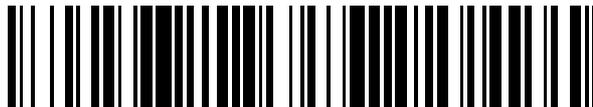


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 370 365**

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: **08165287 .7**  
96 Fecha de presentación: **26.09.2008**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2169821**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **31.03.2010**

54 Título: **MÉTODO Y APARATO PARA COMPARTIR UNA CARGA DINÁMICA.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**14.12.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**14.12.2011**

73 Titular/es:  
**VESTAS WIND SYSTEMS A/S**  
**ALSVEJ 21**  
**8940 RANDERS SV, DK**

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

74 Agente: **Arias Sanz, Juan**

ES 2 370 365 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**

Método y aparato para compartir una carga dinámica

**Campo técnico**

5 La presente invención se refiere en general a generadores polifásicos y, más específicamente, a generadores modulares que comprenden múltiples generadores trifásicos con devanados entrelazados. La invención se refiere además a un controlador adecuado para tales generadores.

**Antecedentes de la invención**

10 Los generadores de energía eléctrica son dispositivos que convierten energía mecánica en energía eléctrica. En un generador de CA, el rotor se acciona mediante, por ejemplo, una turbina y las corrientes eléctricas son inducidas en los devanados del estátor del generador. Normalmente, un generador de CA es de tipo síncrono o de tipo asíncrono. Durante mucho tiempo, los generadores síncronos se han utilizado en sistemas de generación de energía de diferentes tipos. Los generadores síncronos se utilizan, por ejemplo, tanto en grandes sistemas de generación de energía, tales como plantas de energía nuclear, como en pequeños sistemas aislados, tales como plantas de energía eólica.

15 A diferencia del generador asíncrono (o generador de inducción), el cual utiliza inducción para proporcionar un flujo magnético, el generador síncrono utiliza un imán permanente (PM) o magnetización eléctrica para producir su flujo de magnetización. A este respecto, la utilización de generadores de imán permanente ha tenido una mayor aceptación en los últimos años, debido principalmente a la necesidad de componentes de excitación económicos y fiables. La aplicación de nuevos materiales magnéticos permanentes ha dado como resultado generadores de alta eficacia que son superiores a otros tipos de generadores en muchos aspectos.

20 Un generador síncrono comprende normalmente tres fases, pero recientemente se han llevado a cabo muchas investigaciones relacionadas con los generadores polifásicos, muchas de ellas orientadas a generadores de seis fases. El interés en los generadores polifásicos radica principalmente en que, con muchas fases, las corrientes elevadas asociadas con generadores de alta potencia pueden dividirse entre más fases. Otras ventajas de los generadores de múltiples fases en comparación con los generadores trifásicos son, por ejemplo, menores niveles de ruido al mismo nivel de potencia, una menor distorsión armónica y una menor EMI.

25 Los generadores con devanados de seis o más fases se encuentran principalmente en aplicaciones de conversión de energía de turbinas eólicas a toda potencia en las que es deseable una compartición de carga y una distribución de potencia de salida entre los módulos convertidores, así como una escalabilidad de potencia de salida en situaciones de viento fuerte y viento flojo. Un enfoque en la implementación de un generador polifásico, tal como un generador de seis fases, es utilizar un generador modular, es decir, un generador compuesto por múltiples generadores trifásicos con devanados entrelazados, tal y como se ilustra en la figura 1a con un generador PM de 8 polos y seis fases.

30 Las ventajas del generador modular con una configuración de devanados entrelazados incluyen: (1) la fuerza mecánica está siempre equilibrada con respecto al árbol del generador, y el esfuerzo mecánico se distribuye de manera uniforme por toda la estructura del generador independientemente del nivel de potencia de salida de los sistemas trifásicos individuales; (2) idéntica reluctancia en los entrehierros de cada sistema trifásico, lo que facilita la identificación y la medición de los parámetros del generador en un conjunto de sistema trifásico para fines de control; (3) un fallo en cualquier subsistema no requiere que se apague todo el sistema de generación de energía. Por lo tanto, se mejora la fiabilidad y la disponibilidad de la potencia suministrada.

35 En comparación con el funcionamiento de un único generador trifásico, cuando se hace funcionar un generador modular que comprende, por ejemplo, dos o más devanados entrelazados trifásicos, es importante tener en cuenta la compartición de potencia o de carga dinámica de los diferentes sistemas trifásicos. Más específicamente, para el generador PM modular compuesto por múltiples generadores trifásicos con devanados entrelazados, un control convencional orientado a campos de realimentación de corriente no es suficiente debido al gran acoplamiento magnético entre cada sistema trifásico.

40 La manera habitual de diseñar un generador modular de seis fases es disponer dos devanados conectados en estrella con un desfase de 30 grados eléctricos entre las dos estrellas. Mediante esta disposición, el undécimo y el décimo tercer armónico se reducirán, reduciendo de ese modo el esfuerzo en el sistema de generador. Otra manera es dividir la banda de fase de una máquina trifásica convencional en dos partes con una separación de fase espacial de 30 grados eléctricos. Otra manera adicional es utilizar una máquina con devanados conectados en estrella y colocar un transformador de estrella-triángulo en la salida de un generador con el fin de obtener un desfase de 30 grados eléctricos entre los dos generadores. Sin embargo, el primer diseño descrito es la disposición más común en la actualidad.

55 El documento US6008616 describe un aparato para un motor de inducción de cambio de polos y un método de control para ese motor. El motor de cambio de polos se modifica eléctricamente entre un número n de polos y un

número  $2n$  de los polos ( $n = 2, 4, \dots$ ) para garantizar un par de salida del motor de inducción de cambio de polos en un modo de accionamiento constante con una alta velocidad de rotación del motor de inducción sin aumentar las dimensiones del motor de inducción o de un inversor asociado con el motor de inducción de cambio de polos y sin que se produzca una variación en el par.

- 5 La publicación “*Six phase synchronous machine with AC and DC stator connections*”, IEEE 1983, llega a la conclusión de que para la mayoría de estados de funcionamiento, un ángulo de desplazamiento de  $30^\circ$  grados entre las fases parece ser óptimo con respecto a una distorsión armónica de tensión y una pulsación del par.

10 El documento US2003085627 describe un motor eléctrico polifásico con una inyección de corriente de tercer armónico. Un par significativamente aumentado se proporciona mediante una disposición de motor que presenta un estátor con un núcleo y al menos dos devanados trifásicos enrollados al núcleo. Los dos devanados están separados espacialmente en  $30$  grados eléctricos. Se proporciona potencia a los dos devanados mediante dos inversores que suministran cada uno potencia a la misma frecuencia fundamental y con una componente en el tercer armónico de la fundamental, donde la potencia proporcionada por un inversor está desplazada en el tiempo en  $30^\circ$  de la frecuencia fundamental con respecto a la potencia proporcionada por el otro inversor. La componente adicional de tercer armónico reduce la densidad de flujo máxima eficaz, permitiendo un aumento en la componente fundamental del flujo para permitir un aumento en el par eficaz, donde la componente de tercer armónico también proporciona un par adicional.

### Sumario de la invención

20 En vista de lo anterior, un objetivo de la invención es proporcionar un método para una compartición de potencia o de par dinámico de un sistema de generador modular que comprende múltiples sistemas trifásicos con devanados entrelazados. El modelo de generador modular en la estructura d-q de referencia de rotor puede obtenerse y utilizarse como la base para llevar a cabo el control de desacoplamiento de compartición de carga dinámica. La metodología de control de desacoplamiento se describe posteriormente con un generador de seis fases como un ejemplo de aplicación. El método es genérico y puede aplicarse a cualquier control de generador modular múltiple trifásico.

25 La invención se define de manera precisa en la reivindicación de método 1 y en la reivindicación de dispositivo correspondiente 7. Las reivindicaciones dependientes describen realizaciones ventajosas de la invención.

