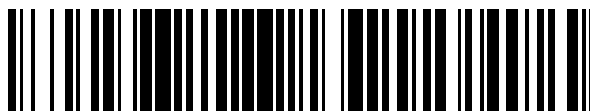


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 391 716**

51 Int. Cl.:

H02P 21/12 (2006.01)

H02P 9/30 (2006.01)

H02P 21/00 (2006.01)

F03D 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **09809345 .3**

96 Fecha de presentación: **28.08.2009**

97 Número de publicación de la solicitud: **2319171**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **11.05.2011**

54 Título: **Control de potencia directa y del vector de flujo del estator de un generador para un sistema de conversión de energía eólica**

30 Prioridad:
29.08.2008 EP 08163325
03.09.2008 US 93864 P

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
29.11.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
29.11.2012

73 Titular/es:
VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 44
8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:
SHU YU, CAO;
HOLM JÖRGENSEN, ALLAN;
TRIPATHI, ANSHUMAN;
HELLE, LARS y
GUPTA, SAURABH

74 Agente/Representante:
ARIAS SANZ, Juan

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).

ES 2 391 716 T3

DESCRIPCIÓN

Control de potencia directa y del vector de flujo del estator de un generador para un sistema de conversión de energía eólica

Campo técnico

- 5 La presente invención se refiere, en general, a convertidores de potencia, y más específicamente a convertidores de potencia que pueden conectarse a generadores de turbina eólica (WTG) que operan a velocidades variables, proporcionando así una tensión y una corriente con una amplitud y una frecuencia variables.

Antecedentes de la invención

- 10 El viento ha sido utilizado durante mucho tiempo como fuente de energía y, en los años recientes se ha vuelto muy común utilizar el viento para producir potencia eléctrica. Con el fin de hacer esto, la energía del viento es capturada por un conjunto de palas (normalmente dos o tres) de una planta de energía eólica. El viento capturado por las palas hace que un eje conectado a las palas gire. El eje está conectado a un rotor de un generador, que, por lo tanto, gira a la misma velocidad que el eje, o a un múltiplo de la velocidad del eje en caso de que el rotor esté conectado al eje a través de una caja de engranajes. A continuación, el generador convierte la potencia mecánica proporcionada por el viento en potencia eléctrica para su suministro a una red.

Para optimizar la eficiencia de un generador de turbina eólica, se prefiere el uso de un generador de velocidad variable, en el que la velocidad de las palas y, por lo tanto, la velocidad del eje, dependerá de la velocidad del viento. Esto implica que debe establecerse un punto de funcionamiento óptimo para el WTG a velocidades de viento diferentes. Esto se realiza mediante el control del par y la potencia activa (real) suministrada por el generador.

- 20 El propósito principal de un WTG es suministrar potencia activa. La potencia activa es el componente de la potencia eléctrica total o aparente que realiza un trabajo y se mide en vatios. El sistema de control en un WTG controlará la potencia activa extraída del WTG para realizar el seguimiento del punto de velocidad de funcionamiento óptimo para el WTG, utilizando el control de par o el control de potencia.

- 25 Cuando se utiliza el control de potencia, un comando de potencia basado en una estimación de la potencia en el viento se suministra al sistema de control. Este valor comandado se compara con la potencia de salida del WTG real y se controla la diferencia.

Cuando se utiliza el control de par, un comando de par sobre la base de un par disponible desde el eje se suministra al sistema de control. Este valor comandado se compara con el par del generador real y se controla la diferencia.

- 30 La potencia reactiva, medida en voltios-amperios, establece y sostiene los campos eléctricos y magnéticos de máquinas de corriente alterna. La potencia aparente, medida en voltios-amperios, es la suma vectorial de las potencias activa y reactiva. Los sistemas de control de WTG modernos pueden controlar tanto la potencia activa como la reactiva a la red.

- 35 Un primer tipo de sistemas de control para WTG se relaciona con el control independiente de (normalmente) tres tensiones sinusoidales espacialmente desplazadas 120° de las tres fases del estator del generador. La generación de las ondas sinusoidales se basa en las propiedades del generador, es decir, un modelo equivalente para el generador cuando se opera en condiciones de régimen permanente se deriva de las características eléctricas y mecánicas del generador, en el que el sistema de control está diseñado basándose en el tipo de generador utilizado (por ejemplo, asíncrono o síncrono).

- 40 La generación de una de las ondas sinusoidales en el sistema trifásico se realiza normalmente de forma independiente de las otras ondas sinusoidales, es decir, este tipo de sistemas de control opera como un sistema de tres controles de un sistema de fase única separada en lugar que como un control común de tres fases. Este hecho resulta en que cualquier desequilibrio en el sistema de tres fases o cualquier interacción entre las fases no se considerará en este tipo de control. Por otra parte, es evidente que el modelo de generador sólo será válido durante el funcionamiento en estado estable del generador. Durante la operación transitoria del generador (inicio, parada, cambios de carga, etc.) el control permitirá, por lo tanto, un pico alto de tensión y corriente transitoria. Esto resulta en una eficiencia de conversión de potencia disminuida, así como en una necesidad de sobredimensionar los componentes eléctricos del sistema de WTG para hacer frente a corrientes de sobretensión transitoria y tensiones.

- 50 Para superar los inconvenientes de la estructura de control anterior, se han introducido una estructura de control alternativa generalmente llamada control orientado de campo (FOC). La idea principal detrás del FOC es el control de las corrientes del estator del generador mediante el uso de una representación vectorial de las corrientes. Más específicamente, el FOC se basa en la transformación de coordenadas que transforman un tiempo de tres fases y un sistema dependiente de la velocidad en un sistema invariante de tiempo de dos coordenadas.

La ventaja de realizar una transformación a partir de un sistema de coordenadas estacionarias de tres fases a un sistema de coordenadas de rotación es que el control del generador se puede realizar mediante el control de las

cantidades de CC y la respuesta a los transitorios se mejora respecto a la que se consigue con el control independiente de las tres fases.

La transformación del FOC se realiza en dos etapas: 1) transformación del sistema de coordenadas estacionario de tres fases abc a uno de dos fases, llamado sistema de coordenadas estacionario $\alpha\beta$ (conocido como transformación de Clarke), y 2) transformación del sistema de coordenadas estacionario $\alpha\beta$ a un sistema de coordenadas de rotación dq (conocido como transformación de Park). Más específicamente, la transformación del marco de referencia abc natural al marco de referencia dq síncrono se obtiene por las ecuaciones

$$[\alpha_u \quad \beta_u \quad 0_u] = [a_u \quad b_u \quad c_u] \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

y

$$[d_u \quad q_u \quad 0_u] = [\alpha_u \quad \beta_u \quad 0_u] \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

lo que proporciona

$$[d_u \quad q_u \quad 0_u] = [a_u \quad b_u \quad c_u] \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

donde $\theta = \omega t$ es el ángulo entre el eje α estacionario y el eje d síncrono.

El control de un generador mediante el FOC requiere un componente de flujo alineado con el eje d. Tal como se ha explicado anteriormente, los componentes orientados d y q son transformaciones del sistema de coordenadas de tres fases estacionario que implica que el FOC, debido al acoplamiento directo a las cantidades eléctricas de tres fases, se encargará del estado estacionario y de la operación transitoria del sistema con independencia del modelo generador.

Una ventaja del FOC es que el control de los parámetros en unas coordenadas giratorias teóricamente permite un control desacoplado entre los parámetros. Por lo tanto, con la amplitud del flujo del rotor controlada en un valor fijo y la relación lineal entre el par y el componente del par iq del estator es posible lograr un control satisfactorio desacoplado del control de potencia de salida del WTG.

El documento US5083039 divulga una turbina eólica de velocidad variable que comprende un rotor de turbina que acciona un generador de múltiples fases, un convertidor de potencia con interruptores que controlan magnitudes eléctricas del estator en cada fase del generador, un dispositivo de mando de par asociado con sensores de parámetros de la turbina que genera una señal de referencia de par indicativa de un par deseado, y un controlador de generador operativo bajo el control de la orientación de campo y sensible a la señal de referencia de par para definir una corriente de eje de cuadratura deseada y para controlar los interruptores para producir cantidades eléctricas del estator que correspondan al eje de cuadratura de corriente deseada.

El control de potencia del generador basado en el FOC también se describe en otros documentos, por ejemplo los documentos JP 2002276533, GB 2411252, US 6420795 y US 2007278797.

