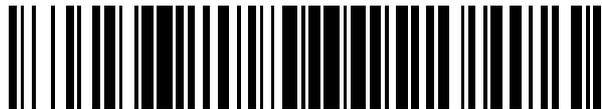


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 682 990**

51 Int. Cl.:

<b>H02P 9/02</b>	(2006.01)
<b>H02P 21/14</b>	(2006.01)
<b>H02P 9/48</b>	(2006.01)
<b>F03D 7/02</b>	(2006.01)
<b>F03D 7/04</b>	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.08.2009 PCT/EP2009/061151**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **04.03.2010 WO10023285**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.08.2009 E 09782347 (0)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.07.2018 EP 2327148**

54 Título: **Un método y una disposición de control para el control de un generador de corriente alterna**

30 Prioridad:

**29.08.2008 DK 200801203**  
**03.09.2008 US 93876**  
**30.07.2009 DK 200970075**  
**31.07.2009 US 230116**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**24.09.2018**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**  
**Hedeager 42**  
**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**BO, YIN;**  
**DENG, HENG y**  
**LARSEN, KIM B.**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 682 990 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

Un método y una disposición de control para el control de un generador de corriente alterna

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un método para el control de un generador de corriente alterna (CA) multifase que se conecta a un convertidor controlable, teniendo el generador un rotor con un árbol conectado a al menos una pala de turbina eólica. La invención se refiere adicionalmente a una disposición de control adecuada para llevar a cabo el método.

**Antecedentes**

Dicho método se divulga en el documento US 5.083.039, que describe un generador de inducción de CA conectado a un convertidor de potencia. Se controla el par del generador usando un regulador PI que funciona utilizando orientación del campo. Se controla entonces el convertidor de potencia para proporcionar corrientes de estator que den como resultado el par deseado. Esto permite al controlador eliminar totalmente un error en un estado estacionario. Un inconveniente que dicho sistema, sin embargo, es que será relativamente complejo.

20 **Sumario**

Un objeto de la presente divulgación es obviar totalmente o en parte el problema anteriormente mencionado, y más particularmente proporcionar un método y un aparato para controlar un generador de CA que sea menos complejo.

Este objeto se consigue mediante un método tal como se define en la reivindicación 1 o una disposición de control correspondiente que lleva a cabo el método tal como se define en la reivindicación 11.

Más específicamente, el método comprende determinar la velocidad de rotación y la fase de un flujo del rotor generado por el rotor del generador, determinar unas características eléctricas del generador de CA, generar una señal de referencia de CA basándose en la fase del flujo del rotor, determinar una señal de error que representa la diferencia entre la característica eléctrica del generador de CA y la señal de referencia de CA, aplicar la señal de error a un controlador para generar una tensión de referencia, en el que el controlador tiene una función de realimentación y una función resonante con una frecuencia de resonancia variable fijada para corresponder a la frecuencia de la referencia de flujo del estator, y aplicar la tensión de referencia al convertidor controlable.

El uso de un controlador con propiedades resonantes significa que las corrientes del estator así como el flujo del estator pueden controlarse como señales alternas. Por lo tanto no hay necesidad de transformar las corrientes o el flujo del estator a ser controlados a un marco rotativo, lo que proporciona un controlador menos complejo. Dado que la frecuencia de resonancia varía de acuerdo con la señal de referencia y en consecuencia de acuerdo con la rotación de la turbina eólica, el controlador es capaz de controlar el convertidor correctamente incluso aunque varíe la velocidad del viento.

La señal de referencia de CA puede generarse basándose en una señal de error correspondiente a una diferencia entre una potencia deseada y una potencia real. Como alternativa, sin embargo, la señal de referencia de CA puede generarse basándose en una señal de error correspondiente a una diferencia entre un par deseado y un par real.

La señal de referencia de CA puede ser una referencia de corriente de CA o una referencia de flujo del estator de CA y la característica eléctrica que se determina puede ser una señal de corriente de CA o una estimación del flujo del estator de CA.

El controlador puede ser un controlador P+resonante que comprende un coeficiente proporcional,  $K_P$ , y un coeficiente de resonancia,  $K_I$ , en el que  $K_P$  y  $K_I$  son constantes o alternativamente varían dependiendo de la velocidad de rotación del flujo del rotor. En cualquier caso, sin embargo, la frecuencia de resonancia  $\omega_{re}$  del controlador varía de acuerdo con la velocidad del rotor.

Adicionalmente, la tensión de referencia puede compensar la fuerza electromagnética del generador, FEM. Esto proporciona un control incluso más eficiente.

La disposición de control se concibe de acuerdo con el método. En un aspecto de la invención, se proporciona una disposición de control para un generador de corriente alterna (CA) multifase, que comprende un rotor conectado a al menos una pala de turbina eólica, que se conecta a un convertidor controlable, comprendiendo la disposición un primer dispositivo detector para la detección de una velocidad de rotación de un flujo del rotor generado por el rotor, un bloque detector para determinar una característica eléctrica del generador de CA, un generador de referencia para generar una señal de referencia de CA basándose en una fase del flujo del rotor, determinándose la fase del flujo del rotor basándose en la velocidad de rotación, un generador de señal de error para determinar una señal de error que representa la diferencia entre las características eléctricas y la señal de referencia de CA, y un controlador

adaptado para generar una tensión de referencia basándose en la señal de error, en el que el controlador tiene una función de realimentación y una función resonante con una frecuencia de resonancia variable fijada para corresponder a la frecuencia de la referencia de flujo del estator, en el que la tensión de referencia se adapta para controlar el convertidor controlable.

5 Los documentos CN101141110 y CN101141111 divulgan sistemas de control para generadores de potencia eólicos DFIG usando reguladores proporcional-resonancia.

### Breve descripción de los dibujos

- 10 La Fig. 1 ilustra esquemáticamente un contexto en el que puede aplicarse un método de control de la presente divulgación.  
 La Fig. 2 ilustra vectores de corriente en un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG).  
 La Fig. 3A ilustra esquemáticamente un controlador P+Resonante.  
 15 La Fig. 3B muestra un diagrama de Bode para un controlador P+Resonante.  
 La Fig. 4 ilustra un lazo exterior que regula la velocidad de la turbina basándose en la potencia del generador.  
 La Fig. 5 ilustra un dispositivo de control de acuerdo con una realización de la invención.  
 La Fig. 6 ilustra un dispositivo de control de acuerdo con otra realización de la invención.  
 La Fig. 7 ilustra un dispositivo de control de acuerdo con una realización en la que se controlan corrientes en el marco natural.  
 20 La Fig. 8 ilustra un dispositivo de control en donde las corrientes en el marco natural se controlan de acuerdo con otra realización.  
 La Fig. 9 ilustra un controlador para una máquina asíncrona de acuerdo con una realización de la invención.  
 La Fig. 10 ilustra un controlador para una máquina asíncrona de acuerdo con otra realización de la invención.  
 25 La Fig. 11 ilustra una compensación de anticipación opcional de la FEM.

### Descripción detallada

30 La Fig. 1 ilustra esquemáticamente un contexto en el que puede aplicarse un método o dispositivo de control de la presente divulgación. Una turbina eólica 1 con al menos una pala 2, en movimiento rotativo, se conecta a través de una caja de engranajes 3 opcional, que se usa para incrementar la velocidad de rotación del movimiento, a un generador de turbina eólica (WTG) 5, que convierte el movimiento rotativo en energía eléctrica.

35 El WTG 5 está dirigido a suministrar energía a una red eléctrica 7 de frecuencia fija (típicamente 50 o 60 Hz). Aunque es posible el funcionamiento de un WTG en sincronismo con dicha red eléctrica, por ejemplo mediante el control del paso de la pala 2, es mucho más preferido permitir que la velocidad de rotación de la pala de la turbina eólica 2 varíe dentro de un cierto intervalo. Esto proporciona una eficiencia energética más alta, dado que puede permitirse que la pala de la turbina eólica gire, por ejemplo, con una velocidad óptima para cualquier velocidad del viento dada. Adicionalmente, pueden realizarse otras consideraciones para un rendimiento mejorado global. Por  
 40 ejemplo, pueden disminuirse las tensiones mecánicas a las que se someten partes de la turbina eólica, de modo que puedan mantenerse bajos los costes de mantenimiento.

45 Por tanto, se permite que el WTG 5 produzca potencia de corriente alterna (CA) fuera de sincronismo con la red eléctrica 7. Se conecta un convertidor 9 CA/CC a los devanados del estator del WTG 5 y convierte su potencia de salida de CA en potencia de corriente continua (CC). El convertidor CA/CC 9 se conecta a través de un condensador de filtro 11 a un convertidor CC/CA 13, que convierte la potencia de corriente continua (CC) en potencia de CA en sincronismo con la red eléctrica 7. Puede colocarse un transformador (no mostrado) entre el convertidor CC/CA 13 y la red 7.

50 En un ejemplo típico, se desea el funcionamiento de la turbina eólica 1 a una velocidad de rotación deseada específica  $\omega^*$  para una velocidad de viento dada. El control puede conseguirse entonces en tres lazos en cascada.

55 En primer lugar, se resta la velocidad de rotación real  $\omega$  de la velocidad de rotación deseada  $\omega^*$  para proporcionar una señal de error. Esta señal de error se suministra a un controlador de velocidad 15, que en respuesta produce la salida de una señal de potencia deseada  $P^*$ . En segundo lugar, la potencia real  $P$  se resta de la potencia deseada  $P^*$  para proporcionar una señal de error de potencia. La señal de error de potencia se suministra a un controlador de potencia 17, que en respuesta produce la salida de una amplitud deseada de la señal de corriente  $i^*$  de generación de potencia del estator.