30 Un planificador de par/potencia minimiza la transición dinámica provocada por un acoplamiento magnético cruzado entre los sistemas trifásicos. En el planificador de par/potencia, el cambio en la pendiente de la señal de referencia del par o de la potencia está limitado. En el planificador de par/potencia se evita un cambio simultáneo de las señales de referencia de par/potencia de dos conjuntos cualesquiera de los sistemas trifásicos para controlar el desacoplamiento dinámico. Es decir, según la invención, es posible utilizar el planificador de par/potencia para mitigar la transición dinámica provocada por el acoplamiento cruzado entre los sistemas trifásicos limitando la pendiente de las señales de referencia del par o de la potencia y utilizando un retardo de tiempo fijo para evitar cambios simultáneos de las señales de referencia del par o de la potencia de dos conjuntos cualesquiera de los sistemas trifásicos.

40 En la implementación del sistema de control, la magnitud de los enlaces entre flujos de rotor y el desplazamiento angular eléctrico entre dos sistemas trifásicos diferentes se identifican a partir de la fuerza contraelectromotriz 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 de parámetros de generador. El desplazamiento angular  $\delta_{2-1}$  del sistema trifásico puede medirse como la diferencia de fase de una señal de tensión de fuerza contraelectromotriz entre la fase a2 y la fase a1, como se describe posteriormente. La magnitud de flujo de rotor  $\psi_{mr}$  puede calcularse como el valor máximo de tensión de fuerza contraelectromotriz de fase dividido por la velocidad angular  $\omega_r$ .

45 Otros objetivos, características y ventajas de la presente invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada, de las reivindicaciones adjuntas y de los dibujos.

50 En general, todos los términos utilizados en las reivindicaciones deben interpretarse según su significado habitual en el campo tecnológico, a no ser que se definan explícitamente de otra manera en este documento. Todas las referencias a “un/una/el/la [elemento, dispositivo, componente, medio, etapa, etc.]” deben interpretarse de manera abierta como haciendo referencia a al menos una instancia de dicho elemento, dispositivo, componente, medio, etapa, etc., a no ser que se indique explícitamente lo contrario. Las etapas de cualquier método descrito en este documento no tienen que llevarse a cabo en el orden exacto dado a conocer, a no ser que se indique explícitamente.

### Breve descripción de los dibujos

55 Lo expuesto anteriormente, así como objetos, características y ventajas adicionales de la presente invención, se entenderán mejor a través de la siguiente descripción detallada ilustrativa pero no limitativa de realizaciones preferidas de la presente invención, con referencia a los dibujos adjuntos, donde los mismos números de referencia se utilizarán para elementos similares, en los que:

La Fig. 1a ilustra un generador PM modular de seis fases y ocho polos con devanados entrelazados. En la Fig. 1a se resalta una disposición de fases de un sistema trifásico. Las ranuras de estátor en blanco son para el otro sistema trifásico que no se ha resaltado en la figura.

La Fig. 1b ilustra un generador PM modular de nueve fases y dos polos.

5 La Fig. 2 ilustra el perfil de un acoplamiento interfásico en función del desplazamiento angular eléctrico entre dos sistemas trifásicos.

La Figura 3 ilustra un algoritmo de control de compartición de potencia/carga dinámica de realimentación basado en corrientes de estátor orientadas a campos según una primera realización de la presente invención.

10 La Figura 4 ilustra un algoritmo de control de compartición de potencia/carga dinámica basado en flujos de estátor según una segunda realización de la presente invención.

**Descripción detallada de realizaciones preferidas**

15 Para un generador PM modular con N conjuntos de sistemas trifásicos "a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>c<sub>1</sub>", "a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>c<sub>2</sub>" ... "a<sub>N</sub>b<sub>N</sub>c<sub>N</sub>", el eje de flujo magnético, la posición del rotor y el desplazamiento angular de los sistemas trifásicos se definen según lo siguiente: el eje d (eje de flujo de rotor directo) se define como el eje de flujo magnético del rotor; el eje q está adelantado 90 grados eléctricos con respecto al eje d en el sentido contrario a las agujas del reloj; el ángulo de posición de rotor θ<sub>r</sub> se define como el ángulo entre el eje d y el eje de flujo magnético de fase a1 del sistema trifásico a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>c<sub>1</sub>; δ<sub>m-1</sub> denota el desplazamiento angular eléctrico entre el conjunto trifásico a<sub>m</sub>b<sub>m</sub>c<sub>m</sub> y el conjunto trifásico a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>c<sub>1</sub>.

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

20 Suponiendo una distribución sinusoidal de los devanados de fase del estátor, el acoplamiento inductivo en un sistema trifásico a<sub>m</sub>b<sub>m</sub>c<sub>m</sub> puede representarse como una matriz "L<sub>ss</sub>", y el acoplamiento inductivo entre dos conjuntos de devanados trifásicos a<sub>n</sub>b<sub>n</sub>c<sub>n</sub> y a<sub>m</sub>b<sub>m</sub>c<sub>m</sub> puede representarse como una matriz "LM<sub>n-m</sub>".

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

Donde L<sub>sl</sub> denota la inductancia de fuga de fase del estátor; L<sub>m</sub> denota la inductancia mutua de fase del estátor.

25

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

Donde δ<sub>n-1</sub> - δ<sub>m-1</sub> es el desplazamiento angular entre los sistemas trifásicos a<sub>n</sub>b<sub>n</sub>c<sub>n</sub> y a<sub>m</sub>b<sub>m</sub>c<sub>m</sub>.

La matriz de acoplamiento de inductancia de fase del generador puede representarse como:

$$L_{a1b1c1\_a2b2c2\_ \wedge \ aNbNcN} = \begin{bmatrix} L_{ss} & LM_{1\_2} & \dots & LM_{1\_N} \\ LM_{2\_1} & L_{ss} & \dots & LM_{2\_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ LM_{N\_1} & LM_{N\_2} & \dots & L_{ss} \end{bmatrix}$$

donde LM<sub>m-n</sub> = LM<sup>T</sup><sub>n-m</sub>

30 El flujo de rotor visto desde el eje de flujo magnético del sistema trifásico a<sub>m</sub>b<sub>m</sub>c<sub>m</sub> 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  $\Psi_{mr}$  denota la magnitud del enlace entre flujos de rotor.

La ecuación de flujo de estátor de un generador modular de 3\*N fases es:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{a1b1c1} \\ \Psi_{a2b2c2} \\ \dots \\ \Psi_{aNbNcN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS} & LM_{1-2} & \dots & LM_{1-N} \\ LM_{2-1} & L_{SS} & \dots & LM_{2-N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ LM_{N-1} & LM_{N-2} & \dots & L_{SS} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{a1b1c1} \\ i_{a2b2c2} \\ \dots \\ i_{aNbNcN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{r\_a1b1c1} \\ \Psi_{r\_a2b2c2} \\ \dots \\ \Psi_{r\_aNbNcN} \end{bmatrix}$$

5 La ecuación de tensión de estátor de un generador modular de 3\*N fases es:

$$\begin{bmatrix} u_{a1b1c1} \\ u_{a2b2c2} \\ \dots \\ u_{aNbNcN} \end{bmatrix} = R_s * \begin{bmatrix} i_{a1b1c1} \\ i_{a2b2c2} \\ \dots \\ i_{aNbNcN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{SS} & LM_{1-2} & \dots & LM_{1-N} \\ LM_{2-1} & L_{SS} & \dots & LM_{2-N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ LM_{N-1} & LM_{N-2} & \dots & L_{SS} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{di_{a1b1c1}}{dt} \\ \frac{di_{a2b2c2}}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_{aNbNcN}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\Psi_{r\_a1b1c1}}{dt} \\ \frac{d\Psi_{r\_a2b2c2}}{dt} \\ \dots \\ \frac{d\Psi_{r\_aNbNcN}}{dt} \end{bmatrix}$$

Con el fin de implementar el desacoplamiento dinámico de la compartición de carga/potencia, se obtiene un modelo de estructura d-q de referencia de rotor del generador PM de 3\*N fases. Suponiendo una distribución de devanados sinusoidal, las tensiones de fase  $u_{a_m b_m c_m}$ , las corrientes de fase  $i_{a_m b_m c_m}$  y el flujo de estátor  $\Psi_{a_m b_m c_m}$  pueden transferirse a la estructura de referencia de rotor según:

10

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

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

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

donde

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

15

La matriz de la transformada de Park de un generador PM modular de 3\*N fases es:

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

La ecuación de flujo de estátor del generador modular PM de 3\*N fases en la estructura d-q de referencia de rotor se

obtiene como:

