el que dicho procesador está configurado para almacenar un conjunto de tablas de búsqueda, una para cada uno de entre una pluralidad de rangos de velocidad del motor.



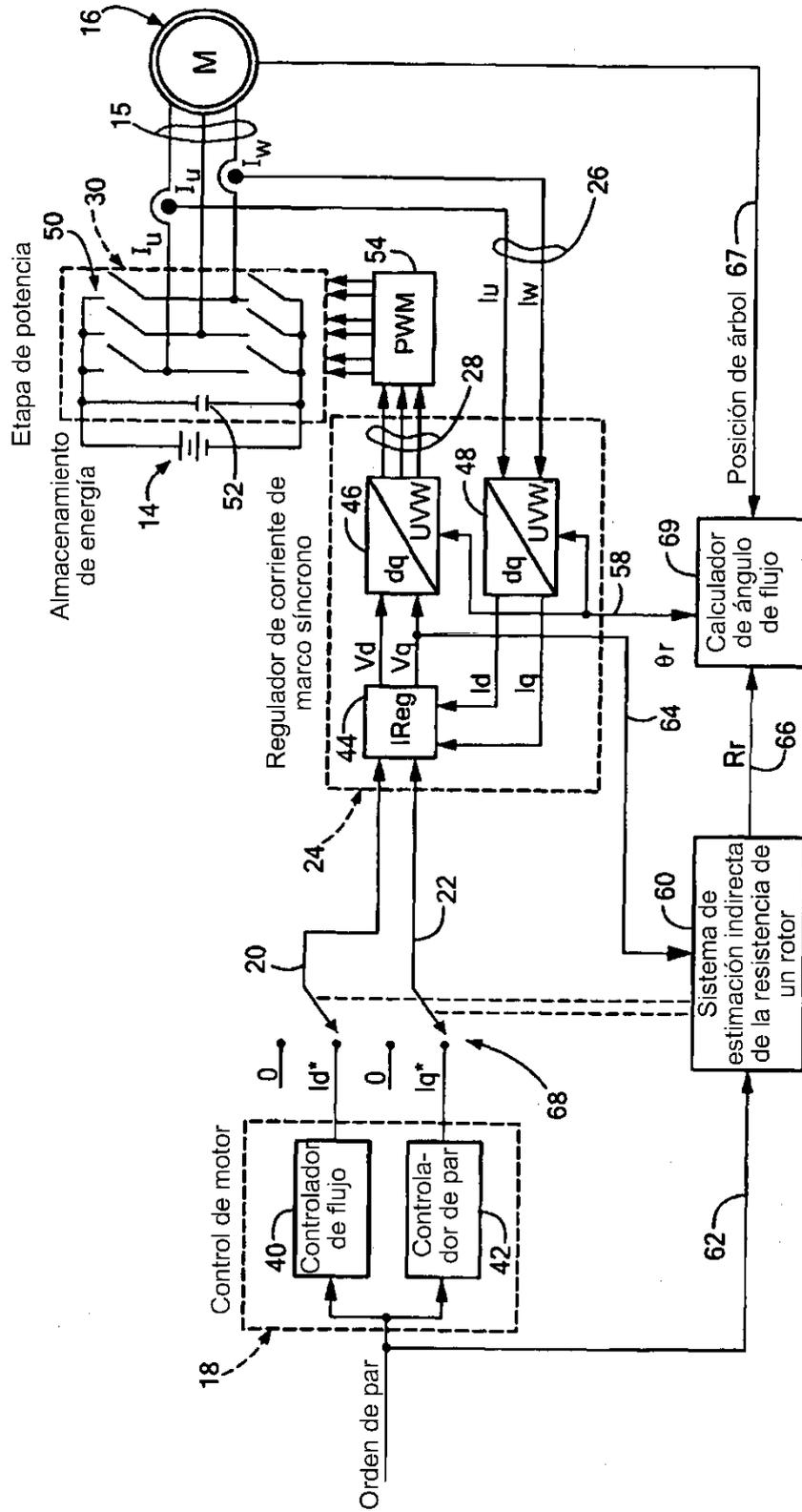


FIG. 4