60 Como alternativa al uso de la potencia como un parámetro de control, podría usarse el par en su lugar como se ilustra en la Fig. 4. El controlador de velocidad 15' produce entonces la salida de un par deseado  $T^*$  que se compara con el par real para proporcionar una señal de error de par que se suministra a un controlador de potencia 17'. Como respuesta, el controlador de potencia 17' produce la salida de una amplitud deseada de la señal de corriente  $i^*$  de generación de potencia del estator.

65 La potencia y el par de un WTG se relacionan por la velocidad angular (es decir la velocidad de rotación del rotor) de

acuerdo con:

$$P = \omega_{rotor} \cdot T$$

5 Esto implica que el control de par y potencia presentan características diferentes cuando se aplican a un WTG. Más específicamente, cuando se controla el par de un WTG, es necesario incluir la velocidad del rotor en el lazo de control. El control de potencia es por ello superior al control de par cuando la señal a ser controlada es potencia dado que la respuesta transitoria es diferente para los dos métodos de control, es decir cuando se usa el control de par, un cambio en la potencia requeriría establecer tanto la velocidad del rotor como el par antes de que puede aplicarse un control apropiado.

10 En tercer lugar, volviendo a la Fig. 1, un controlador 19 produce la salida de la señal de tensión del estator  $\underline{u}$  en respuesta a al menos una señal de referencia y a una característica eléctrica del WTG 5. En una realización de la invención, la señal de tensión del estator  $\underline{u}$  se produce en respuesta a las señales de corriente deseada del estator  $\underline{i}^*$  y a las señales de corriente real del estator  $\underline{i}$  ( $i_a, i_b, i_c$ ).

15 En una realización alternativa de la invención, hay presente un generador de referencia de flujo del estator 18 para producir la salida de una referencia de flujo del estator  $\Psi^*$  basándose en la señal de corriente deseada del estator  $\underline{i}^*$ . El controlador 19 produce la salida posteriormente que una señal de tensión del estator  $\underline{u}$  en respuesta a al menos la señal de referencia de flujo del estator  $\Psi^*$  y a un flujo del estator estimado. Un estimador de flujo 20 determina el flujo del estator estimado, en esta realización actual, a partir de, por ejemplo, las señales de corriente real del estator ( $i_a, i_b, i_c$ ) del generador de la turbina eólica 5. En todas las realizaciones, la señal de tensión del estator  $\underline{u}$  se suministra a un modulador de PWM 21 que controla el convertidor CA/CC 9 en consecuencia.

25 La presente divulgación se refiere al tercero de estos lazos, es decir al lazo más interior que regula las corrientes del estator o flujo del estator. Debería entenderse que las funciones de los lazos exteriores pueden conseguirse de otras maneras que no se explicarán adicionalmente. Un ejemplo, sin embargo, sería proporcionar una tabla de búsqueda que, en respuesta a un flujo de viento o velocidad de pala dados, proporcione una corriente deseada del estator.

30 Adicionalmente, la operación del convertidor CC/CA 13 no se explica adicionalmente dado que su operación es bien conocida.

35 Con referencia a la fig. 2, se dará el ejemplo siguiente basándose en una turbina eólica 1 que comprende un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG). Con algunas modificaciones, a ser explicadas a continuación, el concepto de la presente descripción es aplicable sin embargo a un generador síncrono con una bobina de rotor o un generador asíncrono, por ejemplo un generador con rotor en jaula de ardilla.

40 Con referencia a la fig. 2, las tensiones de los tres terminales a-b-c del generador trifásico se dan mediante la expresión:

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} 1 + \sigma & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 + \sigma & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & 1 + \sigma \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{sa} \\ E_{sb} \\ E_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1})$$

45 en la que  $E_{sa}$ ,  $E_{sb}$ , y  $E_{sc}$  denotan la FEM del generador para cada fase,  $L_m$  es la inductancia mutua de los devanados de fase,  $\sigma$  es el factor de fugas, es decir la autoinductancia dividida por la inductancia mutua, y  $R_s$  es la resistencia del devanado.

Usando la relación ( $i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$ ), las tensiones para los tres terminales a-b-c de un generador trifásico pueden simplificarse como:

$$\begin{aligned} u_{sa} &= R_s \cdot i_{sa} + (1,5 + \sigma)L_m \frac{di_{sa}}{dt} + E_{sa} \\ u_{sb} &= R_s \cdot i_{sb} + (1,5 + \sigma)L_m \frac{di_{sb}}{dt} + E_{sb} \\ u_{sc} &= R_s \cdot i_{sc} + (1,5 + \sigma)L_m \frac{di_{sc}}{dt} + E_{sc} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2})$$

La FEM para cada fase es:

$$\begin{aligned}
 E_{sa} &= -\omega_r \Psi_m \cos(\theta_r) \\
 E_{sb} &= -\omega_r \Psi_m \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 E_{sc} &= -\omega_r \Psi_m \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right),
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3}$$

respectivamente, en donde  $\omega_r$  indica la velocidad angular del flujo del rotor,  $\theta_r$  se relaciona con el ángulo del flujo del rotor, y  $\Psi_m$  es la cantidad de flujo magnético generada por el rotor.

$$\begin{aligned}
 T_{em} &= -p \Psi_m \left[ i_{sa} \cos \theta_r + i_{sb} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \\
 P_{em} &= \omega_M \cdot T_{em},
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 4}$$

en las que  $\omega_M = \omega_r / p$  y  $p$  es el número de pares de polos del rotor. Es posible así controlar la potencia del PMSG en una configuración de turbina eólica mediante el control de cada una de las corrientes del devanado. Esto puede realizarse mediante el control de las tensiones de fase con los interruptores del convertidor CA/CC. Es sin embargo solamente el componente de la corriente del estator que es perpendicular al flujo del rotor el que contribuye al par, y por ello, a la potencia.

En el documento US 5.083.039, que lleva a cabo un método de control para un generador con rotor en jaula de ardilla trifásico, se lleva a cabo primero una transformación desde un sistema trifásico (a-b-c) a un sistema equivalente en dos fases ( $\alpha$ - $\beta$ ):

$$\begin{aligned}
 i_{s\alpha} &= \frac{2}{3} \left( i_{sa} + i_{sb} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right) \\
 i_{s\beta} &= \frac{2}{3} \left( i_{sb} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 6}$$

Esta transformación de tres a dos fases es bien conocida. Adicionalmente, se lleva a cabo una segunda transformación que mapea las corrientes en dos fases a un sistema de coordenadas rotativo, en el que el eje en cuadratura  $q$  coincide con el flujo del rotor y el eje directo  $d$  es perpendicular al mismo:

$$\begin{aligned}
 i_{sd} &= i_{s\alpha} \cos \theta_r + i_{s\beta} \sin \theta_r \\
 i_{sq} &= -i_{s\alpha} \sin \theta_r + i_{s\beta} \cos \theta_r
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 7}$$

Obsérvese que  $\theta_r$  se refiere al ángulo del flujo del rotor. En un rotor para un generador de inducción de jaula de ardilla, el flujo se desliza con relación al rotor. Este no es sin embargo el caso en un generador síncrono tal como un PMSG.

Las transformaciones anteriores pueden aplicarse también de modo similar sobre las tensiones de fase en un sistema trifásico (a-b-c) a un sistema en dos fases ( $\alpha$ - $\beta$ ) equivalente y a continuación posteriormente en el sistema de coordenadas rotativo d-q.

La Fig. 2 ilustra esquemáticamente las corrientes descritas hasta el momento. Las tres fases a, b y c están separadas entre sí  $120^\circ$  y la fase a puede designarse como el eje de estator estacionario 31. La corriente de estator instantánea  $i_s$  es la suma de las corrientes de las tres fases  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ , cuyas direcciones positivas se indican en el dibujo. En el instante ilustrado,  $i_{sc}$  tiene un valor negativo. En el marco  $\alpha$ - $\beta$ , que es asimismo estacionario, las corrientes del estator pueden definirse en su lugar con las dos corrientes  $i_{s\alpha}$  e  $i_{s\beta}$ . Se define así el eje  $\alpha$ - $\beta$  en el que el eje  $\alpha$  es el eje del estator 31 y el eje  $\beta$  es perpendicular al eje del estator 31. El flujo del rotor  $\Psi_r$  gira con relación al eje del estator 31. Todas las corrientes ilustradas hasta el momento varían periódicamente, normalmente con una función sinusoidal que tiene una frecuencia que es igual a la velocidad de rotación del flujo del rotor (o más alta en el caso de un rotor con más de dos polos).

La segunda transformación da como resultado sin embargo dos corrientes que son constantes cuando el generador está en un estado estacionario, como se define en un marco rotativo. La corriente  $i_{sd}$ , que puede denominarse corriente de generación de potencia, es perpendicular al flujo del rotor, y la corriente  $i_{sq}$ , que puede denominarse corriente de generación de flujo, es paralela con el flujo del rotor.

La corriente  $i_{sd}$  que es perpendicular al flujo del rotor, puede controlarse como un parámetro de CC siempre que el generador esté en un estado estacionario. Esto puede realizarse dado que la potencia es proporcional a  $i_{sd}$ . En el documento US 5.083.039 esta corriente se controla con relación a una referencia de CC usando un controlador PI, que es capaz de eliminar completamente un error para una señal de CC. La salida del controlador de CC se conecta a un rectificador controlable que asegura que la tensión en cada fase corresponde a un valor resultante en las corrientes de estator deseadas. Aunque este planteamiento puede ser apropiado en la mayor parte de aplicaciones, su realización puede ser bastante compleja y requiere un equipo de control caro. En lo que sigue se describe por lo tanto un método y aparato de control que pueden realizarse como un sistema menos complejo. En particular se describe en él, un método/aparato de control en el que no es necesaria una transformación a un marco rotativo.

