

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 729 375**

51 Int. Cl.:

**H02P 27/06** (2006.01)

**H02P 6/08** (2006.01)

**H02P 21/00** (2006.01)

**H02P 27/04** (2006.01)

**H02P 21/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.03.2011 PCT/JP2011/057305**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.02.2012 WO12014526**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.03.2011 E 11812122 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.05.2019 EP 2600519**

54 Título: **Aparato de control para una máquina rotatoria en CA**

30 Prioridad:

**28.07.2010 JP 2010168782**

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

**04.11.2019**

73 Titular/es:

**MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION (100.0%)  
7-3 Marunouchi 2-Chome, hiyoda-ku  
Tokyo 100-8310, JP**

72 Inventor/es:

**KATO SHO;  
YAMASAKI HISANORI;  
HATANAKA KEITA;  
KITANAKA HIDETOSHI y  
YAMASHITA YOSHINORI**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 729 375 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**

Aparato de control para una máquina rotatoria en CA

**Campo técnico**

5 La presente invención se refiere a un aparato de control que controla el par de torsión de una máquina rotatoria en CA basada en una instrucción del par de torsión.

**Técnica anterior**

10 Se usa generalmente un aparato de control que convierte el voltaje en CC en un voltaje en CA mediante un convertidor de potencia y realiza el control de impulsión para una máquina rotatoria en CA. En general, con el fin de impulsar la máquina rotatoria en CA con una alta eficacia, tal aparato de control para una máquina rotatoria en CA controla el par de torsión controlando la corriente de la máquina rotatoria en CA de acuerdo con un control de PWM (Modulación de Anchura de Impulso) de onda sinusoidal basándose en el control vectorial.

15 Por otra parte, en el caso en que la máquina rotatoria en CA sea impulsada con una frecuencia relativamente alta, es necesario maximizar el voltaje de impulsión del motor eléctrico basándose en el voltaje en CC, y se emplea un método de impulsión usando un voltaje de onda cuadrada que tiene un valor de pico constante. En la impulsión de onda cuadrada el valor de pico de la forma de onda basada en el control de conmutación es constante, y el par de torsión ocasionado por el motor eléctrico puede ser operado operando la fase de la forma de onda del voltaje. Por ejemplo, en el caso de un motor eléctrico síncrono de imán permanente, el par de torsión puede ser operado operando la fase de la forma de onda del voltaje relativa a la posición del rotor.

20 No obstante, el par de torsión ocasionado por la máquina rotatoria en CA varía junto con la variación de los parámetros de la máquina rotatoria en CA (por ejemplo, en el caso de un motor eléctrico síncrono de imán permanente, los parámetros son el flujo magnético del imán permanente, la inductancia, y la resistencia de la armadura).

25 Por ejemplo, si la inductancia es reducida por la saturación magnética debida a la aplicación de la corriente a la máquina rotatoria en CA, o si la desmagnetización ocurre debido al aumento de la temperatura del imán por la generación de calor, se reduce el par de torsión de salida de la máquina rotatoria en CA.

30 Con el fin de hacer frente al anterior problema, se describe el siguiente aparato de control para una máquina rotatoria en CA. Esto es, el aparato de control para una máquina rotatoria en CA realiza el control del par de torsión para la máquina rotatoria en CA en una amplia zona de la velocidad de rotación desde cero hasta una velocidad alta mientras que apropiadamente se conmutan los métodos de impulsión antes descritos del convertidor de potencia (método de control de PWM de onda sinusoidal o método de impulsión de onda cuadrada) de acuerdo con el estado de operación de la máquina rotatoria en CA (típicamente, el voltaje inducido, el par de torsión, y la velocidad de rotación de la máquina rotatoria en CA), y realiza un control de retroalimentación mediante la estimación del par de torsión de salida de la máquina rotatoria en CA con el fin de suprimir la variación del par de torsión (por ejemplo, véase el Documento 1 de la Patente mostrado más adelante).

35 De acuerdo con el Documento 1 de la Patente, el método de control para la conversión del voltaje en el convertidor de potencia se fija selectivamente de acuerdo con el estado de operación de la máquina rotatoria en CA. Esto es, si el medio de selección del método de control selecciona un primer método de control para aplicar un voltaje de onda cuadrada a la máquina rotatoria en CA, el control del par de torsión es realizado por el control de retroalimentación que ajusta la fase del voltaje de onda cuadrada de acuerdo con la desviación desde un valor de instrucción del par de torsión en el control del par de torsión.

40 Además, si el medio de selección del método de control selecciona un segundo método de control para controlar el voltaje aplicado a la máquina rotatoria en CA de acuerdo con el método de modulación de la anchura del impulso usando el control vectorial, el control del par de torsión es realizado por un control de retroalimentación de la corriente de la máquina rotatoria en CA.

45 De este modo, cuando se selecciona el segundo método de control, el control de retroalimentación de la máquina rotatoria en CA se realiza incluyendo el mismo control de retroalimentación que en el primer método de control que se realiza de acuerdo con la desviación del par de torsión. Por lo tanto, se puede realizar un control de la corriente del motor para compensar la variación del par de torsión característico de la máquina rotatoria en CA que depende de la variación de la temperatura o similar.

50 Como resultado, es posible prevenir la ocurrencia de la variación del par de torsión debido a la variación de la temperatura del imán o similar sin especialmente proporcionar un sensor de temperatura o similar. Además, como los métodos de control primero y segundo realizan el control de retroalimentación de acuerdo con la desviación del par de torsión, es posible prevenir la ocurrencia de la desviación del par de torsión tras la conmutación entre los métodos de control.

El Documento 2 de la Patente describe unos dispositivos de control del motor y de los sistemas de impulsión del motor que pueden conseguir un control de debilitamiento del flujo satisfactorio cuando se realiza el control vectorial adoptando unos ejes de control que son diferentes de un eje d y un eje q.

5 El Documento 3 de la Patente describe un controlador vectorial para un motor eléctrico síncrono de imán permanente que puede realizar con una configuración simplificada un control estable del debilitamiento del campo de modo de un impulso en un intervalo de velocidad alta.

**Lista de citas**

Documento de la patente

Documento 1 de la Patente: Publicación de Patente abierta a la Inspección pública JP-A-2006-311.770

10 Documento 2 de la Patente: EP 1.940.016 A1

Documento 3 de la Patente: EP 2.075.906 A1

Compendio de la invención

**Problemas que resuelve la invención**

15 Como se ha descrito antes, un aparato de control convencional para una máquina rotatoria en CA estima un par de torsión a partir de la potencia de salida de un convertidor de potencia. No obstante, la potencia de salida del convertidor de potencia incluye la pérdida en el convertidor de potencia y la pérdida en el motor que no contribuyen al par de torsión.

20 Por lo tanto, un método de estimación del par de torsión a partir de la potencia de salida como en el aparato de control convencional incluye el error debido a estas pérdidas, por lo tanto es difícil controlar de forma precisa el par de torsión.

25 Entre las técnicas convencionales también se ha propuesto un método de estimación del par de torsión a partir de los parámetros de una máquina rotatoria en CA, como se describe en la Publicación de la Patente Japonesa abierta a la inspección pública JP-A-2002-233.199 (en adelante referida como Documento 2 de la Patente), por ejemplo. Sin embargo, es difícil realizar de forma precisa el control del par de torsión debido a que la variación de los parámetros influye en la estimación del par de torsión.

30 La presente invención ha sido realizada para resolver los anteriores problemas, y un objeto de la presente invención es, en un aparato de control para una máquina rotatoria en CA que realiza el control del par de torsión de la máquina rotatoria en CA sobre una zona de la velocidad de rotación amplia desde cero hasta una velocidad alta, incluso si los parámetros de la máquina rotatoria en CA varían como se ha descrito antes, controlar de forma precisa el par de torsión de la máquina rotatoria en CA y suprimir la ocurrencia de una variación del par de rotación debida a la variación de los parámetros de la máquina rotatoria en CA.

**Solución de los problemas**

35 De acuerdo con la invención, el problema se resuelve por medio de un aparato de control de una máquina rotatoria en CA definido en la reivindicación independiente 1. En las subreivindicaciones se exponen otros desarrollos ventajosos del aparato de control de acuerdo con la invención.

**Efecto de la invención**

40 De acuerdo con la presente invención, si los parámetros de la máquina rotatoria en CA han variado para causar una desviación de la instrucción del par de torsión de la sección de control, el observador estima el flujo magnético de la máquina rotatoria en CA, teniendo en cuenta el error, de modo que la variación del flujo magnético estimado refleje la variación de los parámetros.

45 Además, usando el valor estimado del flujo magnético estimado por el observador para la unidad de cálculo de instrucción de la corriente y la unidad de cálculo de la instrucción del voltaje, es posible calcular un valor óptimo de instrucción de la corriente y un valor óptimo de instrucción del voltaje teniendo en cuenta la variación del parámetro. Por lo tanto, es posible controlar de forma precisa el par de torsión y la corriente de la máquina rotatoria en CA incluso en un sistema de control que no use un sistema de control de la corriente de retroalimentación.

**Breve descripción de los dibujos**

Figura 1 es un diagrama de bloques de un aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 1 de la presente invención.

- Figura 2 es diagrama de bloques de una unidad de cálculo de instrucción de la corriente o del aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 1 de la presente invención.
- 5 Figura 3 es un diagrama de explicación del par de torsión y del estado de corriente mínima en el aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 1 de la presente invención.
- Figura 4 es un diagrama de bloques de una unidad de cálculo del aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 1 de la presente invención.
- 10 Figura 5 es un diagrama de bloques de un observador del aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 1 de la presente invención.
- Figura 6 es un diagrama que muestra la relación en el estado estacionario entre la unidad de cálculo de la instrucción del voltaje y el observador del aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 1 de la presente invención.
- 15 Figura 7 es un diagrama de bloques de un aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 2 de la presente invención.
- Figura 8 es un diagrama de bloques de una unidad de cálculo de la instrucción del voltaje del aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 2 de la presente invención.
- 20 Figura 9 es un diagrama de bloques de un aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 3 de la presente invención.
- Figura 10 es un diagrama de bloques de una unidad de cálculo de la corriente de debilitamiento del aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 3 de la presente invención.

**Descripción de las realizaciones**

25 Realización 1

La Figura 1 es un diagrama de bloques que muestra un aparato de control de una máquina rotativa en CA de acuerdo con la Realización 1 de la presente invención.

30 El aparato de control de una máquina rotatoria en CA de la Realización 1 incluye una sección de control 1, un convertidor de potencia 2, y una sección de detección 4 de la corriente. Un suministro de potencia en CC 6 está conectado al lado de entrada del convertidor de potencia 2, y una máquina rotatoria 3 en CA está conectada al lado de salida del convertidor de potencia 2.

Aquí, el anterior suministro de potencia en CC 6 no está limitado a una batería, sino que puede ser por ejemplo un convertidor que convierte la potencia en CA en potencia en CC, o unos cables aéreos en CC para recibir directamente una potencia en CC por medio de un pantógrafo de vehículos ferroviarios o similar.

35 Además, en la Realización 1 la máquina rotatoria 3 es un motor eléctrico síncrono que usa un imán permanente, y está conectado al convertidor de potencia 2 por medio de unas vías de alimentación trifásica en CA  $I_u$ ,  $I_v$ , e  $I_w$ .

El convertidor de potencia 2 es, por ejemplo, un convertidor de potencia trifásica de tipo de voltaje variable y de frecuencia variable, y convierte la potencia en CC procedente del suministro de potencia 6 en CC en una potencia en CA trifásica para suministrar la potencia en CA trifásica a la máquina rotatoria 3 en CA.