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

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

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

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

5

La ecuación de tensión de estátor del generador modular PM de 3\*N fases en la estructura d-q de referencia de rotor se obtiene como:

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

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

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

10

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

El par eléctrico de un generador PM modular de 3\*N fases en la estructura de referencia natural de fase de estátor es:

$$T_e = \frac{poles}{2} * \begin{bmatrix} i_{a1b1c1}^T & i_{a2b2c2}^T & \dots & i_{aNbNcN}^T \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_{r\_a1b1c1}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial \psi_{r\_a2b2c2}}{\partial \theta_r} \\ \dots \\ \frac{\partial \psi_{r\_aNbNcN}}{\partial \theta_r} \end{bmatrix}$$

15 Aplicando la matriz de la transformada de Park del generador PM modular de 3\*N fases a la ecuación anterior del par, el par eléctrico en la estructura d-q de referencia de rotor puede expresarse como:

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

La matriz de inductancia de una máquina PM de seis fases en la estructura de fase natural se determina en función del ángulo de desfase  $\delta_{2-1}$  entre los dos conjuntos de devanados.

$$L_{\text{af}1, \dots, \text{af}6} = \begin{bmatrix} L_{\mu} + L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m * \cos(\delta_{2-1}) & L_m * \cos(\delta_{2-1} + 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2-1} - 2 * \pi/3) \\ -L_m/2 & L_{\mu} + L_m & -L_m/2 & L_m * \cos(\delta_{2-1} - 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2-1}) & L_m * \cos(\delta_{2-1} + 2 * \pi/3) \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_{\mu} + L_m & L_m * \cos(\delta_{2-1} + 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2-1} - 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2-1}) \\ L_m * \cos(\delta_{2-1}) & L_m * \cos(\delta_{2-1} - 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2-1} + 2 * \pi/3) & L_{\mu} + L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ L_m * \cos(\delta_{2-1} + 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2-1}) & L_m * \cos(\delta_{2-1} - 2 * \pi/3) & -L_m/2 & L_{\mu} + L_m & -L_m/2 \\ L_m * \cos(\delta_{2-1} - 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2-1} + 2 * \pi/3) & L_m * \cos(\delta_{2-1}) & -L_m/2 & -L_m/2 & L_{\mu} + L_m \end{bmatrix}$$

5 Los coeficientes de acoplamiento interfásico entre los dos sistemas trifásicos se definen como:

$$coeff_{m1} = \cos(\delta_{2-1})$$

$$coeff_{m2} = \cos(\delta_{2-1} + 2 * \pi/3)$$

$$coeff_{m3} = \cos(\delta_{2-1} - 2 * \pi/3)$$

10 Tratando cada acoplamiento de fase con la misma importancia, los coeficientes de acoplamiento total de los dos sistemas trifásicos se definen como:

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

La Figura 2 es una representación gráfica de las ecuaciones anteriores e ilustra cómo varían los coeficientes de acoplamiento interfásico  $coeff_{m1}$ ,  $coeff_{m2}$ ,  $coeff_{m3}$  y  $coeff_{mTotal}$  entre los dos sistemas trifásicos con relación al desplazamiento angular eléctrico  $\delta_{2-1}$  entre los dos sistemas.

15 A partir de la curva superior se determina que el acoplamiento magnético total mínimo entre los dos sistemas se consigue en  $\delta_{2-1} = 30^\circ$  y  $\delta_{2-1} = 90^\circ$ . Por consiguiente, disponiendo los devanados en un desplazamiento angular de  $\delta_{2-1} = 30^\circ$  o  $\delta_{2-1} = 90^\circ$ , el acoplamiento físico entre los dos sistemas trifásicos se minimizará, minimizándose de ese modo la saturación de circuito magnético debida a efectos de acoplamiento.

20 Para un generador modular de nueve fases, utilizando un método de análisis similar, el acoplamiento físico mínimo se consigue 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, existe un acoplamiento entre dos sistemas trifásicos cualesquiera. Es difícil encontrar una disposición de devanados que pueda minimizar el acoplamiento físico total.

25 La Figura 3 ilustra un algoritmo de control de compartición de potencia/carga dinámica de realimentación de corriente de estátor orientado a campos según una primera realización de la presente invención para llevar a cabo una compartición de potencia o de carga dinámica de un generador PM modular compuesto por múltiples sistemas trifásicos con devanados entrelazados. La siguiente descripción se proporciona para un generador modular de seis fases como un ejemplo de aplicación. El principio y el método pueden aplicarse para controlar una compartición de potencia/carga dinámica de un generador PM modular con cualquier número múltiple de sistemas trifásicos para una aplicación de turbina eólica.

30 El algoritmo mostrado en la figura está implementado preferiblemente para el caso de acoplamiento más simple con una configuración de devanado ( $\delta_r$ ) de un desplazamiento angular eléctrico de  $90^\circ$  entre dos conjuntos de sistemas trifásicos para un generador PM de seis fases y ocho polos como el ilustrado en la Figura 1a.

35 En el bloque 315, el desplazamiento angular  $\delta_{2-1}$  y el flujo de rotor  $\psi_{mr}$  se identifican a partir de las señales de tensión de fuerza contraelectromotriz de fase en un estado de circuito abierto cuando el generador funciona a velocidad constante. El ángulo eléctrico de desfase  $\delta_{2-1}$  se mide como la diferencia de fase de las señales de tensión

de fuerza contraelectromotriz entre la fase a2 y la fase a1. El flujo de rotor  $\psi_{mr}$  se mide como el resultado de la magnitud de tensión de fuerza contraelectromotriz máxima de fase *ua* (*máxima*) dividida por la velocidad angular de generador  $\omega_r$ .

5 El bloque 305a mide las señales de corriente de fase y las señales de tensión de fase del sistema trifásico a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>c<sub>1</sub>. El bloque 305b mide las señales de corriente de fase y las señales de tensión de fase del sistema trifásico a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>c<sub>2</sub>.

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

10 El bloque 309a lleva a cabo la transformada de Park de la corriente de fase y la tensión de fase desde la estructura a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>c<sub>1</sub> a la estructura dq de referencia de rotor. Las señales de entrada para el bloque 309a son la tensión de fase ua<sub>1</sub>, ub<sub>1</sub>, uc<sub>1</sub>, la corriente de fase ia<sub>1</sub> ib<sub>1</sub> ic<sub>1</sub> y la posición de rotor  $\theta_r$  medidas. Las señales de salida del bloque 309a son las componentes dq de corriente y de tensión id<sub>1</sub> iq<sub>1</sub> ud<sub>1</sub> uq<sub>1</sub> para el sistema trifásico a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>c<sub>1</sub>, las cuales se utilizan como señales para el control de corriente, el cálculo del par eléctrico y la compensación de alimentación anticipada de tensión.

15 El bloque 309b lleva a cabo la transformada de Park de la corriente y la tensión de fase desde la estructura trifásica a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>c<sub>2</sub> a la estructura dq de referencia de rotor. Las señales de entrada para el bloque 309b son la tensión de fase ua<sub>2</sub> ub<sub>2</sub> uc<sub>2</sub>, la corriente de fase ia<sub>2</sub> ib<sub>2</sub> ic<sub>2</sub>, la posición de rotor  $\theta_r$  y el desplazamiento angular  $\delta_{2\_1}$  medidos entre los dos conjuntos de sistemas trifásicos. Las señales de salida del bloque 309b son las componentes dq de corriente y de tensión id<sub>2</sub> iq<sub>2</sub> ud<sub>2</sub> uq<sub>2</sub> para el sistema trifásico a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>c<sub>2</sub>.

20 El control de par o el control de potencia se implementa en el sistema de control de generador de turbina eólica. El control de par se lleva a cabo transfiriendo el comando de potencia al comando de par dividiendo la referencia de potencia por la velocidad angular  $\omega_r$  y, después, cerrando el bucle de control en función de las señales de referencia del par y de realimentación del par. El control de potencia se lleva a cabo cerrando directamente el bucle de control de potencia en función de la señal de referencia de potencia y de realimentación de potencia con una compensación adecuada del cambio de ancho de banda de bucle debido al nivel de velocidad de funcionamiento.

