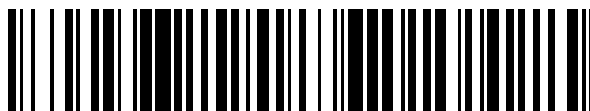


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 728 419**

51 Int. Cl.:

H02P 21/00 (2006.01)

H02P 21/06 (2006.01)

H02P 25/22 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.05.2012 PCT/FI2012/050504**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.11.2013 WO13175050**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.05.2012 E 12730003 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.03.2019 EP 2856631**

54 Título: **Procedimiento y aparato para controlar una máquina eléctrica con dos o más devanados estáticos multifase**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
24.10.2019

73 Titular/es:
**THE SWITCH DRIVE SYSTEMS OY (100.0%)
Salpausselänkatu 291
53850 Lappeenranta, FI**

72 Inventor/es:
**KNUUTILA, TOMI;
PÖLLÄNEN, RIKU;
KALLIO, SAMULI;
PELTONIEMI, PASI y
KARTTUNEN, JUSSI**

74 Agente/Representante:
CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 728 419 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y aparato para controlar una máquina eléctrica con dos o más devanados estatóricos multifase

Campo de la invención

5 La invención versa, en general, acerca de máquinas eléctricas giratorias. Más en particular, la invención versa acerca de un procedimiento para controlar una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estatóricos multifase. Además, la invención versa acerca de un aparato y de un programa de ordenador con el fin de controlar una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estatóricos multifase.

Antecedentes

10 En muchas aplicaciones, se requiere un nivel elevado de disponibilidad de un sistema de accionamiento eléctrico. Por ejemplo, en una propulsión eléctrica de embarcación la disponibilidad es crítica desde el punto de vista de la seguridad. Se puede aumentar la disponibilidad añadiendo redundancia al sistema de accionamiento eléctrico. Debido a razones económicas, una redundancia multiplicando el número de sistemas completos de accionamiento eléctrico solo es posible raramente. Sin embargo, la redundancia puede lograrse proporcionando una máquina eléctrica con dos o más devanados estatóricos multifase aislados galvánicamente, siendo suministrado cada uno de los cuales con su propia etapa de potencia multifase. La máquina eléctrica puede comprender, por ejemplo, dos devanados estatóricos trifásicos conectados en estrella que están desfasados entre sí, por ejemplo, 30 grados eléctricos.

20 Un control preciso de una máquina eléctrica se basa, normalmente, en un modelo que modela el comportamiento de las corrientes y las tensiones de la máquina eléctrica y, a veces, también el par producido. Junto con una máquina eléctrica sincronizada que puede tener un rotor de polos salientes, las corrientes, las tensiones y los acoplamientos inductivos son expresados, preferentemente, en formas convertidas en rotación adecuadas en un sistema de coordenadas acotado al rotor para evitar la dependencia de la posición de los parámetros de inductancia del modelo. Se pueden controlar las corrientes estatóricas convertidas en rotación en función de las diferencias entre las corrientes estatóricas convertidas en rotación y sus valores diana. Los valores diana de las corrientes estatóricas convertidas en rotación pueden formarse en función, por ejemplo, del par deseado. Normalmente, las corrientes y las tensiones estatóricas convertidas en rotación son expresadas en el sistema de coordenadas d-q cuyos ejes de coordenadas se encuentran a lo largo de los ejes directo y de cuadratura del rotor. La ventaja inherente del sistema de coordenadas d-q es que el componente d de las corrientes estatóricas no genera un acoplamiento inductivo en la dirección q y, de forma correspondiente, el componente q de las corrientes estatóricas no genera un acoplamiento inductivo en la dirección d. Este desacoplamiento entre las direcciones d y q facilita significativamente el control de las corrientes estatóricas convertidas en rotación debido a que se pueden regular los componentes d y q de las corrientes estatóricas, por ejemplo, con reguladores separados que pueden ser, por ejemplo, reguladores proporcionales-integrales "PI".

35 En un caso de una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estatóricos multifase, la situación es más complicada. Los dos o más devanados estatóricos multifase tienen acoplamientos magnéticos mutuos. Por lo tanto, por ejemplo, el acoplamiento inductivo estatórico en la dirección d de uno de los devanados estatóricos multifase depende no solo del componente d de las corrientes estatóricas de este devanado estatórico multifase sino también de los componentes d de las corrientes estatóricas de los otros devanados estatóricos multifase. En un principio sencillo de control, se descuidan los acoplamientos magnéticos mutuos mencionados anteriormente y se controlan por separado entre sí los dos o más devanados estatóricos multifase. Sin embargo, el descuido de los acoplamientos magnéticos mutuos mencionados anteriormente reduce la precisión del control. Por otra parte, el control se complica significativamente más si se tienen en cuenta los acoplamientos magnéticos mutuos, debido a que esto requiere una cooperación entre los reguladores relacionada con distintos devanados estatóricos multifase.

40 Los documentos de BENKHORIS M F ET AL: "Decoupling algorithm in view of multivariable electrical drives control", WO2012/046115 y EP2020334 son la técnica anterior de la presente solicitud.

Sumario

45 Lo que sigue presenta un sumario simplificado para proporcionar una compresión básica de algunos aspectos de diversas realizaciones de la invención. El sumario no es una revisión general exhaustiva de la invención. Ni se pretende que identifique elementos clave o críticos de la invención ni que defina el alcance de la invención. El siguiente sumario simplemente presenta algunos conceptos de la invención de una forma simplificada como preludio a una descripción más detallada de realizaciones ejemplares de la invención.

50 Según el primer aspecto de la invención, se proporciona un nuevo procedimiento para controlar una máquina eléctrica que comprende dos devanados estatóricos multifase. El procedimiento según la invención comprende:

- convertir las corrientes estatóricas de fase de los dos devanados estatóricos multifase en cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica, y

- controlar las etapas de potencia conectadas con los devanados estatóricos multifase en función de las cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos las inductancias de los dos devanados estatóricos multifase y las inductancias mutuas entre los dos devanados estatóricos multifase,

5 en el que las corrientes estatóricas de fase se convierten en las corrientes estatóricas convertidas en rotación con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo depende únicamente de una corriente estatórica convertida en rotación cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo, por ejemplo, debido a una saturación magnética.

10 Los coeficientes de inductancia entre los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo de la máquina eléctrica y las corrientes estatóricas convertidas en rotación son proporcionales a: $L_d + M_d$, $L_q + M_q$, $L_d - M_d$, y $L_q - M_q$, siendo L_d una inductancia del eje directo, siendo M_d una inductancia mutua del eje directo entre los dos devanados estatóricos multifase, siendo L_q una inductancia del eje de cuadratura, y siendo M_q es una inductancia mutua del eje de cuadratura entre los dos devanados estatóricos multifase.

15 La forma mencionada anteriormente del modelo en el que cada uno de los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo depende únicamente de una de las corrientes estatóricas convertidas en rotación puede obtenerse, por ejemplo, diagonalizando la matriz de inductancia del modelo tradicional de d-q de la máquina eléctrica.

El uso de la forma en la que cada acoplamiento inductivo estatórico depende únicamente de una corriente estatórica convertida en rotación facilita de forma significativa el control de las corrientes estatóricas convertidas en rotación debido a que las corrientes estatóricas convertidas en rotación pueden ser reguladas, por ejemplo, con reguladores proporcionales-integrales "PI" separados.

20 Según el segundo aspecto de la invención, se proporciona un nuevo aparato con el fin de controlar una máquina eléctrica que comprende dos devanados estatóricos multifase. El aparato según la invención comprende un sistema de procesamiento configurado para:

- 25 - producir señales de control de la tensión, que son adecuadas para controlar la máquina eléctrica, en función de cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos inductancias de los dos devanados estatóricos multifase e inductancias mutuas entre los dos devanados estatóricos multifase, y
- 30 - convertir corrientes estatóricas de fase de los dos devanados estatóricos multifase en las corrientes estatóricas convertidas en rotación con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo depende únicamente de una de las corrientes estatóricas convertidas en rotación cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo.

El aparato puede comprender, además, por ejemplo pero no necesariamente, etapas de potencia para proporcionar tensiones de alimentación a los dos o más devanados estatóricos multifase en función de las señales de control de la tensión.

Según el tercer aspecto de la invención, se proporciona un nuevo programa de ordenador con el fin de controlar una máquina eléctrica que comprende dos devanados estatóricos multifase. El programa de ordenador según la invención comprende instrucciones ejecutables por un ordenador para controlar un procesador programable para:

- 40 - producir señales de control de la tensión, que son adecuadas para controlar la máquina eléctrica, en función de cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos las inductancias de los dos devanados estatóricos multifase y las inductancias mutuas entre los dos devanados estatóricos multifase,
- 45 - convertir corrientes estatóricas de fase de los dos devanados estatóricos multifase en las corrientes estatóricas convertidas en rotación con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo solo depende de una de las corrientes estatóricas convertidas en rotación cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo.