40 En este caso el convertidor de potencia 2 tiene unos circuitos de conversión trifásicos para las fases U, V, y W (no mostrados) conectados, en paralelo entre sí, al suministro de potencia 6 en CC. Como es bien conocido, cada circuito de conversión tiene un par de conmutadores en los lados positivo y negativo, y las vías de alimentación en CA  $I_u$ ,  $I_v$ , e  $I_w$  están conectadas entre los respectivos pares de conmutadores de los circuitos de conversión.

45 El convertidor de potencia 2 recibe unas instrucciones de voltaje  $V_u^*$ ,  $V_v^*$ , y  $V_w^*$  desde la sección de control 1, y cuando se convierte la potencia en CC en potencia en CA trifásica genera una potencia en CA trifásica que tiene el voltaje de salida controlado y controlada la frecuencia angular basándose en las instrucciones de voltaje  $V_u^*$ ,  $V_v^*$ , y  $V_w^*$ .

50 La sección 4 de detección de la corriente está dispuesta en, por ejemplo, las vías de alimentación en CA  $I_u$ ,  $I_v$ , e  $I_w$ , y detecta la corriente basándose en la corriente de fase en CA que fluye desde el convertidor de potencia 2 a la máquina rotatoria 3 en CA, esto es,  $i_u$  de la corriente de fase U,  $i_v$  de la corriente de fase V, e  $i_w$  de la corriente de

fase W. Se ha advertido que en la Realización 1 la sección 4 de detección de la corriente está prevista para dos fases de la corriente en CA.

Si las tres fases están en equilibrio, la otra fase puede ser calculada y la salida basándose en solamente señales para las dos fases usando la relación de  $i_u + i_v + i_w = 0$ .

5 La sección de control 1 realiza un control vectorial sin sensores de la máquina rotatoria 3 en CA, en la que el control vectorial puede ser realizado sin un sensor de la posición de rotación o un sensor de la velocidad de rotación. La sección de control 1 incluye una unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente, una unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje, unos convertidores 30 y 40 de coordenadas primeras y segundas, un observador 50, y un integrador 60.

10 Particularmente, una característica de la sección de control 1 de la Realización 1 es que el observador 50 estima y calcula el flujo magnético de la máquina rotatoria 3 en CA de modo que el flujo magnético estimado  $\varphi^{\wedge}$  sea usado para el cálculo por la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente y el cálculo y la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje. Los detalles de esto se describirán más adelante.

15 Aquí, primero, se describirá un ejemplo de la configuración de la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente con referencia a la Figura 2.

La unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente genera unas instrucciones de la corriente  $I_d^*$  e  $I_q^*$  a partir del par de torsión  $T^*$  que es un valor del objetivo de control. El valor  $T^*$  de la instrucción del par de torsión es introducido en una sección 11 de cálculo de instrucción de la corriente en el eje d para generar un primer valor  $I_d^*$  de instrucción de la corriente en el eje d.

20 Como un método de cálculo para el primer valor  $I_d1^*$  de instrucción de la corriente en el eje d, se conoce un método de control del par de torsión máximo el cual permite que la máquina rotatoria 3 en CA genere un par de torsión deseado con la corriente mínima, y que obtenga un primer valor  $I_d1^*$  óptimo de instrucción de la corriente en el eje d por una expresión de cálculo, basándose en el valor  $T^*$  de la instrucción del par de torsión (por ejemplo, véanse las páginas 23-24 de Yoji Takeda y otros, "Diseño y control de un motor síncrono con un imán incrustado", Ohmsha, publicado el 25 de Octubre de 2001, el cual en adelante es referido como Documento 1 no de la Patente).

25 De acuerdo con el Documento 1 no de la Patente, el anterior método es referido como control del par de torsión máximo / amperios. Aunque la sección 11 de cálculo de instrucción de la corriente en el eje d puede ser configurada basándose en una técnica conocida, la variación del parámetro de una máquina rotatoria en CA no está descrita en ella. Por lo tanto, si varían los parámetros de la máquina rotatoria en CA, el control del par de torsión máximo / amperios no puede ser realizado de una forma precisa.

30 En consecuencia, en la Realización 1 el valor del flujo magnético estimado  $\varphi^{\wedge}$  (particularmente, aquí, un valor  $p^{\wedge}dr$  estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor) de la máquina rotatoria 3 en CA estimado por el observador 50 descrito más adelante se usa en una expresión de cálculo para obtener el primer valor  $I_d1^*$  de instrucción de la corriente en el eje d basándose en el valor  $T^*$  de la instrucción del par de torsión. La influencia de la variación del parámetro está reflejada en el valor  $\varphi^{\wedge}$  estimado del flujo magnético.

35 Por lo tanto, usando el valor  $\varphi^{\wedge}$  estimado del flujo magnético, incluso si varían los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA, pueden ser obtenidos los valores óptimos de instrucción de la corriente  $I_d^*$  e  $I_q^*$ , por lo que el control máximo par de torsión / amperios puede ser realizado.

40 Específicamente, el primer valor  $I_d1^*$  de instrucción de la corriente en el eje d se calcula mediante una expresión de cálculo mostrada por la siguiente Expresión (1). Una característica de la Expresión (1) es que un término que originalmente corresponde a un flujo magnético  $\varphi_a$  (Wb) del imán permanente en la técnica convencional conocida es sustituido por el valor  $\varphi^{\wedge}(p^{\wedge}dr)$  estimado del flujo magnético de la máquina rotatoria 3 en CA estimado por el observador 50. Se ha advertido que los detalles del proceso de derivación para la expresión de cálculo mostrados por la Expresión (1) se describirán más adelante.

45 Expresión 1

$$I_d1^* = \frac{-\{(aP \hat{p}dr) + bP(Ld^* - Lq^*)\} \pm \sqrt{\{(aP \hat{p}dr) + bP(Ld^* - Lq^*)\}^2 - 4\{aP(Ld^* - Lq^*)\}\{bP \hat{p}dr - T^*\}}}{2\{aP(Ld^* - Lq^*)\}} \quad (1)$$

Aquí,  $I_d1^*$  es el primer valor (A) de instrucción de la corriente en el eje d,  $Ld^*$  es un valor (H) fijado de la inductancia en el eje d,  $Lq^*$  es un valor (H) fijado de la inductancia en el eje q, P es un número de pares de polos, a es una

pendiente de una curva de control par de torsión máximo / amperios, y b es una ordenada en el origen de una curva de control par de torsión máximo / amperios.

5 Se ha observado que la sección 11 de cálculo de instrucción de la corriente en el eje d puede también emplear un método de obtención de un primer valor óptimo  $I_{d1}^*$  de instrucción de la corriente con referencia a un mapa basándose en el valor  $T^*$  de la instrucción del par de torsión. No obstante, en el método que usa un mapa es necesario preparar un mapa que incluya todos los valores del flujo magnético estimados correspondientes a la variación del parámetro, y por lo tanto este método es difícil de aplicar.

10 Cuando el primer valor óptimo  $I_{d1}^*$  de instrucción de la corriente en el eje d ha sido generado, a continuación el sumador 12 suma un valor  $dV$  de instrucción del debilitamiento de la corriente al valor  $I_{d1}^*$  de instrucción de la corriente en el eje d, obteniendo así un valor  $I_d^*$  final de instrucción de la corriente en el eje d. Específicamente, el valor  $I_d^*$  de instrucción de la corriente en el eje d es calculado por la Expresión (2).

Expresión 2

$$I_d^* = I_{d1}^* + dV \quad (2)$$

15 Aquí, el valor  $dV$  de instrucción del debilitamiento de la corriente es cero o un valor negativo, y es provisto con el fin de realizar un denominado control de debilitamiento del flujo magnético, el cual corrige el primer valor  $I_{d1}^*$  de instrucción de la corriente en el eje d en la dirección negativa para aumentar el valor  $I_d^*$  de instrucción de la corriente en el eje d en la dirección negativa, generando de este modo un flujo magnético en una dirección para anular el flujo magnético generado por el imán permanente de la máquina rotatoria 3 en CA, debilitando así el flujo magnético de entrelazamiento de la máquina rotatoria 3 en CA.

20 Además, en el caso en el que el control del par de torsión se realice en una zona en la que la máquina rotatoria 3 en CA rota a una velocidad alta y se realice el control de debilitamiento del flujo magnético, es extremadamente importante fijar la posición para añadir el valor  $dV$  de instrucción del debilitamiento de la corriente, como se muestra en la configuración de la Realización 1. Se ha advertido que un método de generación del valor  $dV$  de instrucción del debilitamiento de la corriente puede ser configurado basándose en una técnica conocida. Por lo tanto, aquí se omite su descripción detallada.

25 Finalmente, la sección 13 de cálculo de instrucción de la corriente en el eje q genera el valor  $I_q^*$  de instrucción de la corriente en el eje q a partir del valor  $I_d^*$  de instrucción de la corriente en el eje d y el valor  $T^*$  de la instrucción del par de torsión.

30 Como un método de generación del valor  $I_q^*$  de instrucción de la corriente en el eje q se puede obtener un valor óptimo  $I_q^*$  de instrucción de la corriente en el eje q con referencia a un mapa, o se puede obtener un valor óptimo  $I_q^*$  de instrucción de la corriente en el eje q usando una expresión de cálculo, como se ha descrito antes. No obstante, el método de referencia a un mapa tiene el problema de que es difícil preparar un mapa que cubra completamente la variación de los parámetros.

35 En consecuencia, la Realización 1 emplea un método basado en una expresión de cálculo mostrada por la siguiente Expresión (3) que usa el flujo magnético estimado  $\phi^{\wedge}(p^{\wedge}dr)$  de la máquina rotatoria 3 en CA estimado por el observador 50.

40 También en la Expresión (3) un término que originalmente corresponde al flujo magnético  $\phi_a(Wb)$  es sustituido por el valor estimado del flujo magnético  $\phi^{\wedge}(p^{\wedge}dr)$ , similarmente a la Expresión (1). Usando el valor estimado del flujo magnético  $\phi^{\wedge}$ , incluso si varían los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA, un valor óptimo  $I_q^*$  de instrucción de la corriente en el eje q puede ser calculado teniendo en cuenta la variación del parámetro.

Expresión 3

$$I_q^* = \frac{T^*}{P \{ \hat{p}dr + (L_d^* - L_q^*) I_d^* \}} \quad (3)$$

45 Debido a la configuración de la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente antes descrita, incluso si varían los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA, la influencia de la variación del parámetro se refleja en el valor estimado del flujo magnético  $\phi^{\wedge}(p^{\wedge}dr$ : el valor estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor) de la máquina rotatoria 3 en CA estimado por el observador 50.

Por lo tanto, un valor óptimo  $I_d^*$  de instrucción de la corriente en el eje d puede ser generado por el control del par de torsión máximo / amperios, y además, el valor  $I_q^*$  de instrucción de la corriente en el eje q puede ser generado teniendo en cuenta la variación del parámetro, basándose en la instrucción  $T^*$  del par de torsión. Por lo tanto, es posible controlar de forma precisa el par de torsión incluso si los parámetros varían.

- 5 A continuación se describe el procedimiento para obtener las Expresiones (1) y (3) previamente descritas para realizar el control del par de torsión máximo / amperios.

En la siguiente Expresión (4) se muestra el estado para realizar el control del par de torsión máximo / amperios (véase el Documento 1 no de la Patente antes mencionado).