El concepto de control de la presente divulgación usa un controlador resonante junto con un controlador de realimentación y, opcionalmente, un controlador de anticipación. La combinación de un controlador resonante y un controlador de realimentación puede ser típicamente un controlador P+Resonante que es bien conocido per se. Otras posibilidades incluyen combinaciones con controladores PI de realimentación, y controladores en modo deslizante, etc.

Generalmente, un controlador P+Resonante, que se usa como un ejemplo aquí, puede presentarse como se ha ilustrado esquemáticamente en la Fig. 3A. Se ilustra un diagrama de Bode para el controlador en la Fig. 3B. El controlador tiene una parte proporcional y una parte resonante. La parte resonante contribuye a la salida solamente para frecuencias en la proximidad de la frecuencia central  $\omega_{re}$ , que en la presente divulgación se fija para corresponder a la velocidad de rotación del flujo del rotor, que puede obtenerse por ejemplo por medio de un codificador para medir las características mecánicas de un rotor en un generador eléctrico. Se hace notar que la frecuencia del flujo del estator y la frecuencia del flujo del rotor son iguales, y que la frecuencia de la referencia de flujo del estator es naturalmente igual a la de la frecuencia de flujo del estator. Nótese que el parámetro  $\omega$ , se refiere a la velocidad angular del flujo del rotor. La función de transferencia de un controlador P+Resonante ideal puede definirse como sigue:

$$H(s) = K_p + K_I \frac{s}{s^2 + \omega_{re}^2} \quad (\text{Ec. 8})$$

Este regulador tiene la capacidad de eliminar completamente un error también en un parámetro alterno siempre que el parámetro alterne con una frecuencia próxima a  $\omega_{re}$ . Por lo tanto, puede eliminarse la necesidad de realizar la transformación en un marco rotativo. En su lugar, el control puede aplicarse directamente sobre una corriente trifásica o una transformación bifásica de la misma. Al mismo tiempo el parámetro  $\omega_{re}$  se suministra al controlador.  $K_p$  y  $K_I$  pueden ser constantes o pueden variarse de acuerdo con la velocidad del rotor para conseguir diferentes propiedades dinámicas.

Hay varias implementaciones posibles del control P+Resonante anterior. Puede implementarse un controlador P+Resonante mediante el uso de la siguiente función de transferencia para conseguir un pico de resonancia práctico a un cierto intervalo de frecuencias.

$$H_{ac}(s) = K_p + \frac{2K_I\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_{re}^2} \quad (\text{Ec.9})$$

en la que  $\omega_{re}$  indica la frecuencia de resonancia y  $\omega_c$  puede considerarse como un factor de amortiguación en el pico de resonancia.

La Fig. 5 ilustra un aparato de control que utiliza un controlador P+Resonante de acuerdo con una realización de la invención. Se conecta un PMSG trifásico 105 a un convertidor/rectificador CA/CC 109 controlable que comprende seis interruptores. Se miden dos de las corrientes del estator  $i_a$ ,  $i_b$  usando sensores 106, para generar las señales de sensor. No hay necesidad normalmente de medir la tercera corriente de fase  $i_c$  dado que, típicamente, cada corriente tiene en todo instante una relación predeterminada con las otras dos. Las señales de corriente se transforman a un marco  $\alpha$ - $\beta$  por medio de una unidad de transformación  $\alpha$ - $\beta$  139, que aplica la función de la ecuación 6 anterior, proporcionando de ese modo las corrientes  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$ . Como se muestra a continuación, es posible sin embargo dejar que el controlador actúe directamente sobre las corrientes del estator, es decir en un marco q-b-c o natural.

Como en el sistema descrito en conexión con las Figs. 1 y 4, un controlador de potencia (o par) 117 produce la salida de un valor de referencia  $i_m^*$ , que corresponde a una corriente de generación de par que proporciona el par deseado. Un bloque de referencia de corriente 141 genera, basándose en  $i_m^*$ , valores de referencia de corriente en el marco  $\alpha$ - $\beta$ , es decir  $i_\alpha^*$ ,  $i_\beta^*$ .

El bloque de referencia de corriente 141 comprende un integrador 142 que proporciona, basándose en la velocidad de rotación  $\omega_r$ , una estimación del ángulo del flujo del rotor  $\theta_r$  con relación al eje del estator (véase el 31, Fig. 2). Esto se realiza mediante la integración de la velocidad del rotor y proporcionando el resultado módulo  $2\pi$ . Los

valores de referencia de corriente en el marco  $\alpha$ - $\beta$ ,  $i_{\alpha}^*$ ,  $i_{\beta}^*$  se proporcionan entonces como:

$$\begin{aligned} i_{\alpha}^* &= i_m^* \cos \theta_r \\ i_{\beta}^* &= i_m^* \sin \theta_r \end{aligned} \quad (\text{Ec. 10})$$

5 Para cada uno de los valores de referencia de corriente, se proporciona a continuación una señal de error simplemente mediante la resta del valor real usando unidades de suma 108. Cada una de las señales de error se suministra entonces a un controlador P+Resonante en un bloque controlador 143, que proporciona en consecuencia señales de control  $u_{\alpha}$ ,  $u_{\beta}$  a un controlador de PWM 21. El bloque controlador 143 recibe también una medida  $\omega_r$  de la velocidad del rotor.

10 La Fig. 6 ilustra un aparato de control de acuerdo con otra realización de la invención. Se conecta un PMSG 205 trifásico a un convertidor para rectificador CA/CC 209 controlable que comprende seis interruptores. Se miden dos de las corrientes del estator  $i_a$ ,  $i_b$ , y dos de las tensiones del estator  $u_a$  y  $u_b$ , usando sensores 206, para generar señales de sensor de corriente y tensión. No hay normalmente necesidad de medir la tercera corriente  $i_c$  o tensión  $u_c$  de fase dado que, típicamente, cada corriente de línea o tensión tiene en todo instante una relación predeterminada con las otras dos. Las señales de corriente y tensión se transforman en un marco  $\alpha$ - $\beta$  por medio de una unidad de transformación  $\alpha$ - $\beta$  239, que aplica la función de la ecuación 6 anterior, proporcionando de ese modo las corrientes  $i_{\alpha}$ ,  $i_{\beta}$ , y las tensiones  $u_{\alpha}$ ,  $u_{\beta}$ .

20 Las corrientes  $i_{\alpha}$ ,  $i_{\beta}$ , se pasan entonces al estimador de flujo 220 para obtener una estimación de flujo del estator. Hay muchas formas de conseguir el flujo del estator en el marco estacionario, por ejemplo una estimación de flujo en lazo abierto o un observador de flujo en lazo cerrado. Un posible estimador de flujo del estator se basa en un modelo de corriente. Esto se proporciona como:

$$\begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= L_s i_{s\alpha} + \psi_m \cos \theta_r \\ \psi_{s\beta} &= L_s i_{s\beta} + \psi_m \sin \theta_r \end{aligned} \quad (\text{Ec. 11})$$

30 en donde la inductancia del estator es  $L_s = (\frac{3}{2} + \sigma)L_m$  y  $\psi_m$  se refiere al flujo del rotor, que es un parámetro constante en un PMSG, y se construye como un valor constante previamente al arranque para una máquina asíncrona (MA), y que se usa para el control del flujo del estator en la MA.

Alternativamente, la estimación del flujo del estator puede obtenerse simplemente a partir de mediciones sobre el generador eléctrico, por ejemplo por medio de un codificador, que obtiene la velocidad angular de la posición del rotor del generador, que se combina posteriormente con tensiones de estator medidas del generador de turbina eólica 205, para obtener una estimación del flujo del estator. La estimación del flujo del estator podría obtenerse también mediante medición directa con un sensor de inducción.

35 Puede describirse de ese modo que se proporciona un bloque sensor 246 para determinar una característica eléctrica del generador de CA, siendo la característica eléctrica una corriente de CA o flujo del estator de CA. El bloque sensor podría componerse por ejemplo simplemente de un sensor tal como el sensor 106 como se describe en la Fig. 5, para proporcionar una medición de dos corrientes del estator del generador 105. Alternativamente, podrían medirse las tres corrientes del estator del generador. Para determinar el flujo del estator de CA, el bloque sensor 246 podría componerse de sensores de corriente o tensión 206, una unidad de transformación  $\alpha$ - $\beta$  239, así como un estimador del flujo 220. El bloque sensor 246 podría componerse alternativamente de un sistema para tomar entradas de codificador y tensiones del estator medidas para determinar el flujo del estator de CA. En otra realización, el bloque sensor 246 podría ser también un sensor de inducción para medición directa del flujo del estator de CA.

Volviendo a la Fig. 6, el controlador de potencia (o par) 217 produce la salida de un valor de referencia  $i_m^*$ , que corresponde a una corriente de generación de potencia que proporciona la potencia deseada. Los valores de referencia de flujo del estator en el marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$  de un PMSG  $\psi_{\alpha}^*$ ,  $\psi_{\beta}^*$  se generan en un bloque generador de referencia de flujo del estator 241 mediante el uso de la amplitud de la corriente del estator y el ángulo del rotor:

$$\begin{aligned} \psi_{sqref} &= L_{sq} I_{sq} + \psi_m \\ \psi_{sdref} &= -L_{sd} i_m^* \end{aligned} \quad (\text{Ec.12})$$

55 en donde  $\psi_{sqref}$ ,  $\psi_{sdref}^*$  son los valores de referencia de flujo del estator en el marco rotativo d-q,  $L_{sd}$  y  $L_{sq}$  son las inductancias del estator en el marco d-q. Puede observarse que en los generadores de imán permanente de montaje superficial (SMPM), el término  $I_{sq}$  puede fijarse a 0, dado que  $i_{sq}$  es una referencia para la construcción del flujo,

conduciendo a una referencia de flujo del estator en el marco q  $\psi_{sqref}$  que es simplemente una función del flujo de máquina  $\psi_m$ .

