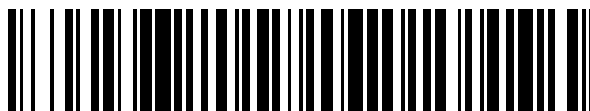


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 527 129**

51 Int. Cl.:

H02P 9/10 (2006.01)

H02P 21/12 (2006.01)

H02P 27/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.10.2009** **E 09752776 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.11.2014** **EP 2362981**

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

30 Prioridad:

27.10.2008 DK 200801477

27.10.2008 US 108668 P

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

20.01.2015

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 44

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

GUPTA, SAURABH;

HELLE, LARS;

TRIPATHI, ANSHUMAN;

JØRGENSEN, ALLAN HOLM y

SHU YU, CAO

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 527 129 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

Control directo de potencia y 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 turbinas eólicas (WTG) que funcionan a velocidades variables, proporcionando de ese modo una tensión y una corriente con amplitud y frecuencia variables.

Antecedentes de la invención

- 10 El viento se ha usado desde hace ya tiempo como fuente de energía y en los últimos años ha pasado a ser muy común usar el viento para producir energía eléctrica. Para ello, la energía en el viento se captura mediante un conjunto de palas (normalmente dos o tres) de una central eólica. El viento capturado por las palas hace girar un árbol conectado a las palas. El árbol está conectado a un rotor de un generador, que a su vez gira a la misma velocidad que el árbol, o a un múltiplo de la velocidad del árbol en caso de que el rotor esté conectado al árbol por medio de una caja de engranajes. Entonces, el generador convierte la energía mecánica proporcionada por el viento
- 15 en energía eléctrica para su entrega a la red eléctrica.

- Para optimizar la eficiencia de un generador de turbina eólica, se prefiere usar un generador de velocidad variable, en el que la velocidad del rotor y por tanto del árbol y las palas dependen de la velocidad del viento. Esto implica que debe establecerse un punto de funcionamiento óptimo para el WTG a diversas velocidades del viento. Esto se realiza controlando el par motor o la potencia entregada por el generador. El sistema de control en un WTG controla
- 20 normalmente la potencia reactiva intercambiada entre el WTG y la red eléctrica así como la potencia activa extraída del WTG para realizar el seguimiento del punto de funcionamiento óptimo para el WTG. La potencia activa es la componente de la potencia eléctrica total, o aparente, que realiza trabajo y se mide en vatios. El trabajo real que realiza la potencia activa difiere de la potencia reactiva que se mide en voltioamperios reactivos y establece y mantiene los campos eléctricos y magnéticos de máquinas de corriente alterna. La potencia aparente, medida en voltioamperios, es la suma vectorial de la potencia real y la reactiva.
- 25

La potencia y el par motor de un WTG están relacionados por la velocidad angular (es decir la velocidad rotacional del rotor) según

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

- 30 Esto implica que el control de par motor y potencia presenta diferentes características cuando se aplica a un WTG. Más específicamente, al controlar el par motor de un WTG, es necesario incluir la velocidad de rotor en el bucle de control. Por tanto, el control de potencia es superior al control de par motor cuando la señal a controlar es la potencia ya que la respuesta transitoria es diferente para los dos métodos de control, es decir al usar control de par motor, un cambio en la potencia requeriría estabilizar tanto la velocidad de rotor como el par motor antes de poder aplicar un control apropiado.
- 35 Un primer tipo de sistemas de control para WTG se refiere al control de (normalmente) tres tensiones sinusoidales desplazadas espacialmente 120° que se aplican a 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 funciona en su estado estacionario se deriva de las características eléctricas y mecánicas del generador en el que el sistema de control se diseña basándose en el tipo de generador usado (por ejemplo asíncrono o síncrono).
- 40 Normalmente la generación de una de las ondas sinusoidales en el sistema trifásico se realiza independientemente de las otras ondas sinusoidales, es decir este tipo de sistemas de control funcionan como tres controles de sistema monofásico independientes en lugar de como un control común de un sistema trifásico. Este hecho tiene como resultado que cualquier desequilibrio en el sistema trifásico o cualquier interacción entre las fases no se considerará en este tipo de control. Además, resulta evidente que el modelo de generador sólo será válido durante el
- 45 funcionamiento en estado estacionario del generador. Durante el funcionamiento transitorio del generador (arranque, parada, cambios de carga, etc.) el control permitirá por tanto altos transitorios de tensión y corriente de pico. Esto da como resultado una disminución de la eficiencia de la conversión de potencia así como la necesidad de sobredimensionar los componentes eléctricos del sistema WTG para hacer frente a las sobreintensidades y sobretensiones transitorias.
- 50 Para superar los inconvenientes de la estructura de control anterior se ha presentado una estructura de control alternativa denominada generalmente Control de Campo Orientado (FOC). La idea principal detrás del FOC es controlar las corrientes de estator del generador usando una representación vectorial de las corrientes. Más específicamente, el FOC se basa en transformaciones de coordenadas que transforman un sistema dependiente del tiempo y la velocidad de tres fases en un sistema invariable en el tiempo de dos coordenadas.
- 55 La ventaja de realizar una transformación a partir de un sistema de coordenadas estacionario de tres fases a un

sistema de coordenadas giratorio es que el control del generador puede realizarse controlando magnitudes de CC. La transformación se realiza en dos etapas: 1) transformación del sistema de coordenadas estacionario abc de tres fases a un sistema de coordenadas estacionario de dos fases denominado $\alpha\beta$ (conocida como transformación de Clarke), y 2) transformación del sistema de coordenadas estacionario $\alpha\beta$ a un sistema de coordenadas giratorio dq (conocida como transformación de Park). Más específicamente, la transformación del marco de referencia abc natural al marco de referencia dq síncrono se obtiene mediante las ecuaciones