25 Un planificador de par o de potencia 301 es responsable de distribuir una demanda de par o de potencia para un generador modular 302 en dos conjuntos de sistemas trifásicos. Con el fin de minimizar la transición dinámica provocada por el acoplamiento entre los dos sistemas trifásicos, la pendiente del cambio en la demanda de par o de potencia debe limitarse. Por el mismo motivo, después de un cambio en el comando de par o de potencia en un conjunto de sistema trifásico, se introduce un retardo de tiempo fijo antes de permitir el cambio en el comando de par o de potencia en el otro conjunto de sistema trifásico. De esta manera se evita un cambio simultáneo del comando de par o de potencia en ambos sistemas trifásicos.

30 Un controlador de par o de potencia 303a para el primer sistema (denotado como a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>c<sub>1</sub> en la figura 3) genera la referencia de corriente de eje q,  $i_{q1}^*$ , en función de una referencia de par o de potencia proporcionada por el planificador de par o de potencia 301 y de una realimentación de par o de potencia proporcionada por el primer observador de par 304a1 o el observador de potencia 304a2.

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

40 
$$T_{e1} = (3/4) * polos * \psi_{mr} * i_{q1}$$

El observador de potencia 304a2 calcula la potencia real del generador basándose en las corrientes de fase de estátor medidas y en las tensiones de fase según:

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

45 Un controlador de par o de potencia 303b correspondiente para el segundo sistema (denotado como a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>c<sub>2</sub> en la figura 3) genera la referencia de corriente de eje q,  $i_{q2}^*$ , basándose en una referencia de par o de potencia proporcionada por el planificador de par o de potencia 301 y en una realimentación de par o de potencia proporcionada por el observador de par 304b1 o el observador de potencia 304b2 según:

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

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

5 Un planificador de debilitamiento de campo 307 se utiliza para distribuir las componentes de flujo de desmagnetización entre los dos conjuntos de sistemas trifásicos. La señal de referencia de corriente de eje d,  $i_{d1}^*$ ,  $i_{d2}^*$ , para cada sistema trifásico individual se calcula mediante un bloque de generación de referencia de corriente de eje d 308 con los efectos de acoplamiento para otros sistemas trifásicos incluidos según:

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

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

10 El planificador de par o de potencia 301 y el planificador de debilitamiento de campo 307 son responsables de conseguir un funcionamiento óptimo del generador modular 302 y de los sistemas convertidores.

15 Las señales de corriente de realimentación  $i_{d1}$ ,  $i_{q1}$ ,  $i_{d2}$ ,  $i_{q2}$  se sustraen de las señales de referencia de 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. Una componente de alimentación anticipada de tensión apropiada  $u_{q1\_FW}$ ,  $u_{d1\_FW}$ ,  $u_{q2\_FW}$ ,  $u_{d2\_FW}$ , se añade a cada referencia de tensión de eje q/eje d correspondiente,  $u_{q1}^*$ ,  $u_{d1}^*$ ,  $u_{q2}^*$ ,  $u_{d2}^*$ , respectivamente, con el fin de compensar el efecto de acoplamiento  $B_{emf}$  giratorio de su propio sistema trifásico y los efectos de acoplamiento de corriente/tensión del otro sistema trifásico según:

$$u_{d1\_FW} = K_{FW} * \frac{(3/2) * L_m}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \{u_{d2} - R_s * i_{d2}\} - \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \omega_r * i_{q1}$$

$$u_{q1\_FW} = K_{FW} * \frac{(3/2) * L_m}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \{u_{q2} - R_s * i_{q2}\} + \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \omega_r * i_{d1} + \frac{L_{sl}}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \psi_{mr} * \omega_r$$

$$u_{d2\_FW} = K_{FW} * \frac{(3/2) * L_m}{L_{sl} + (3/2) * L_m} * \{u_{d1} - R_s * i_{d1}\} - \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \omega_r * i_{q2}$$

20

$$u_{q2\_FW} = K_{FW} * \frac{(3/2) * L_m}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \{u_{q1} - R_s * i_{q1}\} + \frac{L_{sl} * (L_{sl} + 3 * L_m)}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \omega_r * i_{d2} + \frac{L_{sl}}{(L_{sl} + (3/2) * L_m)} * \psi_{mr} * \omega_r$$

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

25 El bloque 312a transfiere las señales de tensión de eje q/eje d,  $u_{q1}^*$ ,  $u_{d1}^*$ , a la estructura estacionaria de estátor  $\alpha\beta 1$  para el primer sistema trifásico a1b1c1 según:

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

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

$$u_{d2\_FW} = -\frac{(3/2)*L_m}{L_{sl} + (3/2)*L_m} * u_{d1} + \frac{(3/2)*L_m}{L_{sl} + (3/2)*L_m} * R_s * i_{d1} - \frac{L_1 * (L_1 + 3 * L_m)}{L_{sl} + (3/2)*L_m} * i_{q2} * (P/2) * \omega_m$$

El bloque 312b transfiere las señales de tensión de eje q/eje d,  $u_{q2}^*$ ,  $u_{d2}^*$ , a la estructura estacionaria de estátor  $\alpha 2\beta 2$  para el segundo sistema trifásico a2b2c2 según:

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

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

5

Los moduladores PWM 313a y 313b toman como entrada la referencia de tensión de la estructura estacionaria de estátor y generan las señales de interrupción para el convertidor PWM 314a y 314b respectivamente. El convertidor PWM 314a aplica la tensión de primer sistema trifásico  $ua_1$ ,  $ub_1$ ,  $uc_1$  al generador 302. El convertidor PWM 314b aplica la tensión de segundo sistema trifásico  $ua_2$ ,  $ub_2$  y  $uc_2$  al generador 302.

10

La compartición de carga dinámica entre dos conjuntos de sistemas trifásicos se realiza por tanto incluyendo el efecto de acoplamiento en el cálculo de la referencia de corriente de eje d y añadiendo la compensación de tensión de alimentación anticipada de desacoplamiento apropiada en la generación de señales de referencia de tensión de estructura dq.

15

El principio del método de desacoplamiento anterior puede aplicarse para soportar cualquier desplazamiento angular físico entre los sistemas trifásicos. Otros métodos de implementación para cualquier generador PM modular múltiple trifásico también pueden desarrollarse en función del principio ilustrado utilizando el generador de seis fases.

20

La Figura 4 ilustra un algoritmo de compartición de potencia/carga dinámica basado en un control vectorial de flujo de estátor según una segunda realización de la presente invención para llevar a cabo una compartición de potencia o de carga dinámica de un generador PM modular compuesto por múltiples sistemas trifásicos con devanados entrelazados. El algoritmo puede utilizarse para controlar una compartición de potencia/carga dinámica de un generador PM modular dispuesto en una turbina eólica.

25

El algoritmo mostrado en la figura está implementado preferiblemente para un generador PM de seis fases como el ilustrado en la Figura 1a. El principio puede aplicarse a una compartición de carga/potencia basada en un control vectorial de flujo de estátor de cualquier generador modular múltiple trifásico.

30

En el bloque 415, el desplazamiento angular  $\delta_{2-1}$  y el flujo de rotor  $\psi_{mr}$  se identifican a partir de las señales de tensión Memf de fase en el circuito abierto de generador y estado de funcionamiento a velocidad constante. El ángulo eléctrico de desfase  $\delta_{2-1}$  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 de rotor  $\psi_{mr}$  se mide como la magnitud de tensión bemf máxima de fase  $ua_1$  (máxima) dividida por la velocidad angular de generador  $\omega_r$ .

35

El bloque 405a mide las señales de corriente de fase y las señales de tensión de fase del sistema trifásico  $a_1b_1c_1$ . El bloque 405b mide las señales de corriente de fase y las señales de tensión de fase del sistema trifásico  $a_2b_2c_2$ .

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

40

El control de par o el control de potencia se implementa en el sistema de control de generador de turbina eólica. El control de par se lleva a cabo transfiriendo el comando de potencia al comando de par dividiendo la referencia de potencia por la velocidad angular  $\omega_r$  y, después, cerrando el bucle de control en función de las señales de referencia del par y de realimentación del par. El control de potencia se lleva a cabo cerrando directamente el bucle de control de potencia en función de la señal de referencia de potencia y de realimentación de potencia con una compensación adecuada del cambio de ancho de banda de bucle debido al nivel de velocidad de funcionamiento.

