

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 372 551**

51 Int. Cl.:

H02P 25/22 (2006.01)

H02P 9/10 (2006.01)

H02P 21/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08165289 .3**

96 Fecha de presentación: **26.09.2008**

97 Número de publicación de la solicitud: **2169822**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **31.03.2010**

54

Título: **PROCEDIMIENTO Y APARATO PARA COMPARTIR CARGA DINÁMICA.**

45

Fecha de publicación de la mención BOPI:
23.01.2012

45

Fecha de la publicación del folleto de la patente:
23.01.2012

73

Titular/es:
Vestas Wind Systems A/S
Hedeager 44
8200 Aarhus N, DK

72

Inventor/es:
Shu Yu, Cao;
Helle, Lars;
Tripathi, Anshuman y
Larsen, Kim B

74

Agente: **Arias Sanz, Juan**

ES 2 372 551 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 compartir carga dinámica

Campo de la técnica

- 5 La presente invención se refiere en general a generadores de múltiples fases, y más específicamente a generadores modulares que comprenden múltiples generadores de tres fases con bobinas intercaladas. La invención también se refiere a un controlador adecuado para estos generadores.

Antecedentes de la invención

- 10 Los generadores de energía eléctrica son dispositivos que convierten la energía mecánica en energía eléctrica. En un generador de corriente alterna, el rotor es accionado mediante, por ejemplo, una turbina y las corrientes eléctricas son inducidas en las bobinas del estátor del generador. Un generador de corriente alterna es normalmente de tipo sincrónico o de tipo asincrónico. Durante mucho tiempo, los generadores sincrónicos han sido utilizados en sistemas de energía de diferentes tipos. Los generadores sincrónicos, por ejemplo, son utilizados en sistemas de gran energía, tales como plantas de energía nuclear, así como en pequeños sistemas aislados, tales como plantas de energía eólica.

- 15 En contraste con el generador asincrónico (o generador de inducción), que utiliza la inducción para proporcionar un flujo magnético, el generador sincrónico utiliza un imán permanente (PM) o magnetización eléctrica para producir su flujo de magnetización. En este sentido, el uso de generadores de imanes permanentes ha encontrado una creciente aceptación en los últimos años, debida principalmente a la necesidad de componentes de excitación de bajo costo y fiables. La aplicación de nuevos materiales magnéticos permanentes se ha traducido en generadores de alta eficiencia que son superiores a otros tipos de generadores de muchas maneras.

- 20 Un generador sincrónico normalmente comprende tres fases, pero en los últimos años se han realizado muchas investigaciones relacionadas con generadores de múltiples fases, muchas de ellas hacia generadores de seis fases. El interés en los generadores de múltiples fases se encuentra principalmente en el hecho de que con muchas fases, las altas corrientes asociadas a los generadores de alta energía se pueden dividir entre más fases. Otras ventajas de los generadores de múltiples fases en comparación con los generadores de tres fases son, por ejemplo, inferiores niveles de ruido en el mismo nivel de energía, menor distorsión armónica y menor EMI.

- 25 Los generadores con seis o más bobinas de fase se encuentran principalmente en la aplicación de conversión de energía de la turbina eólica de índice completo, donde se desea compartir la carga y distribución de energía de salida entre los módulos del convertidor, así como la escalabilidad de la energía de salida en viento bajo y alto. Un enfoque para la implementación de un generador de múltiples fases, tal como un generador de seis fases, es usar un generador modular, es decir, un generador compuesto de múltiples generadores de tres fases con bobinas intercaladas, tal como se ilustra en la figura 1a con un generador PM de 8 polos y seis fases.

- 30 Las ventajas del generador modular con configuración de bobinas intercaladas incluyen (1) La fuerza mecánica está siempre equilibrada respecto al eje del generador y la tensión mecánica se distribuye uniformemente sobre toda la estructura del generador, independientemente del nivel de energía de salida de los sistemas de tres fases individuales, (2) Reluctancia idéntica en el espacio de aire para cada sistema de tres fases, lo que facilita la identificación y la medición de los parámetros del generador en un conjunto de sistema de tres fases para fines de control; (3) El fallo de cualquier subsistema no requiere el cierre de todo el sistema de generación de energía. La fiabilidad y la disponibilidad de energía de salida se mejoran de esta manera.

- 40 En comparación con el funcionamiento de un único generador de tres fases, cuando funciona un generador modular que comprende por ejemplo dos o más bobinas de tres fases intercaladas es importante tener en cuenta el reparto de la carga dinámica o la energía de los diferentes sistemas de tres fases. Más específicamente, para el generador PM modular compuesto por múltiples generadores de tres fases con bobinas intercaladas, un control orientado de campo de retroalimentación de corriente convencional no es suficiente debido al acoplamiento magnético significativo entre cada sistema de tres fases.

- 45 La forma normal de diseñar un generador modular de seis fases consiste en colocar dos bobinas conectadas en estrella con un desplazamiento de fase de 30 grados eléctricos entre las dos estrellas. Mediante esta disposición, se reducirán los armónicos 11° y 13°, lo que reduce la tensión sobre el sistema del generador. Otra forma consiste en dividir la banda de fase de una máquina convencional de tres fases en dos partes con una separación de fase espacial de 30 grados eléctricos. Sin embargo, otra forma es utilizar una máquina con bobinas conectadas en estrella y colocar un transformador triángulo en estrella en la salida de un generador con el fin de conseguir un desplazamiento de fase de 30 grados eléctricos entre los dos generadores. Sin embargo, el primer diseño descrito es la disposición más común hoy en día.

El documento US6008616 describe un aparato para un motor de inducción de cambio de polo y un procedimiento de

control para ese motor. El motor de cambio de polo se cambia eléctricamente entre un número n de los polos y un número $2n$ de los polos ($n = 2, 4, \dots$) para obtener un par de salida del motor de inducción de cambio de polo en un modo de accionamiento constante con una alta velocidad de rotación del motor de inducción sin aumentar la dimensión del motor de inducción o de un inversor asociado con el motor de inducción de cambio de polo y sin presencia de una variación de par.

La publicación "Six phase synchronous machine with AC and DC stator connections", IEEE 1983, llega a la conclusión de que para la mayoría de las condiciones de funcionamiento, un ángulo de desplazamiento de 30° entre las fases parece ser óptimo respecto a la distorsión de armónicos de voltaje y la pulsación de par.

El documento US2003085627 describe un motor eléctrico de múltiples fases con una tercera inyección de corriente armónica. Se proporciona un par aumentado de manera significativa desde una disposición de motor que tiene un estátor con un núcleo y al menos dos bobinas de tres fases en el núcleo. Las dos bobinas están separadas espacialmente por 30 grados eléctricos. La energía se proporciona a las dos bobinas mediante dos inversores, suministrando cada uno energía a la misma frecuencia fundamental y con un componente en el tercer armónico del fundamental, con la energía suministrada desde un inversor desplazado en el tiempo en 30° de la frecuencia fundamental respecto a la energía suministrada por el otro inversor. El tercer componente armónico adicional reduce la densidad de flujo de pico efectivo, lo que permite un aumento en el componente fundamental de flujo para permitir un aumento del par efectivo, con el tercer componente armónico proporcionando también un par adicional.

Sumario de la invención

En vista de lo anterior, un objetivo de la invención es proporcionar un procedimiento para repartir par dinámico o energía de un sistema generador modular que comprende múltiples sistemas de tres fases con bobinas intercaladas. El modelo de generador modular en el marco de referencia d-q del rotor se puede derivar y utilizarse como la base para realizar el control de desacoplamiento del reparto de la carga dinámica. La metodología de control de desacoplamiento se describe a continuación con el generador de seis fases como ejemplo de aplicación. El procedimiento es general y aplicable a cualquier control de generador modular múltiple de tres fases.

La invención se define de manera precisa en la reivindicación de procedimiento 1 y la reivindicación de dispositivo 5 correspondiente. Las reivindicaciones dependientes indican realizaciones ventajosas de la invención.

Un programador de par/energía minimiza la transición dinámica causada por el acoplamiento magnético cruzado entre los sistemas de tres fases. El cambio de pendiente de la señal de referencia del par o de la energía se limita en el programador de par/energía. El cambio simultáneo de las señales de referencia de par/energía de cualquiera de los dos conjuntos de sistemas de tres fases se evita en el programador de torsión/energía para fines de control del desacoplamiento dinámico.

En la implementación del sistema de control, la magnitud de enlace del flujo del rotor y el desplazamiento angular eléctrico entre dos sistemas de tres fases diferentes se identifican a partir de la fuerza electromotriz trasera del generador en circuito abierto, cuando la máquina funciona a velocidad constante. Esto hace que el control de desacoplamiento dinámico sea robusto frente a variaciones del parámetro del generador.