A pesar de las ventajas con el FOC descrito anteriormente, existen deficiencias de los controladores convencionales con los que la industria ha vivido. Estas incluyen, por ejemplo (a) una dificultad para mantener el correcto desacoplamiento entre el flujo y el par que producen componentes de las corrientes del estator durante el estado de equilibrio y dinámica, (b) el control de las corrientes que utilizan controladores lineales a velocidades más altas y mayor índice de modulación. El caso (a) se refiere a la sensibilidad de parámetros y la necesidad de adaptación de los mismos. Esto puede poner la fiabilidad controlador en tensión bajo condiciones extremas de carga. El caso (b),

por otra parte, se refiere a la infrautilización del enlace de CC. Además, puesto que ambos procedimientos descritos anteriormente pueden ser utilizados para el control de la salida de turbinas eólicas, y el control de salida en última instancia supone una interacción entre los flujos o corrientes y flujos, una capacidad para controlar directamente el flujo conduce a sistemas más robustos y más sencillos.

5 Sumario de la invención

En vista de lo anterior, un objetivo de la invención es proporcionar un procedimiento alternativo para el control independiente de las tres fases, así como el FOC clásico para controlar la salida de potencia de un WTG.

En particular, un objetivo es proporcionar un procedimiento para el control de flujo directo en un diseño que tiene un rango de control mayor para las tensiones de enlace de CC esperadas y en el que los interruptores del estator están directamente operados sobre la base de un flujo del estator deseado en un marco de referencia estacionario. El objetivo, además, es proporcionar un procedimiento para determinar los tiempos de conmutación óptimos para un esquema de modulación de vector espacial utilizando una señal de error del vector de flujo del estator.

Estos objetivos se resuelven mediante las características del procedimiento de la reivindicación 1 y el aparato de la reivindicación 6. Las reivindicaciones dependientes describen realizaciones ventajosas y detalles de la invención.

En general, todos los términos utilizados en las reivindicaciones se han de interpretar de acuerdo con su significado ordinario en el campo técnico, a menos que se defina expresamente lo contrario en la presente memoria. Todas las referencias a "un/una/el/la [elemento, dispositivo, componente, medio, etapa, etc.]" deben interpretarse abiertamente como una referencia a al menos una instancia de dicho elemento, dispositivo, componente, medio, etapa, etc., a menos que explícitamente se indique lo contrario. Las etapas de cualquier procedimiento descrito en este documento no tienen que llevarse a cabo en el orden exacto descrito, a menos que se establezca explícitamente.

Breve descripción de los dibujos

Los anteriores, así como otros objetivos, características y ventajas de la presente invención, se comprenderán mejor a través de la siguiente descripción detallada ilustrativa y no limitativa de realizaciones preferidas de la presente invención, con referencia a los dibujos adjuntos, donde la misma referencia numérica se utiliza para elementos similares, en los que:

La figura 1 ilustra el sistema de convertidor de generador de acuerdo con una realización preferida de la presente invención.

La figura 2 ilustra un diagrama vectorial para un generador síncrono representado en un marco de referencia estacionario.

La figura 3 ilustra una representación vectorial de las tensiones presentes en los terminales del estator de un generador.

La figura 4a es una ilustración más detallada del convertidor de lado del generador ilustrado en la figura 1.

La figura 4b ilustra ocho estados de conmutación que determinan un hexágono de vector de espacio.

La figura 5a ilustra un sector del hexágono de vector de espacio ilustrado en la figura 4b.

La figura 5b ilustra un vector de tensión normalizada.

La figura 6 ilustra un sistema de control para controlar la potencia de un generador de turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención.

Las figuras 7a-c ilustran un gráfico de flujo de señal de un generador de potencia y controlador de vector de flujo del estator de acuerdo con una realización de la invención.

La figura 8 ilustra un gráfico para conseguir un control predictivo para mitigar un error de fase en el vector de flujo del estator.

La figura 9 ilustra un principio de la limitación de corriente en la generación de vector de flujo del estator de referencia.

La figura 10 ilustra un diagrama de flujo de decisión de debilitamiento del campo.

45 Descripción detallada de las realizaciones preferidas

La figura 1 ilustra un ejemplo de un sistema de convertidor de generador de acuerdo con una realización preferida de la presente invención.

Un eje 10 transfiere la potencia mecánica desde una fuente de potencia, preferiblemente un conjunto de palas de

turbina eólica (no mostrado), a un rotor de un generador de velocidad variable 11. El eje está conectado preferiblemente a las palas de la turbina eólica, y al rotor a través de una caja de engranajes para adaptar la velocidad de rotación del eje 10 (es decir, velocidad de las palas de la turbina eólica) a un rango de velocidad adecuado para el generador 11. El generador 11 convierte la potencia mecánica proporcionada a través del eje 10 en potencia eléctrica y suministra la potencia eléctrica a un conjunto de terminales del estator 12a, 12b, 12c. Para un rendimiento óptimo respecto a la conversión de la potencia eólica en potencia eléctrica, el eje 10 variará su velocidad como una función de la velocidad del viento. Puesto que la velocidad de rotación del rotor del generador 11 es proporcional a la velocidad de rotación del eje 10, la amplitud y la frecuencia de la señal de tensión proporcionada por el generador 11 a los terminales del estator 12a, 12b, 12c variará de acuerdo con la velocidad de rotación del eje 10. El generador puede ser un generador síncrono individual o doblemente alimentado, por ejemplo, un generador de imán permanente (PM), un generador de inducción o cualquier otro tipo de generador que comprenda un bobinado del estator.

Los terminales 12a, 12b, 12c del generador 11 están conectados a un convertidor de potencia del lado del generador 13. El convertidor 13 es preferiblemente un convertidor de puente de tres fases 13 que incluye seis interruptores ilustrados por motivos de claridad por el único interruptor y el diodo de la figura 1. Tal como se describirá con más detalle a continuación, los interruptores están dispuestos en un conjunto de interruptores superior e inferior que son preferentemente en forma de dispositivos de estado sólido, tales como MOSFET, IGBT o GTO. Otro tipo de interruptores, tales como BJT, sin embargo, son igualmente posibles dependiendo de las consideraciones de diseño del convertidor 13. El convertidor 13 funcionará bajo un funcionamiento normal como un rectificador activo que convierte la frecuencia variable de tensión CA suministrada por el generador 11 en una tensión de CC. La conversión se controla con un esquema de modulación de ancho de pulso, en el que señales de control se aplican a los interruptores en el convertidor 13 para proporcionar la funcionalidad de conversión deseada. En una realización preferida, los interruptores se controlan mediante el empleo del esquema de modulación del vector de espacio, tal como se describe a continuación.

La salida del convertidor 13 se proporciona a un enlace de CC 14, que comprende un condensador de enlace para reducir la ondulación de la tensión en el circuito de CC.

El enlace de CC 14 está conectado a un convertidor de potencia del lado de la red 15. La topología del convertidor de potencia del lado de la red 15 es similar al convertidor de potencia de lado del generador 13 descrito anteriormente. El convertidor de potencia del lado de la red 15 normalmente funciona como un inversor para convertir la tensión de CC en el enlace de CC 14 en una tensión de CC regulada para la alimentación de potencia activa y reactiva a la red 18. Los interruptores del convertidor de potencia del lado de la red 15 se proporcionan con las tensiones de control adecuadas para proporcionar la tensión y la potencia deseadas a una red 18.

La salida desde el convertidor de potencia del lado de la red 15 se filtra mediante inductores 16a, 16b, 16c con el fin, por ejemplo, de eliminar armónicos de orden superior de la señal de potencia de salida. La señal de potencia de salida se proporciona a continuación a la red 18 a través de un transformador 19. La señal de potencia de salida puede, si es necesario, ser filtrada por un segundo filtro 17 con el fin de mantener la interferencia o la distorsión armónica a un valor bajo.

La figura 2 ilustra un diagrama vectorial para un generador síncrono representado en un marco de referencia estacionario. El diagrama comprende dos ejes estacionarios indicados α y β . La transformación desde el marco de referencia abc de tres fases estacionarias al marco de referencia $\alpha\beta$ puede realizarse tal como se ha descrito anteriormente.

Un primer vector representa el flujo de magnetización, indicado Ψ_{mag} en la figura. En el ejemplo mostrado en la figura 2, que se refiere a un generador síncrono, el flujo de magnetización corresponde al flujo del rotor. El flujo del rotor puede ser generado por medio de un imán permanente, como en un generador PM, o por la excitación de una bobina de campo en el rotor. El arco en el extremo del vector del flujo del rotor ilustra que el vector gira alrededor del origen de coordenadas en la figura. El desplazamiento angular del vector del flujo del rotor desde el eje α se indica como θ_r en la figura.

De una manera correspondiente es el vector de flujo del estator, indicado Ψ_s en la figura, representado por un vector que gira alrededor del origen de las coordenadas. En funcionamiento en estado estacionario del vector de flujo del estator gira en el marco de referencia estacionario con una velocidad angular igual al vector del flujo del rotor. El desplazamiento angular del vector del flujo del estator a partir del vector del flujo del rotor se indica por δ en la figura.