Un planificador de par o de potencia 401 es responsable de distribuir una demanda de par o de potencia para un generador modular 402 en dos conjuntos de sistemas trifásicos. Con el fin de minimizar la transición dinámica

provocada por el acoplamiento entre los dos sistemas trifásicos, la pendiente del cambio en la demanda de par o de potencia debe limitarse. Por el mismo motivo, después de un cambio en el comando de par o de potencia en un conjunto de sistema trifásico, se introduce un retardo de tiempo fijo antes de permitir el cambio en el comando de par o de potencia en el otro conjunto de sistema trifásico. De esta manera se evita un cambio simultáneo del comando de par o de potencia en ambos sistemas trifásicos.

5

Un controlador de par o de potencia 403a para el primer sistema (denotado como a1b1c1 en la figura 4) genera la referencia de corriente de eje q,  $i_{q1}^*$ , en función de una referencia de par o de potencia proporcionada por el planificador de par o de potencia 401 y de una realimentación de par o de potencia proporcionada por un primer observador de par 404a1 o un observador de potencia 404a2.

10

Al observador de par 404a1 se le proporcionan las mediciones de corriente/tensión del bloque de medición de corriente y tensión 405a y la posición de rotor del bloque de medición de posición de rotor 406. La salida del observador de par se calcula según:

$$T_{e1} = -(\text{polos} / 2) * \psi_{mr} * \{i_{a1} * \text{sen}(\theta_r) + i_{b1} * \text{sen}(\theta_r - 2 * \pi / 3) + i_{c1} * \text{sen}(\theta_r + 2 * \pi / 3)\}$$

15

Al observador de potencia 404a2 se le proporcionan las mediciones de corriente/tensión del bloque de medición de corriente y tensión 405a. La salida del observador de potencia 404a2 se calcula según:

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

Un controlador de potencia o de par 403b correspondiente para el segundo sistema (denotado como a2b2c2 en la figura 4) genera la referencia de corriente de eje q,  $i_{q2}^*$ , basándose en una referencia de par o de potencia proporcionada por el planificador de par o de potencia 401 y en una realimentación de par o de potencia proporcionada por un observador de par 404b1 o un observador de potencia 404b2. El observador de par 404b1 o el observador de potencia 404b2 está construido de manera similar al observador de par 404a1 o el observador de potencia 404a2. Las entradas del observador de par 404b1 son la medición de corriente de fase del bloque 405b, la medición de posición de rotor del bloque 406 y el ángulo de desplazamiento de sistema trifásico  $\delta_{2\_1}$  del bloque 415. La salida del observador de par 404b1 se calcula según:

20

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

25

Las entradas del observador de potencia 404b2 son la medición de corriente de fase y de tensión de fase del bloque 405b. La salida del observador de par 404b2 se calcula según:

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

30

Un planificador de debilitamiento de campo 407 se utiliza para distribuir las componentes de flujo de estátor de desmagnetización entre los dos conjuntos de sistemas trifásicos. Las referencias de flujo de estátor de eje d,  $\psi_{d1}$ ,  $\psi_{d2}$ , se generan por un primer y un segundo bloque de cálculo de flujo de estátor de eje d, 408a, 408b, para cada sistema trifásico según:

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

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

35

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

El planificador de par o de potencia 401 y el planificador de debilitamiento de campo 407 son responsables de conseguir un funcionamiento óptimo del generador modular 402 y de los sistemas convertidores.

Las referencias de corriente de eje q,  $i_{q1}^*$ ,  $i_{q2}^*$ , de dos conjuntos de sistemas se utilizan por un primer y un segundo bloque de cálculo de flujo de estátor de eje q, 409a, 409b, para generar una referencia de flujo de estátor de eje q,

$\psi_{q1}, \psi_{q2}$ , para cada sistema trifásico. El cálculo incluye el acoplamiento del otro sistema trifásico según:

$$\dot{\psi}_{q1} = (L_{sl} + \frac{3}{2}L_m) * \dot{i}_{q1} + \frac{3}{2} * L_m * \dot{i}_{q2}$$

$$\dot{\psi}_{q2} = (L_{sl} + \frac{3}{2}L_m) * \dot{i}_{q2} + \frac{3}{2} * L_m * \dot{i}_{q1}$$

- 5 Los bloques 410a y 410b transfieren la referencia de flujo de estátor de eje q,  $\psi_{q1}, \psi_{q2}$ , y la referencia de flujo de estátor de eje d  $\psi_{d1}, \psi_{d2}$ , para cada sistema trifásico a la estructura estacionaria de estátor  $\alpha1\beta1$  del primer sistema trifásico y a la estructura estacionaria de estátor  $\alpha2\beta2$  del segundo sistema trifásico, respectivamente.

Para el primer sistema trifásico, la referencia de flujo de estátor transformada se calcula según:

$$\dot{\psi}_{\alpha1} = \cos(\theta_r) * \dot{\psi}_{d1} - \text{sen}(\theta_r) * \dot{\psi}_{q1}$$

$$\dot{\psi}_{\beta1} = \text{sen}(\theta_r) * \dot{\psi}_{d1} + \text{sen}(\theta_r) * \dot{\psi}_{q1}$$

- 10 y para el segundo sistema trifásico:

$$\dot{\psi}_{\alpha2} = \cos(\theta_r - \delta_r) * \dot{\psi}_{d2} - \text{sen}(\theta_r - \delta_r) * \dot{\psi}_{q2}$$

$$\dot{\psi}_{\beta2} = \text{sen}(\theta_r - \delta_r) * \dot{\psi}_{d2} + \text{sen}(\theta_r - \delta_r) * \dot{\psi}_{q2}$$

Las señales de referencia de flujo de estátor transformadas  $\psi_{\alpha1}^*, \psi_{\beta1}^*$  y  $\psi_{\alpha2}^*, \psi_{\beta2}^*$ , respectivamente, se proporcionan posteriormente a un bloque de controlador orientado a flujo de estátor 411a, 411b de cada sistema.

- 15 Los bloques de controlador orientados a flujo de estátor 411a, 411b también reciben señales de realimentación de flujo de estátor,  $\psi_{\alpha1}, \psi_{\beta1}$  y  $\psi_{\alpha2}, \psi_{\beta2}$ , de un observador de flujo de estátor 412. Una realización preferida del observador de flujo de estátor 412 es el observador de flujo de modo de tensión, con el que el flujo de estátor se mide directamente mediante la integración de la tensión de fase después de eliminar la caída de tensión de resistencia de fase según la ecuación proporcionada a continuación. La otra realización posible del observador de flujo de estátor 412 es un observador de flujo de modo de corriente, el cual puede construirse en función de la ecuación de flujo de estátor de un generador modular.
- 20

$$u_{\alpha1} = (2/3) * \{u_{a1} - (1/2) * u_{b1} - (1/2) * u_{c1}\}$$

$$u_{\beta1} = (2/3) * \{(\sqrt{3}/2) * u_{b1} - (\sqrt{3}/2) * u_{c1}\}$$

$$i_{\alpha1} = (2/3) * \{i_{a1} - (1/2) * i_{b1} - (1/2) * i_{c1}\}$$

$$i_{\beta1} = (2/3) * \{(\sqrt{3}/2) * i_{b1} - (\sqrt{3}/2) * i_{c1}\}$$

25

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

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

y

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

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

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

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

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

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

5

- 10 Las salidas del bloque de controlador de flujo de estator 411a son una referencia de tensión de estator para el primer sistema trifásico a1b1c1 en la estructura estacionaria de estator  $\alpha 1\beta 1$  que se calculan según la siguiente ecuación, donde  $T_{PWM}$  es el periodo de conmutación PWM.

$$u_{\alpha 1}^* = \frac{\dot{\Psi}_{\alpha 1} - \Psi_{\alpha 1}}{T_{PWM}}$$

$$u_{\beta 1}^* = \frac{\dot{\Psi}_{\beta 1} - \Psi_{\beta 1}}{T_{PWM}}$$

- 15 Las salidas del bloque de controlador de flujo de estator 411b son una referencia de tensión de estator para el segundo sistema trifásico a2b2c2 en la estructura estacionaria de estator  $\alpha 2\beta 2$  que se calculan según:

$$u_{\alpha 2}^* = \frac{\dot{\Psi}_{\alpha 2} - \Psi_{\alpha 2}}{T_{PWM}}$$

$$u_{\beta 2}^* = \frac{\dot{\Psi}_{\beta 2} - \Psi_{\beta 2}}{T_{PWM}}$$

5 Las salidas,  $u^*_{\alpha 1}$ ,  $u^*_{\beta 1}$  y  $u^*_{\alpha 2}$ ,  $u^*_{\beta 2}$ , de los bloques de controlador de flujo de estátor 411a, 411b se introducen en los moduladores PWM 413a, 413b de cada sistema trifásico. Los moduladores PWM 413a y 413b generan las señales de interrupción para los convertidores PWM 414a y 414b, respectivamente. El convertidor PWM 414a aplica la tensión de primer sistema trifásico  $ua_1$ ,  $ub_1$ ,  $uc_1$  al generador 402. El convertidor PWM 414b aplica la tensión de segundo sistema trifásico  $ua_2$ ,  $ub_2$  y  $uc_2$  al generador 402.