Otros objetivos, características y ventajas de la presente invención se harán evidentes a partir de la descripción detallada a continuación, a partir de las reivindicaciones adjuntas, así como a partir de los dibujos.

En general, todos los términos utilizados en las reivindicaciones se interpretarán de acuerdo con su sentido ordinario en el campo técnico, a menos que se defina expresamente lo contrario aquí. Todas las referencias a "un/una/el/la [elemento, dispositivo, componente, medios, etapa, etc.]" se han de interpretar abiertamente como una referencia a al menos un caso de dicho elemento, dispositivo, componente, medios, etapa, etc., a menos que explícitamente se indique lo contrario. Las etapas de cualquier procedimiento aquí descrito no tienen que llevarse a cabo en el mismo orden descrito, a menos que se indique explícitamente.

Breve descripción de los dibujos

Lo anterior, así como otros objetos, características y ventajas de la presente invención, se comprenderán mejor a través de la siguiente descripción detallada ilustrativa y no limitativa de las realizaciones preferidas de la presente invención, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que los mismos números de referencia se utilizan para elementos similares, en donde:

La figura 1a ilustra un generador PM modular de seis fases y ocho polos con bobinas intercaladas. En la figura 1a, se marca la disposición de fase de un sistema de tres fases. Las ranuras del estátor preliminar son para el sistema de tres fases que no se ha marcado en la figura;

La figura 1b muestra un generador PM modular de nueve fases y dos polos;

La figura 2 muestra el perfil de un acoplamiento entre fases en función del desplazamiento de ángulo eléctrico entre dos sistemas de tres fases;

La figura 3 muestra una corriente de estátor orientada por un campo basada en el algoritmo de control de reparto de carga dinámica/energía de retroalimentación de acuerdo con una primera realización de la presente invención;

- 5 La figura 4 muestra un algoritmo de control de reparto de carga dinámica/energía basada en el flujo del estátor de acuerdo con una segunda realización de la presente invención.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

- 10 Para un generador PM modular con N conjuntos de sistemas de tres fases "a₁b₁c₁", "a₂b₂c₂" ... "a_Nb_Nc_N", el eje de flujo magnético, la posición del rotor, y el desplazamiento de ángulo de los sistemas de tres fases se definen en función de: el eje d (eje de flujo directo del rotor) se define como el eje del flujo magnético del rotor; el eje q lleva el eje d 90° grados eléctricos en dirección antihoraria; el ángulo de la posición del rotor θ_r se define como el ángulo entre el eje d y la fase a₁ del eje de flujo magnético del sistema de tres fases a₁b₁c₁; δ_{m-1} indica el desplazamiento de ángulo eléctrico entre el conjunto de tres fases a_mb_mc_m y el conjunto de tres fases a₁b₁c₁.

Las definiciones anteriores se ilustran gráficamente en la figura 1b con una máquina de dos polos y nueve fases.

- 15 Suponiendo una distribución sinusoidal de las bobinas de fase del estátor, el acoplamiento inductivo en un sistema de tres fases a_mb_mc_m se puede representar como la matriz "L_{ss}", y el acoplamiento inductivo entre dos conjuntos de bobinas de tres fases a_nb_nc_n y a_mb_mc_m se puede presentar como matriz la "LM_{n-m}".

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{sl} + L_m & -L_m / 2 & -L_m / 2 \\ -L_m / 2 & L_{sl} + L_m & -L_m / 2 \\ -L_m / 2 & -L_m / 2 & L_{sl} + L_m \end{bmatrix}$$

Donde, L_{sl} indica la inductancia de fuga de fase del estátor, L_m indica la inductancia mutua de fase del estátor;

20

$$LM_{n-m} = L_m * \begin{bmatrix} \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1}) & \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1} + 2 * \pi / 3) & \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1} - 2 * \pi / 3) \\ \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1} - 2 * \pi / 3) & \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1}) & \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1} + 2 * \pi / 3) \\ \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1} + 2 * \pi / 3) & \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1} - 2 * \pi / 3) & \cos(\delta_{n-1} - \delta_{m-1}) \end{bmatrix}$$

Donde, δ_{n-1} - δ_{m-1} es el desplazamiento del ángulo entre el sistema de tres fases a_nb_nc_n y a_mb_mc_m.

La matriz de acoplamiento de inductancia de fase del generador se puede representar como:

$$L_{a1b1c1_a2b2c2_ \dots aNbNcN} = \begin{bmatrix} L_{ss} & LM_{1_2} & \dots & LM_{1_N} \\ LM_{2_1} & L_{ss} & \dots & LM_{2_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ LM_{N_1} & LM_{N_2} & \dots & L_{ss} \end{bmatrix}$$

Donde,

25

$$LM_{m-n} = LM_{n-m}^T$$

El flujo del rotor visto desde el eje de flujo magnético de tres fases a_mb_mc_m es:

$$\psi_{r_a_m b_m c_m} = \psi_{mr} * \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \delta_{m-1}) \\ \cos(\theta_r - \delta_{m-1} - 2 * \pi / 3) \\ \cos(\theta_r - \delta_{m-1} + 2 * \pi / 3) \end{bmatrix}$$

Donde, Ψ_{mr} indica la magnitud del enlace de flujo del rotor.

La ecuación de flujo del estátor de un generador modular de fase 3*N es:

$$\begin{bmatrix} \psi_{a1b1c1} \\ \psi_{a2b2c2} \\ \dots \\ \psi_{aNbNcN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & LM_{1_2} & \dots & LM_{1_N} \\ LM_{2_1} & L_{ss} & \dots & LM_{2_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ LM_{N_1} & LM_{N_2} & \dots & L_{ss} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{a1b1c1} \\ i_{a2b2c2} \\ \dots \\ i_{aNbNcN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{r_a1b1c1} \\ \psi_{r_a2b2c2} \\ \dots \\ \psi_{r_aNbNcN} \end{bmatrix}$$

La ecuación de voltaje del estátor de un generador modular de fase 3*N es:

$$\begin{bmatrix} u_{a1b1c1} \\ u_{a2b2c2} \\ \dots \\ u_{aNbNcN} \end{bmatrix} = R_s * \begin{bmatrix} i_{a1b1c1} \\ i_{a2b2c2} \\ \dots \\ i_{aNbNcN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & LM_{1_2} & \dots & LM_{1_N} \\ LM_{2_1} & L_{ss} & \dots & LM_{2_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ LM_{N_1} & LM_{N_2} & \dots & L_{ss} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{di_{a1b1c1}}{dt} \\ \frac{di_{a2b2c2}}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_{aNbNcN}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_{r_a1b1c1}}{dt} \\ \frac{d\psi_{r_a2b2c2}}{dt} \\ \dots \\ \frac{d\psi_{r_aNbNcN}}{dt} \end{bmatrix}$$

- 5 Para implementar el desacoplamiento dinámico del reparto de carga/energía se deriva un modelo de marco d-q de referencia del rotor N PM de 3*N fases. Suponiendo una distribución de bobina sinusoidal, los voltajes de fase u_{ambmcm} , las corrientes de fase i_{ambmcm} y el flujo de estátor ψ_{ambmcm} puede ser transferido al marco de referencia del rotor en función de:

$$u_{d_m q_m 0_m} = K_{sm} * u_{a_m b_m c_m}$$

$$i_{d_m q_m 0_m} = K_{sm} * i_{a_m b_m c_m}$$

$$\psi_{d_m q_m 0_m} = K_{sm} * \psi_{a_m b_m c_m}$$

10

Donde

$$K_{sm} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \delta_{m-1}) & \cos(\theta_r - \delta_{m-1} - 2 * \pi / 3) & \cos(\theta_r - \delta_{m-1} + 2 * \pi / 3) \\ -\sin(\theta_r - \delta_{m-1}) & -\sin(\theta_r - \delta_{m-1} - 2 * \pi / 3) & -\sin(\theta_r - \delta_{m-1} + 2 * \pi / 3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación de Park de un generador PM modular de fase 3*N es:

$$K_s = \begin{bmatrix} K_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{sN} \end{bmatrix}$$

15

La ecuación de flujo del estátor del generador PM modular de fase 3*N en el marco de referencia d-q del rotor se deriva como:

$$\psi_{d1} = (L_{sl} + (3/2) * L_m) * i_{d1} + (3/2) * L_m * \{i_{d2} + i_{d3} + \Lambda \Lambda + i_{dN}\} + \psi_{mr}$$

$$\psi_{q1} = (L_{sl} + (3/2) L_m) * i_{q1} + (3/2) * L_m * \{i_{q2} + i_{q3} + \Lambda \Lambda + i_{qN}\}$$

$$\psi_{dN} = (L_{sl} + (3/2) * L_m) * i_{dN} + (3/2) * L_m * \{i_{d1} + i_{d2} + \Lambda \Lambda + i_{d(N-1)}\} + \psi_{mr}$$

$$\psi_{qN} = (L_{sl} + (3/2) * L_m) * i_{qN} + (3/2) * L_m * \{i_{q1} + i_{q2} + \Lambda \Lambda + i_{q(N-1)}\}$$