Según el cuarto aspecto de la invención, se proporciona un nuevo producto de programa de ordenador. El producto de programa de ordenador comprende un soporte no volátil legible por un ordenador, por ejemplo un disco compacto "CD", codificado con un programa de ordenador según la invención.

En las reivindicaciones dependientes adjuntas se describe un número de realizaciones ejemplares de la invención.

Se comprenderán las diversas realizaciones ejemplares de la invención tanto en cuanto a construcciones como a procedimientos de operación, junto con objetos y ventajas adicionales de las mismas, a partir de la siguiente descripción de realizaciones ejemplares específicas cuando sea leída en conexión con los dibujos adjuntos.

En el presente documento se utilizan los verbos “comprender” e “incluir” como limitaciones abiertas que ni excluyen ni requieren la existencia de características no enumeradas. Las características enumeradas en las reivindicaciones dependientes pueden ser combinadas libremente entre sí a no ser que se indique explícitamente lo contrario.

Breve descripción de las figuras

5 A continuación se explican con mayor detalle las realizaciones ejemplares de la invención y sus ventajas en el sentido de ejemplos y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 muestra una ilustración esquemática de una máquina eléctrica ejemplar según la técnica anterior y que comprende dos devanados estatóricos trifásicos,

10 la figura 2 muestra un diagrama de bloques funcionales de un aparato según una realización ejemplar de la invención con el fin de controlar una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estatóricos multifase, y

la figura 3 es un diagrama esquemático de flujo de un procedimiento según una realización ejemplar de la invención para controlar una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estatóricos multifase.

Descripción de realizaciones ejemplares

15 La Figura 1 muestra una ilustración esquemática de una máquina eléctrica ejemplar que comprende dos o más devanados estatóricos multifase. En este caso ejemplar, la máquina eléctrica es una máquina sincronizada de polos salientes, que comprende un devanado de excitación y/o material para imanes permanentes en su rotor 102. Además, la máquina eléctrica podría comprender devanados amortiguadores en su rotor. En este caso ejemplar, un estátor 101 de la máquina eléctrica comprende dos devanados estatóricos trifásicos. El primero de los devanados estatóricos trifásicos comprende devanados estatóricos 103, 104 y 105 de fase. El segundo de los devanados estatóricos trifásicos comprende devanados estatóricos 106, 107 y 108 de fase. Las corrientes de fase del primer devanado estatórico trifásico son denotadas con i_{a1} , i_{b1} y i_{c1} , y las corrientes de fase de los segundos devanados estatóricos trifásicos son denotadas con i_{a2} , i_{b2} y i_{c2} . Las tensiones de fase del primer devanado estatórico trifásico son denotadas con u_{a1} , u_{b1} y u_{c1} , y las tensiones de fase del segundo devanado estatórico trifásico son denotadas con u_{a2} , u_{b2} y u_{c2} . Los devanados estatóricos trifásicos primero y segundo están desfasados entre sí un ángulo eléctrico de 2γ , según se ilustra en la figura 1.

La Figura 1 presenta un sistema de coordenadas d-q que está acotado al rotor 102. El eje d del sistema de coordenadas d-q representa el eje directo del rotor, y el eje q del sistema de coordenadas d-q representa el eje de cuadratura del rotor, según se ilustra en la figura 1. La Figura 1 presenta también un sistema de coordenadas α - β que está acotado al estátor 101. La posición de rotación del rotor con respecto al estátor se expresa con un ángulo θ . La velocidad ω de rotación del rotor es la derivada con relación al tiempo de θ , es decir $\omega = d\theta/dt$. El modelo d-q tradicional de la máquina eléctrica se expone brevemente a continuación como preludeo a las descripciones de realizaciones ejemplares de la invención.

35 Sin limitar la generalidad, los inventores suponen, en aras de la sencillez, que el rotor de la máquina eléctrica es un rotor de imanes permanentes que no comprende ningún devanado de excitación y amortiguador. En este caso, la máquina eléctrica puede ser modelada con las siguientes ecuaciones de tensión expresadas en el sistema de coordenadas d-q:

$$\begin{cases} u_{d1} = R_s i_{d1} + \frac{d\Psi_{d1}}{dt} - \omega \Psi_{q1} \\ u_{q1} = R_s i_{q1} + \frac{d\Psi_{d1}}{dt} + \omega \Psi_{d1} \\ u_{d2} = R_s i_{d2} + \frac{d\Psi_{d2}}{dt} - \omega \Psi_{q2} \\ u_{q2} = R_s i_{q2} + \frac{d\Psi_{q2}}{dt} + \omega \Psi_{d2} \end{cases}, \quad (1)$$

40 siendo u_{d1} y u_{q1} tensiones estatóricas convertidas en rotación del primer devanado estatórico trifásico expresadas en el sistema de coordenadas d-q, u_{d2} y u_{q2} las tensiones estatóricas convertidas en rotación de los segundos devanados estatóricos trifásicos expresados en el sistema de coordenadas d-q, i_{d1} y i_{q1} son corrientes estatóricas convertidas en rotación de los primeros devanados estatóricos trifásicos expresadas en el sistema de coordenadas d-q, i_{d2} y i_{q2} son las corrientes estatóricas convertidas en rotación de los segundos devanados estatóricos trifásicos expresadas en el sistema de coordenadas d-q, y R_s es la resistencia estatórica.

45 Ψ_{d1} y Ψ_{q1} son los acoplamiento inductivos estatóricos en las direcciones d y q de los primeros devanados estatóricos trifásicos, respectivamente, y Ψ_{d2} y Ψ_{q2} son los acoplamiento inductivos estatóricos en las direcciones

d y q de los segundos devanados estáticos trifásicos, respectivamente. Estos acoplamientos inductivos pueden ser modelados con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\Psi_{d1} &= L_d i_{d1} + M_d i_{d2} + \Psi_{PMd}, \\ \Psi_{q1} &= L_q i_{q1} + M_q i_{q2}, \\ \Psi_{d2} &= L_d i_{d2} + M_d i_{d1} + \Psi_{PMd}, \text{ y} \\ \Psi_{q2} &= L_q i_{q2} + M_q i_{q1},\end{aligned}\tag{2}$$

5 en las que L_d es la inductancia del eje directo, M_d es la inductancia mutua del eje directo entre los devanados estáticos trifásicos primero y segundo, L_q es la inductancia del eje de cuadratura, M_q es la inductancia mutua del eje de cuadratura entre los devanados estáticos trifásicos primero y segundo, y Ψ_{PMd} es el acoplamiento inductivo estático en la dirección d creado por el rotor de imanes permanentes.

El modelo de la máquina eléctrica definido por las ecuaciones (1) y (2) puede presentarse de la siguiente forma matricial:

$$10 \quad \mathbf{u}_{dq} = R_s \mathbf{i}_{dq} + \mathbf{L}_{dq} \frac{d\mathbf{i}_{dq}}{dt} + \omega \mathbf{J} \mathbf{L}_{dq} \mathbf{i}_{dq} + \omega \mathbf{J} \Psi_{PMdq},\tag{3}$$

en la que:

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_{dq} &= \begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \\ u_{d2} \\ u_{q2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_{dq} = \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_d & 0 \\ 0 & L_q & 0 & M_q \\ M_d & 0 & L_d & 0 \\ 0 & M_q & 0 & L_q \end{bmatrix}, \\ \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \text{y} \quad \Psi_{PMdq} = \begin{bmatrix} \Psi_{PMd} \\ 0 \\ \Psi_{PMd} \\ 0 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

15 En la ecuación (3) presentada anteriormente, se denotan vectores con una letra negrita minúscula y matrices con letras negritas mayúsculas. También se utilizará esta notación en otras partes del presente documento.

El vector de las tensiones estáticas convertidas en rotación \mathbf{u}_{dq} puede obtenerse del vector de las tensiones estáticas de fase $\mathbf{u}_{abc} = [u_{a1}, u_{b1}, u_{c1}, u_{a2}, u_{b2}, u_{c2}]^T$ con la siguiente norma de conversión:

$$\mathbf{u}_{dq} = \mathbf{T}_1(\theta) \mathbf{u}_{abc},\tag{4}$$

20 en la que θ es el ángulo que expresa la posición de rotación del rotor con respecto al estátor, según se muestra en la figura 1, y $\mathbf{T}_1(\theta)$ es una primera matriz de conversión:

$$\mathbf{T}_1(\theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_p(\delta = \theta - \gamma) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_p(\delta = \theta + \gamma) \end{bmatrix},\tag{5}$$

en la que las submatrices \mathbf{T}_p están dadas por:

$$\mathbf{T}_p(\delta) = C_1 \begin{bmatrix} \cos\delta & \cos\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen}\delta & -\text{sen}\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

en la que C_1 es un coeficiente constante de cambio de escala.