La compartición de carga dinámica entre dos conjuntos de sistemas trifásicos se realiza por tanto incluyendo el efecto de acoplamiento en la generación de vectores de referencia de flujo de estátor.

10 El principio del método de desacoplamiento anterior puede aplicarse para soportar cualquier desplazamiento angular físico entre sistemas trifásicos del generador. También pueden desarrollarse otros métodos de implementación basados en el principio ilustrado en la Figura 4 para el generador modular con cualquier sistema múltiple trifásico.

15 La invención se ha descrito principalmente con referencia a algunas realizaciones. Sin embargo, como podrá apreciar fácilmente un experto en la técnica, otras realizaciones diferentes a las dadas a conocer anteriormente son igualmente posibles dentro del alcance de la invención, tal y como se define en las reivindicaciones de patente adjuntas. Las ilustraciones de realización se proporcionan para el generador modular PM de 6 fases. Sin embargo, el método puede aplicarse a cualquier generador modular PM de  $3 \cdot N$  fases utilizando la ecuación de flujo de estructura dq, la ecuación de tensión y la ecuación de par que se han presentado en la descripción.

**REIVINDICACIONES**

1.- Un método para proporcionar una compartición de carga entre un primer y un segundo sistema trifásico, estando conectados dichos primer y segundo sistema trifásico a un primer y un segundo devanado entrelazado trifásico en un generador (302), comprendiendo el método:

5        determinar una primera señal de control de eje q para el primer sistema trifásico y una segunda señal de control de eje q para el segundo sistema trifásico en función de una demanda de par o de potencia para el generador,

determinar una primera señal de control de eje d para el primer sistema trifásico ( $a_1, b_1, c_1$ ) y una segunda señal de control de eje d para el segundo sistema trifásico ( $a_2, b_2, c_2$ ) en función de un efecto de acoplamiento entre el primer y el segundo sistema trifásico, y

10        ajustar las señales de control de eje q y las señales de control de eje d incluyendo al menos una señal de compensación de alimentación anticipada, donde dicha al menos una señal de compensación de alimentación anticipada está basada en un efecto de acoplamiento entre el primer y el segundo sistema trifásico, minimizándose de ese modo la saturación de circuito magnético debida a los efectos de acoplamiento.

15        2.- El método según la reivindicación 1, en el que la primera señal de control de eje q para el primer sistema trifásico y la segunda señal de control de eje q para el segundo sistema trifásico están basadas en un control de realimentación de par o de potencia de cada sistema trifásico individual del generador.

3.- El método según la reivindicación 1, que comprende:

determinar una componente de flujo de desmagnetización del primer sistema trifásico y una componente de flujo de desmagnetización del segundo sistema trifásico,

20        determinar la primera y la segunda señal de control de eje d en función de dicha componente de flujo de desmagnetización determinada del primer sistema trifásico y de dicha componente de flujo de desmagnetización del segundo sistema trifásico, y

generar una primera y una segunda señal de referencia de corriente de eje d en función de dichas primera y segunda señales de control de eje d.

25        4.- El método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende:

determinar al menos un parámetro de generador,

determinar la primera y la segunda señal de control de eje d en función de dicho al menos un parámetro de generador, y

30        generar una primera y una segunda señal de referencia de corriente de eje d en función de dichas primera y segunda señales de control de eje d.

5.- El método según cualquier reivindicación anterior, que comprende:

determinar la señal de compensación de alimentación anticipada para el primer sistema trifásico en función de una señal de realimentación de tensión de estátor de eje d del segundo sistema trifásico y de una señal de realimentación de corriente de eje d del segundo sistema trifásico, y

35        generar una señal de compensación de alimentación anticipada de tensión de estátor de eje d en función de dicha señal de compensación de alimentación anticipada .

6.- El método según cualquier reivindicación anterior, que comprende:

40        determinar la señal de compensación de alimentación anticipada para el primer sistema trifásico en función de una señal de realimentación de tensión de estátor de eje q del segundo sistema trifásico y de una señal de realimentación de corriente de eje q del segundo sistema trifásico, y

generar una señal de compensación de alimentación anticipada de tensión de estátor de eje q en función de dicha señal de compensación de alimentación anticipada.

7. Un sistema de generador, que comprende:

45        un generador modular (302) que comprende un primer y un segundo devanado entrelazado trifásico de estátor, en el que el segundo devanado entrelazado ( $A_2, B_2, C_2$ ) está desplazado en un ángulo eléctrico ( $\delta_{2\_1}$ ) con respecto al primer devanado trifásico ( $A_1, B_1, C_1$ ),

un primer y un segundo sistema trifásico conectados a dichos primer y segundo devanados entrelazados trifásicos,

un bloque de controlador de par/potencia dispuesto para determinar una primera señal de control de eje q para el primer sistema trifásico y una segunda señal de control de eje q para el segundo sistema trifásico en función de una demanda de par y/o de potencia para el generador,

5 un bloque de controlador de eje d dispuesto para determinar una primera señal de control de eje d para el primer sistema trifásico ( $a_1, b_1, c_1$ ) y una segunda señal de control de eje d para el segundo sistema trifásico ( $a_2, b_2, c_2$ ) en función de un efecto de acoplamiento entre el primer y el segundo sistema trifásico, y

10 un bloque de compensación de alimentación anticipada dispuesto para ajustar las señales de control de eje q y las señales de control de eje d incluyendo al menos una señal de compensación de alimentación anticipada, donde dicha al menos una señal de compensación de alimentación anticipada está basada en un efecto de acoplamiento entre el primer y el segundo sistema trifásico, minimizándose de ese modo la saturación de circuito magnético debida a los efectos de acoplamiento y llevándose a cabo un control de desacoplamiento de compartición de carga dinámica.

15 8.- El sistema de generador según la reivindicación 7, en el que el bloque de controlador de par/potencia está dispuesto para determinar la primera señal de control de eje q para el primer sistema trifásico y la segunda señal de control de eje q para el segundo sistema trifásico en función de un control de realimentación de par o de potencia de cada sistema trifásico individual del generador.

9.- El sistema de generador según la reivindicación 7, que comprende:

un bloque de debilitamiento de campo adaptado para determinar una componente de flujo de desmagnetización del primer sistema trifásico y una componente de flujo de desmagnetización del segundo sistema trifásico,

20 un bloque de señal de referencia de corriente adaptado para determinar la primera y la segunda señal de control de eje d en función de dicha componente de flujo de desmagnetización determinada del primer sistema trifásico y de dicha componente de flujo de desmagnetización del segundo sistema trifásico, y generar una primera y una segunda señal de referencia de corriente de eje d en función de dichas primera y segunda señales de control de eje d.

25 10.- El sistema de generador según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, que comprende:

un bloque de señal de referencia de corriente adaptado para determinar la primera y la segunda señal de control de eje d en función de dicho al menos un parámetro de generador, y generar una primera y una segunda señal de referencia de corriente de eje d en función de dichas primera y segunda señales de control de eje d.

11.- El sistema de generador según cualquiera de las reivindicaciones 7a 10, que comprende:

30 un bloque de transformación adaptado para determinar la señal de compensación de alimentación anticipada para el primer sistema trifásico en función de una señal de realimentación de tensión de estátor de eje d del segundo sistema trifásico y de una señal de realimentación de corriente de eje d del segundo sistema trifásico, y generar una señal de compensación de alimentación anticipada de tensión de estátor de eje d en función de dicha señal de compensación de alimentación anticipada .