5 El bloque generador de referencia del flujo del estator 241 comprende también un integrador 242 que proporciona, basándose en la velocidad de rotación  $\omega_r$ , una estimación del ángulo del flujo del rotor  $\theta_r$  con relación al eje del estator. Esto se realiza de modo similar mediante la integración de la velocidad del rotor y proporcionando el resultado módulo  $2\pi$ .

10 Se realiza a continuación una transformación adicional desde los valores de referencia de flujo del estator en el marco rotativo d-q al marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$ , teniendo en consideración el ángulo de flujo del rotor  $\theta_r$  para obtener los valores de referencia de flujo del estator en el marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$ :

$$\begin{bmatrix} \psi_{s\alpha}^* \\ \psi_{s\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_r & \cos\theta_r \\ -\cos\theta_r & \sin\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sdref} \\ \psi_{sqref} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 13})$$

15 Para cada uno de los valores de referencia de flujo del estator, se proporciona a continuación una señal de error mediante la resta simplemente del valor de flujo estimado usando las unidades sumadoras 208. Cada una de las señales de error se suministra entonces a un controlador P+Resonante en un bloque controlador 243, que proporciona el consecuencia señales de control  $u_\alpha$ ,  $u_\beta$  a un controlador de PWM 221. El bloque controlador 243 recibe también una medida  $\omega_r$  de la velocidad del rotor.

20 El controlador PWM (que es el mismo que para las realizaciones anteriormente descritas) funciona de una forma bien conocida para el experto en la materia y no se describirá con mayor detalle. El controlador PWM 121 (o 221) controla los interruptores del convertidor CA/CC 109 (o 209). Un par de interruptores para cada fase, que se controlan de modo complementario por ejemplo de acuerdo con un esquema de modulación de ancho de pulso por vectores espaciales, SVPWM, como es bien conocido. La frecuencia de conmutación del convertidor CA/CC es mucho más alta que la frecuencia del generador, de modo que puede asegurarse que se produce la tensión instantánea correcta en cada fase del PMSG en todo momento. La frecuencia de conmutación puede ser fija o puede variar de acuerdo con las variaciones de la frecuencia actual del generador de CA.

25 La Fig. 7 ilustra un caso en el que el controlador funciona en el marco a-b-c o natural de acuerdo con una realización de la invención. Esto es, las corrientes del estator se controlan directamente, en lugar de tras haber sido transformadas al marco  $\alpha$ ,  $\beta$ . La ventaja de esta configuración es que puede prescindirse de una etapa de transformación. Por otro lado, necesitan generarse tres corrientes de referencia y necesitan controlarse tres corrientes. Sin embargo, con algunas realizaciones el concepto de control que no se describirá en conexión con la Fig. 7 puede ser aún más eficiente en términos de complejidad del controlador.

30 Un bloque de referencia de corriente 141' ligeramente modificado comprende un integrador 142 como se ha descrito previamente en conexión con la Fig. 5. Los valores de corriente de referencia en el marco natural  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$  se proporcionan como:

$$\begin{aligned} i_a^* &= i_m^* \cos\theta_r \\ i_b^* &= i_m^* \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c^* &= i_m^* \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 14})$$

35 De ese modo, se proporcionan tres valores de corriente de referencia que están a  $120^\circ$  desfasadas entre sí. Para cada uno de los valores de corriente de referencia se proporciona a continuación una señal de error simplemente mediante resta del valor real de la corriente. Cada una de las señales de error se suministra entonces a un controlador P+Resonante 143, que proporciona en consecuencia señales de control  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  a un controlador de PWM 121. El controlador de PWM funciona entonces en una manera bien conocida per se, proporcionando señales de control a los interruptores del convertidor 9 de la Fig. 1. Puede incluirse también una compensación de anticipación de la FEM como se ha ilustrado.

40 La velocidad de rotación real  $\omega$  del rotor puede determinarse por medio de, por ejemplo, un sensor de inducción como es bien conocido per se en la técnica, o mediante el uso de una tecnología sin sensores.

45 Puede ser expeditivo determinar el valor de potencia real basándose en las corrientes del estator como sigue en el marco  $\alpha$ - $\beta$  o en el marco natural:

$$P_{em} = p \frac{d}{dt} \Psi_s^T \cdot \dot{i}_s \quad (\text{Ec. 15})$$

en donde p indica el número de polos del rotor, el vector  $\Psi_s$  indica un vector de flujo del estator siendo  $\Psi_s = [\Psi_{sa} \ \Psi_{sb} \ \Psi_{sc}]$  (o  $\Psi_s = [\Psi_{s\alpha} \ \Psi_{s\beta}]$ ) y el vector  $i_s$  indica la corriente trifásica  $i_s = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]$  (o  $i_s = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta}]$ ).

El par real T puede determinarse mediante el uso asimismo de sensores. Puede determinarse como

$$T_{em} = P_{em} / \omega_M \quad (\text{Ec. 17})$$

en donde  $\omega_M = \omega_r / p$ .

La Fig. 8 ilustra un caso en el que el controlador funciona en el marco a-b-c o natural de acuerdo con otra realización.

Un bloque de generación de referencia de flujo del estator 241' ligeramente modificado, en comparación con la realización ilustrada en la Fig. 6, comprende un integrador, controlador de par o potencia y un bloque de generación de referencia de flujo del estator como se ha descrito previamente. Los valores de referencia de flujo del estator se obtienen primero en el marco d-q, antes de ser transformados al marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$ , a continuación al marco natural.  $\Psi_{sa}^*$ ,  $\Psi_{sb}^*$ ,  $\Psi_{sc}^*$ , se proporciona como:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa}^* \\ \Psi_{sb}^* \\ \Psi_{sc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha}^* \\ \Psi_{s\beta}^* \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 18})$$

De modo similar, se proporcionan tres valores de referencia de flujo del estator que están 120° desfasadas entre sí. Para cada uno de los valores de referencia de flujo del estator se proporciona a continuación una señal de error simplemente mediante la resta del valor estimado correspondiente determinado por un estimador de flujo 220. Cada una de las señales de error se suministra entonces a un controlador P+Resonante 243, que en consecuencia proporciona señales de control  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  a un controlador de PWM 21 (no mostrado en la Fig. 8). El controlador de PWM proporciona entonces señales de control a los interruptores del convertidor. Puede incluirse también compensación de anticipación de la FEM como se ha ilustrado.

Los controladores tal como se han descrito anteriormente pueden adaptarse fácilmente a una máquina síncrona con más de dos polos en formas bien conocidas para el experto en la materia.

La adaptación a las máquinas asíncronas, MA, tal como generadores de jaula de ardilla puede llevarse a cabo de acuerdo con una realización de la invención con referencia a la Fig. 9. Para controlar la máquina, debe determinarse la velocidad de rotación del flujo del rotor real, y con un generador de MA, hay siempre un deslizamiento  $\omega_{desliz}$  entre el rotor y el flujo del rotor, siempre que se produce energía eléctrica. La velocidad de rotación real del flujo del rotor  $\omega_{flujio}$  es por lo tanto:

$$\omega_{flujio} = \omega_r + \omega_{desliz} \quad (\text{Ec. 19})$$

en la que  $\omega_{desliz}$  es la velocidad de deslizamiento del rotor y  $\omega_r$  es la velocidad del rotor. El deslizamiento está directamente conectado al par T producido. La velocidad de deslizamiento, que es negativa en comparación con la velocidad del rotor, puede determinarse como:

$$\omega_{desliz} = \frac{|i_d^*| \times R_r \times L_m}{\Psi^* \times L_r} \quad (\text{Ec. 20})$$

en la que  $R_r$  es la resistencia del rotor,  $L_m$  es la inductancia de magnetización,  $\Psi^*$  es la señal de demanda de flujo del generador,  $L_r$  es la inductancia de fugas del rotor e  $i_d^*$  es la salida del controlador de potencia. El deslizamiento puede determinarse así mediante un bloque de función 140 que implementa la ecuación 20.

Alternativamente, el flujo del rotor  $\omega_{flujio}$  puede determinarse por medio de un observador de flujo.

Otra diferencia del control de MA en comparación con el control de máquinas asíncronas es que la magnitud de la corriente de referencia se construye no solamente mediante el uso de la salida del lazo de potencia/par. Esto se debe al hecho de que el flujo del rotor no es constante como es el caso con un rotor de imán permanente.

5 Un controlador de flujo adicional 149 se usa para el control de la MA. La salida del lazo de control de flujo y la salida del lazo de potencia/par se necesitan y usan todas ellas para elaborar la magnitud de la corriente.

10 La velocidad de rotación real del flujo puede calcularse a continuación, y usarse como la entrada  $\omega_{\text{flujo}}$  al bloque de referencia de corriente 141 y a los controladores P+Resonante.

La Fig. 10 ilustra un controlador para una MA de acuerdo con otra realización de la invención.

15 La velocidad de deslizamiento, que se obtiene de modo diferente para esta realización presente, puede determinarse como:

$$\omega_{\text{desliz}} = \frac{i_m^* \times R_r \times L_m}{\Psi^* \times L_r} \quad (\text{Ec. 21})$$

20 en la que  $R_r$  es la resistencia del rotor,  $L_m$  es la inductancia de magnetización,  $\Psi^*$  es la señal de demanda de flujo del generador,  $L_r$  es la inductancia de fugas del rotor e  $i_d^*$  es la salida del controlador de potencia. El deslizamiento puede determinarse entonces mediante un bloque de determinación del deslizamiento 240 que implementa la ecuación 21.