La potencia electromagnética de un generador síncrono se puede expresar como:

$$P_{EM} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \propto \omega \Psi_s \times \Psi_r$$

que proporciona

$$P_{EM} = f(|\Psi_s|, |\Psi_r|, \delta)$$

Se aprecia a partir de la ecuación de potencia anterior que para una velocidad dada de funcionamiento, la potencia electromagnética depende de la magnitud del vector de flujo del estator y su ubicación con respecto al vector del flujo del rotor. Si la posición del vector de flujo del rotor se conoce, es posible aplicar una tensión que va a posicionar el vector de flujo del estator para dar la magnitud deseada de potencia a una velocidad dada. Por lo tanto, mediante el control del vector del flujo del estator, la potencia electromagnética (EM), que corresponde a la potencia de carga, se puede conseguir según lo ordenado.

Puesto que el control se lleva a cabo en el marco de referencia estacionario, puede ser necesario compensar el retraso de fase creado. Esto se consigue mediante una predicción lineal llevada a cabo en coordenadas polares.

La figura 3 ilustra una representación vectorial de las tensiones presentes en los terminales del estator de un generador. Con el fin de controlar la potencia creada por el generador es necesario controlar las señales que se aplican a los terminales del estator. A este respecto la modulación del vector espacial (SVM) es un algoritmo de promedio efectivo para proporcionar una señal de salida de CA desde una tensión de CC. La SVM también minimiza el contenido de armónicos que determina las pérdidas de cobre en el generador. La SVM es también eficaz en que minimiza las pérdidas de conmutación en los interruptores del convertidor de potencia del lado del generador 13.

Para un generador trifásico, las tensiones en el marco de referencia estacionario abc pueden ser representadas como tres vectores de fase desplazados 120° (direcciones u_a , u_b y u_c) en el espacio, como se muestra en la figura 3. Para un sistema de equilibrado de tres fases, estos vectores suman a cero. Esto implica que los tres vectores pueden ser representados por un único vector de referencia de espacio (u_s). La idea detrás de la SVM es controlar la amplitud y la frecuencia de V_s , lo que implica que la amplitud de la tensión de fase, y la frecuencia en los terminales del estator 12a, b, c y por lo tanto el flujo en el estator puede ser controlado.

Haciendo referencia a la figura 4a, que es una ilustración más detallada del convertidor del lado del generador 13 se muestra en la figura 1. Los interruptores 52a, b, c y 53a, b, c en la figura se ilustran como BJT. Es, sin embargo, igualmente posible utilizar MOSFET, GTO, IGBT, etc. como dispositivos de conmutación. Independientemente de la tecnología utilizada para la fabricación de los interruptores 52a, b, c, y 53a, b, c, la secuencia de conmutación, o el patrón de conmutación, de los dispositivos debe seguir ciertas reglas. Más específicamente, cada vez que uno de los interruptores superiores 52a, b, c está conduciendo (es decir, en un estado de encendido) el interruptor inferior correspondiente 53a, b, c debe estar apagado, y viceversa. Además tres de los interruptores deben estar siempre encendidos y tres interruptores deben estar siempre apagados. Estas reglas dan lugar a ocho combinaciones diferentes para los estados de conmutación de los dispositivos 52a, b, c y 53a, b, c. Estas combinaciones se indican (abc) donde, por ejemplo a = 1, b = 0 y c = 0 indica que el interruptor superior 52a está encendido (convirtiendo así al interruptor 53a en apagado) mientras que los interruptores 52b y c están apagados. Seis de los estados son estados activos que producen un vector de tensión en una dirección predefinida, mientras que dos de los estados son estados inactivos, es decir todos los interruptores superiores 52a, b, c están apagados y todos los interruptores inferiores 53a, b, c se encuentran encendidos, o viceversa.

Los ocho estados de conmutación definidos anteriormente determinan ocho configuraciones de tensión de fase como se ilustra en la figura 4b. Tal como se ve en la figura, los vectores definen un hexágono, con seis sectores de igual tamaño separados 60°. Cada sector está delimitado por dos vectores activos. Los estados inactivos están representados por los vectores (000) y (111) que son cero y se encuentran en el origen del hexágono. Dos vectores de tensión adyacentes se eligen en función del sector en el que se encuentra el vector u_s (100 y 110 en la figura 4b). A partir de la figura 4b queda claro que sólo uno de los interruptores superior e inferior se cambia de estado cuando el patrón de cambio se mueve de un sector al sector adyacente, en el que las pérdidas de conmutación se mantienen en un mínimo.

Normalmente, los interruptores funcionan a una frecuencia F , que es sustancialmente más alta que la frecuencia de la red. La frecuencia de conmutación F define el período de muestreo τ_s a través de la relación $\tau_s = 1/F$. El período de muestreo τ_s se utiliza al generar el vector V_s a partir de los vectores de tensión diferentes (100, 110, etc.) En concreto es el vector u_s formado por los vectores ponderación temporal durante un período de muestreo τ_s . Matemáticamente el vector u_s puede expresarse como

$$u_s = \frac{\tau_0}{\tau_s} u_0 + \frac{\tau_1}{\tau_s} u_1 + \dots + \frac{\tau_7}{\tau_s} u_7$$

donde $\tau_0, \tau_1 \dots \tau_7$ es el tiempo que cada vector $u_0, u_1 \dots u_7$ se aplica, respectivamente. Los vectores u_0 y u_7 son los vectores cero (000, 111) que se aplican con el fin de producir una tensión cero.

Cuando u_s y τ_s son conocidos, es posible determinar el tiempo de encendido para cada vector, respectivamente, a

partir de las ecuaciones

$$u_s = \frac{\tau_1}{\tau_s} u_1 + \frac{\tau_2}{\tau_s} u_2 + \frac{\tau_{07}}{\tau_s} u_{07}$$

y

$$\tau_s = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{07}$$

- 5 Un problema reside en cómo determinar el vector u_s deseado para proporcionar un control eficiente de la potencia eléctrica suministrada por el generador.

La figura 5a ilustra un sector del hexágono de vector de espacio que se muestra en la figura 4b. El vector de flujo del estator Ψ_s deseado en dos momentos de tiempo posteriores se ilustra como los vectores $\Psi_s(k)$ y $\Psi_s(k+1)$. La referencia de flujo Ψ_s^* es representada por un arco de círculo en la figura. La diferencia entre el vector de flujo de estator deseado y el flujo de referencia crea un vector de error de flujo $\Delta\Psi_s^*(k)$ con una dirección que es perpendicular a la dirección del flujo deseado. El flujo en el estator se refiere a la EMF del generador por la ecuación (ley de Faraday)

$$e = \frac{d\Psi_s}{dt}$$

- 15 Esto implica que el vector de error de flujo $\Delta\Psi_s^*(k)$ es proporcional a un vector de tensión que se puede obtener como una media en una muestra usando vectores adyacentes y es desplazado por un ángulo γ con respecto al vector de tensión u_a (es decir, los vectores activos u_0 , u_1 , etc.) en cualquier sector de actividad. Por lo tanto γ varía de 0 a 60 grados en un sector. El tiempo de cada vector activo, por ejemplo, u_1 y u_2 se aplica en la figura 5 se representa por τ_a y τ_b en la figura.

- 20 La figura 5b ilustra un ejemplo donde se utiliza un vector de tensión normalizado para generar los tiempos de conmutación. La base para la normalización se toma como el valor de pico de la componente fundamental de la tensión de fase durante el funcionamiento de seis etapas

$$u_{peak} = \frac{2}{\pi} U_{DC}$$

donde U_{DC} es la tensión del enlace de CC de un inversor de dos niveles descritos anteriormente. En el esquema de modulación de vector espacial se puede demostrar que la longitud de cada uno de los seis vectores (u_1 - u_6) es

$$u_u = \frac{2}{3} U_{DC}$$

25

en el que la normalización de la tensión se convierte

$$\text{Normalización} = \pi/3$$

A partir de la figura 3 se puede observar que

$$\frac{\frac{\pi}{3} \tau_a}{\sin(\frac{\pi}{3} - \gamma)} = \frac{\frac{\pi}{3} \tau_b}{\sin(\gamma)} = \frac{|\Delta\Psi_s^*(k)|}{\sin(\frac{\pi}{3})}$$

- 30 a partir de la cual los tiempos de conmutación para cada uno de los vectores activos se pueden derivar, por ejemplo, que definen las señales de control que se aplican a los interruptores de potencia en el lado del generador del convertidor 13, según

$$\tau_a = \frac{|\Delta\Psi_s^*(k)|\sin(\frac{\pi}{3} - \gamma)}{\frac{\pi}{3}\sin(\frac{\pi}{3})}$$

$$\tau_b = \frac{|\Delta\Psi_s^*(k)|\sin(\gamma)}{\frac{\pi}{3}\sin(\frac{\pi}{3})}$$

$$\tau_0 = \tau_s - (\tau_a + \tau_b)$$

donde τ_a es el tiempo en que se aplica el primer vector (por ejemplo, vector u_1 en la figura 4b) y τ_b es el tiempo en que se aplica el segundo vector (por ejemplo, vector u_2 en la figura 4b).