La ecuación de voltaje del estátor del generador PM modular de fase N*3 en el marco d-q de referencia del rotor se deriva como:

$$u_{d1} = R_s * i_{d1} - \omega_r * \{ (L_{sl} + (3/2) * L_m) * i_{q1} + (3/2) * L_m * i_{q2} + \Lambda \Lambda + (3/2) * L_m * i_{qN} \} \\ + \left\{ (L_{sl} + (3/2) * L_m) * \frac{di_{d1}}{dt} + (3/2) * L_m * \frac{di_{d2}}{dt} + \Lambda \Lambda + (3/2) * L_m * \frac{di_{dN}}{dt} \right\}$$

$$u_{q1} = R_s * i_{q1} + \omega_r * \{ (L_{sl} + (3/2) * L_m) * i_{d1} + (3/2) * L_m * i_{d2} + \Lambda \Lambda + (3/2) * L_m * i_{dN} \} \\ + \left\{ (L_{sl} + (3/2) * L_m) * \frac{di_{q1}}{dt} + (3/2) * L_m * \frac{di_{q2}}{dt} + \Lambda \Lambda + (3/2) * L_m * \frac{di_{qN}}{dt} \right\} + \psi_{mr} * \omega_r$$

5

$$u_{dN} = R_s * i_{dN} - \omega_r * \{ (L_{sl} + (3/2) * L_m) * i_{qN} + (3/2) * L_m * i_{q1} + \Lambda \Lambda + (3/2) * L_m * i_{q(N-1)} \} \\ + \left\{ (L_{sl} + (3/2) * L_m) * \frac{di_{dN}}{dt} + (3/2) * L_m * \frac{di_{d1}}{dt} + \Lambda \Lambda + (3/2) * L_m * \frac{di_{d(N-1)}}{dt} \right\}$$

$$u_{qN} = R_s * i_{qN} + \omega_r * \{ (L_{sl} + (3/2) * L_m) * i_{dN} + (3/2) * L_m * i_{d1} + \Lambda \Lambda + (3/2) * L_m * i_{d(N-1)} \} \\ + \left\{ (L_{sl} + (3/2) * L_m) * \frac{di_{qN}}{dt} + (3/2) * L_m * \frac{di_{q1}}{dt} + \Lambda \Lambda + (3/2) * L_m * \frac{di_{q(N-1)}}{dt} \right\} + \psi_{mr} * \omega_r$$

El par eléctrico de un generador PM modular de fase 3*N en el marco de referencia natural de la fase de estátor es:

$$Te = \frac{\text{polos}}{2} * \begin{bmatrix} i_{a1b1c1}^T & i_{a2b2c2}^T & \dots & i_{aNbNcN}^T \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_{r_a1b1c1}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial \psi_{r_a2b2c2}}{\partial \theta_r} \\ \dots \\ \frac{\partial \psi_{r_aNbNcN}}{\partial \theta_r} \end{bmatrix}$$

- 10 Aplicando la matriz de transformación de Park del generador PM modular de fase 3*N a la ecuación de par anterior, el par eléctrico en el marco d-q de referencia del rotor puede expresarse como:

$$Te = \frac{3 * \text{polos}}{4} * \psi_{mr} * \sum_{m=1}^N i_{qm}$$

La matriz de inductancia de una máquina PM de seis fases en el marco de fase natural es una función del ángulo de desplazamiento de fase δ_{2_1} entre los dos conjuntos de bobinas.

$$L_{a1b1c1_a2b2c2} = \begin{bmatrix} L_u + L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m * \cos(\delta_{2_1}) & L_m * \cos(\delta_{2_1} + 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2_1} - 2 * \pi/3) \\ -L_m/2 & L_u + L_m & -L_m/2 & L_m * \cos(\delta_{2_1} - 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2_1}) & L_m * \cos(\delta_{2_1} + 2 * \pi/3) \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_u + L_m & L_m * \cos(\delta_{2_1} + 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2_1} - 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2_1}) \\ L_m * \cos(\delta_{2_1}) & L_m * \cos(\delta_{2_1} - 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2_1} + 2 * \pi/3) & L_u + L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ L_m * \cos(\delta_{2_1} + 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2_1}) & L_m * \cos(\delta_{2_1} - 2 * \pi/3) & -L_m/2 & L_u + L_m & -L_m/2 \\ L_m * \cos(\delta_{2_1} - 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2_1} + 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2_1}) & -L_m/2 & -L_m/2 & L_u + L_m \end{bmatrix}$$

15

Los coeficientes de acoplamiento entre fases entre los dos sistemas de tres fases se definen como:

$$coef_{m1} = \cos(\delta_{2_1})$$

$$coef_{m2} = \cos(\delta_{2_1} + 2 * \pi / 3)$$

$$coef_{m3} = \cos(\delta_{2_1} - 2 * \pi / 3)$$

- 5 Tratando cada fase de acoplamiento de manera igualmente importante, los coeficientes de acoplamiento totales de los dos sistemas de tres fases se define como:

$$coef_{mTotal} = |coef_{m1}| + |coef_{m2}| + |coef_{m3}|$$

- 10 La figura 2 es una representación gráfica de las ecuaciones anteriores, e ilustra cómo los coeficientes de acoplamiento entre fases $coef_{m1}$, $coef_{m2}$, $coef_{m3}$ y $coef_{mTotal}$ entre los dos sistemas de tres fases varía en relación con el desplazamiento de ángulo eléctrico δ_{2_1} entre los dos sistemas.

A partir de la curva superior se determina que el mínimo acoplamiento magnético total entre los dos sistemas se alcanza en $\delta_{2_1} = 30^\circ$ y $\delta_{2_1} = 90^\circ$. En consecuencia, mediante la disposición de las bobinas en un desplazamiento de ángulo de $\delta_{2_1} = 30^\circ$ o $\delta_{2_1} = 90^\circ$, el acoplamiento físico entre los dos sistemas de tres fases se minimizará, minimizando así la saturación del circuito magnético, debido a los efectos de acoplamiento.

- 15 Para un generador modular de nueve fases, utilizando un procedimiento de análisis similar, el acoplamiento físico mínimo se alcanza en $\delta_{2_1} = 30^\circ$, $\delta_{3_1} = 60^\circ$, o $\delta_{3_1} = 90^\circ$.

Para un generador modular con más de doce fases, el acoplamiento existe entre cualesquiera dos sistemas de tres fases. Es difícil encontrar una disposición de las bobinas que pueda minimizar el acoplamiento físico total.

- 20 La figura 3 muestra un algoritmo de control de reparto de carga dinámica/energía de retroalimentación de corriente del estátor orientada por un campo de acuerdo con una primera realización de la presente invención para la realización de reparto de carga dinámica o energía de un generador PM modular compuesto de múltiples sistemas de tres fases con bobinas intercaladas. La siguiente descripción se proporciona para un generador modular de seis fases como un ejemplo de aplicación. El principio y el procedimiento es aplicable para el control de un reparto de carga dinámica/energía de un generador PM modular con cualquier número múltiple de sistemas de tres fases para una aplicación de turbinas eólicas.

- 25 El algoritmo que se muestra en la figura está preferentemente implementado para el caso más sencillo de acoplamiento con una configuración de bobina (δ_r) de desplazamiento de ángulo eléctrico de 90° entre dos conjuntos de sistemas de tres fases para un generador PM de seis fases y ocho polos tal como se ilustra en la figura 1a.

- 30 En el bloque 315, el desplazamiento de ángulo δ_{2_1} y el flujo del rotor Ψ_{mr} son identificados a partir de las señales de tensión de la fuerza electromotriz de retorno de la fase en condición de circuito abierto cuando el generador funciona a una velocidad constante. El ángulo eléctrico de desplazamiento de fase δ_{2_1} se mide como la diferencia de fase de las señales de tensión de la fuerza electromotriz de retorno entre la fase a2 y la fase a1. El flujo del rotor Ψ_{mr} se mide como el resultado de la magnitud de tensión de la fuerza electromotriz de retorno pico de fase u_a (pico) dividida por la velocidad angular del generador ω_r .

- 35 El bloque 305a mide las señales de corriente de fase y las señales de tensión de fase del sistema de tres fases $a_1b_1c_1$. El bloque 305b mide las señales de corriente de fase y las señales de tensión de fase del sistema de tres fases $a_2b_2c_2$.

En el bloque 306, el ángulo del rotor eléctrico se estima a partir de un esquema de posición sin sensor o calculado a partir de $\theta_r = (P/2) * \theta_m$. La posición del rotor θ_m (es decir, el ángulo mecánico con grado cero definido como el eje d del rotor alineado con el eje de flujo de la fase a1) de la máquina PM se mide utilizando un codificador de posición montado en el eje del generador.