25 Alternativamente, el flujo del rotor  $\omega_{\text{flujo}}$  puede determinarse por medio de un observador de flujo.

La velocidad de rotación real del flujo puede calcularse a continuación, y usarse como la entrada  $\omega_{\text{flujo}}$  al bloque de referencia de flujo 241'' y al controlador P+Resonante.

30 Otra diferencia del control de una MA en comparación con el control de máquinas síncronas es la inclusión de una referencia de clasificación del flujo de rotor fijo  $\Psi_{\text{rqref}}$  como un parámetro en el bloque de generación de referencia de flujo del estator.

35 La referencia de clasificación de flujo del rotor  $\Psi_{\text{rqref}}$  se pasa primero a través de un bloque de ganancia de inductancia 244, que se define como  $L_s/L_m$ , en donde  $L_s$  es la inductancia del estator, y  $L_m$  es la inductancia mutua, para obtener la referencia de flujo del estator en el eje q  $\Psi_{\text{sqref}}$ , que puede definirse como

$$\Psi_{\text{sqref}} = \frac{L_s}{L_m} * \left\{ \Psi_{\text{rqref}} + \lambda \tau_r * \frac{d\Psi_{\text{rqref}}}{dt} \right\} \approx \frac{L_s}{L_m} * \Psi_{\text{rqref}} \quad (\text{Ec. 21})$$

40 El error de par  $T_e$  se obtiene cuando la potencia real  $P$  se resta de la potencia deseada  $P^*$ . Se pasa a continuación a través de un controlador PI para obtener la referencia de corriente de generación de potencia en el eje d  $i_m^*$ . Esta referencia de corriente se pasa a través de un bloque de ganancia, que se define como  $-L_s$ , para obtener la referencia de flujo del estator en el eje d  $\Psi_{\text{dqref}}$ .

45 Posteriormente, y de modo similar al control en una máquina síncrona, se realiza a continuación una transformación adicional desde los valores de referencia de flujo del estator en el marco rotativo d-q un marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$ , teniendo en consideración al ángulo del flujo del rotor  $\theta_r$  para obtener los valores de referencia de flujo del estator en el marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$ .

50 Volviendo al controlador P+Resonante de las realizaciones descritas anteriormente, es posible opcionalmente mejorar adicionalmente la operación del control del generador mediante la introducción de un control de anticipación de la fuerza contra-electromotriz. Dado que la FEM es un valor de corriente alterna que no se relaciona directamente con la corriente de fase o la tensión de fase, puede conseguirse un mejor rendimiento mediante el uso de una compensación de anticipación de la FEM.

55 La inclusión de los términos de anticipación en el lazo de realimentación se muestra en la Fig. 11. En este caso, la compensación de anticipación de la FEM en un marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$  se toma como un ejemplo. El modelo de generador en el marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$  viene dado como (compárese con la Ec. 2 para el marco natural):

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{R_s}{\left(\frac{3}{2} + \sigma\right)L_m} \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{s\alpha} \\ E_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 22})$$

La entrada de control incluye tres partes como las que siguen:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{s\alpha\_ff} \\ u_{s\beta\_ff} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{s\alpha\_fb} \\ u_{s\beta\_fb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{s\alpha\_resonante} \\ u_{s\beta\_resonante} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 23})$$

5 En este caso, las entradas de control  $u_{s\alpha\_ff}$  y  $u_{s\beta\_ff}$  denotan el esfuerzo de anticipación, las entradas de control  $u_{s\alpha\_fb}$  y  $u_{s\beta\_fb}$  denotan el esfuerzo de control de realimentación y las entradas de control  $u_{s\alpha\_resonante}$  y  $u_{s\beta\_resonante}$  denotan el esfuerzo de control de resonancia. Un bloque de normalización 45 ilustrado en la Fig. 11 normaliza las señales de control para el convertidor con relación a la tensión del enlace en CC.

10 El control de anticipación  $u_{s\alpha\_ff}$  y  $u_{s\beta\_ff}$  se introduce para contrarrestar el efecto de la fuerza contraelectromotriz como sigue:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha\_ff} \\ u_{s\beta\_ff} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{s\alpha} \\ E_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (\text{Ec. 24})$$

15 en la que  $E_{s\alpha}$  y  $E_{s\beta}$  se dan a continuación:

$$\begin{aligned} E_{s\alpha} &= -\omega_r \Phi_m \cos \theta_r, \\ E_{s\beta} &= -\omega_r \Phi_m \sin \theta_r, \end{aligned} \quad (\text{Ec. 25})$$

20 respectivamente, en la que  $\omega_r$  indica la velocidad angular del rotor,  $\theta_r$  el ángulo del rotor, y  $\Psi_m$  la cantidad de flujo magnético generado por el rotor.

Con la inclusión de la compensación de anticipación, el modelo de generador se cambia a:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha\_fb} \\ u_{s\beta\_fb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{s\alpha\_resonante} \\ u_{s\beta\_resonante} \end{bmatrix} = \left(\frac{3}{2} + \sigma\right)L_m \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 26})$$

o

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha\_fb} \\ u_{s\beta\_fb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{s\alpha\_resonante} \\ u_{s\beta\_resonante} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{R_s}{\left(\frac{3}{2} + \sigma\right)L_m} \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 27})$$

30 donde la Ec. 26 aplica a un controlador P+Resonante adaptado para el control de corriente en CA, mientras que la Ec. 27 aplica a un controlador P+Resonante adaptado para el control del flujo en CA.

35 El modelo de generador se convierte así en un sistema de primer orden muy simple, que puede controlarse fácilmente. Más aún, el rendimiento dinámico del sistema de control se mejora generalmente mediante la adición de la compensación de anticipación.

40 La invención no está restringida a las realizaciones anteriormente descritas, y puede variarse y alterarse en diferentes formas dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

## REIVINDICACIONES

1. Un método para el control de un generador de corriente alterna (CA) multifase que se conecta a un convertidor controlable, teniendo el generador un rotor con un árbol conectado a al menos una pala de turbina eólica, comprendiendo el método:
- 5                   determinar una velocidad de rotación y fase de un flujo del rotor generado por el rotor,  
determinar una estimación de un flujo del estator,  
generar una señal de referencia de flujo del estator de CA basándose en la fase del flujo del rotor,  
10                   determinar una señal de error que representa la diferencia entre el flujo del estator estimado y una señal de referencia de flujo del estator de CA,  
aplicar la señal de error a un controlador para generar una tensión de referencia, en el que el controlador tiene una función de realimentación y una función resonante con una frecuencia de resonancia variable fijada para corresponder a la frecuencia de la referencia de flujo del estator, y  
15                   aplicar la tensión de referencia al convertidor controlable.
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la señal de referencia de flujo del estator en CA se genera basándose en una señal de error correspondiente a una cualquiera de entre una diferencia entre una potencia deseada y una potencia real y una diferencia entre un par deseado y un par real.
- 20                   3. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que el método comprende además medir una característica eléctrica del generador de CA y la estimación del flujo del estator se determina basándose en la característica eléctrica.
- 25                   4. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que la estimación del flujo del estator se determina mediante medición directa del flujo del estator.
- 30                   5. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la referencia de flujo del estator se genera en el marco rotativo d-q antes de ser transformado al marco estacionario  $\alpha$ - $\beta$ .
- 35                   6. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la referencia de flujo del estator se genera en el marco rotativo d-q antes de ser transformado al marco natural a-b-c.
- 40                   7. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que una transformación al marco rotativo d-q no se lleva a cabo en ninguna de las etapas.
- 45                   8. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el controlador es un controlador P+resonante que comprende un coeficiente proporcional,  $K_P$ , y un coeficiente de resonancia,  $K_I$ , en el que  $K_P$  y  $K_I$  son constantes y en el que la frecuencia de resonancia del controlador se varía de acuerdo con la velocidad del rotor.
- 50                   9. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-7, en el que el controlador es un controlador P+resonante que comprende un coeficiente proporcional,  $K_P$ , y un coeficiente de resonancia,  $K_I$ , en el que alguno o ambos de  $K_P$  y  $K_I$  se varían dependiendo de la velocidad de rotación del flujo del rotor, y en el que la frecuencia de resonancia del controlador se varía de acuerdo con la velocidad del rotor.
- 55                   10. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la tensión de referencia se compensa para la fuerza electromagnética del generador, FEM.
- 60                   11. Una disposición de control para un generador de corriente alterna (CA) multifase, que comprende un rotor conectado a al menos una pala de turbina eólica, que se conecta a un convertidor controlable, comprendiendo la disposición:
- 65                   un primer dispositivo detector para la detección de una velocidad de rotación de un flujo del rotor generado por el rotor,  
un bloque detector para determinar una estimación del flujo del estator del generador de CA,  
un generador de flujo del estator de CA para la generación de una señal de referencia de flujo del estator de CA basándose en una fase del flujo del rotor, determinándose la fase del flujo del rotor basándose en la velocidad de rotación,  
un generador de señal de error para determinar una señal de error que representa la diferencia entre el flujo del estator estimado y la señal de referencia del flujo del estator de CA, y  
un controlador adaptado para generar una tensión de referencia basándose en la señal de error, en el que el controlador tiene una función de realimentación y una función resonante con una frecuencia de resonancia variable fijada para corresponder a la frecuencia de la referencia de flujo del estator, en el que la tensión de referencia se adapta para controlar el convertidor controlable.