5 Haciendo una breve referencia a las figuras 1, 4a y 7, los tiempos de conmutación determinados se utilizan como señales de control por una unidad de control de conmutación indicado por el bloque PWM 82. El bloque PWM 82 se utiliza la señal de control para controlar los interruptores 52, 53 en el convertidor de potencia del lado del generador 13. Al cambiar los estados de los interruptores en el convertidor de potencia del lado del generador 13 es posible establecer cantidades eléctricas del estator tales que se alcance un nivel generador de potencia deseado. Más
10 específicamente, las señales de control hacen que los interruptores 52, 53 del convertidor del generador de la potencia lateral 13 ajuste la fase y la magnitud de la tensión de su tensión de terminal de CA respecto a la EMF del generador 11 con el fin de proporcionar la potencia eléctrica deseada.

La tensión generada por el convertidor de potencia del lado del generador 13 está definida por el requisito del controlador de flujo. Así la conmutación tiene que llevarse a cabo para mitigar el error en el vector de flujo del estator $\Delta\Psi_s^*(k)$. Este enfoque de control del vector del flujo se puede extender a cualquier índice de modulación. Durante el
15 intervalo de modulación de vector espacial normal, el error puede ser compensado a través de la conmutación en una muestra.

La figura 6 ilustra un sistema de control para controlar la potencia de un generador de turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención.

20 El comando de control de potencia para el convertidor se compara con la estimación de la potencia suministrada por el generador 71. La dinámica mecánica del sistema siendo más lenta permite que el controlador de potencia 79 sea utilizado directamente para dar la referencia del vector de flujo del estator.

El generador 71 no requiere potencia reactiva a menos que a velocidades muy altas cuando se debilita el campo sea necesario. El diseño EM abastece a este aspecto del generador. Por lo tanto, es el requerimiento de potencia activa que acciona el controlador de potencia en la dinámica del generador más lentas. El vector de flujo del estator está
25 siendo controlado de una manera similar como se explicó anteriormente. La conmutación llevada a cabo utilizando el error del vector de flujo del estator es la misma que se ha descrito anteriormente.

El controlador de generador se describirá con la ayuda de las figuras 7a-c.

30 El funcionamiento básico del controlador es el siguiente: El inversor del lado del generador recibe el comando de potencia Pref basado en ya sea una diferencia de una velocidad de generador deseada y una velocidad del generador real desarrollada en modo de carga parcial o un valor constante sobre la base de las condiciones ambientales en el modo de carga completa. El controlador funciona en un sistema fijo de coordenadas del estator del generador.

El controlador opera sobre el principio básico de que la salida de potencia eléctrica de un generador es

$$P_e = \omega * |\Psi_r| * |\Psi_s^*| \sin \gamma$$

donde:

ω es la velocidad de giro del generador;

$|\Psi_r|$ es la magnitud de flujo proporcionado por el imán permanente del rotor

$|\Psi_s^*|$ es la magnitud del flujo del estator controlada por la PWM del inversor del lado del generador

sin y es el seno de un ángulo δ deseado entre el flujo generado por el imán permanente del rotor y el flujo del estator controlado por la PWM del inversor del lado del generador

No hay operaciones para establecer ya sea un componente de la corriente del rotor o componente de la corriente en cuadratura con un vector de flujo.

5 Un comando de potencia, Pref, desde los controladores de carga (no mostrado) se alimenta al detector de error 501 y se compara con la potencia de salida del sistema proporcionado para el punto de conexión común. La salida del detector 501 se pasa a través del interruptor 502 al controlador PI 504. El interruptor 502 es un dispositivo de protección para eliminar el comando Pref si, durante un proceso de control de flujo, las corrientes del estator excedieran un valor predeterminado tal como es detectada en el bloque 512.

10 La salida del bloque 504 se alimenta a través de dos bloques de ganancia 505 que ajustan la señal de potencia como una función de la velocidad del rotor del generador y la corriente del estator y convierte la señal de error de alimentación a una ref de flujo requerido $\Psi_{\text{PEM_REF}}$.

15 $\Psi_{\text{PEM_REF}}$ se compara a continuación, en el bloque 509, con un valor de flujo de salida Ψ_{PEM} , que es proporcional a la potencia de salida real, para formar un $\Psi_{\text{PEM_REF_ERROR}}$ que después del procesamiento por el controlador PI 510 se convierte en Ψ_{PEM}^* . Asimismo $\Psi_{\text{MAG_REF}}$ (del bloque de debilitamiento de campo 506) se compara con Ψ_{MAG} desde el bloque 520 para formar una $\Psi_{\text{MAG_ERROR}}$ que después del procesamiento por el controlador PI 508 y la adición de Ψ_r se convierte en Ψ_{MAG}^* . La lógica contenida en el bloque de debilitamiento de campo 506 se muestra en la figura 10.

20 Los valores de Ψ_{PEM} y Ψ_{MAG} se calculan en los bloques 520 y 522 utilizando un flujo del estator total Ψ_s (determinado en el bloque 528) utilizando el ángulo de carga delta (δ), el ángulo entre un flujo de magnetización deseada y el flujo deseado responsable de la producción de potencia, $\delta_{\text{ángulo_carga}}$ se determina en el bloque 514 utilizando el $\arctan(\Psi_{\text{PEM}}^*/\Psi_{\text{MAG}}^*)$, mientras que la magnitud del flujo del estator total $|\Psi_s|$ también se determina en el bloque 514 como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los componentes de flujo en el bloque 514.

25 Hasta este punto, todas las señales han sido valores de CC, no se han producido las transformaciones en sistemas de referencia de rotación, ni tampoco ha habido colocación de par para producir vectores de corriente en cuadratura con vectores de flujo del rotor identificados.

30 El vector de flujo del estator, que tiene una magnitud y una posición, se desarrolla en el bloque 516 y se corrige en el bloque 518 de los retrasos causados por la velocidad de rotación del generador y la necesidad de muestrear a intervalos de tiempo discretos. Más específicamente, y como se muestra en la figura 8 la referencia de flujo se ajusta mediante el ajuste del intervalo de tiempo entre k usando la señal delta theta alimentada al bloque 518.

35 El debilitamiento de campo es necesario cuando hay una ráfaga de viento y la velocidad del rotor excede la velocidad nominal. La FEM generada aumenta dejando un margen de tensión pequeño para el control de potencia del generador y de flujo del estator. Se convierte en esencial para debilitar el campo de hueco de aire resultante, de modo que la EMF generada se mantiene efectiva a un valor deseado incluso si hay un aumento en la velocidad. La figura 10 ilustra un diagrama de flujo del procedimiento de debilitamiento del campo. El índice de modulación máximo ajustado se utiliza para calcular la magnitud de referencia resultante de magnetización. En condiciones distintas de debilitamiento de campo o en condiciones de baja velocidad, la referencia de magnetización calculada es mayor o igual a la magnitud del flujo del rotor. A alta velocidad, se aplicará el resultado de cálculo. El procedimiento también tiene la posibilidad de "fortalecer" el campo en caso de que los imanes se debiliten debido a las altas temperaturas.

40 El control predictivo para mitigar el error de fase del vector de flujo del estator se consigue como se muestra en la figura 8. La predicción se realiza en coordenadas polares y genera el vector de flujo del estator Ψ_{ps}^* . El vector de flujo estimado del estator Ψ_s como se muestra se compara con el vector de flujo del estator de referencia predicho y el vector de error $\Delta\Psi_s$ define los estados de conmutación para el control de la potencia activa y vector de flujo del estator en el marco estático de referencia.

45 El principio de generación de vector de flujo del estator de referencia limitante de corriente se muestra en la figura 9. El hecho de que no es necesaria la magnetización de una máquina de rotor magnetizado como superficie montada máquina PM o una máquina sincrónica que alimente el rotor, puede ser explotado para definir la magnitud vectorial del flujo de referencia deseado. La figura 9 ilustra esto. El vector de corriente necesario en este control es sólo para atender a la demanda de potencia activa y no a la creación de cualquier flujo en la máquina. Por lo tanto, la magnitud del vector de corriente mínima que puede lograr este requisito debe estar a lo largo de una dirección perpendicular al vector del flujo del rotor.