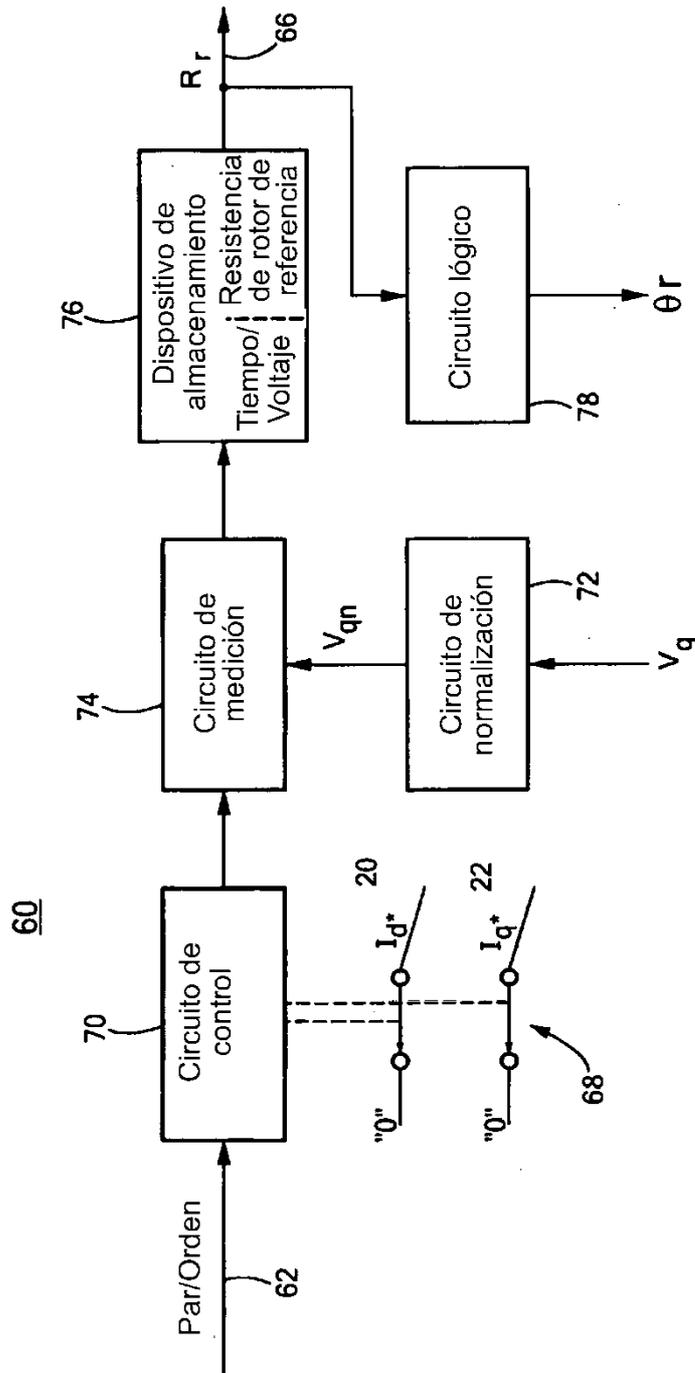


FIG. 5

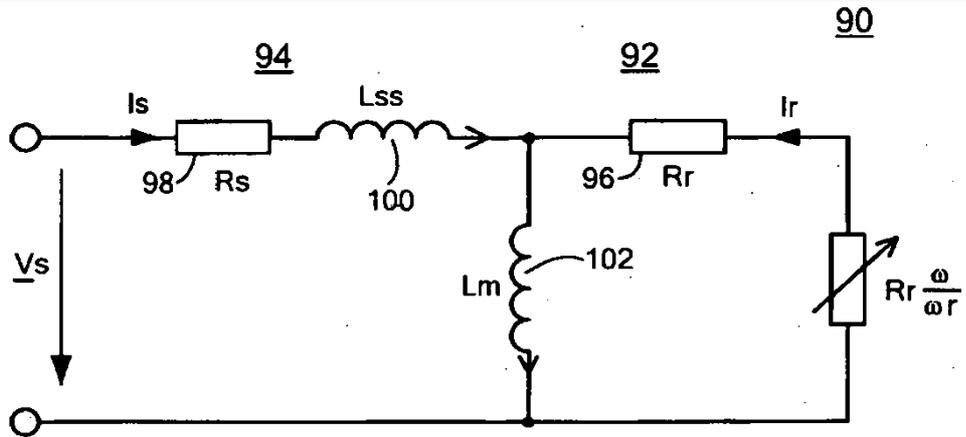


FIG. 6

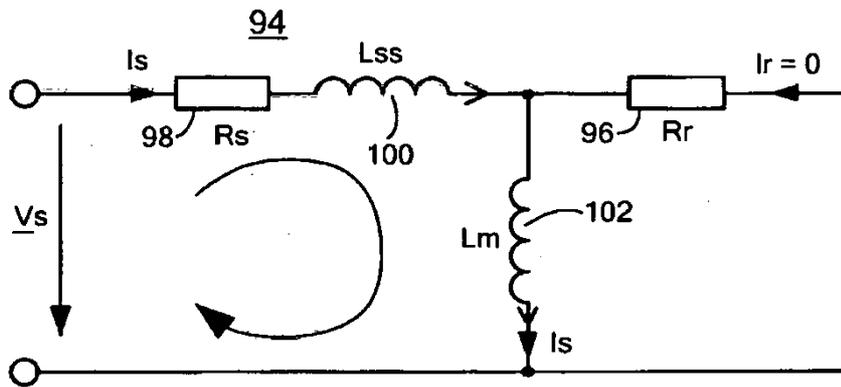