12. Una disposición de acuerdo con la reivindicación 11, en la que la señal de referencia de flujo del estator de CA se genera basándose en una señal de error que corresponde a una cualquiera de entre una diferencia entre una potencia deseada y una potencia real, y una diferencia entre un par deseado y un par real.
- 5 13. Una disposición de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 11 o 12, en la que el controlador es un controlador P+resonante que comprende un coeficiente proporcional,  $K_P$ , y un coeficiente de resonancia,  $K_I$ , en el que  $K_P$  y  $K_I$  son constantes, y en el que la frecuencia de resonancia del controlador se varía de acuerdo con la velocidad del rotor.
- 10 14. Una disposición de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 11 o 12, en la que el controlador es un controlador P+resonante que comprende un coeficiente proporcional,  $K_P$ , y un coeficiente de resonancia,  $K_I$ , en el que alguno o ambos de  $K_P$  y  $K_I$  se varían dependiendo de la velocidad de rotación del flujo del rotor, y en el que la frecuencia de resonancia del controlador se varía de acuerdo con la velocidad del rotor.
- 15 15. Una disposición de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, en el que la tensión de referencia se compensa para la fuerza electromagnética del generador, FEM.

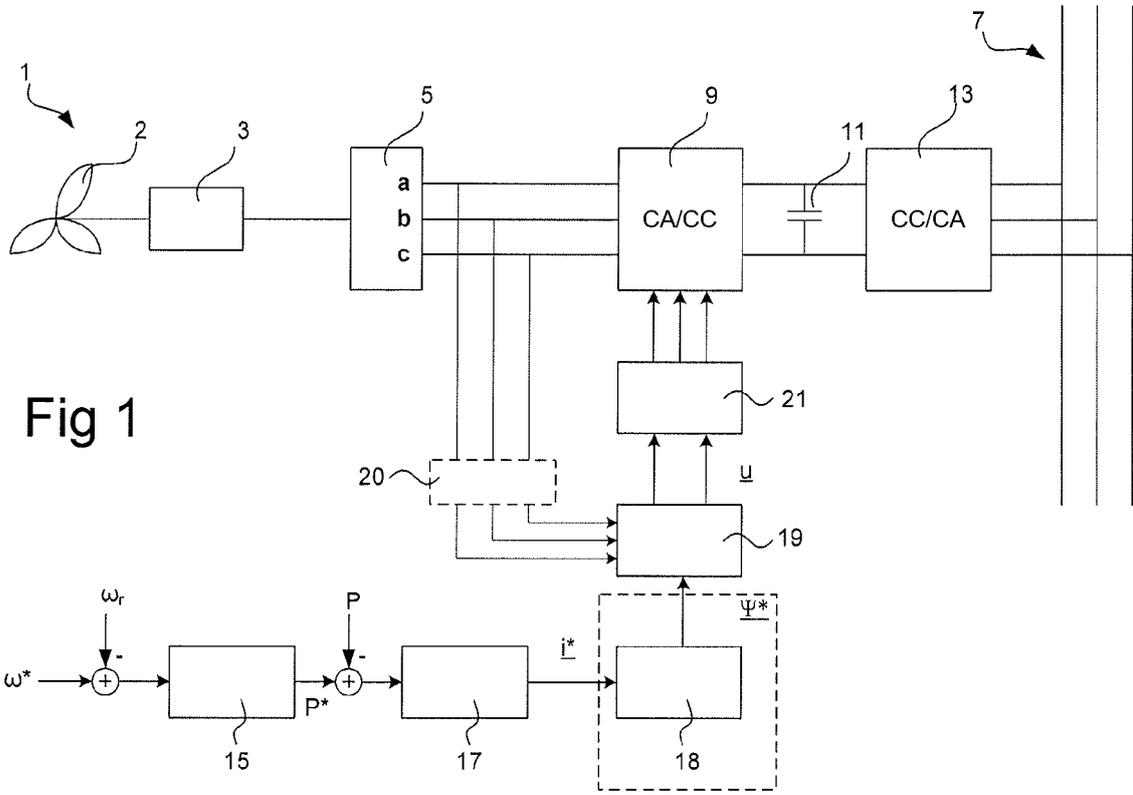


Fig 1

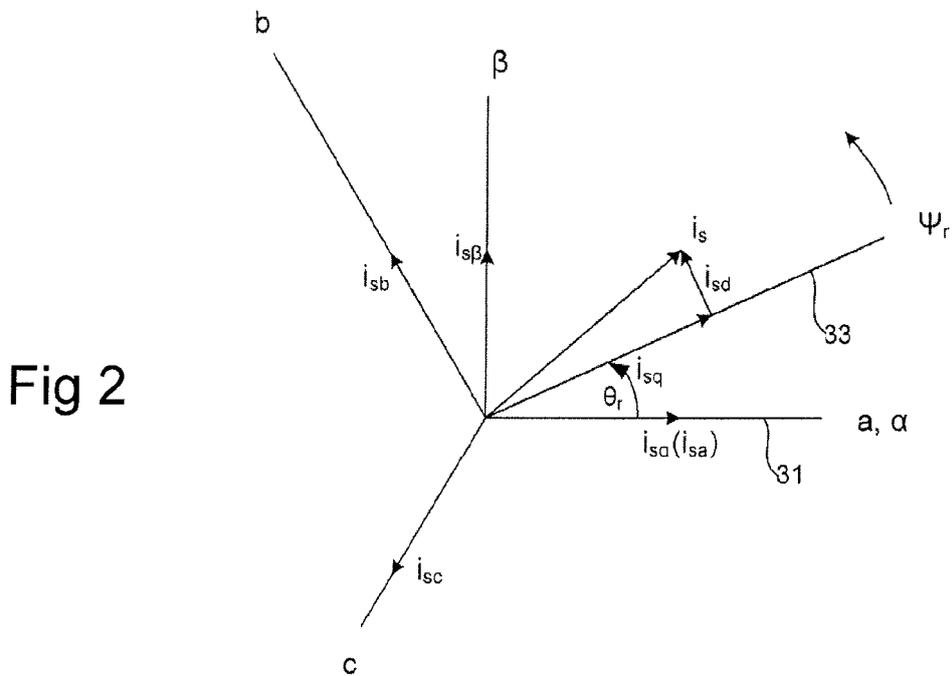


Fig 2

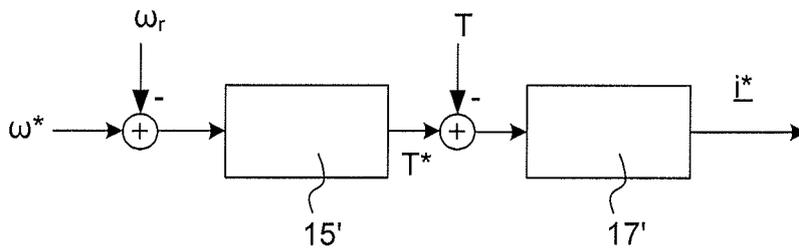
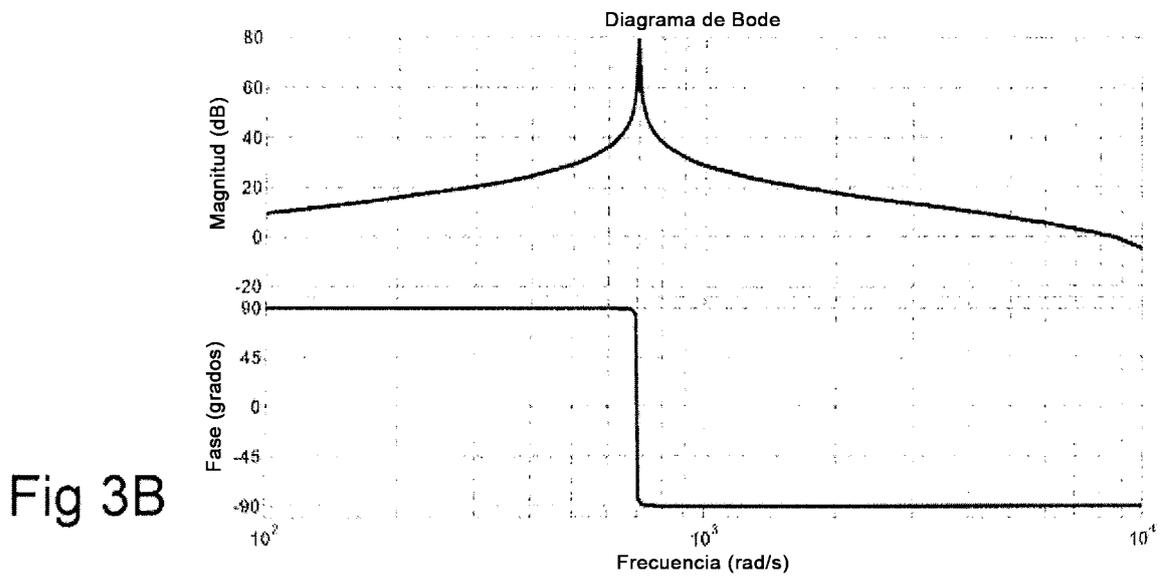
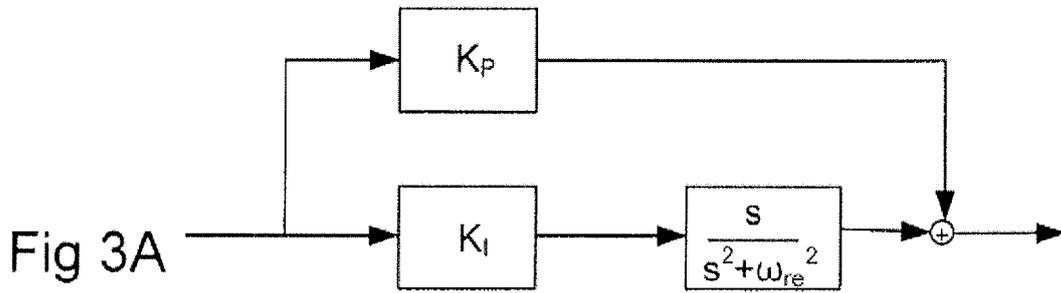
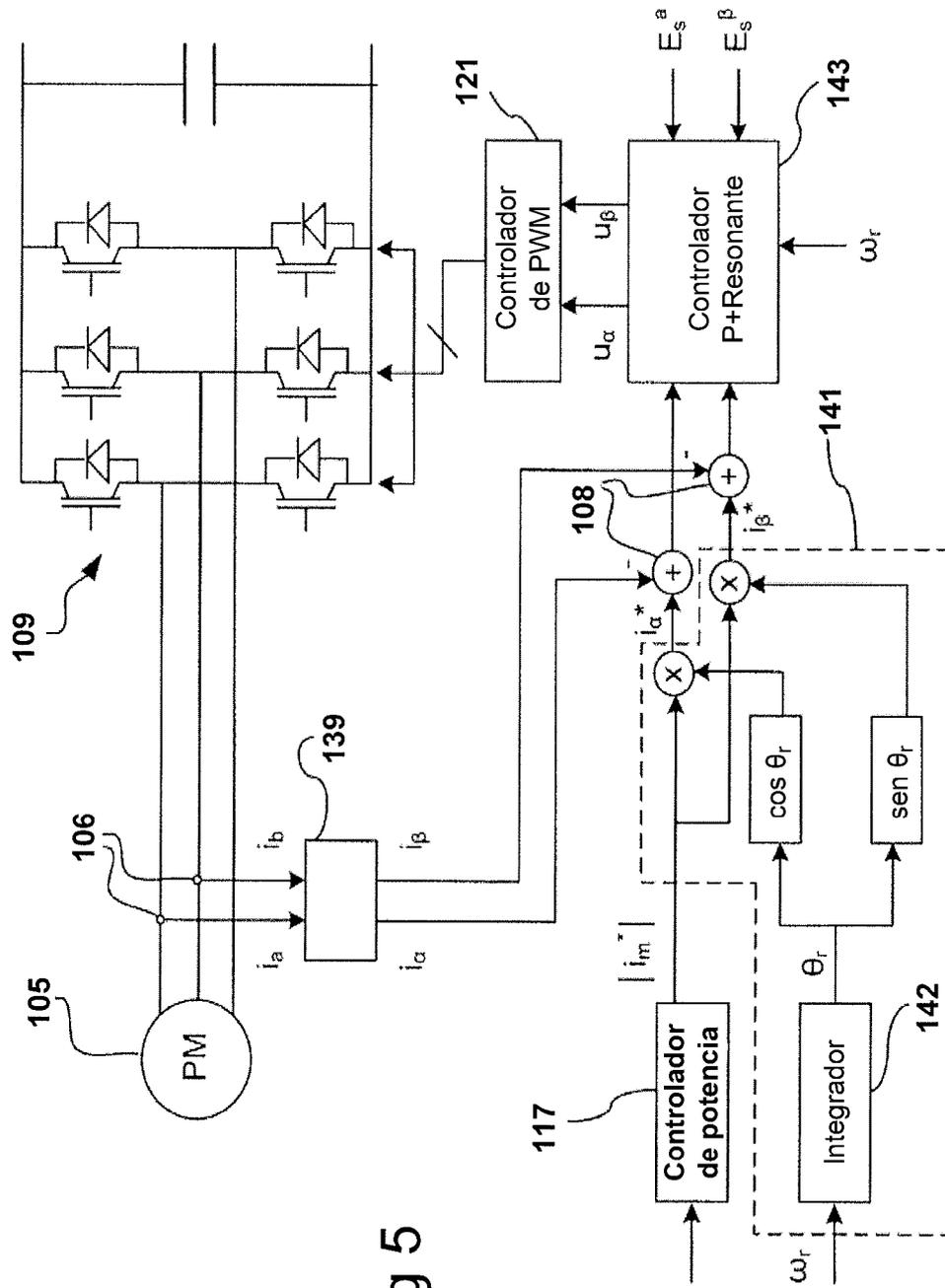