50 Si la máquina tiene que ser utilizada como motor, el vector de corriente debe conducir el vector del flujo del rotor en caso contrario debería retrasarse el vector del flujo del rotor como se muestra en la figura. Por lo tanto, la componente del vector de flujo de referencia que contribuya a la torsión o la potencia activa se puede derivar directamente con la información de ubicación de este vector de corriente. Esto implica la entrada de la ubicación de vector de flujo del rotor, que está disponible a partir de la posición y/o codificador incremental unido al eje de la

máquina. Para los generadores con salientes en la estructura del rotor, la operación sin sensores puede ser incorporada mediante la medición de la tensión y corrientes eliminando así la necesidad de un sensor de velocidad/posición. La ventaja es la posibilidad de que el controlador limite la corriente en el marco de referencia estacionario. A velocidades de funcionamiento muy altas, es posible tener un componente de magnetización del vector de flujo del estator. Este componente también puede ser necesario cuando una máquina PM interior se emplea para la generación de potencia.

La invención se ha descrito principalmente anteriormente con referencia a unas pocas realizaciones. Sin embargo, como se apreciará fácilmente por una persona experta en la técnica, realizaciones distintas de las descritas anteriormente son lo igualmente posibles dentro del alcance de la invención, tal como se define por las reivindicaciones de patente adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para controlar un generador de turbina eólica de velocidad variable (11) conectado a un convertidor de potencia (13) que comprende interruptores (52, 53), comprendiendo dicho generador un estator y un conjunto de terminales conectados a dicho estator y a dichos interruptores, comprendiendo dicho procedimiento:

- 5 determinar un valor de flujo de estator de referencia correspondiente a un generador (11) de potencia de una magnitud deseada,

determinar un valor de flujo de estator estimado correspondiente a una potencia del generador (11) real,

determinar un valor de diferencia de flujo del estator entre el valor de referencia del flujo del estator determinado y el valor de flujo del estator estimado, y

- 10 operar dichos interruptores (52, 53) según un esquema de modulación del vector de espacio para controlar un patrón de conmutación de dichos interruptores (52, 53), donde dicho patrón de conmutación está formado por la aplicación de uno o más vectores durante uno o más períodos de conmutación, y dichos períodos de conmutación para el patrón de conmutación se determinan a partir de la magnitud y dirección del vector de diferencia del flujo del estator para adaptar al menos una cantidad eléctrica de un estator para obtener la magnitud de potencia de dicho generador (11) deseado.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que se determina un vector de diferencia de flujo del estator con una magnitud y dirección por medio de la diferencia entre el valor de referencia del vector de flujo del estator y el valor estimado del vector del flujo del estator, y dichos interruptores (52, 53) funcionan en base a dicho vector de diferencia de flujo del estator.

- 20 3. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 ó 2, en el que dicho interruptores (52, 53) funcionan de acuerdo con un esquema de modulación de impulsos en anchura para generar una forma de onda de tensión sintetizada en los terminales del estator.

4. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los interruptores (52, 53) comprenden un primer y un segundo conjunto de interruptores (52, 53) y el primer conjunto de interruptores funciona hacia un estado de encendido durante un primer intervalo de tiempo, τ_a , y el segundo conjunto de interruptores hacia un estado de encendido durante un segundo intervalo de tiempo, τ_b .

- 25 5. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que los intervalos de tiempo primero y segundo se determinan de acuerdo con

$$\tau_a = \frac{|\Delta\Psi_s^*(k)|\sin(\frac{\pi}{3} - \gamma)}{\frac{\pi}{3}\sin(\frac{\pi}{3})}$$

$$\tau_b = \frac{|\Delta\Psi_s^*(k)|\sin(\gamma)}{\frac{\pi}{3}\sin(\frac{\pi}{3})}$$

- 30 6. Aparato para controlar un generador de turbina eólica de velocidad variable (11) conectado a un convertidor de potencia (13) que comprende interruptores (52, 53), comprendiendo dicho generador (11) un estator y un conjunto de terminales conectados a dicho estator y a dichos interruptores, comprendiendo dicho aparato:

un controlador de potencia (79) adaptado para determinar un valor de referencia del flujo de estator correspondiente a una potencia de generador (11) de una magnitud deseada,

- 35 un estimador de flujo (78) adaptado para determinar un valor estimado de flujo de estator correspondiente a una potencia real del generador,

un comparador adaptado para determinar un valor de diferencia del flujo del estator entre el valor de referencia determinado del flujo del estator y el valor estimado de flujo del estator, y

- 40 una unidad de control del interruptor (72) adaptada para operar dichos interruptores (52, 53) según un esquema de modulación de vector de espacio para controlar un patrón de conmutación de dichos interruptores (52, 53), en donde dicha unidad de control del interruptor (72) está adaptada para determinar los períodos de conmutación para el patrón de conmutación a partir de la magnitud y la dirección del vector de diferencia de flujo del estator para adaptar al menos una magnitud eléctrica del estator para obtener dicha magnitud deseada de potencia del generador.

7. Aparato según la reivindicación 6, en el que el comparador está adaptado para establecer, a partir de una

diferencia entre el valor de referencia de flujo del estator y el valor estimado del flujo del estator, un vector de diferencia del flujo del estator con una magnitud y dirección y funcionando dichos interruptores en base a dicho vector de diferencia del flujo del estator.

5 8. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 6 a 7, en el que dicha unidad de control del interruptor (72) está adaptada para operar los interruptores (52, 53) de acuerdo con un esquema de modulación de ancho de impulsos para generar una forma de onda de tensión sintetizada en los terminales del estator.

10 9. Aparato según la reivindicación 6, en el que la unidad de control del interruptor (72) está adaptada para establecer un patrón de conmutación al proporcionar señales de control que operan un primer conjunto de los interruptores hacia un estado de encendido durante un primer intervalo de tiempo, τ_a , y un segundo conjunto de los interruptores hacia un estado de encendido durante un segundo intervalo de tiempo, τ_b .

10. Aparato según la reivindicación 9, en el que la unidad de control del interruptor (72) está adaptada para determinar los intervalos de tiempo primero y segundo según

$$\tau_b = \frac{|\Delta\Psi_s^*(k)|\sin(\gamma)}{\frac{\pi}{3}\sin(\frac{\pi}{3})}$$

$$\tau_a = \frac{|\Delta\Psi_s^*(k)|\sin(\frac{\pi}{3}-\gamma)}{\frac{\pi}{3}\sin(\frac{\pi}{3})}$$

15 11. Producto de programa de ordenador que puede cargarse directamente en la memoria de un dispositivo electrónico que tiene capacidades de computación digital, que comprende porciones de código de software para realizar las etapas de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, cuando dicho producto se ejecuta mediante dicho dispositivo electrónico.