FIG. 7

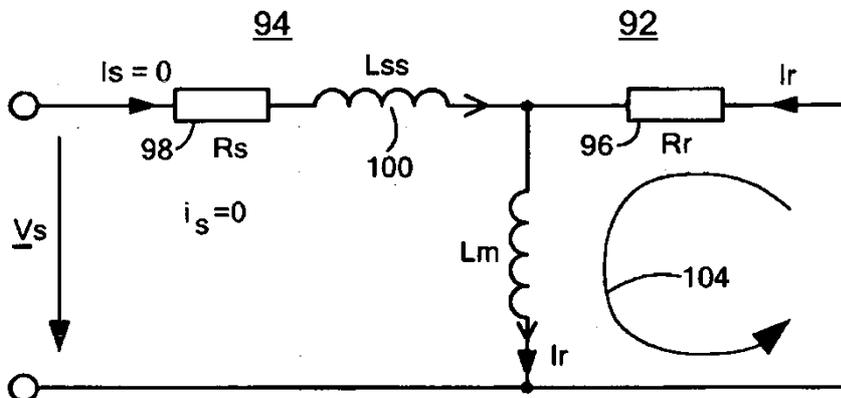


FIG. 8

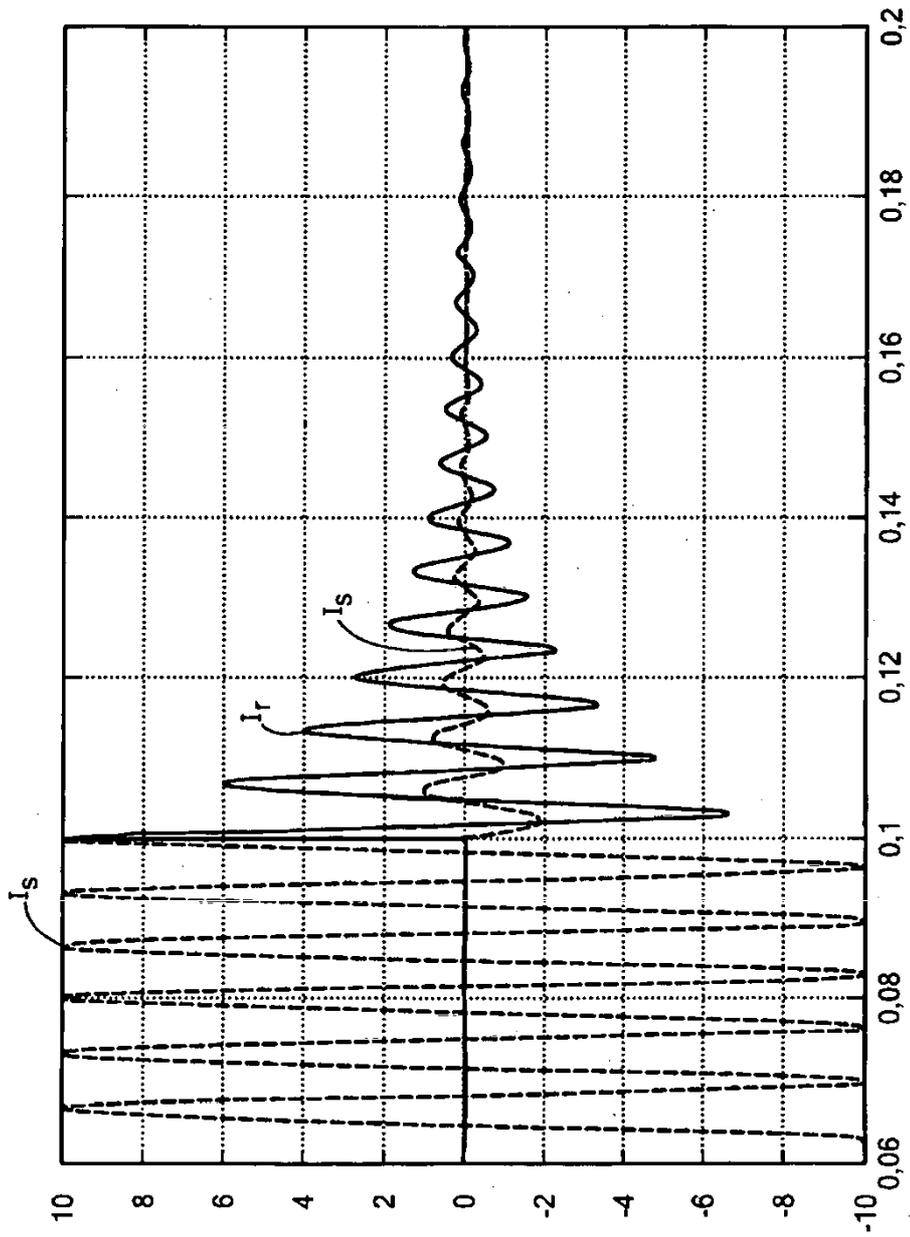


FIG. 9