Expresión 4

$$10 \quad i_d = \frac{\phi a}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\phi a^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (4)$$

Aquí,  $L_d$  es una inductancia (H) en el eje d,  $L_q$  es una inductancia (H) en el eje q,  $\phi a$  es un flujo magnético (Wb) del imán permanente,  $i_d$  es una corriente (A) en el eje d, e  $i_q$  es una corriente (A) en el eje q.

Además, el par de torsión está dado por la siguiente Expresión (5).

Expresión (5)

$$15 \quad T = P \{ \phi a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (5)$$

La Expresión (5) es deformada por  $i_q$  para obtener la siguiente Expresión (6).

Expresión 6

$$i_q = \frac{T}{P \{ \phi a + (L_d - L_q) i_d \}} \quad (6)$$

- 20 Si simultáneamente las ecuaciones compuestas por las Expresiones (4) y (6) son resueltas para  $i_d$  e  $i_q$ , se pueden obtener los vectores de la corriente  $i_d$  e  $i_q$  que permiten que el par de torsión sea generado con la corriente mínima relativa al par de torsión  $T$ . No obstante, actualmente, como las ecuaciones simultáneas compuestas por las Expresiones (4) y (6) serán una ecuación de cuarto grado, son difíciles de resolver. En consecuencia, la aproximación se realiza como se muestra a continuación.

La Figura 3 es un gráfico de las Expresiones (4) y (6).

- 25 En la Figura 3 las curvas que se extienden desde el lado superior derecho al lado inferior izquierdo son unas curvas representadas por la Expresión (6) y cada una corresponde al par de torsión  $T = 100\%$  a  $25\%$ . Además, una curva (línea continua) que se extiende desde el lado superior izquierdo al lado inferior derecho es una curva representada por la Expresión (4) y que corresponde al estado de corriente mínima.

- 30 Como se muestra por la curva de la Expresión (4), el estado de corriente mínima es aproximadamente una línea recta aunque representada por una expresión cuadrática. Por lo tanto, se ha considerado que no hay un problema práctico si el estado de corriente mínima es aproximado por una función lineal.

En consecuencia, la curva del estado de corriente mínima mostrado en la Figura 3 es linealmente aproximada para obtener la siguiente expresión (7). En la Figura 3 el resultado de aproximar linealmente la curva cuadrática de la Expresión (4) está indicado por una línea de trazos.

- 35 Expresión 7

$$i_q = a i_d + b \quad (7)$$

Aquí, en la Expresión (7) mostrada en la Figura 3,  $a$  es una pendiente de la función lineal, y  $b$  es una ordenada en el origen de la función lineal. Por lo tanto, pueden ser obtenidos  $i_d$  e  $i_q$  en la intersección de la curva del par de torsión

y del estado de corriente mínima aproximado linealmente resolviendo simultáneamente las ecuaciones compuestas de las anteriores Expresiones (6) y (7). Como estas ecuaciones simultáneas se convertirán en una ecuación cuadrática, son fáciles de resolver. En consecuencia, las Expresiones (6) y (7) son coordinadas para obtener la siguiente Expresión (8).

5 Expresión 8

$$\{aP(Ld - Lq)\}id^2 + \{(aP \phi a) + bP(Ld - Lq)\}id + bP \phi a - T = 0 \quad (8)$$

A partir de la Expresión (8), id se obtiene como se muestra en la siguiente Expresión (9).

Expresión 9

$$id = \frac{-\{(aP \phi a) + bP(Ld - Lq)\} \pm \sqrt{\{(aP \phi a) + bP(Ld - Lq)\}^2 - 4\{aP(Ld - Lq)\}(bP \phi a - T)}}{2\{aP(Ld - Lq)\}} \quad (9)$$

10 De este modo se puede obtener id. Además, iq puede obtenerse sustituyendo el resultado de id obtenido por la Expresión (9) en la anterior Expresión (6).

En la anterior descripción la Expresión (4) que representa la curva (línea continua) del estado de corriente mínima es linealmente aproximada, para ser representada por la Expresión (7). No obstante, en algunos casos puede ser difícil aproximar linealmente la curva del estado de corriente mínima representado por la Expresión (4).

15 En tal caso, la pendiente a y la ordenada b en el origen que corresponden a cada par de torsión son obtenidas por adelantado, y a continuación la pendiente a y la ordenada b en el origen como valores de tabla son referidas a las basadas en el valor T\* de la instrucción del par de torsión, por lo que puede ser realizado el control del par de torsión máximo / amperios.

20 Como se ha descrito previamente, incluso si un valor fijado de cada parámetro del motor de la máquina rotatoria 3 en CA es diferente del valor actual del parámetro, basándose en las Expresiones (6) y (9), la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente realiza el cálculo usando el valor estimado del flujo magnético  $\phi^{\wedge}(p^{\wedge}dr$ : el valor estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor) de la máquina rotatoria 3 en CA estimado por el observador 50, en lugar de un término del flujo magnético  $\phi a(Wb)$  del imán permanente en las Expresiones (6) y (9), generando de este modo una instrucción de la corriente óptima teniendo en cuenta la variación del parámetro basándose en la instrucción T\* del par de torsión.

25 Esto es, con el fin de realizar tal operación, la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente realiza el cálculo usando la Expresión (1) obtenida deformando la Expresión (9) y la Expresión (3) obtenida deformando la Expresión (6) (aquí, id = Id\*, e iq = Iq\* están fijados). La teoría detallada de esto se describirá más adelante.

30 En la anterior descripción de la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente, se ha descrito el método de generación de una instrucción de la corriente por el control del par de torsión máximo / amperios. No obstante, el control que usa la instrucción de la corriente en el eje d Id\* = 0 también obtiene el mismo efecto.

A continuación, se describe con referencia a la Figura 4 la configuración de la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje.

35 La unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje calcula un valor Vd\* de instrucción del voltaje en el eje d y un valor Vq\* de instrucción del voltaje en el eje q, basándose en la siguiente Expresión (10), usando las instrucciones Id\* e Iq\* de la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente, y el valor  $\phi^{\wedge}(p^{\wedge}dr$ : el valor estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor) y un valor estimado  $\omega^{\wedge}$  de la velocidad angular de la máquina rotatoria 3 en CA estimado por el observador 50.

40 Particularmente, la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje calcula las instrucciones del voltaje usando el valor  $\phi^{\wedge}(p^{\wedge}dr)$  en la Expresión (10) en lugar de un término del flujo magnético de imán permanente  $\phi a(Wb)$ . De este modo, incluso si varían los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA, la corriente de la máquina rotatoria en CA puede ser hecha coincidir con un valor de instrucción. Más adelante se describe la teoría detallada de esto.

Expresión 10

$$\begin{bmatrix} Vd^* \\ Vq^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^* & -\hat{\omega} Lq^* \\ \hat{\omega} Ld^* & R^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Id^* \\ Iq^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\omega} \hat{p}dr \end{bmatrix} \quad (10)$$

Aquí,  $I_d^*$  es una instrucción de la corriente en el eje d,  $I_q^*$  es una instrucción de la corriente en el eje q,  $V_d^*$  y  $V_q^*$  son instrucciones del voltaje del componente en el eje d-q para el voltaje de la armadura,  $R^*$  es un valor fijado de la resistencia de la armadura,  $L_d^*$  y  $L_q^*$  son valores fijados de la inductancia en el eje d y en el eje q,  $\hat{\omega}$  es un valor de la velocidad angular estimado por el observador 50, y  $\hat{p}dr$  es un valor estimado del flujo magnético por el observador 50.

A continuación se describen las configuraciones del integrador 60 y de los convertidores primero y segundo 30 y 40 de las coordenadas.

El integrador 60 calcula una fase estimada  $\hat{\theta}$  a partir del valor  $\hat{\omega}$  estimado de la velocidad salido del observador 50. El primer convertidor 30 de coordenadas convierte las instrucciones del voltaje en un sistema de coordenadas rotacional de dos ejes d-q en los valores de instrucción del voltaje en CA trifásico  $V_u^*$ ,  $V_v^*$ , y  $V_w^*$  en un sistema de coordenadas de dos ejes en reposo, basándose en las instrucciones del voltaje  $V_d^*$  y  $V_q^*$  a partir de la unidad 20 de cálculo de las instrucciones del voltaje, y la fase estimada  $\hat{\theta}$  calculada por el integrador 60, y genera los valores  $V_u^*$ ,  $V_v^*$ , y  $V_w^*$  de la instrucción del voltaje en CA trifásico.

Los valores  $V_u^*$ ,  $V_v^*$ , y  $V_w^*$  de la instrucción del voltaje en CA trifásico son introducidos en el convertidor de potencia 2 para realizar el control del par de torsión de la máquina rotatoria 3 en CA basándose en los  $V_u^*$ ,  $V_v^*$ , y  $V_w^*$  de la instrucción del voltaje en CA trifásico. El segundo convertidor 40 de coordenadas convierte las corrientes en CA trifásicas  $i_u$  e  $i_w$  en un sistema de coordenadas en reposo que fluye en las vías de alimentación en CA  $i_d$  e  $i_q$  detectadas por la sección 4 de detección de la corriente, en los valores de la corriente  $i_d$  e  $i_q$  en un sistema de coordenadas rotacional de dos ejes d-q, basándose en la fase  $\hat{\theta}$  estimada calculada por el integrador 60, y genera los valores de la corriente  $i_d$  e  $i_q$ .

A continuación se describe la configuración del observador 50 con referencia a la Figura 5.

El observador 50 estima y calcula el valor  $\hat{\omega}$  estimado de la velocidad angular y el flujo magnético estimado  $\hat{\varphi}^*(\hat{p}dr$ : el valor estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor) de la máquina rotatoria 3 en CA necesario para un control vectorial sin sensores, basándose en los valores  $V_d^*$  y  $V_q^*$  de la instrucción del voltaje calculados por la unidad 20 de cálculo de las instrucciones del voltaje, y las corrientes detectadas  $i_d$  e  $i_q$  de la máquina rotatoria 3 en un sistema de coordenadas rotacional de dos ejes d-q calculadas por el segundo convertidor 40 de coordenadas.

Se ha observado que la configuración del observador 50 mostrada en la Figura 5 es una técnica conocida (por ejemplo, descrita en el Documento 2 de la Patente antes mencionado). Las siguientes Expresiones (11) a (17) muestran las expresiones de cálculo del observador.

Expresión 11

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{p}ds \\ \hat{p}qs \\ \hat{p}dr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R^*/Ldob & \hat{\omega} & 0 \\ -\hat{\omega} & -R^*/Lqob & -\hat{\omega}r \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{p}ds \\ \hat{p}qs \\ \hat{p}dr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Vd^* \\ Vq^* \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \hat{i}d \\ \hat{i}q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/Ldob & 0 & 0 \\ 0 & 1/Lqob & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{p}ds \\ \hat{p}qs \\ \hat{p}dr \end{pmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

Expresión 12

$$\begin{cases} eds = \hat{i}d - Id \\ eqs = \hat{i}q - Iq \end{cases} \quad (12)$$

Expresión 13

$$H = \begin{bmatrix} h11 & h12 \\ h21 & h22 \\ h31 & h32 \\ h41 & h42 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h11 & h12 \\ h21 & h22 \\ h31 & h32 \\ h41 & h42 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} eds \\ eqs \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h11eds+h12eqs \\ h21eds+h22eqs \\ h31eds+h32eqs \\ h41eds+h42eqs \end{bmatrix} \quad (14)$$

Expresión 14

$$\hat{\omega}r = \left( Kp + \frac{Ki}{s} \right) \frac{eqs}{\hat{p}dr} \quad (15)$$

$$\hat{\omega}r = \frac{1}{s} \hat{\omega}r \quad (16)$$

$$\hat{\omega} = \hat{\omega} - \frac{D}{\hat{p}dr} \quad (17)$$

5 Aquí, en cada expresión un sufijo \* significa un valor de instrucción, un sufijo ob significa un valor fijado del observador 50, un sufijo r significa un rotor, un sufijo s significa un estator, y un sufijo ^ significa un valor estimado.