- 40 El bloque 309a realiza la transformación de Park de la corriente de fase y la tensión de fase desde un marco $a_1b_1c_1$ al marco dq de referencia del rotor. Las señales de entrada para el bloque 309a son la tensión de fase u_{a1} , u_{b1} , u_{c1} , la corriente de fase i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} , y la posición del rotor θ_r medidas. Las señales de salida del bloque 309a son el componente dq de corriente y tensión i_{d1} , i_{q1} , u_{d1} , u_{q1} para el sistema de tres fases $a_1b_1c_1$, que se utilizan como señales para el control

de corriente, cálculo del par eléctrico, y compensación directa de la tensión de alimentación.

El bloque 309b realiza la transformación de Park de la corriente de fase y la tensión desde el marco de tres fases $a_2b_2c_2$ al marco referencia dq del rotor. Las señales de entrada de bloque 309b son la tensión de fase u_{a2} , u_{b2} , u_{c2} , la corriente de fase i_{a2} , i_{b2} , i_{c2} , la posición del rotor θ_r , y el desplazamiento de ángulo δ_{2_1} medidos entre los dos conjuntos de sistemas de tres fases. Las señales de salida del bloque 309b son el componente dq de la corriente y la tensión i_{d2} , i_{q2} , u_{d2} , u_{q2} para el sistema de tres fases $a_2b_2c_2$.

Cualquier control de par o control de energía se implementa en el sistema de control del generador de la turbina eólica. El control de par se realiza mediante la transferencia del comando de energía en comando de par dividiendo la energía de referencia por la velocidad angular ω_r , a continuación, cerrando el bucle de control basado en la referencia de par y las señales de retroalimentación del par. El control de energía se realiza directamente cerrando el bucle de control de energía basado en la referencia de energía y la señal de retroalimentación de energía con la compensación adecuada del cambio de ancho de banda del bucle debido al nivel de velocidad de la operación.

Un programador de par o energía 301 se encarga de distribuir la demanda de par o energía para un generador modular 302 en dos conjuntos de sistemas de tres fases. Para minimizar la transición dinámica causada por el acoplamiento entre los dos sistemas de tres fases, la pendiente del cambio de demanda de par o energía debe estar limitada. Por la misma razón, después de un cambio de comando de par o energía en un conjunto de sistema de tres fases, se inserta un retardo de tiempo fijo antes de permitir el cambio de comando de par o energía en el otro conjunto del sistema de tres fases. De esta manera, se evita el cambio simultáneo de comando de par o energía en los dos sistemas de tres fases.

Un controlador de par o energía 303a para el primer sistema (denominado $a_1b_1c_1$ en la figura 3) genera la referencia de corriente del eje q, i_{q1}^* , en base a una referencia de par o energía proporcionada por el programador de par o energía 301 y una retroalimentación de par o energía proporcionada por el primer observador de par 304a1 o el observador de energía 304a2.

El observador de par 304a1 calcula el par eléctrico del primer sistema basado en la corriente del eje q y el flujo del rotor en función de:

$$T_{e1} = (3/4) * \text{polos} * \psi_{mr} * i_{q1}$$

El observador de energía 304a2 calcula la energía real del generador basado en las corrientes de fase del estátor medidas y las tensiones de fase en función de:

$$P_{e1} = i_{a1} * u_{a1} + i_{b1} * u_{b1} + i_{c1} * u_{c1}$$

Un controlador de par o energía 303b correspondiente para el segundo sistema (denominado $a_2b_2c_2$ en la figura 3) genera la referencia de corriente del eje q, i_{q2}^* , en base a una referencia de par o energía proporcionada por el programador de par o energía 301 y la retroalimentación de par o energía suministrada por el observador de par 304b1 o el observador de energía 304b2 de acuerdo a:

$$T_{e2} = (3/4) * \text{polos} * \psi_{mr} * i_{q2}$$

$$P_{e2} = i_{a2} * u_{a2} + i_{b2} * u_{b2} + i_{c2} * u_{c2}$$

Un programador de debilitamiento de campo 307 se utiliza para distribuir los componentes de flujo de desmagnetización entre los dos conjuntos de sistemas de tres fases. La señal de referencia de corriente del eje d, i_{d1}^* , i_{d2}^* , para cada sistema individual de tres fases se calcula mediante un bloque de generación de referencia de corriente de eje d 308, con los efectos de acoplamiento en otros sistemas de tres fases incluidos de acuerdo a:

$$i_{d1}^* = - \left\{ \frac{L_{sl} + (3/2) * L_m}{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)} \Delta \psi_{d1}^* - \frac{(3/2) * L_m}{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)} \Delta \psi_{d2}^* \right\}$$

$$i_{d2}^* = - \left\{ \frac{L_{sl} + (3/2) * L_m}{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)} \Delta \psi_{d2}^* - \frac{(3/2) * L_m}{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)} \Delta \psi_{d1}^* \right\}$$

El programador de par o energía 301 y el programador de debilitamiento de campo 307 son responsables de lograr un funcionamiento óptimo del generador modular 302 y sistemas de conversión.

5 Las señales de retroalimentación de corriente, i_{d1} , i_{q1} , i_{d2} , i_{q2} , se restan de las señales de referencia de la corriente, i_{d1}^* , i_{q1}^* , i_{d2}^* , i_{q2}^* , y se proporcionan a un controlador de corriente de eje q y de eje d 310a, 311a, y 310b, 311b para cada sistema, respectivamente. Un componente de alimentación hacia delante de tensión adecuada u_{q1_FW} , u_{d1_FW} , u_{q2_FW} , u_{d2_FW} , se añade a cada referencia de tensión de eje q/eje d correspondiente, u_{q1}^* , u_{d1}^* , u_{q2}^* , u_{d2}^* , respectivamente, para compensar la efecto de acoplamiento rotativo B_{emf} desde su propio sistema de tres fases y los efectos de acoplamiento de corriente/tensión desde el otro sistema de tres fase de acuerdo con

$$10 \quad u_{d1_FW} = K_{FW} * \frac{(3/2) * L_m}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \{u_{d2} - R_s * i_{d2}\} - \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \omega_r * i_{q1}$$

$$u_{q1_FW} = K_{FW} * \frac{(3/2) * L_m}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \{u_{q2} - R_s * i_{q2}\} + \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \omega_r * i_{d1} + \frac{L_{sl}}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \psi_{mr} * \omega_r$$

$$u_{d2_FW} = K_{FW} * \frac{(3/2) * L_m}{L_{sl} + (3/2) * L_m} * \{u_{d1} - R_s * i_{d1}\} - \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \omega_r * i_{q2}$$

$$u_{q2_FW} = K_{FW} * \frac{(3/2) * L_m}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \{u_{q1} - R_s * i_{q1}\} + \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \omega_r * i_{d2} + \frac{L_{sl}}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \psi_{mr} * \omega_r$$

15 donde la ganancia de alimentación directa $0 < K_{FW} < 1$ se introduce para controlar la resistencia de la señal de desacoplamiento del sistema cruzado.

El bloque 312a transfiere las señales de tensión eje q/eje d, u_{q1}^* , u_{d1}^* al marco $\alpha 1 \beta 1$ del estátor estacionario para el primer sistema de tres fases $a 1 b 1 c 1$ en función de:

$$u_{\alpha 1}^* = \cos(\theta_r) * u_{d1}^* - \sin(\theta_r) * u_{q1}^*$$

$$u_{\beta 1}^* = \sin(\theta_r) * u_{d1}^* + \sin(\theta_r) * u_{q1}^*$$

$$u_{d2_FW} = - \frac{(3/2) * L_m}{L_{sl} + (3/2) * L_m} * u_{d1} + \frac{(3/2) * L_m}{L_{sl} + (3/2) * L_m} * R_s * i_{d1} - \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{L_{sl} + (3/2) * L_m} * i_{q2} * (P/2) * \omega_m$$

20

El bloque 312b transfiere las señales de tensión de eje q/eje d, u_{q2}^* , u_{d2}^* , al marco $\alpha 2 \beta 2$ estacionario del estátor para el segundo sistema de tres fases $a 2 b 2 c 2$ en función de:

$$u_{\alpha 2}^* = \cos(\theta_r - \delta_r) * u_{d2}^* - \sin(\theta_r - \delta_r) * u_{q2}^*$$

$$u_{\beta 2}^* = \sin(\theta_r - \delta_r) * u_{d2}^* + \sin(\theta_r - \delta_r) * u_{q2}^*$$

25 Los moduladores PWM 313a y 313b toman la referencia de tensión en el marco estacionario del estátor como entrada y

generan las señales de puerta de enlace para el convertidor PWM 314a y 314b, respectivamente. El convertidor PWM 314a aplica la primera tensión del sistema de tres fases ua1, ub1, uc1 al generador 302. El convertidor PWM 314b aplica el segundo sistema de tres fases ua2, ub2 y uc2 al generador 302.