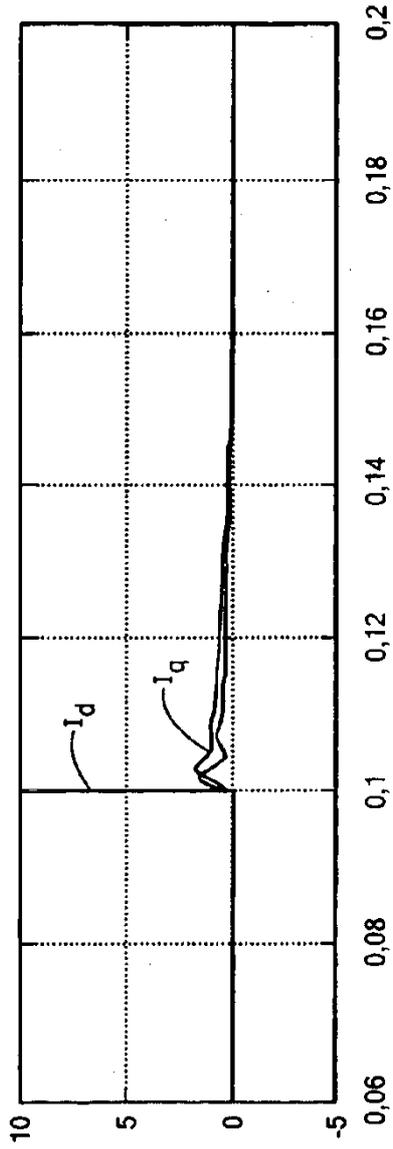


FIG. 10

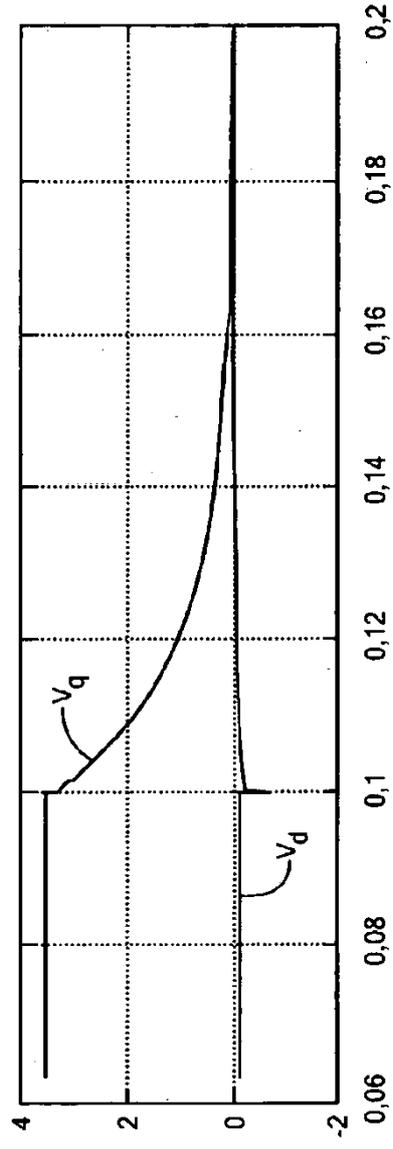


FIG. 11