Se ha observado que Ldob y Lqob son unos valores fijados de las inductancias en el eje d-q del observador 50, R\* es el valor fijado de la resistencia de la armadura,  $\omega^\wedge$  es el valor estimado de la velocidad angular, Vd\* y Vq\* son los valores de la instrucción del voltaje en el eje d-q, Id e Iq son los valores de la corriente en el eje d-q, p^ads y p^aqs son los valores estimados del flujo magnético en el eje d-q del lado primario, p^adr es el valor estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor (lado secundario),  $\omega_r$  es la velocidad angular del rotor,  $\omega^\wedge_r$  es un valor estimado de la velocidad angular del rotor, h11, h12, h21, h22, h31, h32, h41, y h42 son las ganancias de retroalimentación del observador 50, y Kp y Ki son una ganancia proporcional estimada de la aceleración y una ganancia integral estimada de la aceleración del observador 50.

15 Como se muestra en la Figura 5, el observador 50 está compuesto aproximadamente por tres elementos de una sección 51 del modelo de motor eléctrico, una sección 52 de estimación de la velocidad, y una sección 53 de cálculo de la ganancia.

La sección 51 del modelo de motor eléctrico realiza el cálculo de la Expresión (11) que generalmente se obtiene a partir de una ecuación de estado de la máquina rotatoria 3 en CA. De este modo se estima y calcula cada flujo magnético y cada corriente de la máquina rotatoria 3 en CA. La Expresión (11) es una expresión de cálculo para el caso en el que la máquina rotatoria 3 en CA sea un motor eléctrico síncrono de imán permanente.

Fijando la expresión de cálculo de la sección 51 del modelo de motor eléctrico de acuerdo con la máquina rotatoria 3 en CA para ser impulsada, es también posible aplicar la presente invención a una máquina rotatoria en CA distinta de un motor eléctrico síncrono de imán permanente.

25 La sección 52 de estimación de la velocidad recibe: el resultado del cálculo por la Expresión (12) de las desviaciones entre las corrientes estimadas I^ad e I^aq estimadas por la sección 51 del modelo de motor eléctrico y las corrientes Id e Iq de la máquina rotatoria 3 en CA en un sistema de coordenadas rotacional de dos ejes d-q calculado por el segundo convertidor 40 de coordenadas; y el valor  $\varphi^\wedge$  estimado del flujo magnético  $\varphi^\wedge(p^\wedge dr$ : el valor estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor) estimado por la sección 51 del modelo de motor eléctrico.

A continuación, basándose en los valores recibidos, la sección 52 de estimación de la velocidad calcula el valor  $\omega^*$  de la velocidad angular de la máquina rotatoria 3 en CA a través del cálculo de PI (integral proporcional) por la Ecuación (15) para el cálculo por la Ecuación (17).

5 Esto es, una sección 52a de cálculo de PI realiza el cálculo por la Ecuación (15) para obtener el resultado, una sección 52b transformada de Laplace realiza el cálculo por la Ecuación (16) para obtener el resultado, y una sección 52c de cálculo de la velocidad estimada realiza el cálculo por la Ecuación (17) para obtener el resultado.

10 La sección 53 de cálculo de la ganancia recibe las desviaciones de la corriente estimadas  $i_{ds}$  y  $i_{qs}$  de la Expresión (12), y calcula A, B, C, y D que son términos de retroalimentación del observador, a partir de las Ecuaciones (13) y (14). Aquí, H en la Ecuación (13) es una ganancia de retroalimentación, esto es, un parámetro de diseño para realizar un cálculo estable.

En la Realización 1, usando la configuración antes descrita, es posible controlar de forma precisa el par de torsión generado por la máquina rotatoria 3 en CA incluso si varían los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA.

15 A continuación se describe el control del par de torsión realizado cuando varían los parámetros, que es una característica de la presente invención, usando unas expresiones matemáticas, en comparación con un método convencional.

20 Aquí el método convencional es un método para dar el valor  $\varphi^*$  de la instrucción del flujo magnético como un valor constante en la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente y en la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje. Por lo tanto, en el método convencional, como se muestra por las Expresiones (4) y (6), como se calcula una instrucción de la corriente óptima usando los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA, no se puede obtener una instrucción de la corriente óptima si varían los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA.

Además, también en la siguiente Ecuación (18), o la Expresión (15), como una instrucción del voltaje óptimo se calcula usando los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA, una desviación de la corriente es a la izquierda si varían los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA. Como resultado, el par de torsión no puede ser controlado de una forma precisa.

25 Primero, se describe el efecto obtenido usando el valor estimado del flujo magnético  $\varphi^*(p^*dr)$  del observador 50 para la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje en la presente invención.

30 El procedimiento de la descripción es como sigue. Primero, basándose en la relación de la operación en el estado estacionario entre la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje y el observador 50 en el método de control convencional, se muestra una expresión relacional de un factor de error entre un valor de instrucción de la corriente y la corriente actual que fluye en la máquina rotatoria en CA en el caso en que los parámetros varíen usando unas expresiones matemáticas, a partir de una expresión de cálculo de la unidad de cálculo de la instrucción del voltaje convencional y de una expresión de cálculo del observador en el estado estacionario.

35 A continuación, se obtendrá una expresión relacional mostrada por la Ecuación (25), o Expresión (22), descrita más tarde. Además, a partir de la expresión relacional mostrada por la Ecuación (25), se mostrará que si se aplica el método de control de la presente invención, un valor de instrucción de la corriente y de la corriente actual que fluye en la máquina rotatoria 3 en CA coinciden uno con otro.

40 La siguiente Ecuación (18), o la Expresión (15), muestra una expresión de cálculo de la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje convencional. La diferencia con la Expresión (10) previamente descrita es que el valor  $\varphi^*$  de la instrucción del flujo se usa en la Ecuación (18) mientras que el valor  $p^*dr$  estimado del flujo magnético en el eje d del lado del rotor se usa en cambio en la Expresión (10). Además, la Ecuación (19) muestra una expresión de cálculo del observador 50, la cual es obtenida sustituyendo la Ecuación (14) en la Expresión (11).

Expresión 15

$$\begin{cases} Vd^* = R^* Id^* - \hat{\omega} Lq^* Iq^* \\ Vq^* = R^* Iq^* + \hat{\omega} (La^* Id^* + \phi^*) \end{cases} \quad (18)$$

45 Expresión 16

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{p}ds \\ \hat{p}qs \\ \hat{p}dr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R^*/Ldob & \hat{\omega} & 0 \\ -\hat{\omega} & -R^*/Lqob & -\hat{\omega}r \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{p}ds \\ \hat{p}qs \\ \hat{p}dr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Vd^* \\ Vq^* \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} h11 & h12 \\ h21 & h22 \\ h31 & h32 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}d - Id \\ \hat{I}q - Iq \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \hat{I}d \\ \hat{I}q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/Ldob & 0 & 0 \\ 0 & 1/Lqob & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{p}ds \\ \hat{p}qs \\ \hat{p}dr \end{pmatrix} \end{cases} \quad (19)$$

Aquí, en las anteriores expresiones, un sufijo \* significa un valor de instrucción, un sufijo ob significa un valor fijado del observador, y un sufijo ^ significa un valor estimado. A partir de las Ecuaciones (18) y (19), o las Expresiones (15) y (16), si se supone que la velocidad está en la zona de una velocidad suficientemente alta y se fija  $R^* = 0$ , y si se supone el estado estacionario, se obtiene  $d/dt = 0$ ,  $\omega^{\wedge} = \omega^{\wedge}r$ ,  $I^{\wedge}d - Id = 0$ , e  $I^{\wedge}q - Iq = 0$ . Por lo tanto, estas condiciones son sustituidas en las Ecuaciones (18) y (19) para obtener las Ecuaciones (20) y (21), o las Expresiones (17) y (18):

Expresión 17

$$\begin{cases} Vd^* = -\hat{\omega}Lq^* Iq^* \\ Vq^* = \hat{\omega}(La^* Id^* + \phi^*) \end{cases} \quad (20)$$

Expresión 18

$$\begin{cases} 0 = \hat{\omega} \hat{p}qs + Vd^* \\ 0 = -\hat{\omega} \hat{p}ds - \hat{\omega} \hat{p}dr + Vq^* \end{cases} \quad (21)$$

La Ecuación (21) está coordinada para los valores  $p^{\wedge}ds$  y  $p^{\wedge}qs$  estimados del flujo magnético en el eje d-q en el lado primario para obtener la Ecuación (22).

Expresión 19

$$\begin{cases} \hat{p}ds = Vq^* / \hat{\omega} - \hat{p}dr \\ \hat{p}qs = -Vd^* / \hat{\omega} \end{cases} \quad (22)$$

A partir de la Ecuación (22) los valores  $I^{\wedge}d$  e  $I^{\wedge}q$  estimados son obtenidos como se muestra en la Ecuación (23), o la Expresión (20). Estos valores estimados de la corriente coinciden con las corrientes actuales  $Id$  e  $Iq$ , de modo que el observador 50 converge en el estado estacionario.

Expresión 20

$$\begin{cases} \hat{I}d = \hat{p}ds / Ldob = \frac{1}{Ldob} (Vq^* / \omega - \hat{p}dr) = Id \\ \hat{I}q = \hat{p}qs / Lqob = -\frac{Vd^*}{\omega Lqob} = Iq \end{cases} \quad (23)$$

Las expresiones relacionales antes descritas pueden ser representadas por un diagrama de bloques del observador 50 en el estado estacionario como está mostrado en la Figura 6. Aquí, si los valores de la instrucción del voltaje son generados por la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje sin realizar un control de retroalimentación de la corriente de la máquina rotatoria 3 en CA, los valores de la instrucción del voltaje que están representados por la Ecuación (20) son sustituidos en la Ecuación (23) para obtener la Ecuación (24) o la Expresión (21).

Expresión 21

$$\begin{cases} \hat{I}_d = \frac{1}{L_{dob}} ((L_d^* I_d^* + \phi^*) - \hat{p}^{dr}) = I_d \\ \hat{I}_q = -\frac{L_q^*}{L_{qob}} I_q^* = I_q \end{cases} \quad (24)$$

La Ecuación (24) representa la relación entre las instrucciones  $I_d^*$  e  $I_q^*$  de la corriente y las corrientes actuales  $I_d$  e  $I_q$  en el caso de usar la configuración mostrada en la Figura 6. Aquí, si la fijación de la inductancia es supuesta como  $L_d^* = L_{dob}$  y  $L_q^* = L_{qob}$ , se obtiene la Ecuación (25) o Expresión (22).

5 Expresión 22

$$\begin{cases} \hat{I}_d = I_d^* + \frac{\phi^* - \hat{p}^{dr}}{L_d^*} = I_d \\ \hat{I}_q = I_q^* = I_q \end{cases} \quad (25)$$

A partir de la Ecuación (25) se ha encontrado que la corriente en el eje q y el valor de instrucción coinciden entre sí. Esto muestra que, incluso si varían los parámetros ( $L_d \neq L_d^*$ ,  $L_q \neq L_q^*$ ,  $\phi_a \neq \phi^*$ ), la corriente en el eje q coincide con un valor de instrucción fijando  $L_d^* = L_{dob}$  y  $L_q^* = L_{qob}$ .