5 El reparto de la carga dinámica entre dos conjuntos de sistemas de tres fases, por lo tanto, se realiza incluyendo el efecto de acoplamiento en el cálculo de la referencia de corriente del eje d y añadiendo la compensación de tensión de alimentación hacia delante de desacoplamiento adecuada en la generación de la señal de referencia de tensión del marco dq.

10 El principio del procedimiento de desacoplamiento anterior se puede aplicar para soportar cualquier desplazamiento de ángulo físico entre los sistemas de tres fases. Otros procedimientos de implementación para cualquier generador PM modular múltiple de tres fases también pueden ser desarrollados con base en el principio ilustrado usando el generador de seis fases.

15 La figura 4 muestra un algoritmo de reparto de carga dinámica/energía flujo basado en el control de vector de flujo del estátor de acuerdo con una segunda realización de la presente invención para la realización de reparto de carga dinámica o energía de un generador de PM modular compuesto de múltiples sistemas de tres fases con bobinas intercaladas. El algoritmo puede ser usado para controlar un reparto de carga dinámica/energía de un generador PM modular dispuesto en una turbina eólica.

El algoritmo que se muestra en la figura está preferentemente implementado para un generador PM de seis fases, tal como se ilustra en la figura 1a. El principio puede ser aplicado a un reparto de carga/energía basado en el control del vector de flujo del estátor de cualquier generador modular múltiple de tres fases.

20 En el bloque 415, el desplazamiento de ángulo δ_{2_1} y el rotor de flujo Ψ_{mr} se identifican a partir de las señales de tensión de fase Bemf en el circuito abierto del generador y la condición de operación de velocidad constante. El ángulo eléctrico de desplazamiento de fase δ_{2_1} se mide como la diferencia de ángulo de fase de las señales de tensión Bemf entre la fase a2 y la fase a1. El flujo del rotor Ψ_{mr} se mide como la magnitud de tensión bemf del pico de fase ua1 (pico) dividido por la velocidad angular del generador ω_r .

25 El bloque 405a mide las señales de corriente de fase y las señales de tensión de fase del sistema de tres fases a₁b₁c₁. El bloque 405b mide las señales de corriente de fase y las señales de tensión de fase del sistema de tres fases a₂b₂c₂.

30 En el bloque 406, el ángulo del rotor eléctrico se estima a partir de un esquema de posición sin sensor o se calcula a partir de $\theta_r = (P/2) * \theta_m$. La posición del rotor θ_m (es decir, el ángulo mecánico con grado cero definido como el eje d del rotor alineado con el eje de flujo de fase a1) de la máquina PM se mide utilizando un codificador de posición montado en el eje del generador.

35 El control de par o el control de energía se implementan en el sistema de control del generador de turbina eólica. El control de par se realiza mediante la transferencia del comando de energía en el comando de par dividiendo la energía de referencia por la velocidad angular ω_r , a continuación, cerrando el bucle de control basado en las señales de referencia de par y retroalimentación del par. El control de energía se realiza directamente cerrando el bucle de control de energía basado en la referencia de energía y la señal de retroalimentación de energía con la compensación adecuada del cambio de ancho de banda del bucle debido al nivel de velocidad de funcionamiento.

40 Un programador de par o energía 401 se encarga de distribuir la demanda de par o energía para un generador modular 402 en dos conjuntos de sistemas de tres fases. Con el fin de minimizar la transición dinámica causada por el acoplamiento entre los dos sistemas de tres fases, la pendiente del cambio de demanda de par o energía debe ser limitada. Por la misma razón, después de un cambio de comando de par o energía en un conjunto de un sistema de tres fases, un retardo de tiempo fijo se inserta antes de permitir el cambio de comando de par o energía en el otro conjunto de sistema de tres fases. De esta manera, se evita el cambio simultáneo de comando de par o energía en los dos sistemas de tres fases.

45 Un controlador de par o energía 403a para el primer sistema (denominado a₁b₁c₁ en la figura 4) genera la referencia de corriente del eje q, i_{q1}^* , en base a una referencia de par o energía suministrada por el programador 401 de par o energía y la retroalimentación de par o energía proporcionada por un primer observador de par 404a1 o un observador de energía 404a2.

50 Al observador de par 404a1 se le proporcionan mediciones de corriente/tensión desde el bloque de medición de la corriente y la tensión 405a y la posición del rotor desde el bloque de medición de la posición del rotor 406. La salida del observador de par se calcula de acuerdo con

$$T_{c1} = -(\text{polos}/2) * \psi_{mr} * \{i_{a1} * \sin(\theta_r) + i_{b1} * \sin(\theta_r - 2 * \pi / 3) + i_{c1} * \sin(\theta_r + 2 * \pi / 3)\}$$

Al observador de energía 404a2 se le proporcionan mediciones de corriente/tensión del bloque de medición de corriente y tensión 405a. La salida del observador de energía 404a2 se calcula de acuerdo con

$$P_{e1} = i_{a1} * u_{a1} + i_{b1} * u_{b1} + i_{c1} * u_{c1}$$

- 5 Un controlador de par o de energía correspondiente 403b para el segundo sistema (denominado a2b2c2 en la figura 4) genera la referencia de corriente del eje q, i_{q2}^* , en base a una referencia de par o energía proporcionada por el programador de par o energía 401 y una retroalimentación de par o energía proporcionada por un observador de par 404b1 u observador de energía 404b2. El observador de par 404b1 o el observador de energía 404b2 están contruidos de forma similar al observador de par 404a1 o al observador de energía 404a2. Las entradas del observador de par 404b1 son la medición de la corriente de fase desde el bloque 405b, la medición de la posición del rotor desde el bloque 406, y el desplazamiento de ángulo del sistema de tres fases δ_{2_1} desde el bloque 415. La salida del observador de par 404b1 se calcula en función de:

$$T_{e2} = -(\text{polos}/2) * \psi_{mr} * \{i_{a2} * \sin(\theta_r - \delta_r) + i_{b2} * \sin(\theta_r - \delta_r - 2 * \pi / 3) + i_{c2} * \sin(\theta_r - \delta_r + 2 * \pi / 3)\}$$

Las entradas del observador de energía 404b2 son la medición de la corriente de fase y la tensión de fase desde el bloque 405b. La salida del observador de par 404b2 se calcula de acuerdo con

$$P_{e2} = i_{a2} * u_{a2} + i_{b2} * u_{b2} + i_{c2} * u_{c2}$$

- 15 Un programador de debilitamiento de campo 407 se utiliza para distribuir los componentes de flujo del estátor de desmagnetización entre los dos conjuntos de sistemas de tres fases. Las referencias de flujo del estátor del eje d, Ψ_{d1} , Ψ_{d2} , son generadas por un primer y segundo bloques de cálculo del flujo del estátor del eje d, 408a, 408b, para cada sistema de tres fases de acuerdo a:

$$\psi_{d1}^* = \psi_{mr} - \Delta \psi_{d1}^*$$

- 20
$$\psi_{d2}^* = \psi_{mr} - \Delta \psi_{d2}^*$$

En un funcionamiento normal, los componentes del flujo de desmagnetización se ponen a cero ($\Delta \psi_{d1} = \Delta \psi_{d2} = 0$).

El programador de par o energía 401 y el programador de debilitamiento de campo 407 son responsables de lograr un funcionamiento óptimo del generador modular 402 y los sistemas de conversión.

- 25 Las referencias de corriente del eje q, i_{q1}^* , i_{q2}^* , a partir de dos conjuntos de sistemas son utilizadas por un primer y segundo bloques de cálculo del flujo del estátor, 409a, 409b, para generar una referencia de flujo del estátor del eje q, Ψ_{q1} , Ψ_{q2} , para cada sistema de tres fases. El cálculo incluye el acoplamiento del otro sistema de tres fases de acuerdo con

$$\psi_{q1}^* = (L_{sl} + \frac{3}{2} L_m) * i_{q1}^* + \frac{3}{2} * L_m * i_{q2}^*$$

$$\psi_{q2}^* = (L_{sl} + \frac{3}{2} L_m) * i_{q2}^* + \frac{3}{2} * L_m * i_{q1}^*$$

- 30 Los bloques 410a y 410b transfieren la referencia de flujo del estátor del eje q, Ψ_{q1} , Ψ_{q2} , y la referencia de flujo del estátor Ψ_{d1} , Ψ_{d2} , para cada sistema de tres fases en el correspondiente primer marco $\alpha 1 \beta 1$ estacionario del estátor del sistema de tres fases y el segundo marco $\alpha 2 \beta 2$ estacionario del estátor del sistema de tres fases, respectivamente.