Fig 4



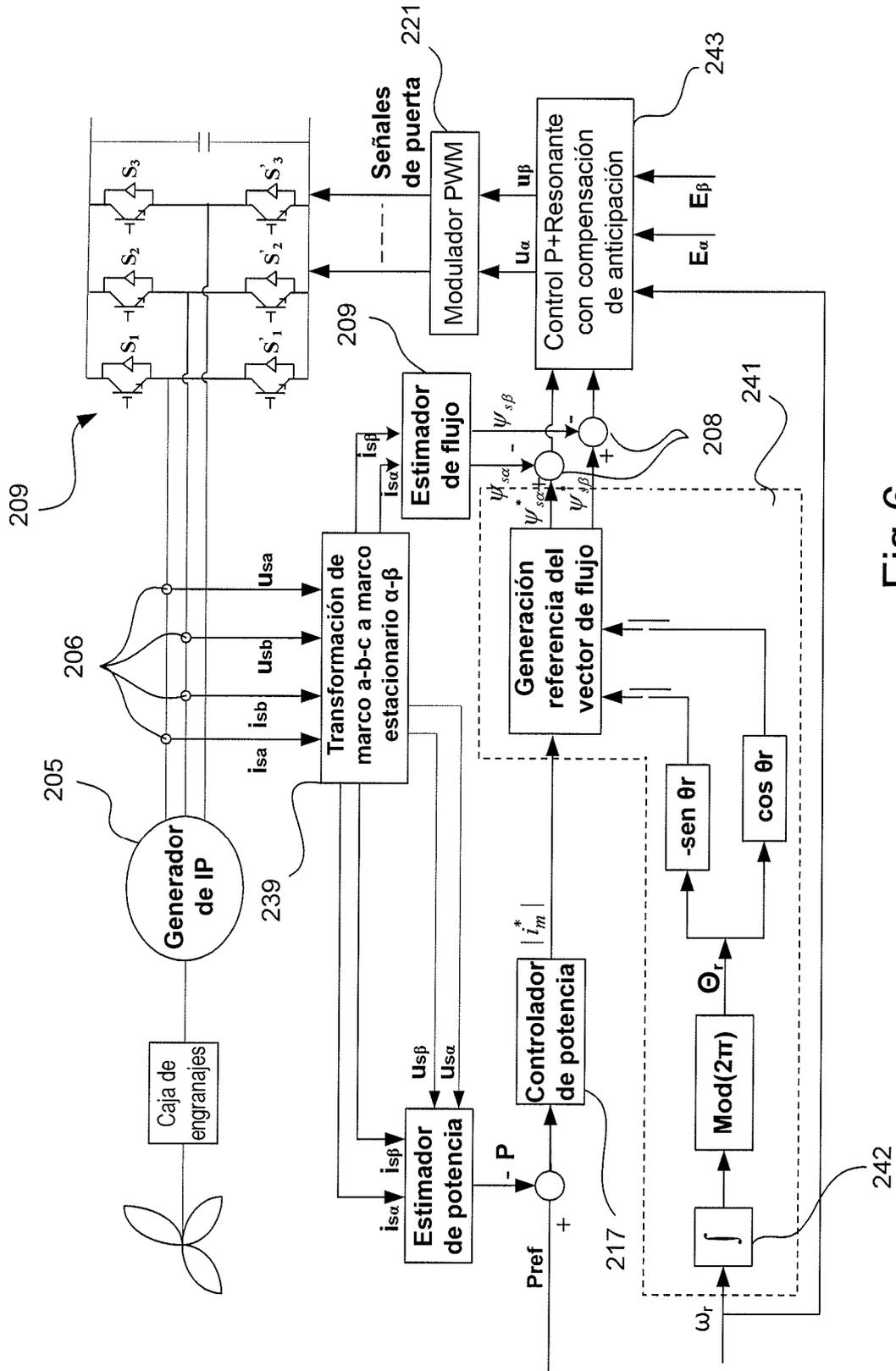


Fig 6

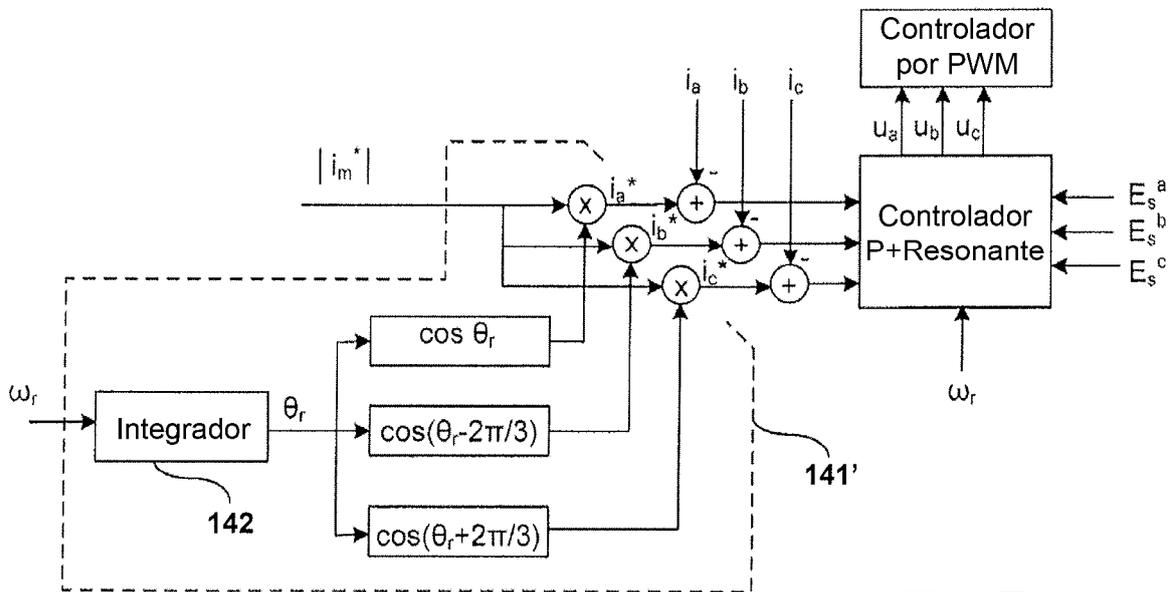


Fig 7

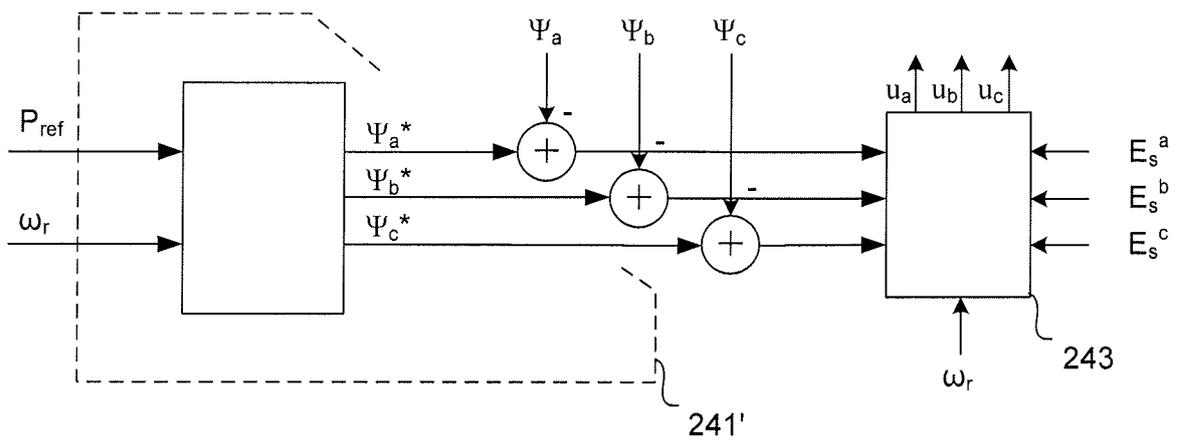