El vector de las corrientes estatóricas convertidas en rotación i_{dq} puede obtenerse del vector de las corrientes estatóricas de fase $i_{abc} = [i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}, i_{a2}, i_{b2}, i_{c2}]^T$ con la siguiente norma de conversión:

$$i_{dq} = \mathbf{T}_1(\theta) i_{abc}.$$

5 La descripción presentada anteriormente está relacionada con una máquina eléctrica que comprende dos devanados estatóricos trifásicos. Sin embargo, es sencillo generalizar las ecuaciones (1)-(6) presentadas anteriormente a un caso general en el que hay N devanados estatóricos de M fases. También en el caso general, las ecuaciones de tensión en la forma matricial serían similares a la ecuación (3) mostrada anteriormente. La matriz de inductancia L_{dq} sería una
10 matriz de $2N \times 2N$, el vector de las corrientes estatóricas convertidas en rotación i_{dq} tendrían $2N$ elementos y el vector de las tensiones estatóricas convertidas en rotación u_{dq} tendrían $2N$ elementos.

Como puede verse en las ecuaciones (2), los acoplamientos inductivos estatóricos en las direcciones d y q del primer devanado estatórico trifásico Ψ_{d1} y Ψ_{q1} también dependen de las corrientes i_{d2} e i_{q2} del segundo devanado estatórico trifásico. De forma correspondiente, los acoplamientos inductivos estatóricos en las direcciones d y q del segundo devanado estatórico trifásico Ψ_{d2} y Ψ_{q2} también dependen de las corrientes i_{d1} e i_{q1} del primer devanado estatórico trifásico. Esta dependencia cruzada complica el control de las corrientes de la máquina eléctrica. En la ecuación (3)
15 de forma matricial, la dependencia cruzada se manifiesta mediante los elementos no nulos fuera de la diagonal de la matriz L_{dq} de inductancia.

20 Junto con las realizaciones de la presente invención, se evita el problema asociado con la dependencia cruzada mencionada anteriormente utilizando tal forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo depende únicamente de una de las corrientes estatóricas convertidas en rotación a pesar de las inductancias mutuas entre los dos devanados estatóricos multifase cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo, por ejemplo, debido a una saturación magnética.

25 La forma mencionada anteriormente del modelo de la máquina eléctrica puede derivarse, por ejemplo, de la formulación matricial presentada por la ecuación (3).

La matriz L_{dq} de inductancia es simétrica y, por lo tanto, puede ser convertida en una forma diagonal con la ayuda de una segunda matriz T_2 de conversión:

$$L_{DQ} = T_2 L_{dq} T_2^T, \quad (7)$$

30 en la que L_{DQ} es la matriz diagonalizada de inductancia y la segunda matriz T_2 de conversión es $[g_1 g_2 \dots g_n]$ siendo $g_1 g_2 \dots g_n$ los vectores propios de la matriz L_{dq} de inductancia. Por ejemplo, en el caso en el que hay dos devanados estatóricos multifase, se puede presentar la segunda matriz T_2 de conversión en la forma:

$$T_2 = C_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

en la que C_2 es un coeficiente constante de cambio de escala. Por ejemplo, $C_2 = 1/\sqrt{2}$ hace a la segunda matriz de conversión ortonormal para que $T_2 T_2^T = T_2^T T_2$ sea una diagonal de matriz unidad $(1, 1, 1, 1)$.

35 La formulación matricial representada por la ecuación (3) puede ser multiplicada desde la izquierda con la segunda matriz T_2 de conversión:

$$T_2 u_{dq} = R_s T_2 i_{dq} + T_2 L_{dq} T_2^T \frac{dT_2 i_{dq}}{dt} + \omega T_2 J L_{dq} T_2^T T_2 i_{dq} + \omega T_2 J \Psi_{PMdq}, \quad (9)$$

en la que también se utiliza la norma de que $\mathbf{T}_2^T \mathbf{T}_2$ es una matriz unidad.

La ecuación (9) puede escribirse como:

$$\mathbf{u}_{DQ} = R_s \mathbf{i}_{DQ} + \mathbf{L}_{DQ} \frac{d\mathbf{i}_{DQ}}{dt} + \omega \mathbf{J}_m \mathbf{L}_{DQ} \mathbf{i}_{DQ} + \omega \mathbf{J}_m \boldsymbol{\Psi}_{PMDQ}, \quad (10)$$

en la que:

- 5 - \mathbf{u}_{DQ} es un vector de las tensiones estáticas convertidas en rotación $\mathbf{T}_2 \mathbf{u}_{dq}$,
- \mathbf{i}_{DQ} es un vector de las corrientes estáticas convertidas en rotación $\mathbf{T}_2 \mathbf{i}_{dq}$,
- \mathbf{J}_m es una matriz para la cual $\mathbf{J}_m \mathbf{T}_2 = \mathbf{T}_2 \mathbf{J}$, y
- $\boldsymbol{\Psi}_{PMDQ} = \mathbf{T}_2 \boldsymbol{\Psi}_{PMDq}$.

- 10 Dado que la matriz \mathbf{L}_{DQ} de inductancia es una matriz diagonal, cada uno de los acoplamientos inductivos estáticos de esta forma del modelo depende únicamente de una de las corrientes estáticas convertidas en rotación a pesar de las inductancias mutuas entre los dos o más devanados estáticos multifase. Junto con un control de la corriente, puede tenerse en cuenta el vector de tensión provocado por la rotación del rotor:

$$\omega \mathbf{J}_m \mathbf{L}_{DQ} \mathbf{i}_{DQ} + \omega \mathbf{J}_m \boldsymbol{\Psi}_{PMDQ}$$

- 15 como un término de alimentación directa \mathbf{u}_r que se superpone a una salida de un dispositivo de regulación de la corriente. Eliminando el término de alimentación directa mencionado anteriormente de la ecuación (10) y resolviendo a continuación, en el dominio de Laplace, el vector \mathbf{i}_{DQ} de las corrientes estáticas convertidas en rotación produce el siguiente sistema que ha de ser controlado con el dispositivo de regulación de la corriente:

$$\mathbf{i}_{DQ}(s) = (R_s \mathbf{I} + s \mathbf{L}_{DQ})^{-1} \mathbf{u}_{DQ}(s), \quad (11)$$

- 20 en la que s es la variable de Laplace y \mathbf{I} es una matriz unidad que tiene las mismas dimensiones que la matriz \mathbf{L}_{DQ} de inductancia. El vector $\mathbf{i}_{DQ}(s)$ de las corrientes estáticas convertidas en rotación representa la cantidad que ha de ser controlada, y el vector $\mathbf{u}_{DQ}(s)$ de las tensiones estáticas convertidas en rotación representa la cantidad con la ayuda de la cual se lleva a cabo el control. Las filas de la ecuación (11) representan sistemas de primer orden mutuamente independientes debido a que la matriz \mathbf{L}_{DQ} de inductancia es una matriz diagonal. Por ejemplo, la n -ésima fila de la ecuación (11) es:

$$25 \quad i_{DQ,n}(s) = \frac{1}{R_s + sL_{DQ,n}} u_{DQ,n}(s),$$

en la que $i_{DQ,n}(s)$ es la n -ésima corriente estática convertida en rotación, es decir, el n -ésimo elemento del vector $\mathbf{i}_{DQ}(s)$, $u_{DQ,n}(s)$ es la n -ésima tensión estática convertida en rotación, i.e. el n -ésimo elemento del vector $\mathbf{u}_{DQ}(s)$ y $L_{DQ,n}$ es el elemento diagonal de la n -ésima fila, o columna, de la matriz \mathbf{L}_{DQ} de inductancia.