Para el primer sistema de tres fases, la referencia de flujo del estátor transformada se calcula de acuerdo con

$$\psi_{\alpha 1}^* = \cos(\theta_r) * \psi_{d1}^* - \sin(\theta_r) * \psi_{q1}^*$$

$$\psi_{\beta 1}^* = \sin(\theta_r) * \psi_{d1}^* + \cos(\theta_r) * \psi_{q1}^*$$

y para el segundo sistema de tres fases

$$\psi_{\alpha 2}^* = \cos(\theta_r - \delta_r) * \psi_{d2}^* - \sin(\theta_r - \delta_r) * \psi_{q2}^*$$

5

$$\psi_{\beta 2}^* = \sin(\theta_r - \delta_r) * \psi_{d2}^* + \cos(\theta_r - \delta_r) * \psi_{q2}^*$$

Las señales de referencia de flujo del estátor transformadas $\Psi_{\alpha 1}^*$, $\Psi_{\beta 1}^*$ y $\Psi_{\alpha 2}^*$, $\Psi_{\beta 2}^*$, respectivamente, se proporcionan entonces a un bloque de controlador orientado de flujo del estátor 411a, 411b para cada sistema.

10

Los bloques del controlador orientado de flujo del estátor 411a, 411b también reciben señales de retroalimentación del flujo del estátor, $\Psi_{\alpha 1}^*$, $\Psi_{\beta 1}^*$ y $\Psi_{\alpha 2}^*$, $\Psi_{\beta 2}^*$, desde un observador de flujo del estátor 412. Una realización preferida del observador de flujo del estátor 412 es el observador de flujo de modo de tensión, con la cual el flujo del estátor se mide directamente mediante la integración de la tensión de fase después de eliminar la caída de tensión de la resistencia de fase de acuerdo a la ecuación dada a continuación. La otra realización posible del observador del flujo del estátor 412 es un observador de flujo de modo de corriente, que se puede construir sobre la base de la ecuación de flujo del estátor de un generador modular.

15

$$u_{\alpha 1} = (2/3) * \{u_{a1} - (1/2) * u_{b1} - (1/2) * u_{c1}\}$$

$$u_{\beta 1} = (2/3) * \{(\sqrt{3}/2) * u_{b1} - (\sqrt{3}/2) * u_{c1}\}$$

$$i_{\alpha 1} = (2/3) * \{i_{a1} - (1/2) * i_{b1} - (1/2) * i_{c1}\}$$

$$i_{\beta 1} = (2/3) * \{(\sqrt{3}/2) * i_{b1} - (\sqrt{3}/2) * i_{c1}\}$$

$$\psi_{\alpha 1} = \int (u_{\alpha 1} - i_{\alpha 1} * R_s) dt$$

$$\psi_{\beta 1} = \int (u_{\beta 1} - i_{\beta 1} * R_s) dt$$

20

y

$$u_{\alpha 2} = (2/3) * \{u_{a2} - (1/2) * u_{b2} - (1/2) * u_{c2}\}$$

$$u_{\beta 2} = (2/3) * \{(\sqrt{3}/2) * u_{b2} - (\sqrt{3}/2) * u_{c2}\}$$

$$i_{\alpha 2} = (2/3) * \{i_{a2} - (1/2) * i_{b2} - (1/2) * i_{c2}\}$$

$$i_{\beta 2} = (2/3) * \left\{ (\sqrt{3}/2) * i_{b2} - (\sqrt{3}/2) * i_{c2} \right\}$$

$$\psi_{\alpha 2} = \int (u_{\alpha 2} - i_{\alpha 2} * R_s) dt$$

$$\psi_{\beta 2} = \int (u_{\beta 2} - i_{\beta 2} * R_s) dt$$

- 5 Las salidas del bloque del controlador de flujo del estátor 411A son una referencia de tensión del estátor para el primer sistema de tres fases $\alpha 1 \beta 1 c1$ en el marco $\alpha 1 \beta 1$ estacionario del estátor que se calculan de acuerdo con la siguiente ecuación, donde T_{PWM} es el periodo de conmutación PWM.

$$u_{\alpha 1}^* = \frac{\psi_{\alpha 1}^* - \psi_{\alpha 1}}{T_{PWM}}$$

$$u_{\beta 1}^* = \frac{\psi_{\beta 1}^* - \psi_{\beta 1}}{T_{PWM}}$$

- 10 Las salidas del bloque controlador de flujo del estátor 411b son una referencia de la tensión del estátor para el segundo sistema de tres fases $\alpha 2 \beta 2 c2$ en el marco $\alpha 2 \beta 2$ estacionario del estátor, que se calculan de acuerdo con

$$u_{\alpha 2}^* = \frac{\psi_{\alpha 2}^* - \psi_{\alpha 2}}{T_{PWM}}$$

$$u_{\beta 2}^* = \frac{\psi_{\beta 2}^* - \psi_{\beta 2}}{T_{PWM}}$$

- 15 Las salidas, $u_{\alpha 1}^*$, $u_{\beta 1}^*$ y $u_{\alpha 2}^*$, $u_{\beta 2}^*$, a partir de los bloques del controlador de flujo del estátor 411a, 411b se suministran en los moduladores PWM 413a, 413b para cada sistema de tres fases. Los moduladores PWM 413a y 413b generan las señales de puerta de enlace para el convertidor PWM 414a y 414b respectivamente. El convertidor PWM 414a aplica la primer tensión del sistema de tres fases u_{a1} , u_{b1} , u_{c1} al generador 402. El convertidor PWM 414b aplica el segundo sistema de tres fases u_{a2} , u_{b2} y u_{c2} al generador 402.

El reparto de la carga dinámica entre los dos conjuntos de sistemas de tres fases, por lo tanto, se realiza incluyendo el efecto de acoplamiento en la generación del vector de referencia del flujo del estátor.

- 20 El principio del procedimiento de desacoplamiento anterior se puede aplicar para soportar cualquier desplazamiento de ángulo físico entre los tres sistemas de fase del generador. Otros procedimientos de implementación también se pueden desarrollar con base al principio ilustrado en la figura 4 para el generador modular con cualesquiera múltiples sistemas de tres fases.

- 25 La invención principalmente se ha descrito anteriormente con referencia a unas pocas realizaciones. Sin embargo, como se apreciará fácilmente por una persona experta en la técnica, realizaciones diferentes de las descritas anteriormente son igualmente posibles en el alcance de la invención, tal como se define en las reivindicaciones de patente adjuntas. Las ilustraciones de realización se dan para el generador modular PM de 6 fases. Sin embargo, el procedimiento puede ser aplicado para cualquier generador modular PM de $3*N$ fases utilizando la ecuación del flujo del marco dq, la ecuación de tensión y la ecuación de par que se han presentado en la descripción.

REIVINDICACIONES

1. El procedimiento para proporcionar un reparto de carga entre un primer y un segundo sistemas de tres fases, estando dicho primer y segundo sistemas de tres fases conectados a una primera y segunda bobinas intercaladas de tres fases en un generador (302), comprendiendo el procedimiento

- 5 determinar una señal de referencia de corriente del eje q para el primer sistema de tres fases y una señal de referencia de corriente del eje q para el segundo sistema de tres fases,

determinar una primera y segunda señales de referencia de flujo del estátor en base a dicha señal de referencia de corriente del eje q para el primer sistema de tres fases y dicha señal de referencia de corriente del eje q para el segundo sistema de tres fases, en el que la primera señal de referencia del flujo del estátor para el primer sistema de tres fases se determina en función de

10

$$\psi_{q1}^* = (L_{sl} + \frac{3}{2} L_m) * i_{q1}^* + \frac{3}{2} * L_m * i_{q2}^*$$

y la segunda señal de referencia del flujo del estátor para el segundo sistema de tres fases se determina de acuerdo con

$$\psi_{q2}^* = (L_{sl} + \frac{3}{2} L_m) * i_{q2}^* + \frac{3}{2} * L_m * i_{q1}^*$$

donde L_{sl} indica la inductancia de fuga de fase del estátor y L_m indica la inductancia mutua de fase del estátor,

- 15 determinar una primera señal de retroalimentación del flujo del estátor para el primer sistema de tres fases (a1, b1, c1) y una segunda señal del flujo del estátor para el segundo sistema de tres fases (a2, b2, c2), basado en un efecto de acoplamiento entre el primer y segundo sistemas de tres fases, y

determinar una primera señal de control del flujo del estátor para el primer sistema de tres fases en base a dicha primera señal de referencia del flujo del estátor y dicha primera señal de retroalimentación del flujo del estátor, y una segunda
20 señal de control del flujo del estátor para el segundo sistema de tres fases en base a dicha segunda señal de referencia del flujo del estátor y dicha segunda señal de retroalimentación del flujo del estátor, minimizando así la saturación del circuito magnético debido a los efectos de acoplamiento.