35 12.- El sistema de generador según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 11, que comprende:

un bloque de transformación adaptado para determinar la señal de compensación de alimentación anticipada para el primer sistema trifásico en función de una señal de realimentación de tensión de estátor de eje q del segundo sistema trifásico y de una señal de realimentación de corriente de eje q del segundo sistema trifásico, y generar una señal de compensación de alimentación anticipada de tensión de estátor de eje q en función de dicha señal de compensación de alimentación anticipada.

40 13.- El sistema de generador según la reivindicación 7, que comprende un generador modular de seis fases que comprende:

un primer devanado trifásico,

45 un segundo devanado trifásico entrelazado con el primer devanado trifásico y desfasado en un ángulo eléctrico comprendido entre  $70^\circ$  y  $110^\circ$  con respecto al primer devanado trifásico.

14.- El sistema de generador según la reivindicación 7, que comprende un generador modular de nueve fases que comprende:

un primer devanado trifásico,

50 un segundo devanado trifásico entrelazado con el primer devanado trifásico y desfasado en un ángulo eléctrico comprendido entre  $10^\circ$  y  $50^\circ$  con respecto al primer devanado trifásico,

## ES 2 370 365 T3

un tercer devanado trifásico entrelazado con el primer y el segundo devanado trifásico y desfasado en un ángulo eléctrico comprendido entre  $40^\circ$  y  $80^\circ$  o entre  $70^\circ$  y  $110^\circ$  con respecto al primer devanado trifásico.