En un caso ejemplar en el que hay dos devanados estáticos multifase, la matriz \mathbf{L}_{DQ} de inductancia es

$$30 \quad \mathbf{L}_{DQ} = \begin{bmatrix} L_{D1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{Q1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{D2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{Q2} \end{bmatrix} = 2C_2^2 \begin{bmatrix} L_d + M_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_q + M_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q - M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_d - M_d \end{bmatrix}, \quad (12a)$$

en la que C_2 es el coeficiente constante de cambio de escala presentado en la ecuación (8), y \mathbf{u}_{DQ} , \mathbf{i}_{DQ} , $\boldsymbol{\Psi}_{PMDQ}$ y \mathbf{J}_m son:

$$\mathbf{u}_{DQ} = \begin{bmatrix} u_{D1} \\ u_{Q1} \\ u_{D2} \\ u_{Q2} \end{bmatrix} = C_2 \begin{bmatrix} u_{d1} + u_{d2} \\ u_{q1} + u_{q2} \\ u_{q1} - u_{q2} \\ u_{d2} - u_{d1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_{DQ} = \begin{bmatrix} i_{D1} \\ i_{Q1} \\ i_{D2} \\ i_{Q2} \end{bmatrix} = C_2 \begin{bmatrix} i_{d1} + i_{d2} \\ i_{q1} + i_{q2} \\ i_{q1} - i_{q2} \\ i_{d2} - i_{d1} \end{bmatrix}, \quad (12b)$$

$$\Psi_{\text{PMDQ}} = \begin{bmatrix} \Psi_{\text{PMD1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2C_2 \Psi_{\text{PMd}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{y } \mathbf{J}_m = \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12c)$$

La ecuación (10), cuando se escribe en la forma de componentes, produce:

$$\begin{cases} u_{D1} = R_s i_{D1} + \frac{d\Psi_{D1}}{dt} - \omega \Psi_{Q1} \\ u_{Q1} = R_s i_{Q1} + \frac{d\Psi_{Q1}}{dt} + \omega \Psi_{D1} \\ u_{D2} = R_s i_{D2} + \frac{d\Psi_{D2}}{dt} - \omega \Psi_{Q2} \\ u_{Q2} = R_s i_{Q2} + \frac{d\Psi_{Q2}}{dt} + \omega \Psi_{D2} \end{cases}, \quad (13)$$

en la que los acoplamientos inductivos del modelo son:

$$\begin{cases} \Psi_{D1} = L_{D1} i_{D1} + \Psi_{\text{PMD1}} \\ \Psi_{Q1} = L_{Q1} i_{Q1} \\ \Psi_{D2} = L_{D2} i_{D2} \\ \Psi_{Q2} = L_{Q2} i_{Q2} \end{cases}. \quad (14)$$

5 Según se muestra mediante las ecuaciones (14), cada uno de los acoplamientos inductivos estáticos Ψ_{D1} , Ψ_{Q1} , Ψ_{D2} y Ψ_{Q2} de esta forma del modelo depende únicamente de una de las corrientes estáticas convertidas en rotación i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , e i_{Q2} cuando los parámetros L_{D1} , L_{Q1} , L_{D2} , y L_{Q2} de inductancia del modelo son constantes, es decir, inalterados. La saturación magnética puede provocar, por ejemplo, que la corriente estática convertida en rotación i_{D2} afecte al valor, por ejemplo, de L_{D1} y, por lo tanto, i_{D2} puede afectar indirectamente a Ψ_{D1} . Sin embargo, cuando los parámetros de inductancia no son alterados, cada acoplamiento inductivo depende únicamente de una corriente estática convertida en rotación.

Las tensiones provocadas por la rotación del rotor son:

$$\begin{cases} u_{D1,ff} = -\omega L_{Q1} i_{Q1} \\ u_{Q1,ff} = \omega L_{D1} i_{D1} + \omega \Psi_{\text{PMD1}} \\ u_{D2,ff} = -\omega L_{Q2} i_{Q2} \\ u_{Q2,ff} = \omega L_{D2} i_{D2} \end{cases}. \quad (15)$$

15 Por lo tanto, los sistemas de primer orden mutuamente independientes que han de ser regulados con un dispositivo de regulación de la corriente son:

$$\begin{cases} i_{D1}(s) = \frac{1}{R_s + sL_{D1}} u_{D1}(s) \\ i_{Q1}(s) = \frac{1}{R_s + sL_{D1}} u_{Q1}(s) \\ i_{D2}(s) = \frac{1}{R_s + sL_{D1}} u_{D2}(s) \\ i_{Q2}(s) = \frac{1}{R_s + sL_{D1}} u_{Q2}(s) \end{cases}. \quad (16)$$

Las corrientes estáticas convertidas en rotación i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , e i_{Q2} están acotadas a las corrientes estáticas i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} , i_{a2} , i_{b2} , e i_{c2} de fase mediante una tercera matriz $T_3(\theta)$ de conversión:

$$\mathbf{i}_{DQ} = T_3(\theta)\mathbf{i}_{abc} = T_2T_1(\theta)\mathbf{i}_{abc}, \quad (17)$$

$$\mathbf{i}_{abc} = T_3^T(\theta)\mathbf{i}_{DQ}, \quad (18)$$

5 en la que $T_1(\theta)$ es la primera matriz de conversión definida en las ecuaciones (5) y (6). De forma correspondiente, las tensiones estáticas convertidas en rotación u_{D1} , u_{Q1} , u_{D2} , y u_{Q2} están acotadas a las tensiones estáticas u_{a1} , u_{b1} , u_{c1} , u_{a2} , u_{b2} , y u_{c2} de fase mediante la tercera matriz $T_3(\theta)$ de conversión:

$$\mathbf{u}_{DQ} = T_3(\theta)\mathbf{u}_{abc}, \quad (19)$$

$$\mathbf{u}_{abc} = T_3^T(\theta)\mathbf{u}_{DQ}. \quad (20)$$

10 Un aparato según una realización ejemplar de la invención comprende:

- un medio para producir señales de control de la tensión, que son adecuadas para controlar una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estáticos multifase, en función de las corrientes estáticas convertidas en rotación expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos inductancias de los dos o más devanados estáticos multifase y las inductancias mutuas entre los dos o más devanados estáticos multifase, y
- un medio para convertir corrientes estáticas de fase de los dos o más devanados estáticos multifase en las corrientes estáticas convertidas en rotación con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estáticos del modelo solo depende de una de las corrientes estáticas convertidas en rotación cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo.

La Figura 2 muestra un diagrama funcional de bloques de un aparato 200 según una realización ejemplar de la invención con el fin de controlar una máquina eléctrica 202 que comprende dos o más devanados estáticos multifase. En el caso ejemplar mostrado en la figura 2, la máquina eléctrica comprende dos devanados estáticos multifase que pueden ser, por ejemplo, devanados estáticos trifásicos. El aparato comprende un sistema 201 de procesamiento configurado para producir señales \mathbf{u}_1 y \mathbf{u}_2 de control de la tensión adecuadas para controlar la máquina eléctrica 202. El aparato puede comprender, además, moduladores 203 y 204 para producir señales \mathbf{s}_1 y \mathbf{s}_2 de control de conmutación en función de las señales \mathbf{u}_1 y \mathbf{u}_2 de control de la tensión y etapas 212 y 213 de potencia para producir tensiones de alimentación de los devanados estáticos en función de las señales \mathbf{s}_1 y \mathbf{s}_2 de control de conmutación. De forma alternativa, el aparato puede comprender interfaces de señales para conectarlo a un sistema externo que comprende moduladores y etapas de potencia. Los moduladores 203 y 204 pueden ser, por ejemplo, moduladores por anchura de impulsos "PWM". En este caso, las señales \mathbf{u}_1 y \mathbf{u}_2 de control de la tensión están dispuestas para expresar valores diana de las tensiones de fase de los devanados estáticos multifase. Como otro ejemplo, los moduladores 203 y 204 pueden ser moduladores por anchura de impulsos de vector espacial "SVPWM". En este caso, cada una de las señales \mathbf{u}_1 y \mathbf{u}_2 de control de la tensión puede expresarse como un vector en el sistema de coordenadas α - β ilustrado en la figura 1.

El sistema 201 de procesamiento está configurado para producir las señales \mathbf{u}_1 y \mathbf{u}_2 de control de la tensión en función de las corrientes estáticas convertidas en rotación i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , e i_{Q2} que son expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos las inductancias de los dos devanados estáticos multifase y las inductancias mutuas entre los dos devanados estáticos multifase. Las corrientes estáticas i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} , i_{a2} , i_{b2} , i_{c2} de fase se convierten en las corrientes estáticas convertidas en rotación i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , e i_{Q2} con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estáticos Ψ_{D1} , Ψ_{Q1} , Ψ_{D2} y Ψ_{Q2} del modelo solo depende de una de las corrientes estáticas convertidas en rotación i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , e i_{Q2} cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo. Con la ecuación (17) se presenta una norma de conversión del tipo mencionado anteriormente. Un bloque funcional 205 mostrado en la figura 2 representa la conversión de las corrientes estáticas de fase en las corrientes estáticas convertidas en rotación.