20

2. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende

- 25 determinar una primera y segunda señales de referencia del estátor del eje d sobre la base de un requisito de debilitamiento del campo en el primer sistemas de tres fases y un requisito de debilitamiento de campo en el segundo sistemas de tres fases.

3. El procedimiento según la reivindicación 2, que comprende

determinar la primera señal de referencia del eje d del flujo del estátor de acuerdo con

$$\psi_{d1}^* = \psi_{mr} - \Delta \psi_{d1}^*$$

- 30 y determinar la segunda señal de referencia del eje d del flujo del estátor de acuerdo a

$$\psi_{d2}^* = \psi_{mr} - \Delta \psi_{d2}^*$$

4. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende

determinar una señal de tensión de fase para al menos una de las fases en el primer o segundo sistemas de tres fases,

integrar la señal de tensión de fase determinada

- 35 determinar al menos una señal de retroalimentación de flujo del estátor basada en dicha señal de tensión de fase integrada.

5. Un sistema generador que comprende

un generador modular (302) que comprende una primera y segunda bobinas intercaladas de tres fases del estátor, en el que la segunda bobina intercalada (A_2 , B_2 , C_2) se desplaza un ángulo eléctrico respecto a la primera bobina de tres fases

(A₁, B₁, C₁),

un primer y segundo sistemas de tres fases conectados a dicha primera y segunda bobinas intercaladas de tres fases,

un controlador de par/energía adaptado para determinar una señal de referencia de corriente del eje q para el primer sistema de tres fases (a₁, b₁, c₁) y una señal de referencia de corriente del eje q para el segundo sistema de tres fases (a₂, b₂, c₂),

un controlador del flujo del estátor del eje q adaptado para determinar la primera y la segunda señales de referencia del flujo del estátor en base a dicha señal de referencia de corriente del eje q para el primer sistema de tres fases y dicha señal de referencia de corriente del eje q para el segundo sistema de tres fases, en el que el controlador del flujo del estátor del eje q está adaptado para determinar la primera señal de referencia de flujo del estátor para el primer sistema de tres fases de acuerdo a

$$\psi_{q1}^* = (L_{sl} + \frac{3}{2} L_m) * i_{q1}^* + \frac{3}{2} * L_m * i_{q2}^*$$

y determinar la segunda señal de referencia del flujo del estátor para el segundo sistema de tres fases de acuerdo a

$$\psi_{q2}^* = (L_{sl} + \frac{3}{2} L_m) * i_{q2}^* + \frac{3}{2} * L_m * i_{q1}^*,$$

donde L_{sl} indica la inductancia de fuga de fase del estátor y L_m indica la inductancia mutua de fase del estátor,

un observador de flujo del estátor adaptado para determinar una primera señal de retroalimentación del flujo del estátor para el primer sistema de tres fases y una segunda señal de retroalimentación del flujo del estátor para el segundo sistema de tres fases basado en un efecto de acoplamiento entre el primer y segundo sistemas de tres fases, y

un controlador de flujo del estátor adaptado para determinar una primera señal de control del flujo del estátor para el primer sistema de tres fases en base a dicha primera señal de referencia del flujo del estátor y dicha primera señal de retroalimentación del flujo del estátor, y una segunda señal de control del flujo del estátor para el segundo sistema de tres fases en base a dicha segunda señal de referencia del flujo del estátor y dicha segunda señal de retroalimentación del flujo del estátor, minimizando así la saturación del circuito magnético debido a los efectos de acoplamiento y realizando un control de desacoplamiento del reparto de la carga dinámica.

6. El sistema generador según una cualquiera de las reivindicaciones 5, que comprende

un controlador de flujo del estátor del eje d adaptado para determinar una primera y segunda señales de referencia del flujo del estátor del eje d basado en el requerimiento de debilitamiento del campo en el primer sistema de tres fases y un requerimiento de debilitamiento del campo en el segundo sistema de tres fases.

7. El sistema generador según la reivindicación 6, en el que el controlador del flujo del estátor del eje d está adaptado para determinar la primera señal de referencia del flujo del estátor del eje d de acuerdo con

$$\psi_{d1}^* = \psi_{mr} - \Delta \psi_{d1}^*$$

y determinar la segunda señal de referencia del flujo del estátor del eje d de acuerdo con

$$\psi_{d2}^* = \psi_{mr} - \Delta \psi_{d2}^*$$

8. El sistema generador según una cualquiera de las reivindicaciones 5 - 7,

en el que el observador del flujo del estátor está adaptado para

determinar una señal de tensión de fase para al menos una de las fases en el primer o segundo sistemas de tres fases, integrar la señal de tensión de fase determinada, y

determinar por lo menos una señal de retroalimentación del flujo del estátor sobre la base de dicha señal de tensión de fase integrada.

9. El sistema generador de acuerdo con la reivindicación 5, que comprende un generador modular de seis fases que

comprende

una primera bobina de tres fases,

una segunda bobina de tres fases intercalada con la primera bobina de tres fases y con un desplazamiento de fase en un ángulo eléctrico entre 70° y 110° desde la primera bobina de tres fases.

5 10. El sistema generador según la reivindicación 5, que comprende un generador modular de nueve fases que comprende

una primera bobina de tres fases,

una segunda bobina de tres fases intercalada con la primera bobina de tres fases y con un desplazamiento de fase en un ángulo eléctrico entre 10° y 50° desde la primera bobina de tres fases,

10 una tercera bobina de tres fases intercalada con la primera y segunda bobinas de tres fases y con un desplazamiento de fase en un ángulo eléctrico entre 40° y 80° o entre 70° y 110° desde la primera bobina de tres fases.