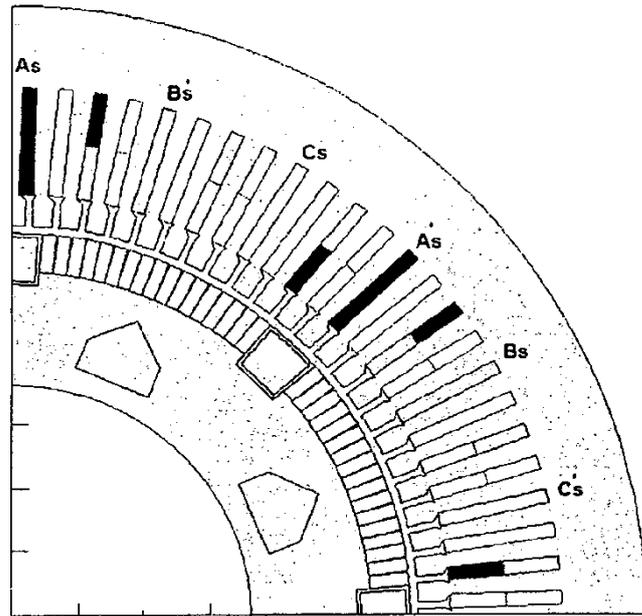


Figura 1a

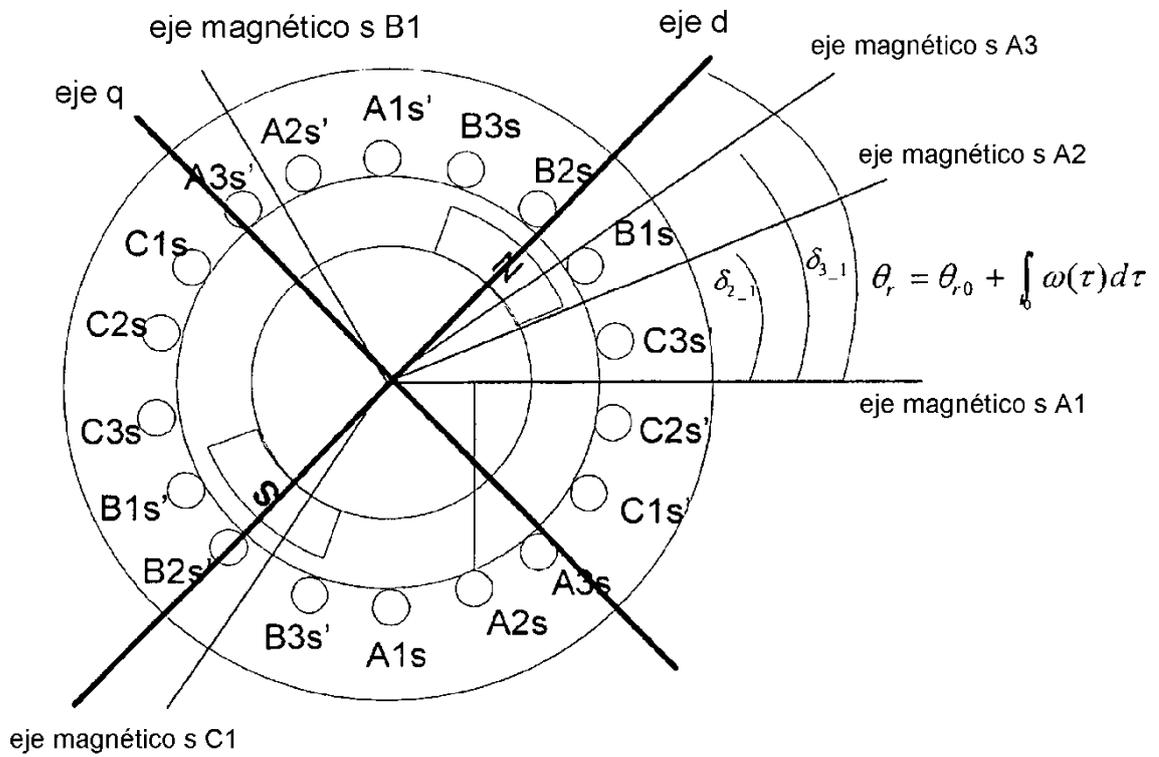


Figura 1b

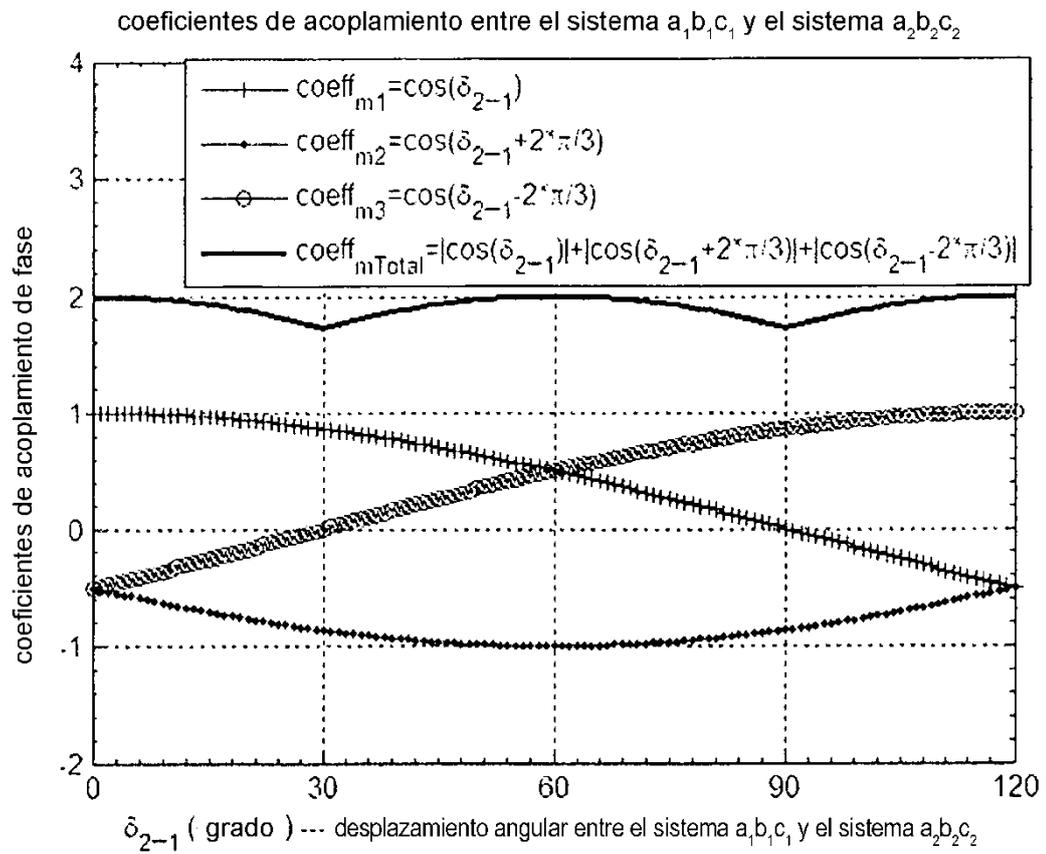


Figura 2

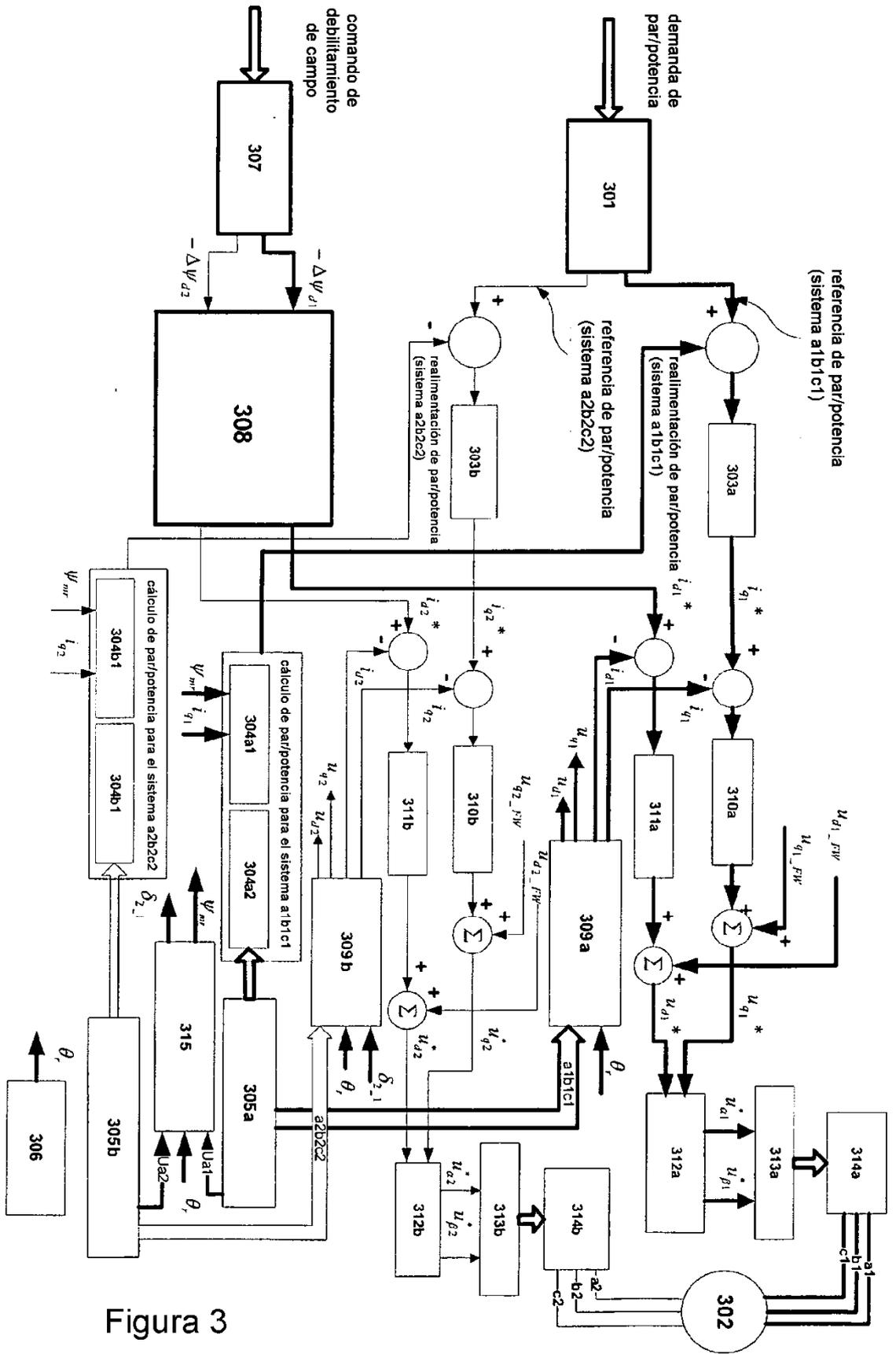


Figura 3

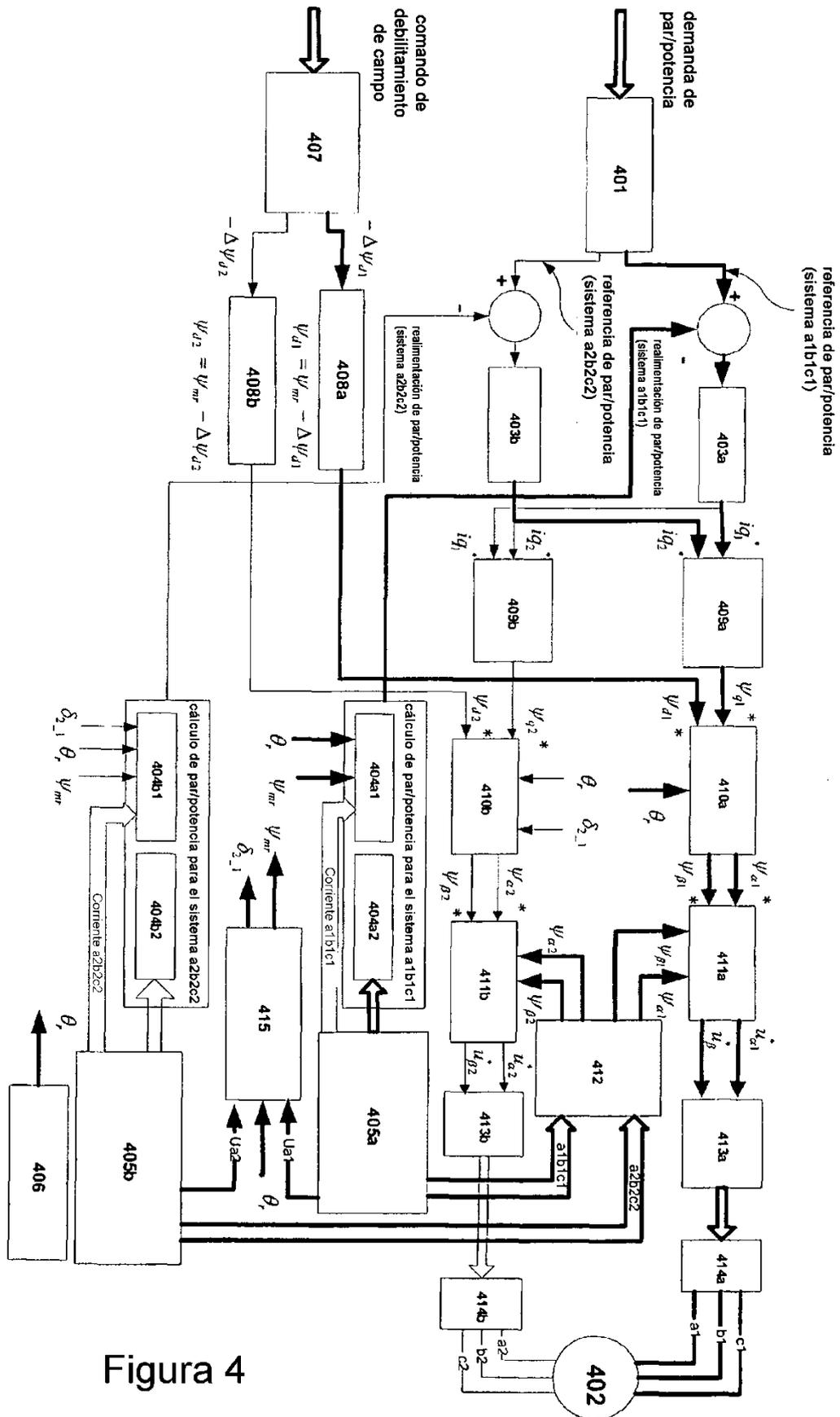


Figura 4