En la realización ejemplar ilustrada en la figura 2, el sistema 201 de procesamiento está configurado para dirigir las funciones 206, 207, 208 y 209 del regulador a diferencias e_{iD1} , e_{iQ1} , e_{iD2} y e_{iQ2} entre las corrientes estáticas convertidas en rotación i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , e i_{Q2} y sus valores diana $i_{D1,ref}$, $i_{Q1,ref}$, $i_{D2,ref}$, e $i_{Q2,ref}$ como se ilustra en la figura 2. Las funciones 206-209 del regulador pueden implementarse, por ejemplo, con reguladores proporcionales-integrales "PI" mutuamente independientes o con reguladores proporcionales-integrales-derivativos "PID" mutuamente independientes. Las salidas de las funciones 206-209 del regulador se superponen con las tensiones $u_{D1,ff}$, $u_{Q1,ff}$, $u_{D2,ff}$, y $u_{Q2,ff}$ provocadas por la rotación del rotor y expresadas en el sistema de coordenadas acotado al rotor. Se proporcionan las tensiones $u_{D1,ff}$, $u_{Q1,ff}$, $u_{D2,ff}$, y $u_{Q2,ff}$ mediante las ecuaciones (15). Un bloque funcional 210 mostrado en la figura 2 representa la formación de las tensiones $u_{D1,ff}$, $u_{Q1,ff}$, $u_{D2,ff}$, y $u_{Q2,ff}$ en función de las corrientes estáticas

convertidas en rotación i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , e i_{Q2} , de la velocidad rotacional ω del rotor, de los parámetros de inductancia del modelo y del acoplamiento inductivo Ψ_{PMD1} generado por el material para imanes permanentes del rotor. Las salidas de la superposición representan valores diana de tensión $u_{D1,ref}$, $u_{Q1,ref}$, $u_{D2,ref}$, y $u_{Q2,ref}$ que son valores deseados de las tensiones estáticas convertidas en rotación u_{D1} , u_{Q1} , u_{D2} , y u_{Q2} . El sistema 201 de procesamiento está configurado para convertir los valores diana de tensión $u_{D1,ref}$, $u_{Q1,ref}$, $u_{D2,ref}$, y $u_{Q2,ref}$ en valores de tensión expresados en un sistema adecuado de coordenadas acotado al estátor de la máquina eléctrica, de forma que produzca las señales u_1 y u_2 de control de la tensión. Las tensiones diana de tensión $u_{D1,ref}$, $u_{Q1,ref}$, $u_{D2,ref}$, y $u_{Q2,ref}$ pueden ser convertidas, por ejemplo, en valores de tensión correspondientes a las tensiones estáticas de fase con la ayuda de la ecuación (20), es decir,

$$[u_1 \ u_2]^T = C_3 T_3^T(\theta) [u_{D1,ref} \ u_{Q1,ref} \ u_{D2,ref} \ u_{Q2,ref}]^T, \quad (21)$$

en la que C_3 es un coeficiente constante de cambio de escala, y se supone que las señales u_1 y u_2 de control de la tensión son vectores de fila de valores proporcionales a las tensiones diana de fase de los dos devanados estáticos multifase. También es posible convertir los valores diana de tensión $u_{D1,ref}$, $u_{Q1,ref}$, $u_{D2,ref}$, y $u_{Q2,ref}$ en valores de tensión expresados en el sistema de coordenadas α - β ilustrado en la figura 1. Un bloque funcional 211 mostrado en la figura 2 representa la conversión de los valores diana de tensión $u_{D1,ref}$, $u_{Q1,ref}$, $u_{D2,ref}$, y $u_{Q2,ref}$ en los valores de tensión expresados en el sistema de coordenadas acotado al estátor.

En un aparato según una realización ejemplar de la invención, el sistema 201 de procesamiento está configurado para determinar los valores diana de las corrientes estáticas convertidas en rotación $i_{D1,ref}$, $i_{Q1,ref}$, $i_{D2,ref}$, e $i_{Q2,ref}$ en función, al menos parcialmente, de un par deseado T_{ref} . Mediante un análisis sencillo, se puede mostrar que se puede estimar el par T_e producido por la máquina eléctrica mediante la siguiente ecuación:

$$T_e = C_T p (\Psi_{PMD1} i_{Q1} + (L_{D1} - L_{Q1}) i_{D1} i_{Q1} + (L_{D2} - L_{Q2}) i_{D2} i_{Q2}), \quad (22)$$

en la que p es el número de pares polares de la máquina eléctrica y C_T es un coeficiente constante de cambio de escala.

En el caso ejemplar mostrado en la figura 2, la máquina eléctrica comprende dos devanados estáticos multifase. En este caso, las corrientes estáticas convertidas en rotación i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , e i_{Q2} son según las ecuaciones (12b):

$$\begin{bmatrix} i_{D1} \\ i_{Q1} \\ i_{D2} \\ i_{Q2} \end{bmatrix} = C_2 \begin{bmatrix} i_{d1} + i_{d2} \\ i_{q1} + i_{q2} \\ i_{q1} - i_{q2} \\ i_{d2} - i_{d1} \end{bmatrix},$$

en la que C_2 es el coeficiente constante de cambio de escala definido en la ecuación (8) e i_{d1} es la componente del eje directo de un vector espacial de la primera corriente creado por las corrientes estáticas i_{a1} , i_{b1} , e i_{c1} de fase del primer devanado de los dos devanados estáticos multifase, i_{q1} es la componente del eje de cuadratura del vector espacial de la primera corriente, i_{d2} es la componente del eje directo de un vector espacial de la segunda corriente creado por las corrientes estáticas i_{a2} , i_{b2} , e i_{c2} de fase del segundo devanado de los dos devanados estáticos multifase e i_{q2} es una componente del eje de cuadratura del vector espacial de la segunda corriente.

De forma ventajosa, pero no necesariamente, se selecciona que los valores diana de las corrientes estáticas convertidas en rotación i_{D2} e i_{Q2} sean ceros, es decir $i_{D2,ref} = i_{Q2,ref} = 0$. Esta selección es, en realidad, un intento por lograr una carga simétrica entre los dos devanados estáticos multifase debido a que $i_{d1} = i_{d2}$ e $i_{q1} = i_{q2}$ cuando $i_{D2,ref} = i_{Q2,ref} = 0$. En este caso, se puede proporcionar el valor de referencia $i_{Q1,ref}$ como:

$$i_{Q1,ref} = \frac{T_{ref}}{C_T p (\Psi_{PMD1} + (L_{D1} - L_{Q1}) i_{D1,ref})}. \quad (23)$$

Se puede seleccionar el valor $i_{D1,ref}$ de referencia, por ejemplo, de forma que se minimice la corriente estática total y que la tensión estática tenga un valor deseado. Un bloque funcional 214 mostrado en la figura 2 representa la determinación de los valores diana de las corrientes estáticas convertidas en rotación $i_{D1,ref}$, $i_{Q1,ref}$, $i_{D2,ref}$, e $i_{Q2,ref}$ en función, al menos en parte, del par deseado T_{ref} .

En un aparato según una realización ejemplar de la invención, el sistema 201 de procesamiento está configurado para utilizar un ángulo medido θ de posición del rotor en la conversión de las corrientes estáticas de fase de los devanados estáticos multifase en las corrientes estáticas convertidas en rotación.

En un aparato según una realización ejemplar de la invención, el sistema 201 de procesamiento está configurado para estimar el ángulo θ de posición del rotor en función de una o más magnitudes eléctricas relacionadas con la máquina

eléctrica y para utilizar el ángulo estimado de posición en la conversión de las corrientes estáticas de fase de los devanados estáticos multifase en las corrientes estáticas convertidas en rotación. Se pueden encontrar procedimientos para estimar el ángulo θ de posición del rotor, por ejemplo, en las siguientes publicaciones: T. Halkosaari: "Speed Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Wind Power Generator - The Redundant Drive Concept", en Wind Power. InTech, 2010, 558 p., y A. Piippo, M. Hinkkanen, y J. Luomi: "Sensorless Control of PMSM Drives Using a Combination of Voltage Model and HF Signal Injection" en Conference Record of the 39th IEEE-Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting, vol 2, pp 964-970, Seattle, Washington, EE. UU.

El sistema 201 de procesamiento puede implementarse con uno o más circuitos de procesador, cada uno de los cuales puede ser un circuito de procesador programable dotado de soporte lógico apropiado, un circuito dedicado de soporte lógico tal como, por ejemplo, un circuito integrado para aplicaciones específicas "ASIC", o un circuito configurable de soporte físico tal como, por ejemplo, una matriz de puertas de campo programable "FPGA". Por ejemplo, algunos de los bloques funcionales 205-211 y 214 pueden implementarse con un circuito dedicado o configurable de soporte físico y algunos de estos bloques funcionales pueden implementarse con uno o más circuitos de procesador programable, o todos estos bloques funcionales pueden implementarse con uno o más circuitos de procesador programable o con circuitos dedicados o configurables de soporte físico. La presente invención no está limitada a ningún procedimiento de implementación.