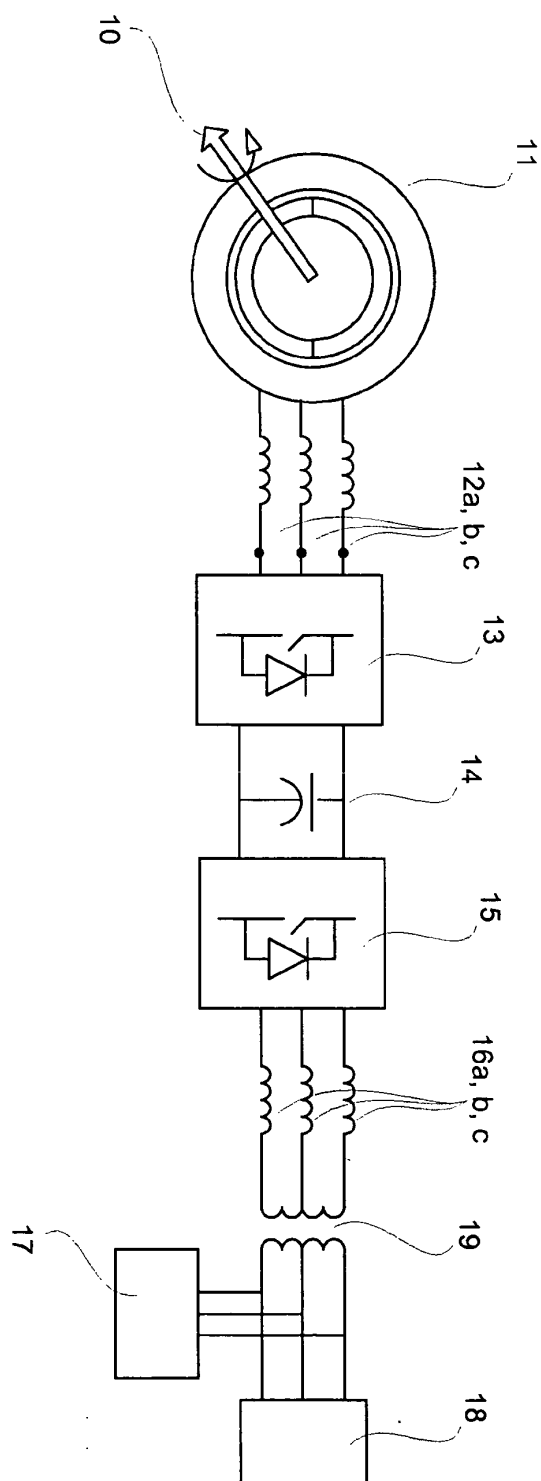


Figura 1

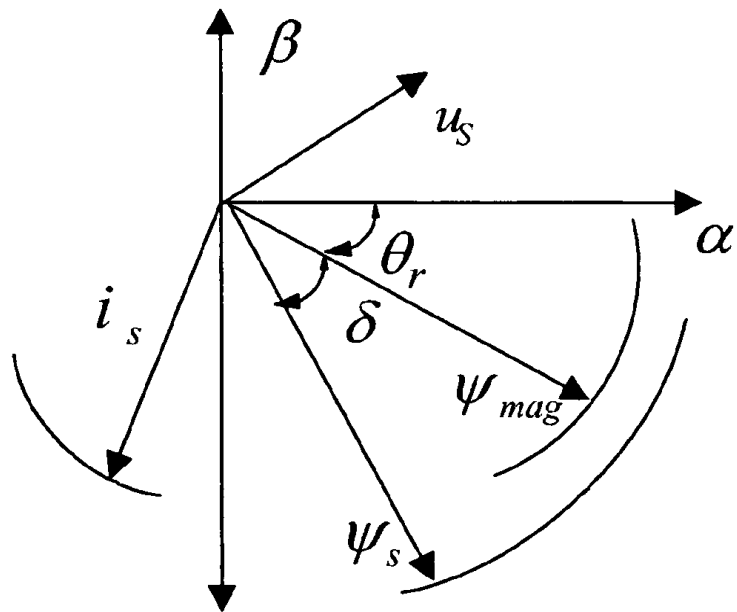


Figura 2

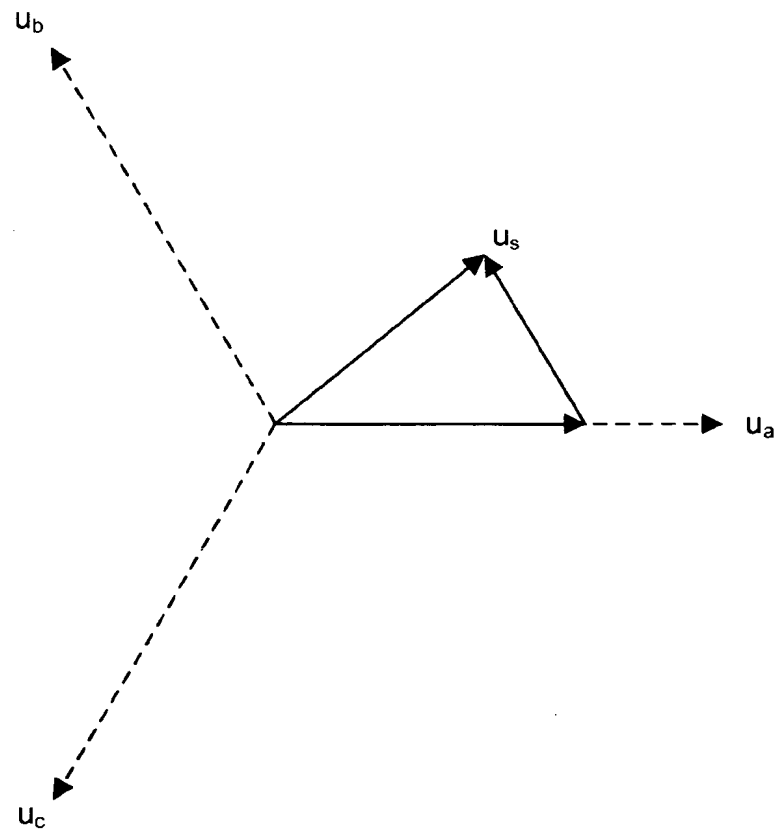


Figura 3

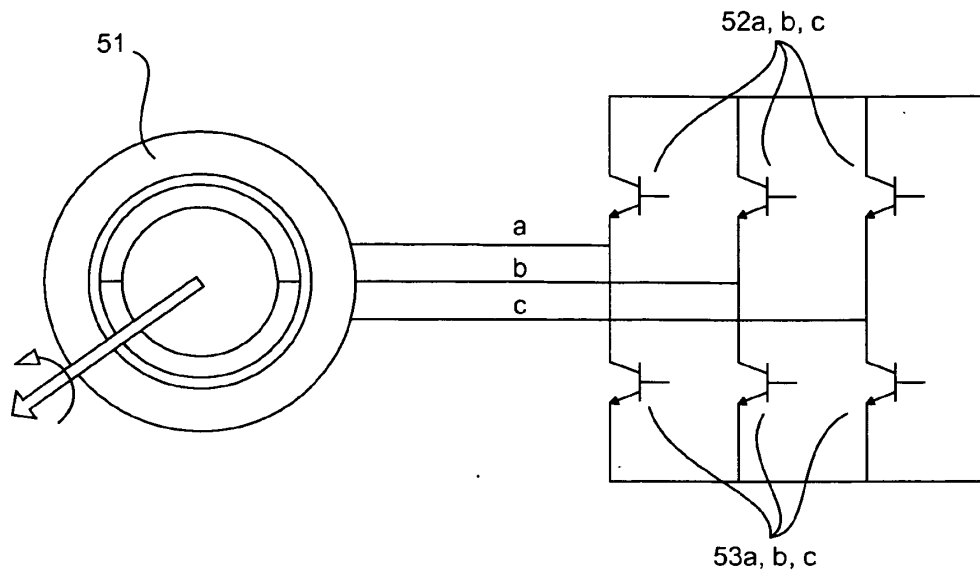


Figura 4a