10 Además, si varían los parámetros, tales errores (error de  $L_d$ , error de  $L_q$ , y error de  $\phi$ ) todos parecen como un error de la corriente en el eje d. Por lo tanto, configurando un sistema de control para eliminar el error de la corriente en el eje d, la corriente puede ser controlada sin realizar un control de retroalimentación de la corriente.

15 Esto es, la ocurrencia de la desviación de la corriente puede ser impedida incluso si varían los parámetros. Además, a partir de la Ecuación (25) de la corriente en el eje d se ha encontrado que, si se ha fijado  $\phi^* - \hat{p}^{dr} = 0$ , el control puede ser realizado sin causar el error de la corriente en el eje d.

La presente invención se consigue por la teoría anterior, y puede causar que el error de la corriente en el eje d sea cero usando el valor estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor estimado por el observador 50 en lugar de  $\phi^*$  ( $\phi^* = \hat{p}^{dr}$ ) de la Ecuación (20) que es una expresión del cálculo del voltaje de desacoplamiento, que de este modo controla la corriente en el eje d.

20 A continuación se describe el efecto obtenido usando el valor estimado  $\hat{p}^{dr}$  del flujo magnético del observador 50 para la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente en la presente invención.

25 El procedimiento de la descripción es como sigue. Primero, el valor que alcanzará el valor  $\hat{p}^{dr}$  estimado del flujo magnético estimado por el observador 50 si los parámetros varían, será obtenido a partir de una ecuación de estado de la máquina rotatoria 3 en CA y una expresión de cálculo del observador 50, como se muestra mediante la siguiente Ecuación (29) o la Expresión (26).

30 Además, en el método de control convencional la relación del error del par de torsión en el caso en que los parámetros varían se obtendrá a partir de una expresión de cálculo del par de torsión de la máquina rotatoria 3 en CA y una expresión de cálculo de instrucción de la corriente en el eje q de la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente, como se muestra por la Ecuación (30) o la Expresión (27), que es una expresión relacional del error del par de torsión.

Además, a partir de la expresión relacional del error del par de torsión, se muestra que si se aplica la presente invención, el control del par de torsión de la máquina rotatoria 3 en CA puede ser realizado sin causar un error del par de torsión, como se muestra en la Ecuación (31) o la Expresión (28).

35 Si los parámetros no varían, el observador 50 en el estado estacionario estima el flujo magnético permanente  $\phi_a (= \phi^*)$  de la máquina rotatoria 3 en CA. Sin embargo, si varían algunos de los parámetros,  $\hat{p}^{dr}$  no es igual a  $\phi_a$ .

Con respecto al  $\hat{p}^{dr}$  cuando varían los parámetros, la siguiente Ecuación (27) es obtenida por, en consideración del estado estacionario, aproximando la ecuación de estado, es decir, la siguiente Ecuación (26), de un motor eléctrico síncrono de imán permanente que es la máquina rotatoria 3 en CA, de forma similar al caso del observador 50 ( $R = 0$ ,  $d/dt = 0$ ).

40 Expresión 23

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R/Ld & \omega & 0 \\ -\omega & -R/Lq & -\omega \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Vd \\ Vq \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Id \\ Iq \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/Ld & 0 & 0 \\ 0 & 1/Lq & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_a \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (26)$$

Expresión 24

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \omega \phi_{qs} + Vd \\ 0 = -\omega \phi_{ds} - \omega \phi_a + Vq \end{array} \right. \quad (27)$$

5 Aquí, a partir de la Ecuación (27) y la Ecuación (21) aproximada del observador en el estado estacionario, el valor estimado  $\hat{p}^{dr}$  del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor puede ser obtenido como se muestra por la siguiente Ecuación (28) o la Expresión (25).

Expresión 25

$$\begin{array}{l} 0 = -\hat{\omega} \hat{p}^{ds} - \hat{\omega} \hat{p}^{dr} + Vq^* \\ - ) \quad 0 = -\omega \phi_{ds} - \omega \phi_a + Vq \\ \hline 0 = (\hat{p}^{ds} - \phi_{ds}) + (\hat{p}^{dr} - \phi_a) \\ = (L_{dob} \hat{I}^d - L_{dob} I^d + L_{dob} I^d - L^d I^d) + (\hat{p}^{dr} - \phi_a) \\ = (L_{dob}(\hat{I}^d - I^d) + (L_{dob} - L^d)I^d) + (\hat{p}^{dr} - \phi_a) \end{array} \quad (28)$$

10 Aquí, en el estado estacionario, de acuerdo con la descripción de la Ecuación (25), si se fija  $(\hat{I}^d - I^d) = 0$ , y si se fija  $(L_{dob} - L^d) = \Delta L^d$ , el valor  $\hat{p}^{dr}$  estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor se representa como una expresión relacional mostrada por la siguiente Ecuación (29) o la Expresión (26).

Expresión (26)

$$\hat{p}^{dr} = -\Delta L^d I^d + \phi_a \quad (29)$$

15 Por otra parte, la expresión relacional del error del par de torsión cuando varían los parámetros se obtendrá como se muestra más adelante. La expresión relacional del error del par de torsión puede ser obtenida a partir de la relación entre la expresión de cálculo del par de torsión de la máquina rotatoria 3 en CA y la instrucción  $T^*$  del par de torsión en el control convencional, como se muestra mediante la siguiente Ecuación (30) o la Expresión (27).

Aquí se fijan  $I^d^* = I^d$ ,  $I^q^* = I^q$ ,  $L_{dob} - L^d = \Delta L^d$ ,  $L_{qob} - L^q = \Delta L^q$ , y  $\varphi_a - \varphi^* = \Delta \varphi$ . Además, las inductancias se fijan como  $L^d^* = L_{dob}$  y  $L^q^* = L_{qob}$ .

20

Expresión 27

$$\begin{aligned}
 T &= p(\phi a I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \\
 T^* &= p(\phi^* I_q^* + (L_d^* - L_q^*) I_d^* I_q^*) \\
 \hline
 \frac{(T - T^*)}{p} &= (\phi a - \phi^*) I_q^* + (L_d - L_d^* - L_q + L_q^*) I_d^* I_q^* \\
 &= \Delta \phi I_q^* + (-\Delta L_d + \Delta L_q) I_d^* I_q^*
 \end{aligned} \tag{30}$$

En la expresión relacional del error del par de torsión mostrada en la anterior Ecuación (30), si varían los parámetros y el error ocurre en  $L_d$ , los términos en el lado derecho no se hacen cero en su conjunto, y por lo tanto  $(T - T^*)$  en el lado izquierdo no se hace cero, tampoco.

- 5 Esto es, esto muestra que en el control convencional, si varían los parámetros ocurre un error del par de torsión. Por otra parte, en la presente invención, el valor  $p^{\wedge}dr$  estimado del flujo magnético del observador 50 se usa para la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente, por lo que se obtiene la Ecuación (29).

A continuación, si  $\Delta L_q = 0$  y  $\phi^* = p^{\wedge}dr = -\Delta L_d I_d + \phi a$  son fijados y la Ecuación (29) es sustituida por la Ecuación (30), se obtiene la siguiente Ecuación (31) o la Expresión (28). De este modo se hace posible controlar que el error del par de torsión sea cero incluso con la condición de que  $\Delta L_d$  esté presente.

10

Expresión 28

$$\begin{aligned}
 \frac{(T - T^*)}{p} &= (\phi a - (-\Delta L_d I_d^* + \phi a)) I_q^* + (L_d - L_d^* - L_q + L_q^*) I_d^* I_q^* \\
 &= \Delta L_d I_d^* I_q^* - \Delta L_d I_d^* I_q^* = 0
 \end{aligned} \tag{31}$$

Como se ha descrito antes, de acuerdo con la Realización 1, si los parámetros de la máquina rotatoria 3 en CA han variado para causar la desviación del valor objetivo de la sección de control, la variación de los parámetros se refleja en la variación del valor estimado  $\phi^{\wedge}(p^{\wedge}dr)$  estimado por el observador 50.

15

Además, el valor estimado  $\phi^{\wedge}(p^{\wedge}dr)$  estimado por el observador 50 se usa para el cálculo de las instrucciones de la corriente  $I_d^*$  e  $I_q^*$  por la unidad 10 de cálculo de instrucción de la corriente, y para el cálculo de las instrucciones del voltaje  $V_d^*$  y  $V_q^*$  por la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje. Por lo tanto, el par de torsión puede ser controlado de forma precisa.

Además, el sistema de control de la Realización 1 está configurado como un denominado sistema de control de la corriente de bucle abierto que no usa un sistema de control de la corriente basado en un valor de retroalimentación de la corriente detectada. Debido a tal configuración como un sistema control de la corriente de bucle abierto, el sistema de control puede ser aplicado en un amplio intervalo que incluye el control de PWM de onda sinusoidal y el método de impulsión de onda cuadrada descrito en Técnica anterior, y el control preciso del par de torsión puede ser realizado incluso en el método de impulsión de onda cuadrada sin usar el control de retroalimentación basado en el par de torsión estimado.

25

Además, como el sistema de control de la Realización 1 puede ser aplicado en un amplio intervalo que incluye el control de PWM de onda sinusoidal y el método de impulsión de onda cuadrada sin la necesidad de conmutación del sistema de control, el control del par de torsión puede ser realizado con un programa sencillo. Todavía además, la presente invención puede realizar un control preciso del par de torsión incluso en un aparato de control que no use un sensor de la velocidad de rotación o un sensor de la posición de rotación de la máquina rotatoria 3 en CA.

30

En la anterior descripción se ha descrito el caso en el que la presente invención se aplica a un sistema de control vectorial sin sensores que no tiene un sensor de la velocidad de rotación o un sensor de la posición de rotación. No obstante, en el caso en que la presente invención se aplique a un sistema de control vectorial que tenga un sensor de la velocidad de rotación o similar, se puede obtener el mismo efecto.

35

Realización 2

La Figura 7 es un diagrama de bloques que muestra un aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 2 de la presente invención. Los componentes, que son los mismos que o corresponden a los de la Realización 1 mostrados en la Figura 1, están indicados por los mismos números de referencia.

Una característica del aparato de control de una máquina rotatoria en CA de la Realización 2 es que la configuración de la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje (Figura 4) mostrada en la Realización 1 está modificada, esto es, sustituida por la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje que tiene una configuración mostrada en la Figura 8. Excepto para la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje, la configuración es básicamente la misma que la de la Realización 1. Por lo tanto, se omite su descripción detallada.

En la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje de la Realización 2, el cálculo de las instrucciones del voltaje  $V_d^*$  y  $V_q^*$  adicionalmente incluye el control de retroalimentación de las corrientes detectadas  $I_d$  e  $I_q$  obtenidas por el segundo convertidor 40 de coordenadas.

Las expresiones de cálculo en este caso son como sigue. Esto es, los términos de retroalimentación de la corriente son calculados por la siguiente Ecuación (32) o la Expresión (29), y los términos de alimentación hacia adelante son calculados por la siguiente Ecuación (33) o la Expresión (30). A continuación, las instrucciones del voltaje finales  $V_d^*$  y  $V_q^*$  son calculadas por la Ecuación (34) o la Expresión (31).