La Figura 3 es un diagrama esquemático de flujo de un procedimiento según una realización ejemplar de la invención para controlar una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estáticos multifase. El procedimiento comprende, en una etapa 301, convertir corrientes estáticas de fase de los dos o más devanados estáticos multifase en corrientes estáticas convertidas en rotación expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica. La conversión se lleva a cabo utilizando una norma de conversión que se corresponde con una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estáticos del modelo depende únicamente de una de las corrientes estáticas convertidas en rotación a pesar de las inductancias mutuas entre los dos o más devanados estáticos multifase cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo. El procedimiento comprende, además, en una etapa 302, el control de las etapas de potencia conectadas con los devanados estáticos multifase en función de las corrientes estáticas convertidas en rotación y en función del modelo de la máquina eléctrica.

En un procedimiento según una realización ejemplar de la invención, las corrientes estáticas de fase de dos devanados estáticos multifase se convierten en cuatro corrientes estáticas convertidas en rotación, y los coeficientes de inductancia entre los acoplamientos inductivos estáticos y las corrientes estáticas convertidas en rotación son proporcionales a: $L_d + M_d$, $L_q + M_q$, $L_d - M_d$, y $L_q - M_q$, siendo L_d una inductancia del eje directo, siendo M_d una inductancia mutua del eje directo entre los dos devanados estáticos multifase, siendo L_q una inductancia del eje de cuadratura y siendo M_q una inductancia mutua del eje de cuadratura entre los dos devanados estáticos multifase.

En un procedimiento según una realización ejemplar de la invención, las cuatro corrientes estáticas convertidas en rotación son proporcionales a $i_{d1} + i_{d2}$, $i_{q1} + i_{q2}$, $i_{q1} - i_{q2}$, e $i_{d2} - i_{d1}$, respectivamente, siendo i_{d1} la componente del eje directo de un vector espacial de la primera corriente creado por las corrientes estáticas de fase del primer devanado de los dos devanados estáticos multifase, siendo i_{q1} la componente del eje de cuadratura del vector espacial de la primera corriente, siendo i_{d2} la componente del eje directo de un vector espacial de la segunda corriente creado por las corrientes estáticas de fase del segundo devanado de los dos devanados estáticos multifase, y siendo i_{q2} la componente del eje de cuadratura del vector espacial de la segunda corriente.

En un procedimiento según una realización ejemplar de la invención, los valores diana de las corrientes estáticas convertidas en rotación que son proporcionales a $i_{q1} - i_{q2}$ y a $i_{d2} - i_{d1}$ son ceros, de forma que se logre una carga simétrica entre los dos devanados estáticos multifase.

Un procedimiento según una realización ejemplar de la invención comprende medir un ángulo de posición del rotor y utilizar el ángulo medido de posición en la conversión de las corrientes estáticas de fase de los dos o más devanados estáticos multifase en las corrientes estáticas convertidas en rotación.

Un procedimiento según una realización ejemplar de la invención comprende estimar un ángulo de posición del rotor en función de una o más magnitudes eléctricas relacionadas con la máquina eléctrica y utilizar el ángulo estimado de posición en la conversión de las corrientes estáticas de fase de los dos o más devanados estáticos multifase en las corrientes estáticas convertidas en rotación.

En un procedimiento según una realización ejemplar de la invención, el control de las etapas de potencia comprende:

- regular las tensiones estáticas convertidas en rotación expresadas en el sistema de coordenadas acotado al rotor en función de las diferencias entre las corrientes estáticas convertidas en rotación y sus valores diana, y
- convertir las tensiones estáticas convertidas en rotación en tensiones estáticas expresadas en un sistema de coordenadas acotado al estator de la máquina eléctrica.

En un procedimiento según una realización ejemplar de la invención, la regulación de las tensiones estáticas convertidas en rotación comprende:

- procesar las diferencias entre las corrientes estáticas convertidas en rotación y sus valores diana con un regulador, y
- superponer, a las salidas del regulador, tensiones provocadas por la rotación del rotor y expresadas en el sistema de coordenadas acotado al rotor.

5 El regulador puede comprender, por ejemplo, un regulador proporcional-integral "PI" o proporcional-integral-derivativo "PID" separado para cada una de las diferencias entre las corrientes estáticas convertidas en rotación y sus valores diana.

Un procedimiento según una realización ejemplar de la invención comprende determinar los valores diana de las corrientes estáticas convertidas en rotación en función, al menos parcialmente, de un par deseado.

10 Un programa de ordenador según una realización ejemplar de la invención comprende módulos de soporte lógico con el fin de controlar una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estáticos multifase. Los módulos de soporte lógico comprenden instrucciones ejecutables por un ordenador para controlar un procesador programable para:

- 15 - producir señales de control de la tensión, adecuadas para controlar una máquina eléctrica que comprende dos o más devanados estáticos multifase, en función de las corrientes estáticas convertidas en rotación expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos las inductancias de los dos o más devanados estáticos multifase y las inductancias mutuas entre los dos o más devanados estáticos multifase,
- 20 - convertir las corrientes estáticas de fase de los dos o más devanados estáticos multifase en las corrientes estáticas convertidas en rotación con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estáticos del modelo solo depende de una de las corrientes estáticas convertidas en rotación cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo.

25 Los módulos de soporte lógico pueden ser, por ejemplo, subrutinas o funciones implementadas con un lenguaje adecuado de programación y con un compilador adecuado para el lenguaje de programación y el procesador programable.

Un producto de programa de ordenador según una realización ejemplar de la invención comprende un medio legible por un ordenador, por ejemplo un disco compacto "CD", codificado con un programa de ordenador según una realización de la invención.

30 Una señal según una realización ejemplar de la invención está codificada para tener información que define un programa de ordenador según una realización de la invención.

No se deberían interpretar como limitantes los ejemplos específicos proporcionados en la descripción proporcionada anteriormente. Por lo tanto, la invención no está limitada simplemente a las realizaciones descritas anteriormente. Son posibles otras variaciones y modificaciones dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

35

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para controlar una máquina eléctrica que comprende dos devanados estatóricos multifase, comprendiendo el procedimiento:

- 5 - controlar (302) las etapas de potencia conectadas con los devanados estatóricos multifase en función de cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación (i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , i_{Q2}) expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos las inductancias de los dos devanados estatóricos multifase y las inductancias mutuas entre los dos devanados estatóricos multifase, y
- 10 - convertir (301) las corrientes estatóricas de fase de los dos devanados estatóricos multifase en las cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en el que cada uno de los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo depende únicamente de una de las corrientes estatóricas convertidas en rotación cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo,

15 **caracterizado porque** los coeficientes de inductancias entre los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo y las corrientes estatóricas convertidas en rotación son proporcionales a: $L_d + M_d$, $L_q + M_q$, $L_d - M_d$, y $L_q - M_q$, siendo L_d una inductancia del eje directo, siendo M_d una inductancia mutua del eje directo entre los dos devanados estatóricos multifase, siendo L_q una inductancia del eje de cuadratura, y siendo M_q una inductancia mutua del eje de cuadratura entre los dos devanados estatóricos multifase.

20 2. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1, en el que el control de las etapas de potencia comprende regular las tensiones estatóricas convertidas en rotación expresadas en el sistema de coordenadas acotado al rotor en función de diferencias entre las corrientes estatóricas convertidas en rotación y sus valores diana, y convertir las tensiones estatóricas convertidas en rotación en tensiones estatóricas expresadas en un sistema de coordenadas acotado al estátor de la máquina eléctrica.

25 3. Un procedimiento según la reivindicación 2, en el que la regulación de las tensiones estatóricas convertidas en rotación comprende procesar las diferencias entre las corrientes estatóricas convertidas en rotación y sus valores diana con un regulador y superponer, a las salidas del regulador, las tensiones provocadas por la rotación del rotor y expresadas en el sistema de coordenadas acotado al rotor.

30 4. Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que las cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación son proporcionales a $i_{d1} + i_{d2}$, $i_{q1} + i_{q2}$, $i_{q1} - i_{q2}$, e $i_{d2} - i_{d1}$, respectivamente, siendo i_{d1} una componente del eje directo de un vector espacial de la primera corriente creado por las corrientes estatóricas de fase de un primer devanado de los dos devanados estatóricos multifase, siendo i_{q1} una componente del eje de cuadratura del vector espacial de la primera corriente, siendo i_{d2} una componente del eje directo de un vector espacial de la segunda corriente creado por las corrientes estatóricas de fase de un segundo devanado de los dos devanados estatóricos multifase, y siendo i_{q2} una componente del eje de cuadratura del vector espacial de la segunda corriente.

35 5. Un procedimiento según la reivindicación 4, en el que los valores diana de las corrientes estatóricas convertidas en rotación que son proporcionales a $i_{q1} - i_{q2}$ e $i_{d2} - i_{d1}$ son ceros, de forma que se logre una carga simétrica entre los dos devanados estatóricos multifase.