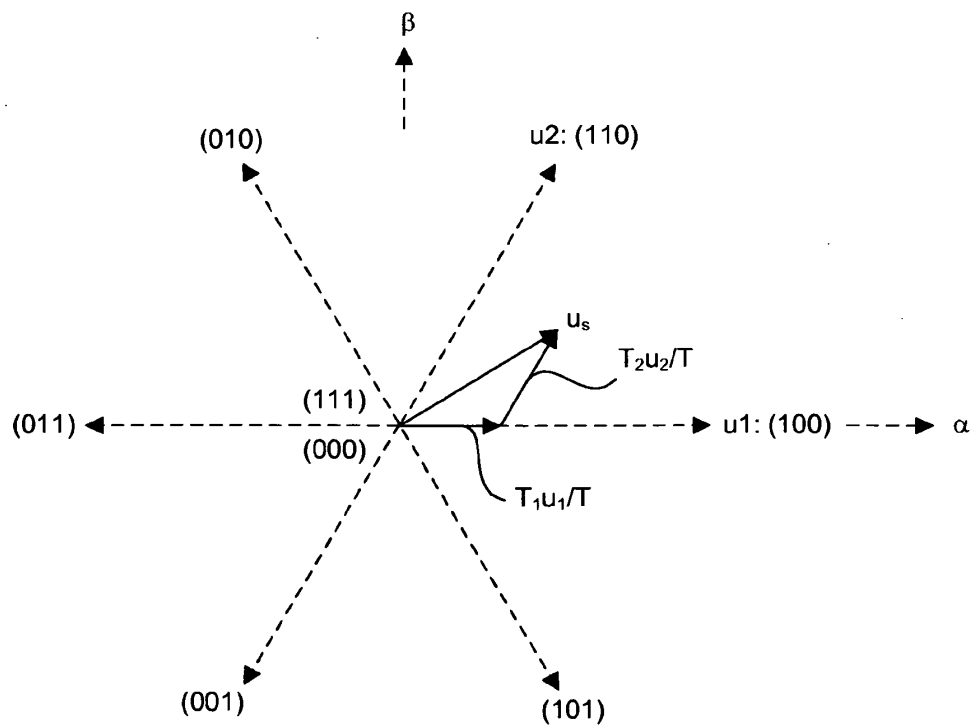


Figura 4b

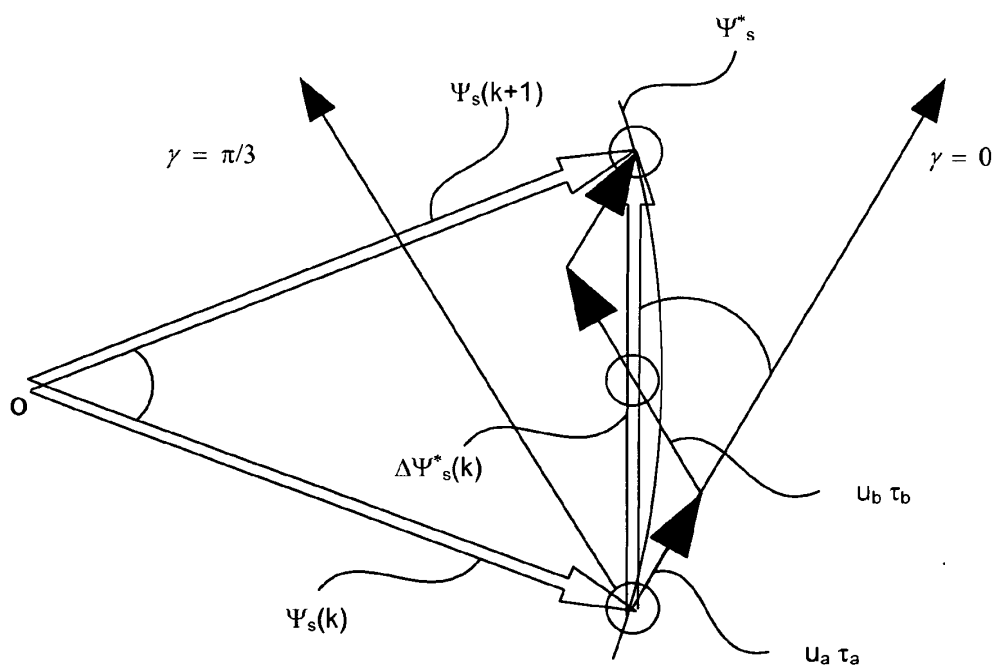


Figura 5a

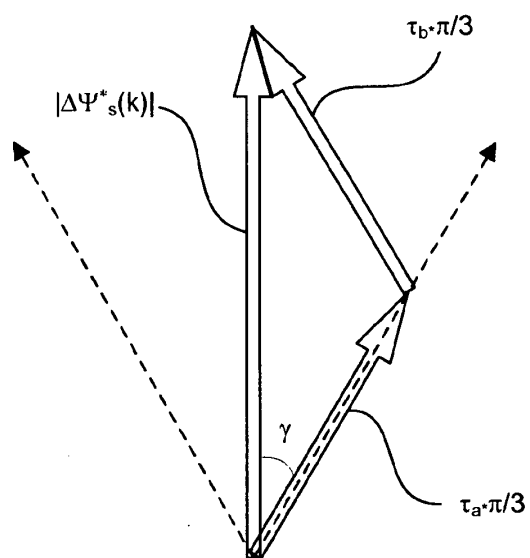


Figura 5b

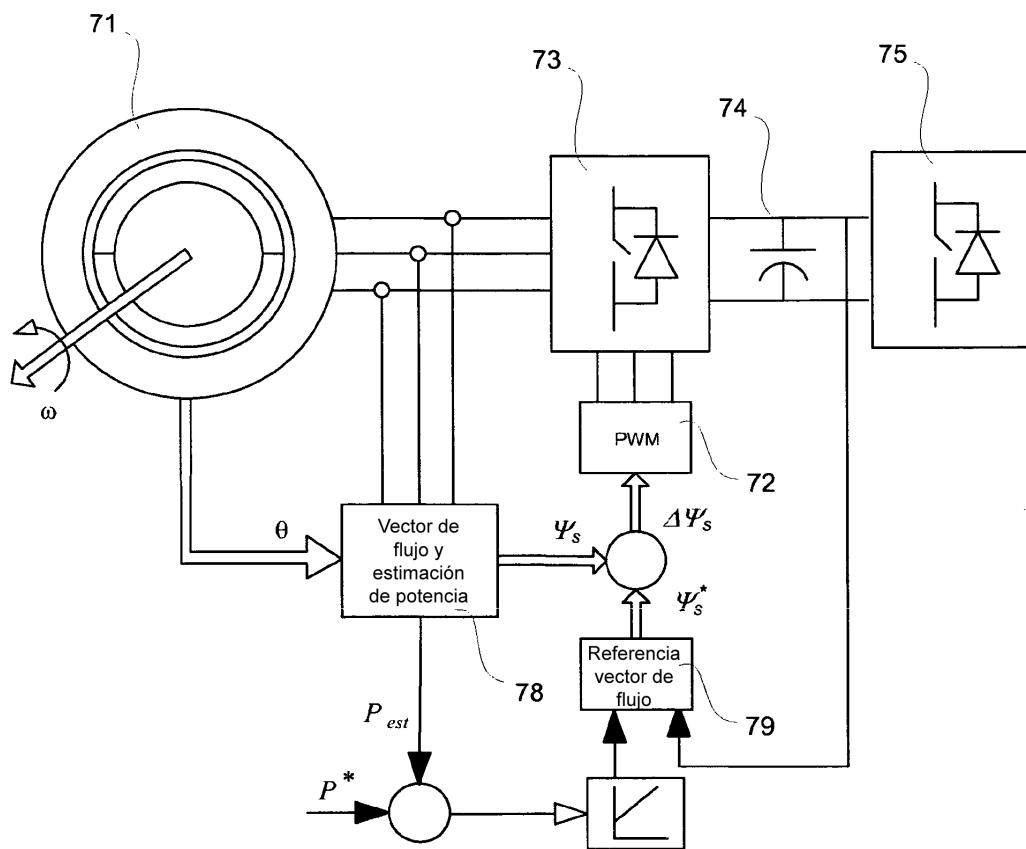
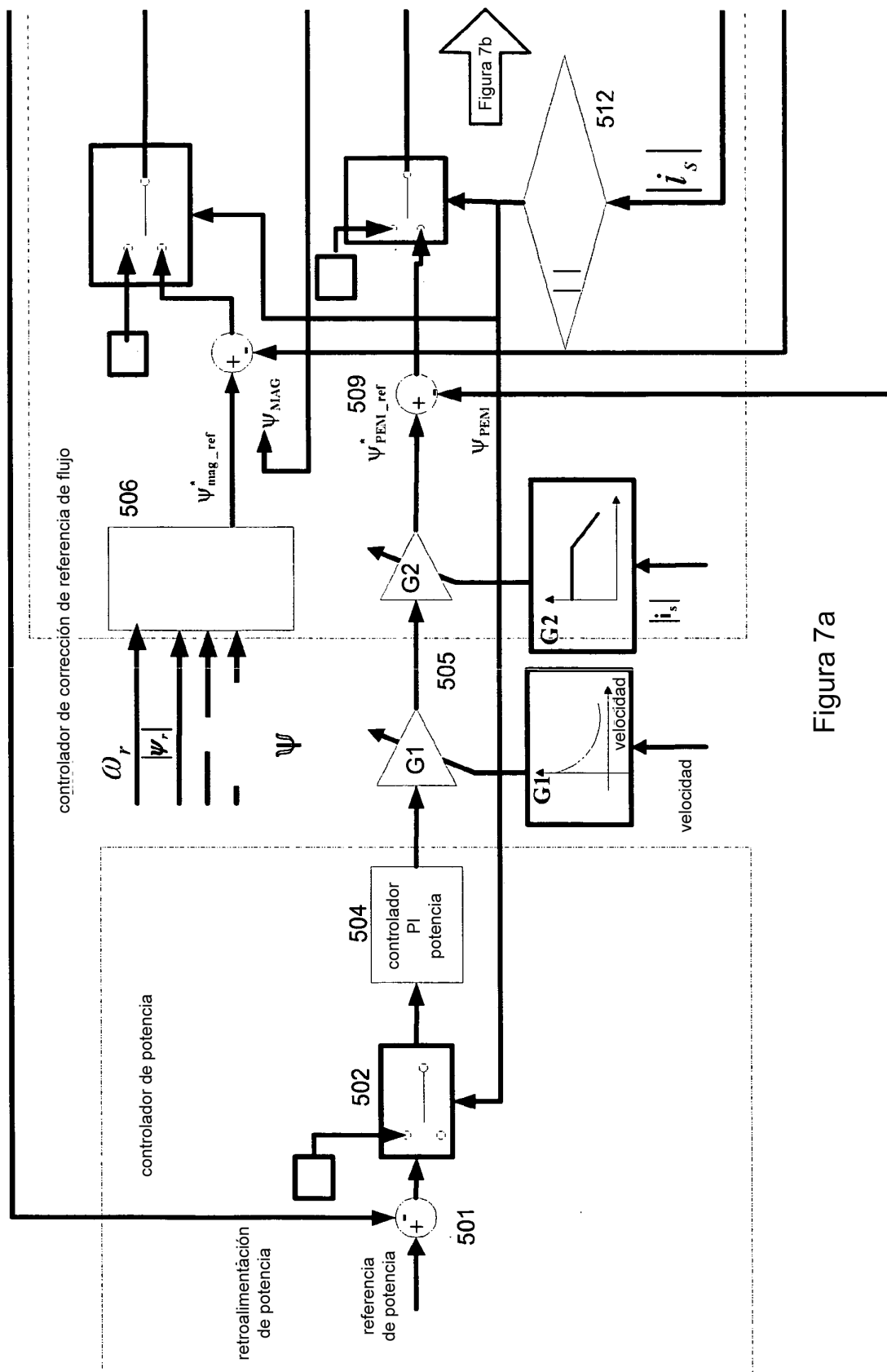