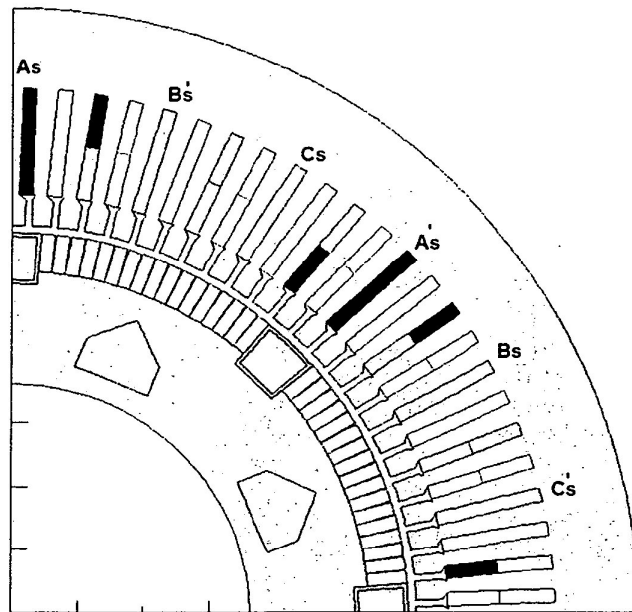


Figura 1a

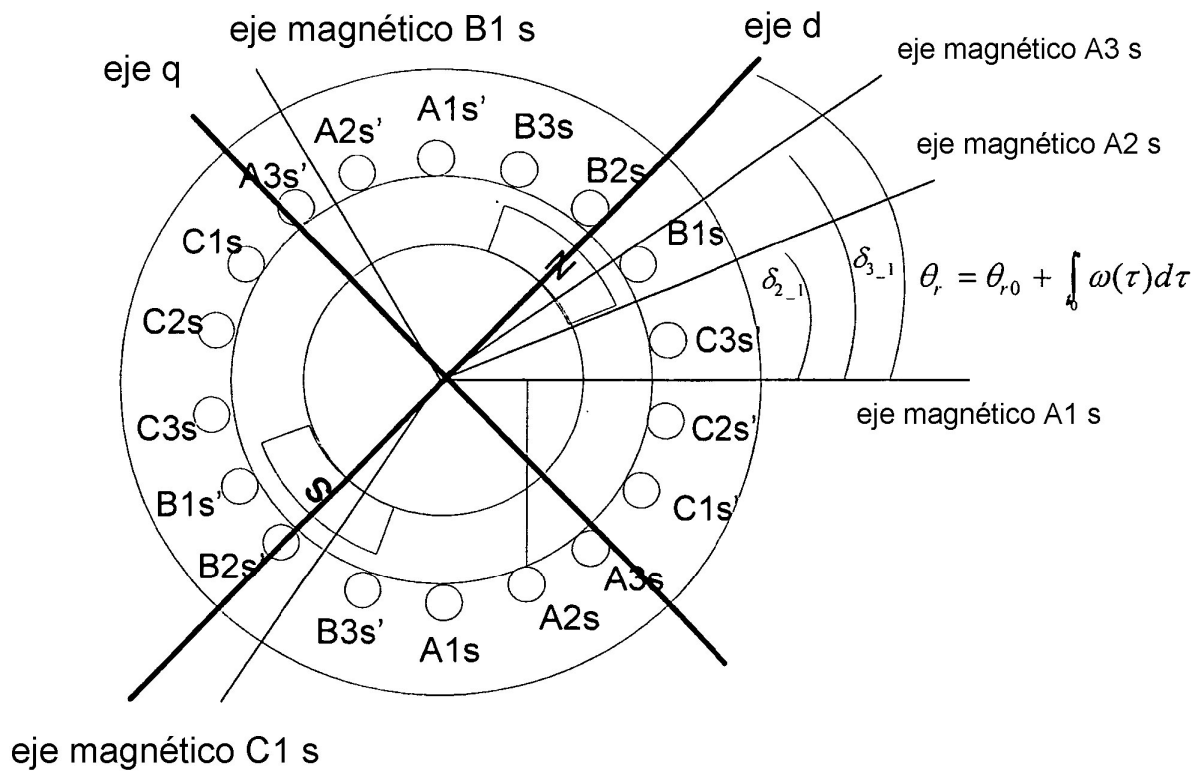


Figura 1b

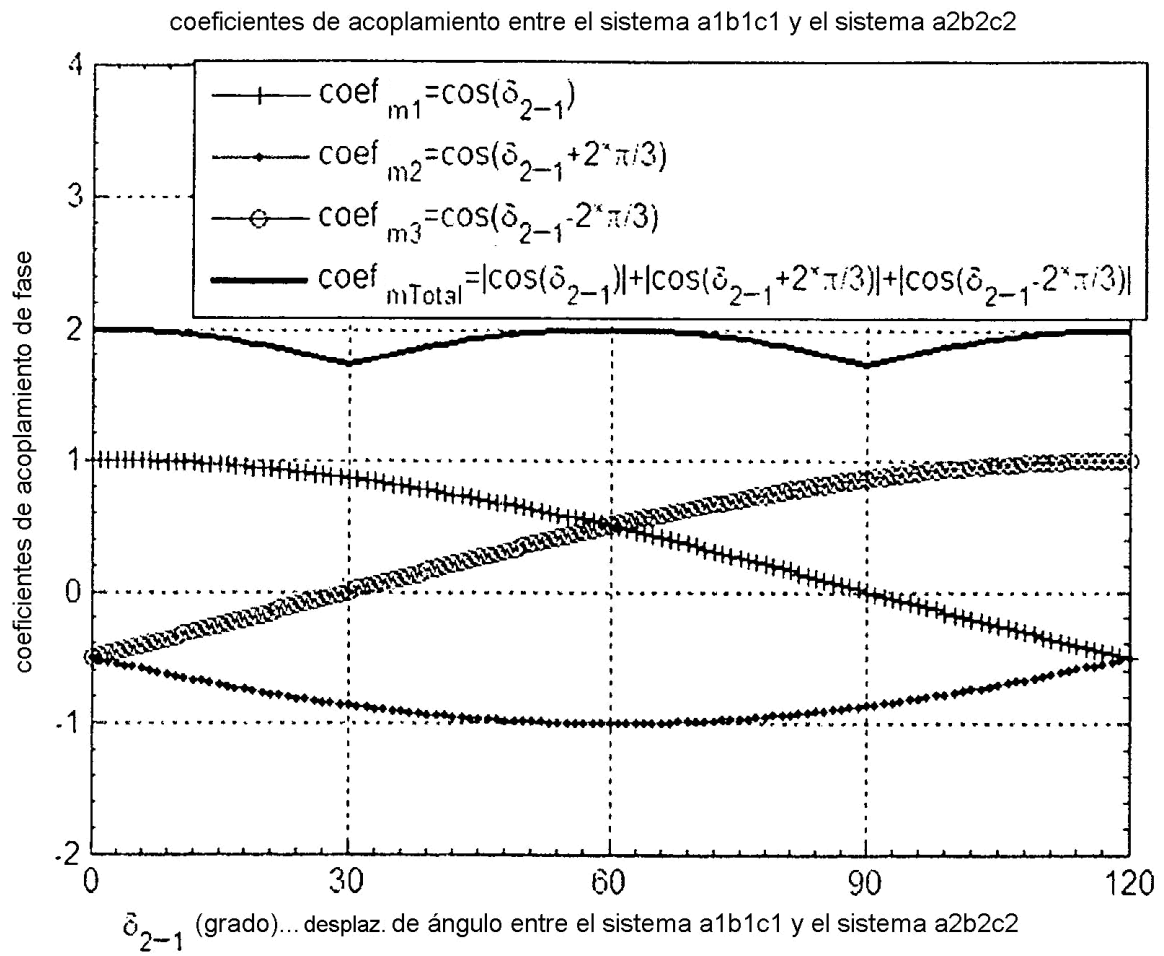


Figura 2

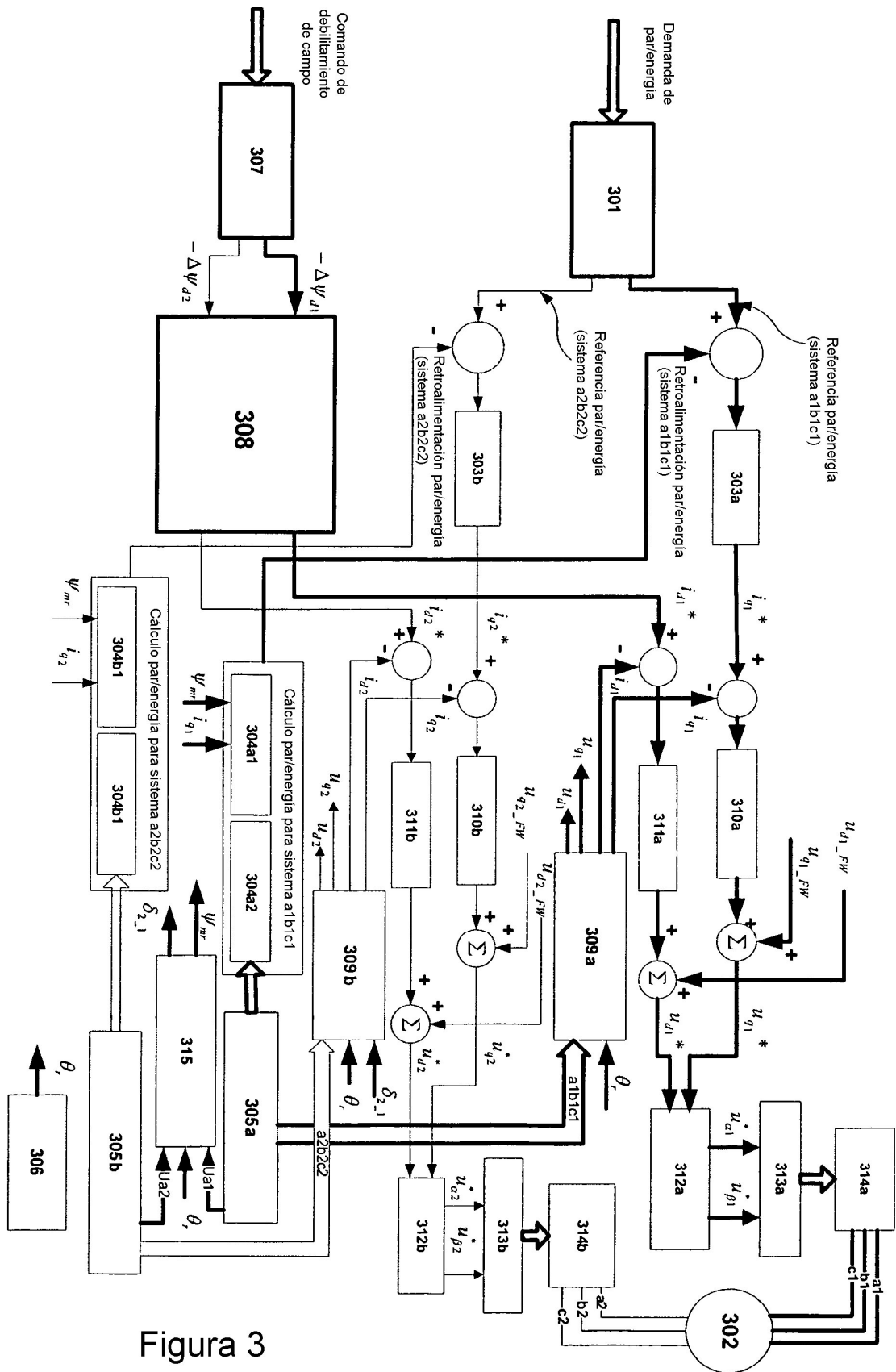


Figura 3