6. Un aparato (200) que comprende un sistema (201) de procesamiento configurado para:

- 40 - producir señales de control de la tensión adecuadas para controlar una máquina eléctrica que comprende dos devanados estatóricos multifase, estando configurado el sistema de procesamiento para producir las señales de control de la tensión en función de cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación (i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , i_{Q2}) expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos las inductancias de los dos devanados estatóricos multifase y las inductancias mutuas entre los dos devanados estatóricos multifase, y
- 45 - convertir las corrientes estatóricas de fase de los dos devanados estatóricos multifase en las cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo depende únicamente de una de las corrientes estatóricas convertidas en rotación cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo,

50 **caracterizado porque** los coeficientes de inductancia entre los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo y las corrientes estatóricas convertidas en rotación son proporcionales a: $L_d + M_d$, $L_q + M_q$, $L_d - M_d$, y $L_q - M_q$, siendo L_d una inductancia del eje directo, siendo M_d una inductancia mutua del eje directo entre los dos devanados estatóricos multifase, siendo L_q una inductancia del eje de cuadratura y siendo M_q una inductancia mutua del eje de cuadratura entre los dos devanados estatóricos multifase.

7. Un aparato según la reivindicación 6, en el que el sistema de procesamiento está configurado para utilizar un ángulo medido de posición del rotor en la conversión de las corrientes estatóricas de fase de los dos devanados estatóricos multifase en las corrientes estatóricas convertidas en rotación.
8. Un aparato según la reivindicación 6, en el que el sistema de procesamiento está configurado para estimar un ángulo de posición del rotor en función de una o más magnitudes eléctricas relacionadas con la máquina eléctrica y para utilizar el ángulo estimado de posición en la conversión de las corrientes estatóricas de fase de los dos devanados estatóricos multifase en las corrientes estatóricas convertidas en rotación.
9. Un aparato según cualquiera de las reivindicaciones 6-8, en el que el sistema de procesamiento está configurado para:
- dirigir las funciones del regulador a diferencias entre las corrientes estatóricas convertidas en rotación y sus valores diana,
 - superponer, a las salidas de las funciones de regulador, tensiones provocadas por la rotación del rotor y expresadas en el sistema de coordenadas acotado al rotor, representando las salidas de la superposición de los valores diana de la tensión expresados en el sistema de coordenadas acotado al rotor, y
 - convertir los valores diana de tensión a un sistema de coordenadas acotado al estátor de la máquina eléctrica, de forma que se produzcan las señales de control de la tensión adecuadas para controlar la máquina eléctrica.
10. Un aparato según la reivindicación 9, en el que el sistema de procesamiento está configurado para dirigir una función de regulador proporcional-integral o proporcional-integral-derivativo separado a cada una de las diferencias entre las corrientes estatóricas convertidas en rotación y sus valores diana.
11. Un aparato según la reivindicación 9 o 10, en el que el sistema de procesamiento está configurado para determinar los valores diana de las corrientes estatóricas convertidas en rotación en función, al menos en parte, de un par deseado.
12. Un aparato según la reivindicación 6, en el que las cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación son proporcionales a $i_{d1} + i_{d2}$, $i_{q1} + i_{q2}$, $i_{q1} - i_{q2}$, e $i_{d2} - i_{d1}$, respectivamente, siendo i_{d1} una componente del eje directo de un vector espacial de la primera corriente creado por las corrientes estatóricas de fase de un primer devanado de los dos devanados estatóricos multifase, siendo i_{q1} una componente del eje de cuadratura del vector espacial de la primera corriente, siendo i_{d2} una componente del eje directo de un vector espacial de la segunda corriente creado por las corrientes estatóricas de fase de un segundo devanado de los dos devanados estatóricos multifase y siendo i_{q2} una componente del eje de cuadratura del vector espacial de la segunda corriente.
13. Un aparato según la reivindicación 12, en el que el sistema de procesamiento está configurado para regular las corrientes estatóricas convertidas en rotación que son proporcionales a $i_{q1} - i_{q2}$ e $i_{d2} - i_{d1}$ haciéndolas cero, de forma que se logre una carga simétrica entre los dos devanados estatóricos multifase.
14. Un aparato según cualquiera de las reivindicaciones 6-13, en el que el aparato comprende, además, moduladores (203, 204) para producir señales de control de conmutación en función de las señales de control de la tensión, y etapas (212, 213) de potencia para proporcionar tensiones de alimentación a los devanados estatóricos multifase en función de las señales de control de conmutación.
15. Un programa de ordenador que comprende instrucciones ejecutables por un ordenador para controlar un procesador programable para:
- producir valores diana de tensión, adecuados para controlar una máquina eléctrica que comprende dos devanados estatóricos multifase, en función de cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación (i_{D1} , i_{Q1} , i_{D2} , i_{Q2}) expresadas en un sistema de coordenadas acotado a un rotor de la máquina eléctrica y en función de un modelo de la máquina eléctrica que modela al menos las inductancias de los dos devanados estatóricos multifase y las inductancias mutuas entre los dos devanados estatóricos multifase, y
 - convertir corrientes estatóricas de fase de los dos devanados estatóricos multifase en las cuatro corrientes estatóricas convertidas en rotación con una norma de conversión correspondiente a una forma del modelo de la máquina eléctrica en la que cada uno de los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo depende únicamente de una de las corrientes estatóricas convertidas en rotación cuando no se alteran los parámetros de inductancia del modelo,
- caracterizado porque** los coeficientes de inductancia entre los acoplamientos inductivos estatóricos del modelo y las corrientes estatóricas convertidas en rotación son proporcionales a: $L_d + M_d$, $L_q + M_q$, $L_d - M_d$ y $L_q - M_q$, siendo L_d una inductancia del eje directo, siendo M_d una inductancia mutua del eje directo entre los dos devanados estatóricos multifase, siendo L_q una inductancia del eje de cuadratura y siendo M_q una inductancia mutua del eje de cuadratura entre los dos devanados estatóricos multifase.