Expresión 29

$$\begin{cases} V_{dFB} = \left( K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) (I_d^* - I_d) \\ V_{qFB} = \left( K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s} \right) (I_q^* - I_q) \end{cases} \quad (32)$$

Expresión 30

$$\begin{bmatrix} V_{dFF} \\ V_{qFF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^* & -\hat{\omega}Lq^* \\ \hat{\omega}Ld^* & R^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^* \\ I_q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\omega} \hat{p}^{dr} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Expresión 31

$$\begin{cases} V_d^* = V_{dFF} + V_{dFB} \\ V_q^* = V_{qFF} + V_{qFB} \end{cases} \quad (34)$$

Aquí,  $V_{dFB}$  y  $V_{qFB}$  son términos de retroalimentación,  $V_{dFF}$  y  $V_{qFF}$  son términos de alimentación hacia adelante,  $K_{pd}$  y  $K_{pq}$  son las ganancias proporcionales, y  $K_{id}$  y  $K_{iq}$  son las ganancias integrales.

Los términos de retroalimentación  $V_{dFB}$  y  $V_{qFB}$  en la anterior Ecuación (32) son calculados por los sustractores 22d y 22q y las unidades de cálculo de PI 23d y 23q mostrados en la Figura 8. Los términos de alimentación hacia adelante  $V_{dFF}$  y  $V_{qFF}$  en la Ecuación (33) son calculados por una unidad 21 de cálculo de alimentación hacia adelante mostrada en la Figura 8 que tiene la misma configuración que en la Realización 1 (Figura 4). El cálculo en la Ecuación (34) es realizado por los sumadores 25d y 25q mostrados en la Figura 8.

Como se ha descrito anteriormente en la Realización 1, la teoría se desarrolla ignorando el error de resistencia. Actualmente, en una zona en la que la máquina rotatoria 3 en CA rota a una velocidad alta hasta un cierto grado de modo que el voltaje inducido de la máquina rotatoria 3 en CA sea grande hasta un cierto punto, incluso si ocurre un error de resistencia, el error de resistencia difícilmente influye en el par de torsión de salida de la máquina rotatoria 3 en CA.

No obstante, en una zona en la que la máquina rotatoria 3 en CA rota a una velocidad baja, el error de resistencia puede ser ignorado. En consecuencia, como en la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje mostrada en la Figura 8, se añade el control de retroalimentación de las corrientes detectadas  $I_d$  e  $I_q$ . De este modo, el error del voltaje causado por el error de resistencia es compensado, de modo que la resistencia puede ser controlada con precisión.

Se ha advertido que, como una diferencia entre la configuración de la Realización 2 y la técnica convencional, el valor estimado del flujo magnético  $\hat{\phi}^{(p^{dr})}$ : el valor estimado del flujo magnético en el eje d en el lado del rotor) estimado por el observador 50 se usa para el cálculo de los términos de alimentación hacia adelante.

Debido a esta configuración, los errores en los valores fijados de la inductancia en el eje q y del valor fijado del flujo magnético son compensados por los términos de alimentación hacia adelante  $V_{dFF}$  y  $V_{qFF}$ , y los demás errores tales como un error de resistencia pueden ser compensados por los términos de retroalimentación de la corriente

VdFB y VqFB, obteniendo de este modo el efecto de mejorar la respuesta del control de retroalimentación de la corriente cuando varían los parámetros.

Además, en la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje de la Realización 2, los conmutadores 24d y 24q que pueden activar y desactivar el control de retroalimentación de la corriente están dispuestos entre las unidades de cálculo 23d y 23q de PI y los sumadores 25d y 25q.

A continuación, sólo cuando la máquina rotatoria 3 en CA rota a velocidad baja, el control de retroalimentación de la corriente es realizado, y en los otros casos, los conmutadores 24d y 24q son conmutados para desactivar el control de retroalimentación de la corriente. De este modo, el control del par de torsión puede ser realizado con precisión de la máquina rotatoria en CA en una zona amplia de velocidad de rotación desde cero hasta una velocidad alta.

Como se ha descrito antes, de acuerdo con la Realización 2, empleando la unidad 20 de cálculo de la instrucción del voltaje que tiene la configuración mostrada en la Figura 8 para añadir el control de retroalimentación de la corriente, es posible controlar favorablemente la corriente cuando ocurre un error de la resistencia, y para suprimir de forma precisa la variación del par de torsión incluso cuando la máquina rotatoria 3 rota a una baja velocidad.

### Realización 3

La Figura 9 es un diagrama de bloques que muestra un aparato de control de una máquina rotatoria en CA de la Realización 3 de la presente invención. Los componentes que son los mismos o corresponden a los de la Realización 1 mostrada en la Figura 1 están indicados por los mismos números de referencia.

Una característica del aparato de control de una máquina rotatoria en CA de acuerdo con la Realización 3 es que, en comparación con la Realización 1, se añade de nuevo una sección 5 de detección del voltaje para detectar el voltaje EFC en CC aplicado al convertidor de potencia 2 por el suministro de potencia 6 en CC, y en la sección 1 de control se añade de nuevo una unidad 70 de cálculo de la corriente de debilitamiento para calcular la instrucción dV de la corriente de debilitamiento a partir de un factor de modulación PMF de modo que el factor de modulación PMF será "1".

Excepto para los anteriores componentes, la configuración es la misma que la de la Realización 1. Por lo tanto, se omite su descripción detallada.

En este caso, el primer convertidor 30 de coordenadas calcula el factor de modulación PMF como se muestra en la siguiente Ecuación (35) o en la Expresión (32).

### Expresión 32

$$PMF = \frac{\sqrt{(Vd^*)^2 + (Vq^*)^2}}{\frac{\sqrt{6}}{\pi} EFC} \quad (35)$$

La expresión de cálculo del factor de modulación PMF mostrada por la Ecuación (35) es para realizar el cálculo de modo que el voltaje máximo que puede ser producido por el convertidor de potencia 2 satisfaga  $PMF = 1$  en el método de impulsión de onda cuadrada. Controlando el factor de modulación PMF para satisfacer  $PMF = 1$ , se puede realizar el control del par de torsión en el método de impulsión de onda cuadrada.

A continuación, las instrucciones  $Vu^*$ ,  $Vv^*$ , y  $Vw^*$  del voltaje trifásico se calculan a partir del factor de modulación PMF mostrado por la Ecuación (35). Por lo tanto, incluso si varía el voltaje EFC en CC aplicado al convertidor de potencia 2, es posible siempre aplicar un voltaje apropiado a la máquina rotatoria 3 en CA, suprimiendo de este modo la variación del par de torsión debida a la variación en el voltaje EFC en CC.

La Figura 10 es un diagrama que muestra la configuración de la unidad 70 de cálculo de la corriente de debilitamiento para realizar el control de debilitamiento del flujo magnético basándose en el método de impulsión de onda cuadrada. Se ha observado que la configuración mostrada en la Figura 10 es una técnica conocida, la cual solamente tiene que permitir que la instrucción dV de la corriente de debilitamiento sea generada de modo que el factor de modulación PMF sea "1".

Como se ha descrito antes, de acuerdo con la Realización 3, basándose en la configuración de la Realización 1, la sección 5 de detección del voltaje que detecta el voltaje EFC en CC es proporcionada para calcular el factor de modulación PMF por la Ecuación (35), y la unidad 70 de cálculo de la corriente de debilitamiento calcula un valor dV de instrucción de la corriente debilitamiento óptima de modo que el factor de modulación PMF sea "1".

Por lo tanto, incluso si varía el voltaje EFC introducido en el convertidor de potencia 2, se puede generar una instrucción de la corriente de debilitamiento óptima. Además, en el método de impulsión de onda cuadrada es posible suprimir efectivamente la ocurrencia de un error de par de torsión incluso si varía el voltaje EFC, así como

suprimir la ocurrencia de un error del par de torsión debido a la variación del parámetro de la máquina rotatoria 3 en CA como en la Realización 1.

**Aplicabilidad industrial**

5 La presente invención se refiere a un aparato de control que controla el par de torsión de una máquina rotatoria en CA basándose en una instrucción del par de torsión, y es aplicable a diversos aparatos de control de una máquina rotatoria en CA.

**REIVINDICACIONES**

1. Un aparato de control que controla el par de torsión de una máquina rotatoria (3) en CA basándose en un valor de instrucción del par de torsión, comprendiendo el aparato de control:
- un convertidor de potencia (2) que está adaptado para convertir potencia en CC en potencia en CA y para suministrar la potencia en CA a la máquina rotatoria (3) en CA;
  - una sección (4) de detección de la corriente que está adaptada para detectar una corriente que fluye desde el convertidor de potencia (2) hasta la máquina rotatoria (3) en CA; y
  - una sección (1) de control que está adaptada para generar un valor de instrucción del voltaje en CA trifásico para controlar la máquina rotatoria (3) en CA, al convertidor de potencia (2), basándose en la corriente detectada por la sección (4) de detección de la corriente y el valor de instrucción del par de torsión,
- en donde la sección de control (1) incluye:
- una unidad (10) de cálculo de instrucción de la corriente que está adaptada para calcular un valor de instrucción de la corriente;
  - una unidad (20) de cálculo de instrucción del voltaje que está adaptada para calcular el valor de instrucción del voltaje; y
  - un observador (50) que está adaptado para calcular un valor estimado del flujo magnético de la máquina rotatoria (3) en CA, basándose en la corriente detectada y en el valor de instrucción del voltaje,
- en donde la unidad (10) de cálculo de instrucción de la corriente está adaptada para calcular los valores de instrucción de la corriente en dos ejes rotacionales, basándose en el valor de instrucción del par de torsión, y el flujo magnético estimado salido del observador (50),
- en donde la unidad (20) de cálculo de la instrucción del voltaje está adaptada para calcular el valor de instrucción del voltaje, basándose en los valores de instrucción de la corriente salidos de la unidad (10) de cálculo de instrucción de la corriente y en el valor del flujo magnético estimado salido del observador (50) a la unidad (20) de cálculo de la instrucción del voltaje, y
- en donde el valor del flujo magnético estimado es un valor estimado del flujo magnético en el eje d.
2. El aparato de control de acuerdo con la reivindicación 1,
- en donde el observador (50) está adaptado para calcular un valor estimado de la velocidad angular además del valor estimado del flujo magnético de la máquina rotatoria (3) en CA, basándose en la corriente detectada y en el valor de instrucción del voltaje, y
- en donde la unidad (20) de cálculo de la instrucción del voltaje está adaptada para calcular un valor de instrucción del voltaje, basándose en los valores de instrucción de la corriente, el valor estimado del flujo magnético, y el valor estimado de la velocidad angular, y
- en donde el control vectorial sin sensores se realiza basándose en el valor estimado de la velocidad angular.
3. El aparato de control de acuerdo con la reivindicación 1 o 2,
- en donde la unidad (20) de cálculo de la instrucción del voltaje está adaptado para calcular un valor de instrucción del voltaje, basándose en un resultado del cálculo salido del observador (50) y en el cálculo de la retroalimentación de una desviación de la corriente entre los valores de instrucción de la corriente y la corriente detectada.
4. El aparato de control de acuerdo con la reivindicación 1, comprendiendo además el aparato de control:
- una sección (7) de detección del voltaje que está adaptada para detectar una entrada de voltaje en CC al convertidor de potencia (2); y
  - una unidad (70) de cálculo de la corriente de debilitamiento que está adaptada para calcular una instrucción de la corriente de debilitamiento para controlar un factor de modulación calculado a partir de un valor detectado del voltaje en CC detectado por la sección (7) de detección del voltaje y el valor de instrucción del voltaje, para hacer que el factor de modulación sea igual a o menor que un valor predeterminado.
5. El aparato de control de acuerdo con la reivindicación 2, comprendiendo además el aparato de control:
- una sección (7) de detección del voltaje que está adaptada para detectar una entrada de voltaje en CC al convertidor de potencia (2); y

– una unidad (70) de cálculo de la corriente de debilitamiento que está adaptada para calcular una instrucción de la corriente de debilitamiento para controlar un factor de modulación calculado a partir de un valor detectado del voltaje en CC detectado por la sección (7) de detección del voltaje y el valor de instrucción del voltaje, para hacer que el factor de modulación sea igual a o menor que un valor predeterminado.