Figura 6





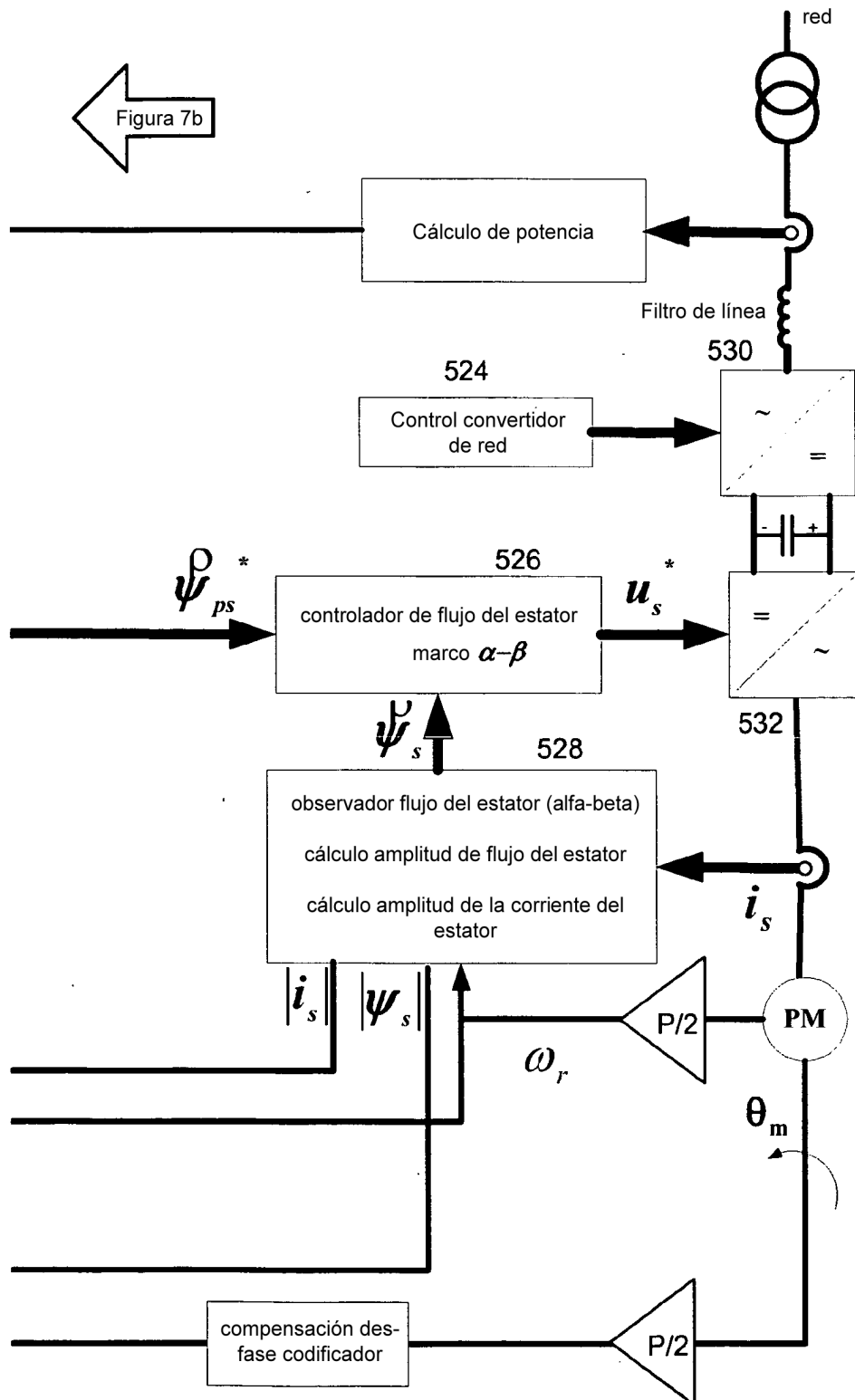


Figura 7c

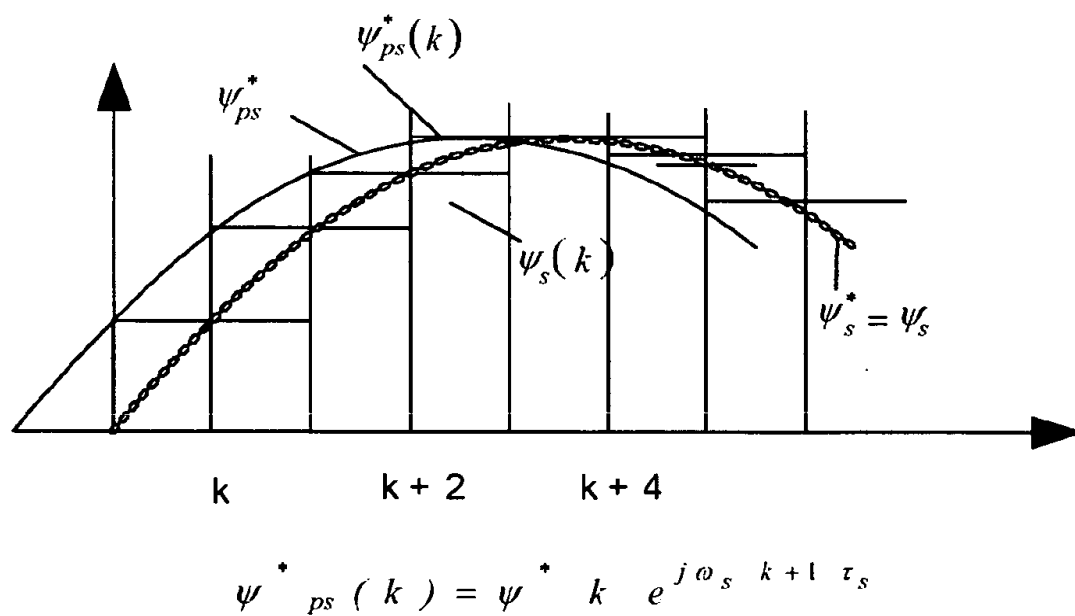


Figura 8

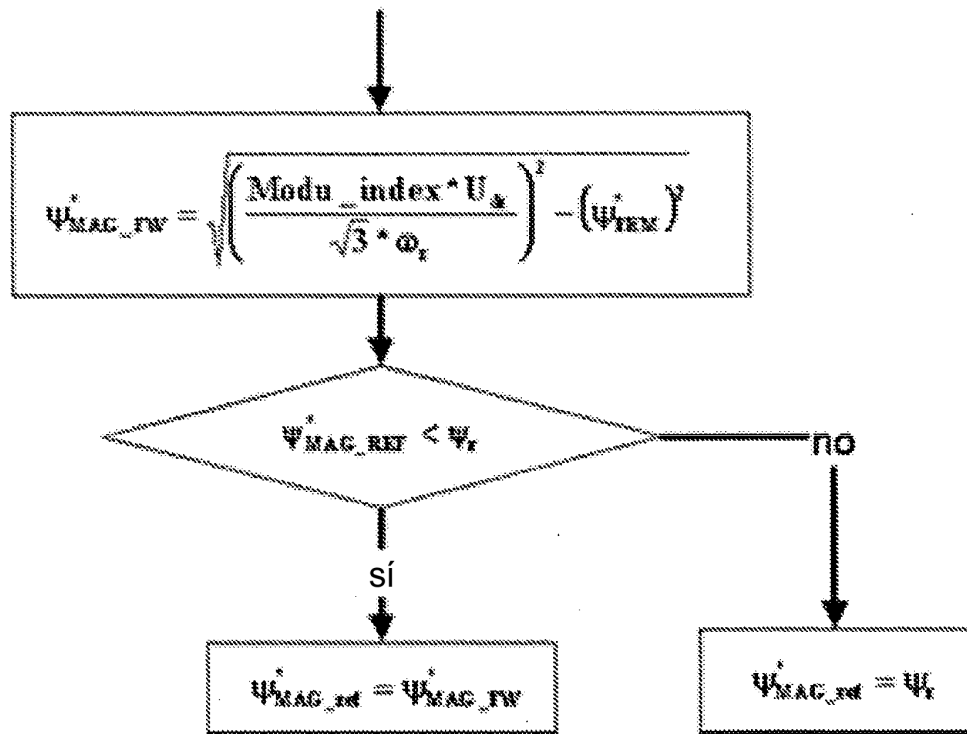


Figura 10