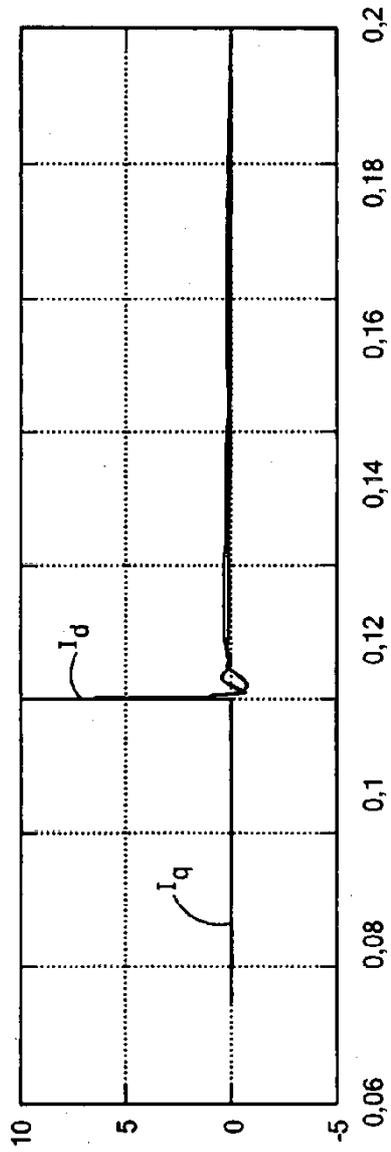


FIG. 12

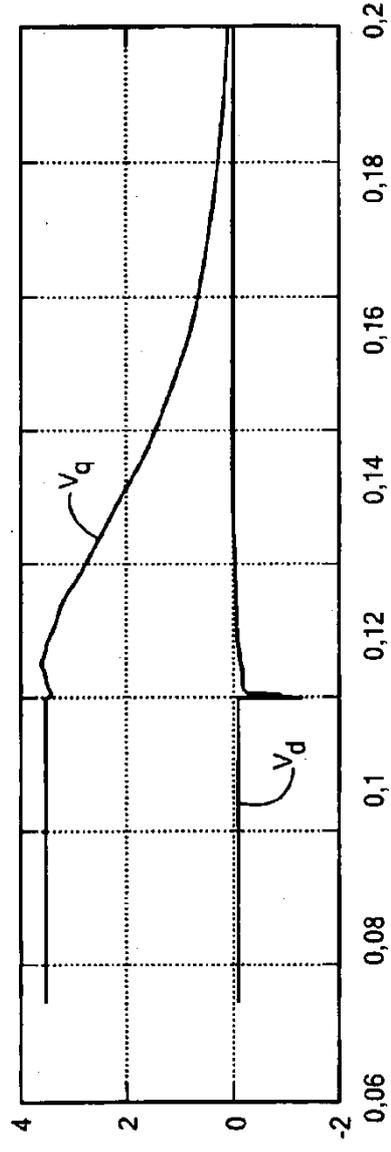


FIG. 13

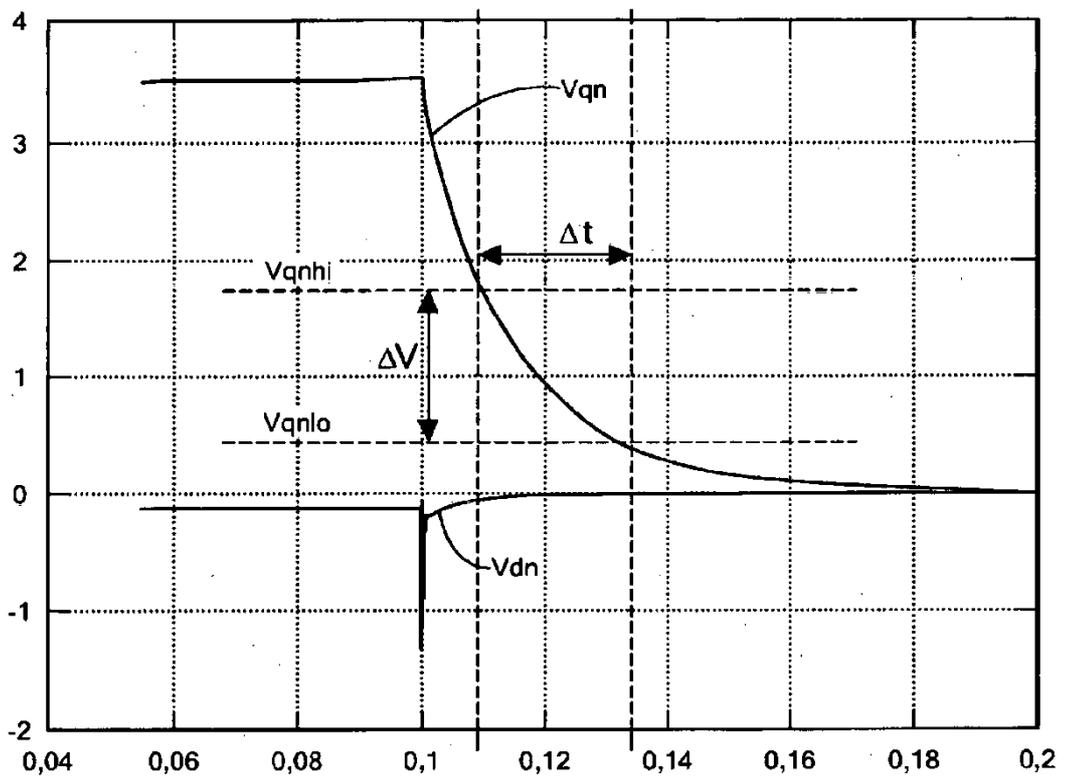