5 6. El aparato de control de acuerdo con la reivindicación 3, comprendiendo además el aparato de control:

– una sección (7) de detección del voltaje que está adaptada para detectar una entrada de voltaje en CC al convertidor de potencia (2); y

10 – una unidad (70) de cálculo de la corriente de debilitamiento que está adaptada para calcular una instrucción de la corriente de debilitamiento para controlar un factor de modulación calculado a partir de un valor detectado del voltaje en CC detectado por la sección (7) de detección del voltaje y el valor de instrucción del voltaje, para hacer que el factor de modulación sea igual a o menor que un valor predeterminado.

7. El aparato de control de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 6,

en donde la unidad (20) de cálculo de la instrucción del voltaje está adaptada para calcular el valor de instrucción del voltaje sustituyendo un flujo magnético permanente por el valor estimado del flujo magnético.

15

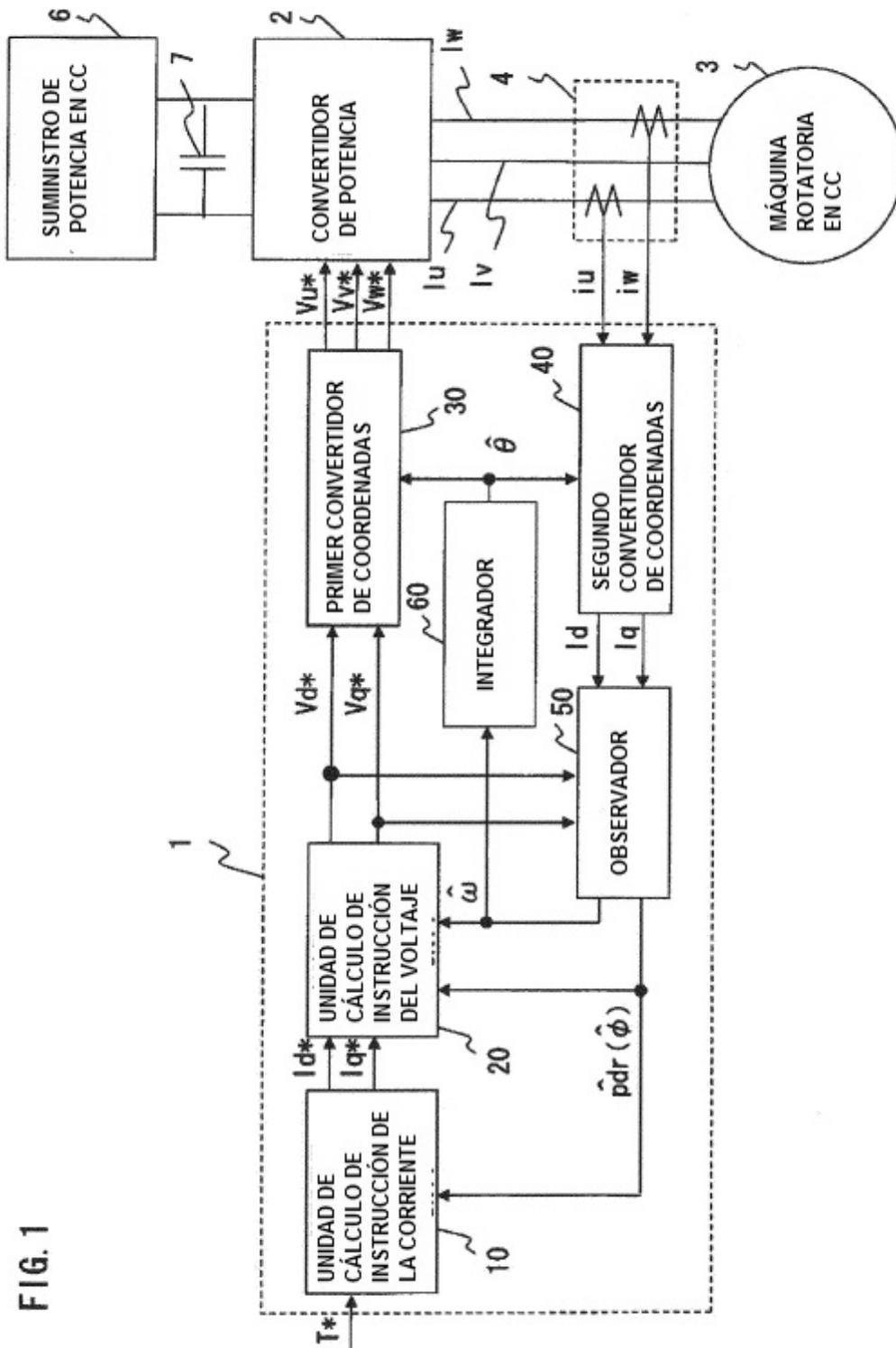


FIG. 1

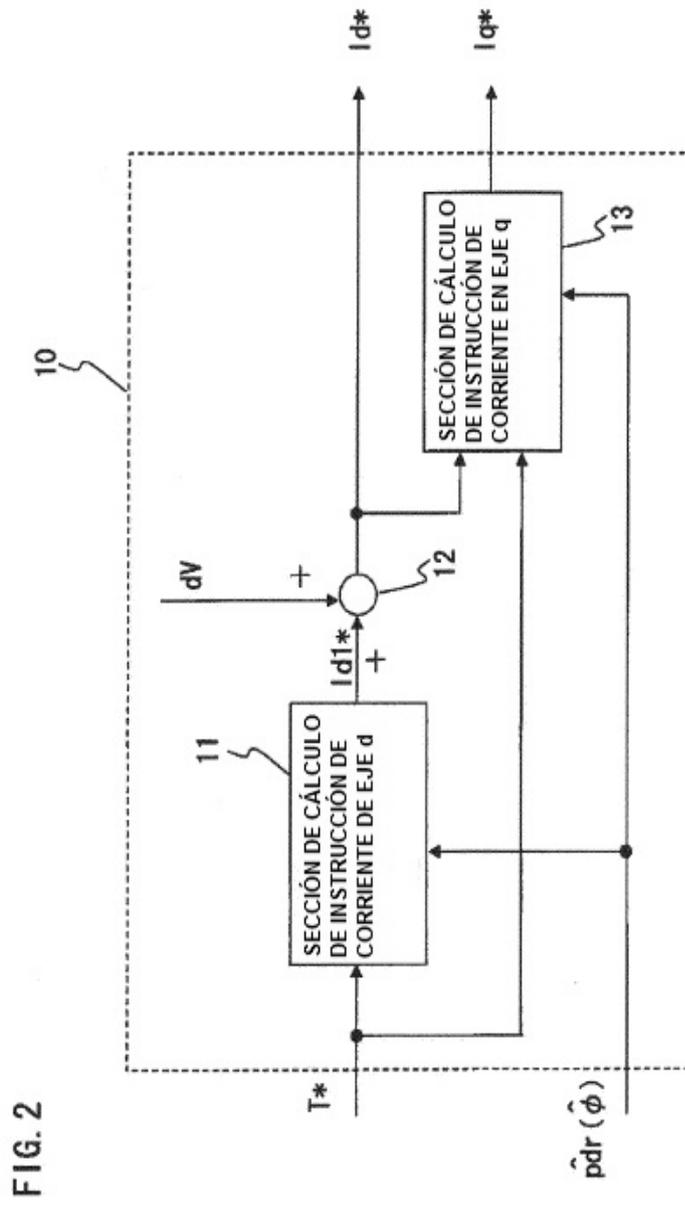


FIG. 3

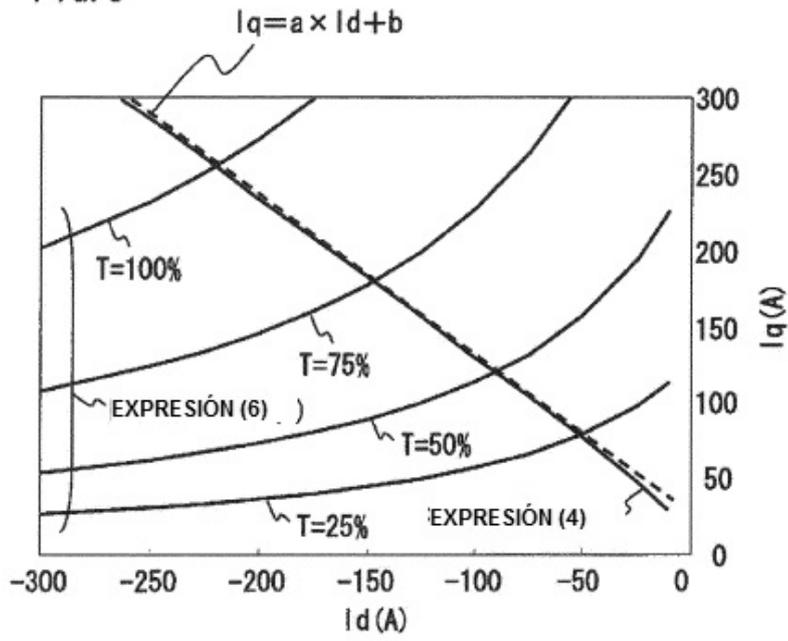


FIG. 4

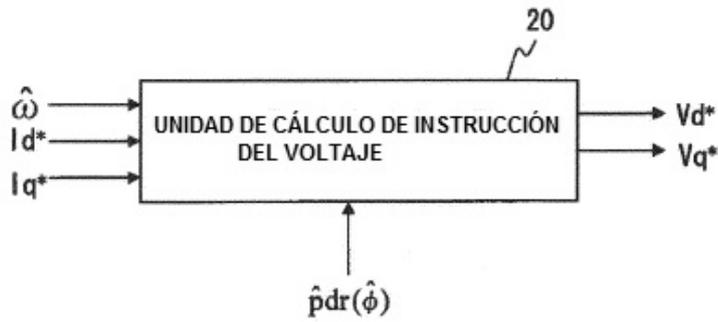
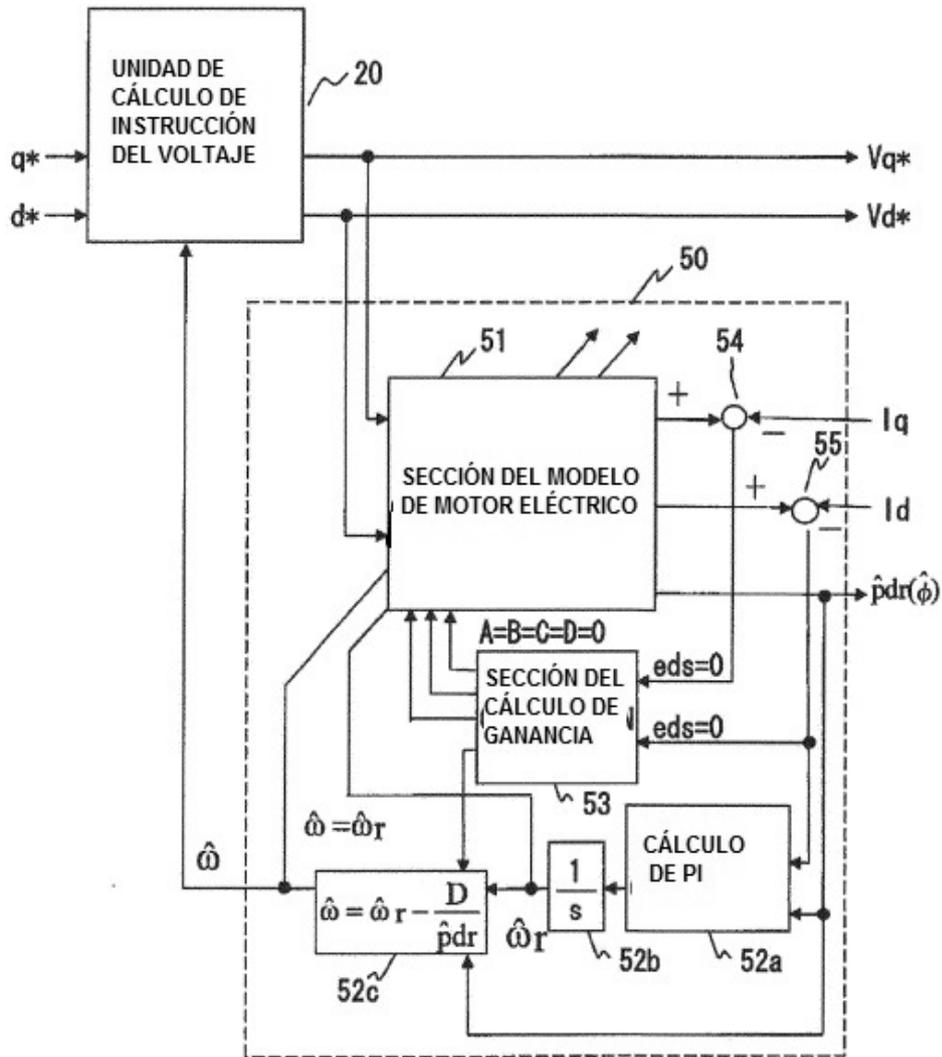