Fig 8

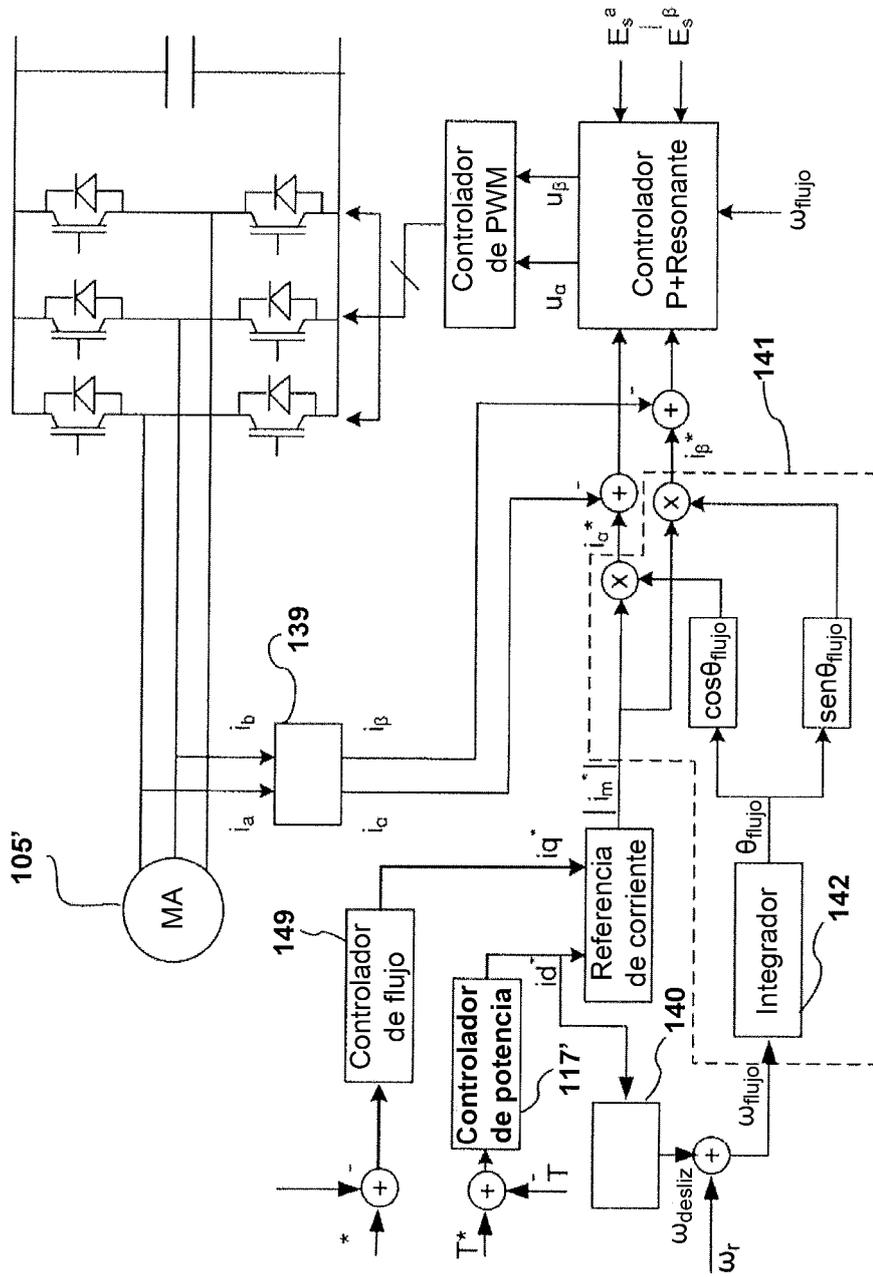


Fig 9



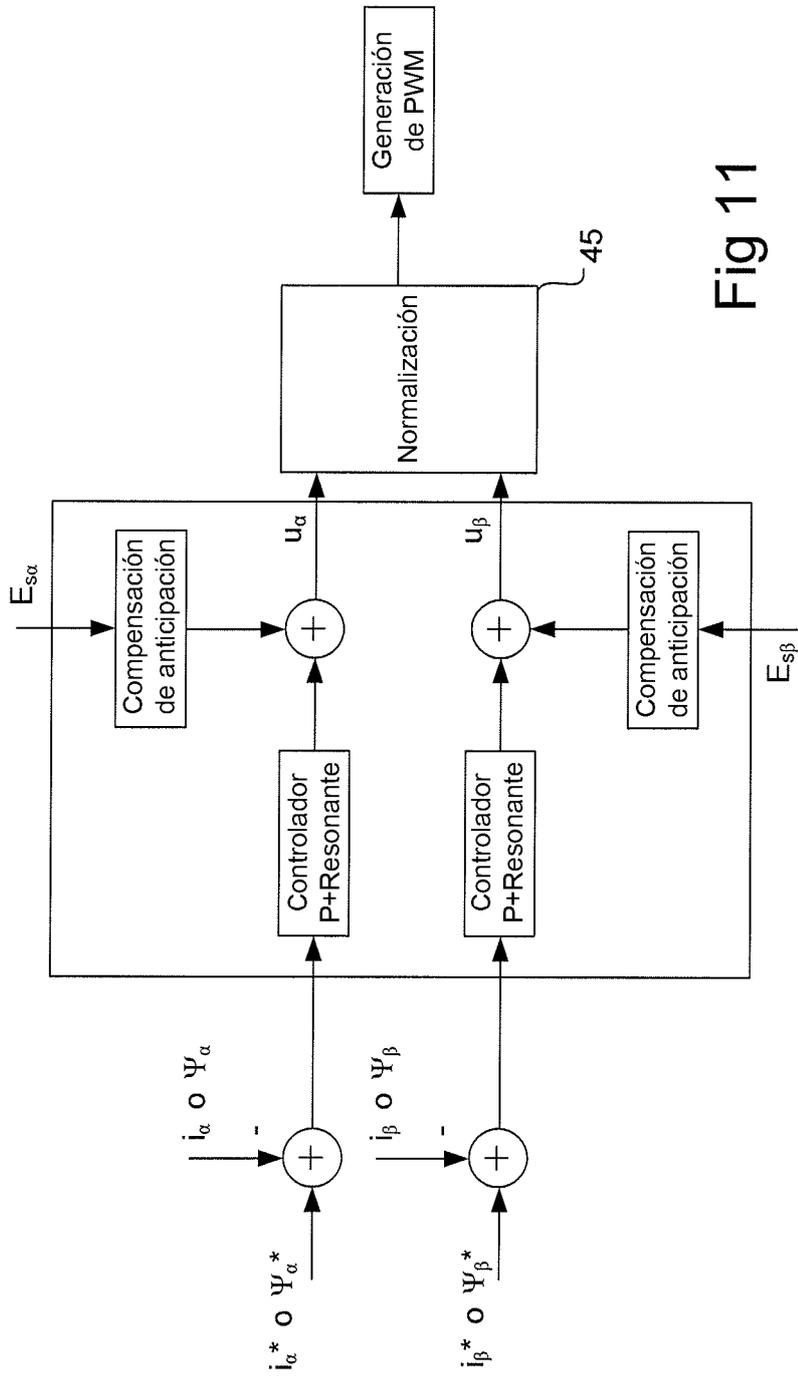


Fig 11