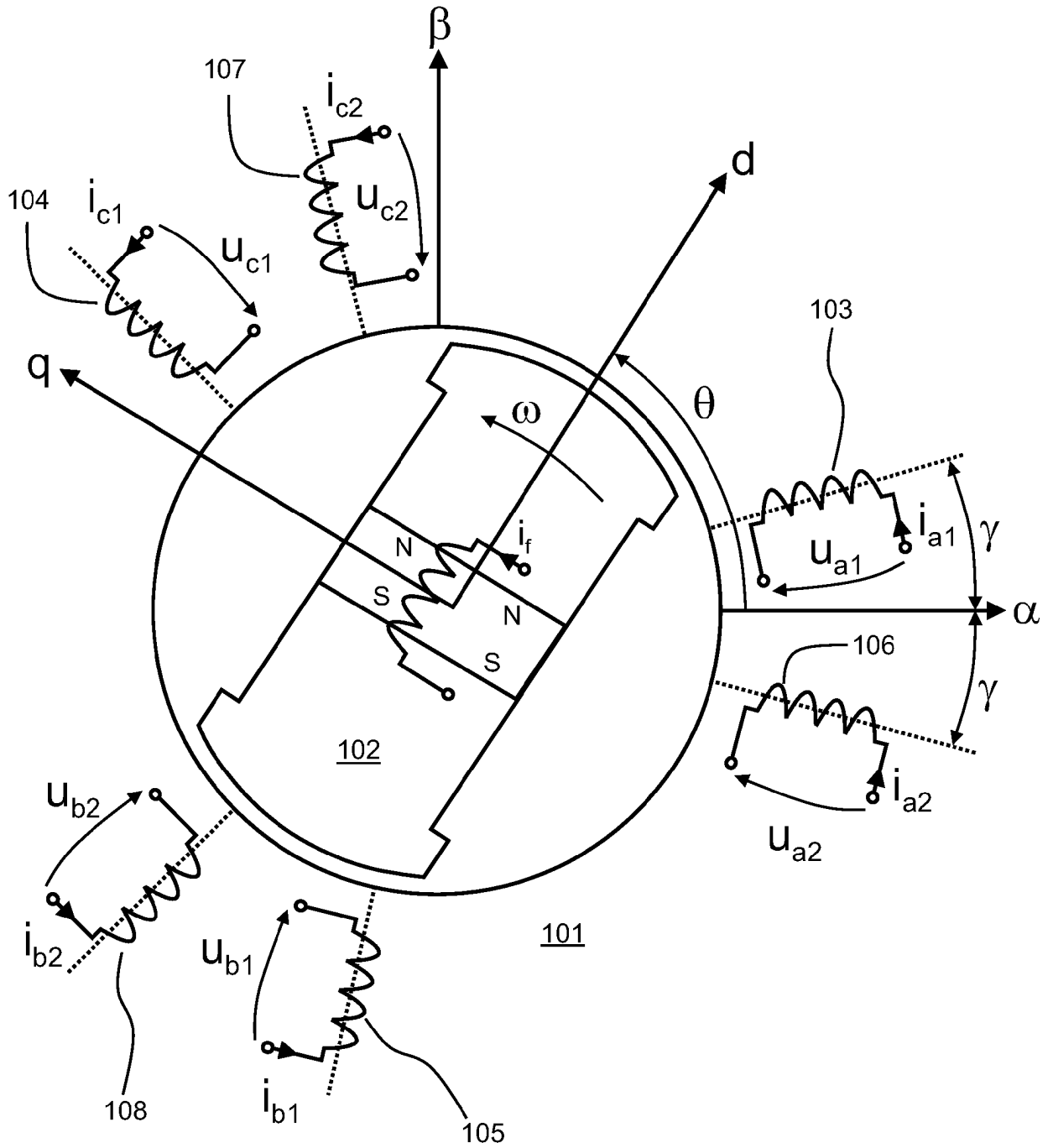


Figura 1, técnica anterior

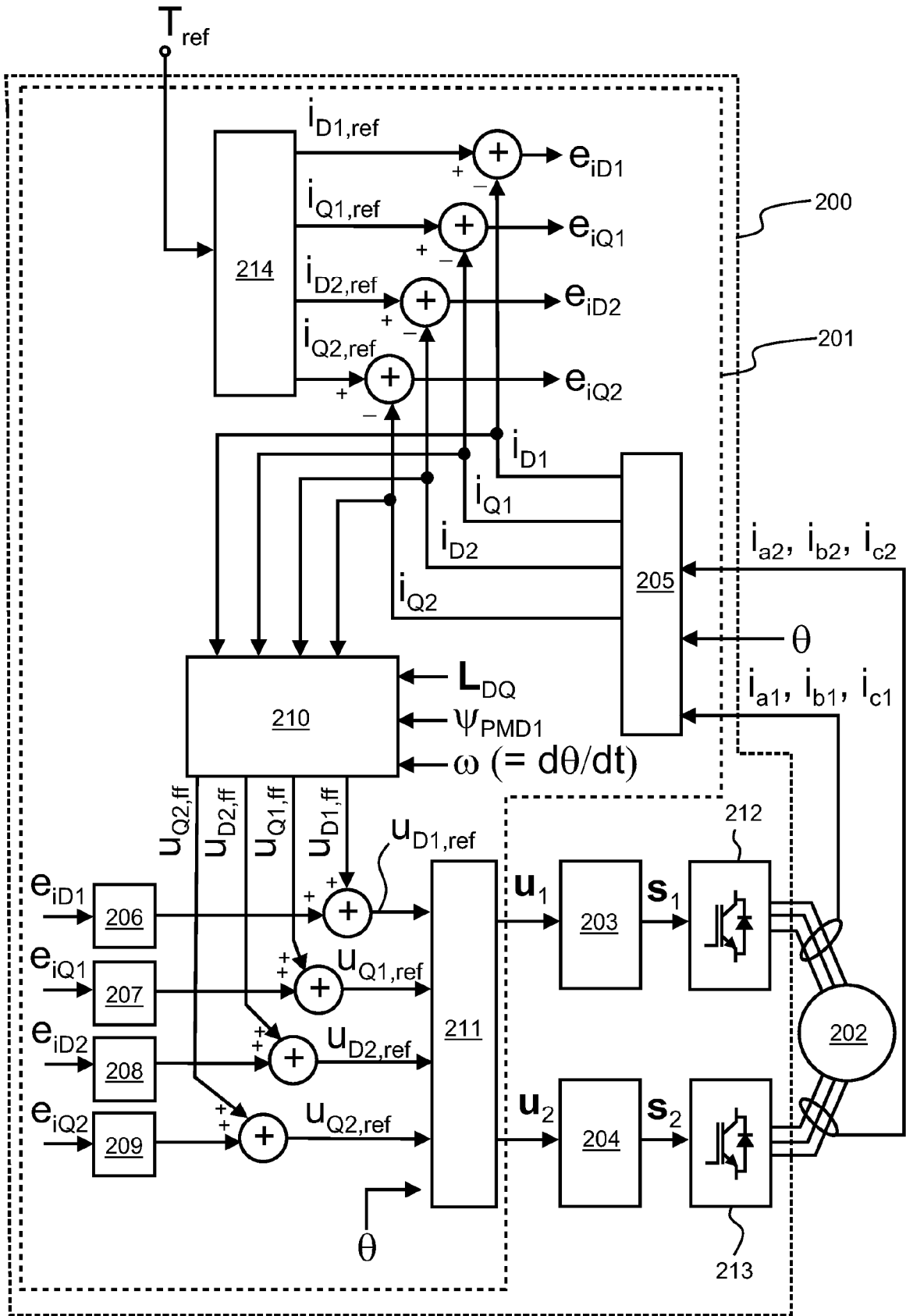


Figura 2

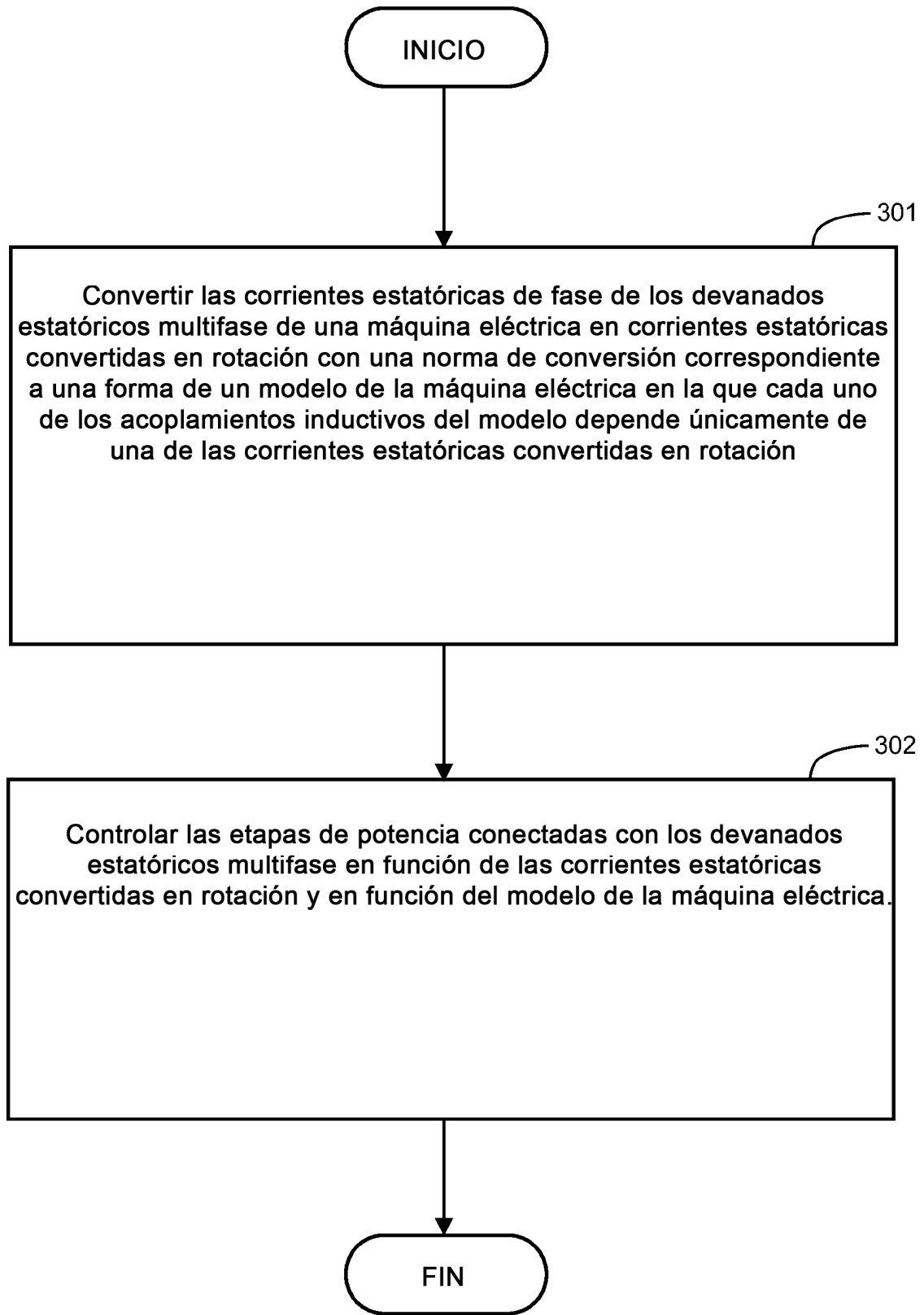


Figura 3