FIG. 14

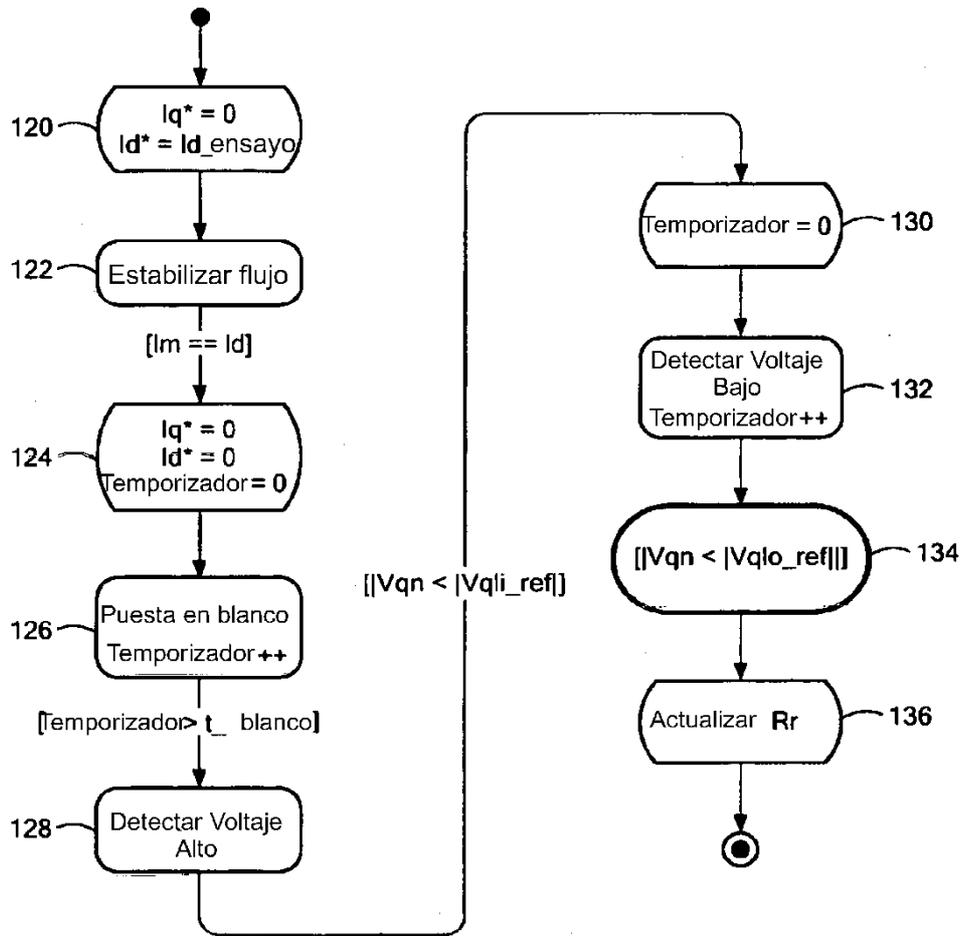


FIG. 15

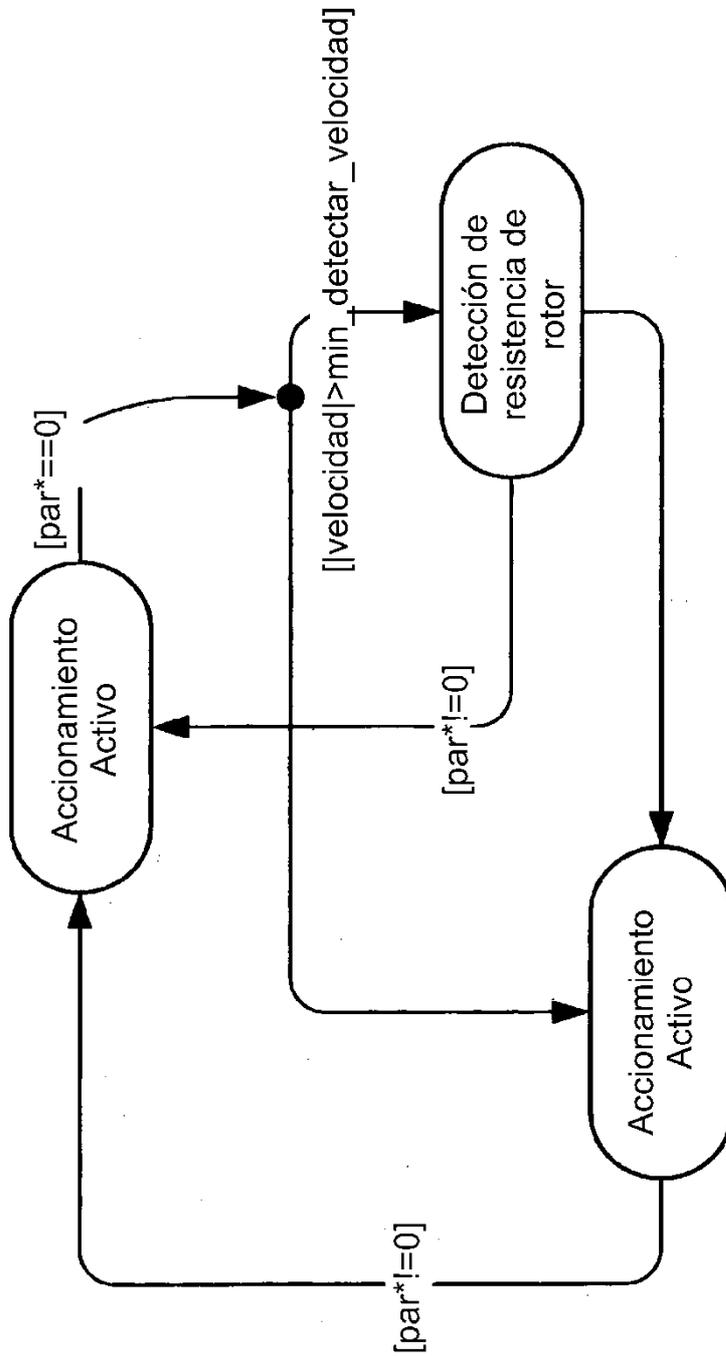


FIG. 16