FIG. 6



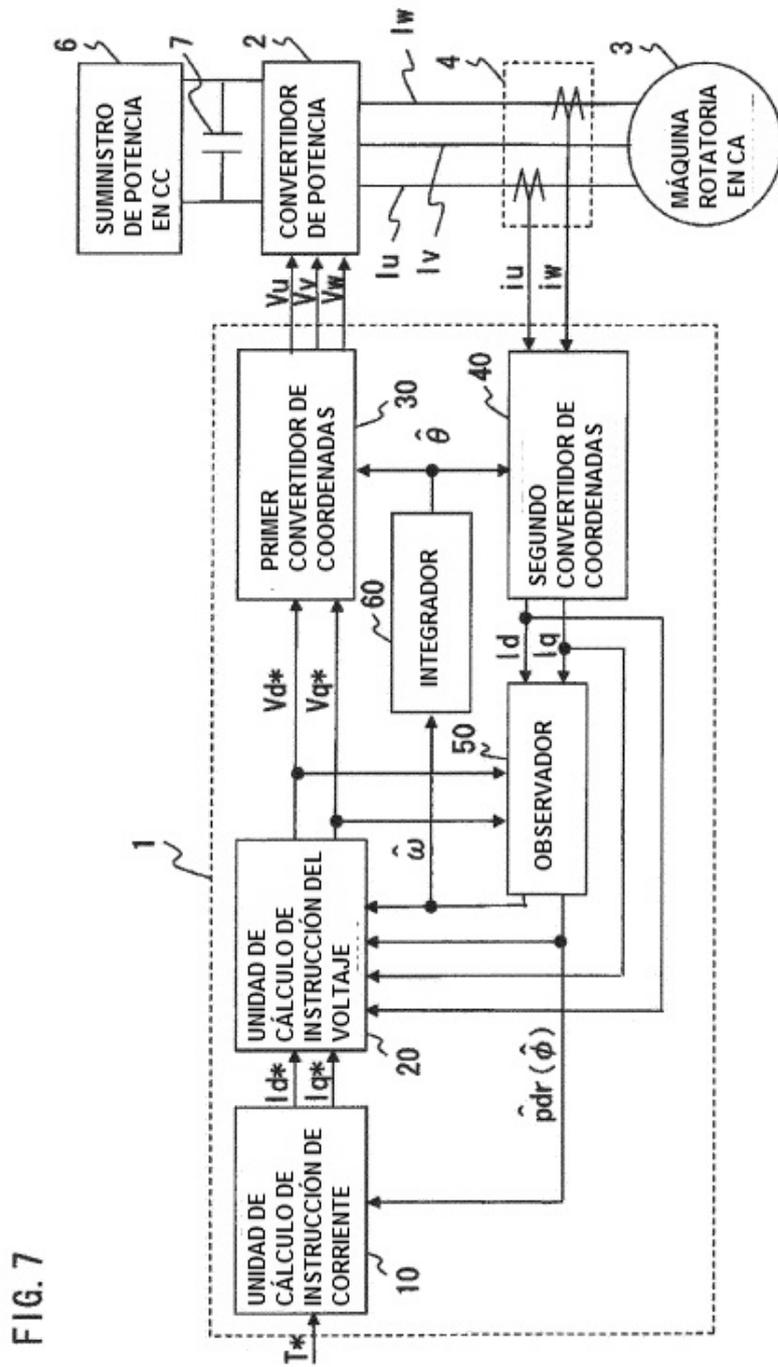
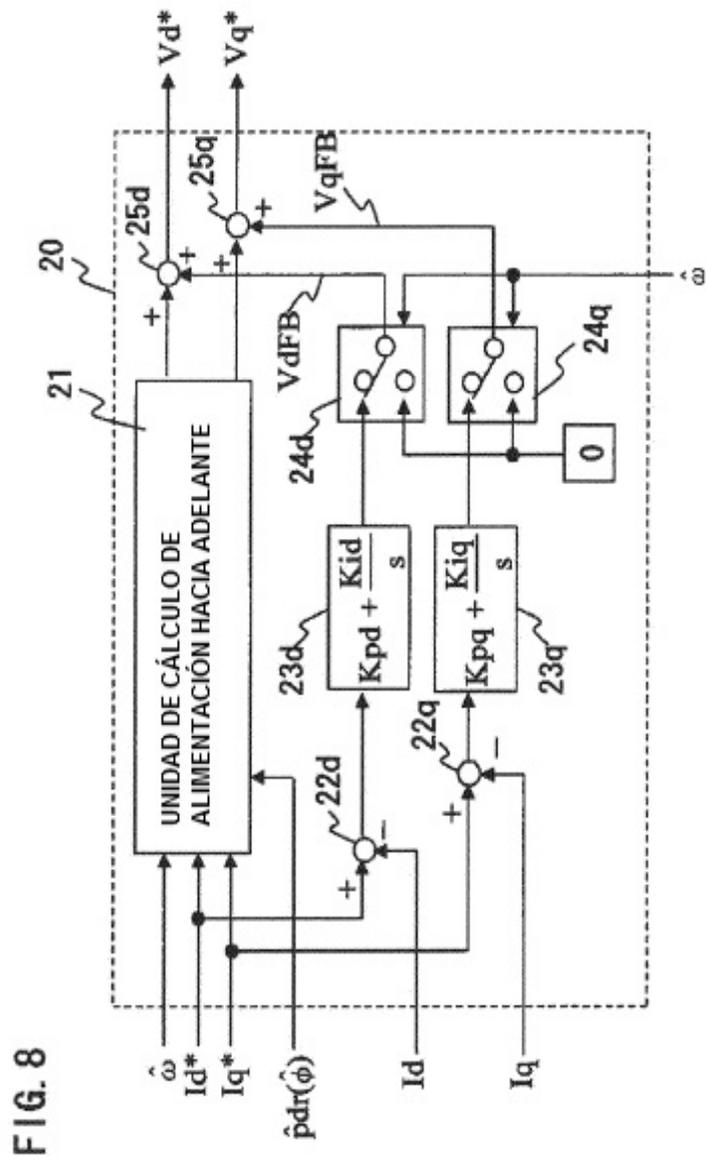


FIG. 7



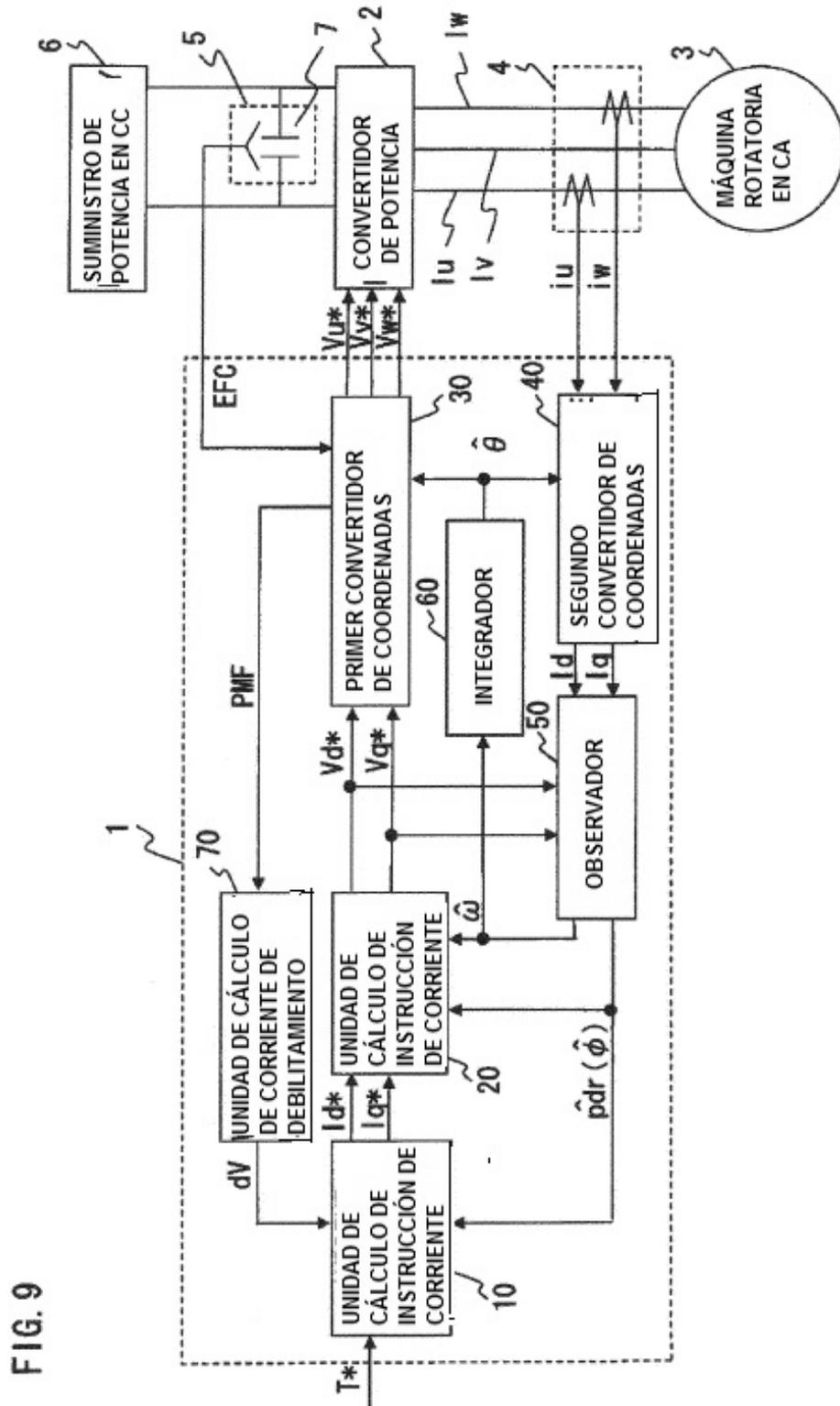


FIG. 9

FIG. 10