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

y

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

que da

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

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

Controlar un generador por medio de FOC requiere la provisión de una componente de par motor alineada de eje q y una componente de flujo alineada de eje d como entrada para el sistema. Tal como se explicó anteriormente, las componentes orientadas d y q son transformaciones a partir del sistema de coordenadas de tres fases estacionario lo que implica que el FOC, debido al acoplamiento directo de las magnitudes eléctricas trifásicas, aceptará el funcionamiento tanto de estado estacionario como transitorio del sistema independientemente del modelo de generador.

El par motor electromecánico T_{EM} del generador en el sistema de coordenadas dq puede expresarse como

$$T_{EM} \propto \Psi_{rotor} \cdot i_{qgestator}$$

lo que facilita la aplicación de control de par motor directo en comparación con el primer tipo de sistema de control dado a conocer anteriormente. Más específicamente, manteniendo la amplitud del flujo de rotor a un valor fijado es posible controlar la componente de par motor de la corriente de estator debido a la relación lineal entre el par motor y la componente de par motor $i_{qgestator}$.

Otra ventaja técnica del FOC comparado con el control trifásico directo es el nivel existente de conocimiento técnico que se ha puesto en práctica en la industria de los accionamientos de CC. Esto conduce a una reducción sustancial en el tiempo entre diseño y comercialización de cualquier accionamiento que se controle usando un controlador FOC.

El documento US5083039 da a conocer una turbina eólica de velocidad variable que comprende un rotor de turbina que impulsa un generador multifásico, un convertidor de potencia con conmutadores que controlan las magnitudes eléctricas del estator en cada fase del generador, un dispositivo de comando de par motor asociado con los sensores de parámetros de la turbina que genera una señal de referencia de par motor indicativa de un par motor deseado, y un controlador de generador que funciona bajo control por orientación de campo y que responde a la señal de referencia de par motor para definir una corriente de eje de cuadratura deseada y para controlar los

conmutadores para producir magnitudes eléctricas del estator correspondientes a la corriente de eje de cuadratura deseada.

A pesar de las ventajas con FOC dadas a conocer anteriormente, existen deficiencias de los controladores convencionales que la industria ha tenido que aceptar. Éstas constituyen por ejemplo (a) limitarse a mantener el desacoplamiento correcto entre las componentes de producción de flujo y par motor de las corrientes de estator durante el estado estacionario y dinámicas, (b) controlar las corrientes usando controladores lineales a velocidades superiores y un índice de modulación superior. El caso (a) se refiere a la sensibilidad de parámetro y la necesidad de adaptación del mismo. Esto puede forzar la fiabilidad del controlador en condiciones extremas de carga. Por otro lado, el caso (b) se refiere a la poca utilización de la tensión de enlace de CC debido a la falta de un control fiable a índices de modulación superiores.

Como estas condiciones son críticas para una operación de accionamiento de alta potencia desde el punto de vista tanto de la fiabilidad como del coste, es importante proporcionar métodos alternativos para el control de potencia del generador.

El documento US 2008/0136380 A1 tiene relación con un método para la aplicación controlada de un valor objetivo de corriente de estator I_{Snom} y un valor objetivo de par motor M_{nom} para una máquina polifásica que se alimenta mediante un convertidor de potencia electrónico. Las correspondientes corrientes están limitadas a las corrientes máximas $I_{Sdmáx}$ e $I_{Sq máx}$ (figura 9).

El documento US 2001/0017529 A1 describe un sistema para arrancar un motor síncrono a partir de un inversor estático modulado por ancho de pulso sin usar mediciones de velocidad o posición de rotor. La excitación suministrada al motor se reduce una vez se detecta un valor dado de la tensión de la línea.

Sumario de la invención

En vista de lo anterior, un objetivo de la invención es proporcionar un método alternativo al FOC clásico para controlar la salida de potencia de un generador.

Un objetivo es proporcionar un método para determinar los tiempos de conmutación óptimos para un esquema de modulación por vector espacial usando una señal de error de vector de flujo del estator.

Otro objetivo de la presente invención es proporcionar un método y un aparato para controlar de manera eficiente la corriente de estator en un generador.

La invención se realiza mediante un método según la reivindicación 1 para generar un vector de referencia de flujo del estator para controlar un generador que comprende un estator y un rotor, comprendiendo dicho método:

determinar una primera componente de vector de referencia de flujo del estator correspondiente a un flujo de magnetización de una magnitud deseada para el generador,

determinar una magnitud de corriente equivalente correspondiente a un flujo del estator de producción de potencia y/o par motor de una magnitud deseada para el generador,

comparar la corriente equivalente con una corriente de estator real y limitar la magnitud de la corriente equivalente si la corriente de estator real está por encima de un umbral predefinido,

determinar una segunda componente de vector de referencia de flujo del estator basándose en la corriente equivalente limitada, y

determinar un vector de referencia de flujo del estator basándose en las componentes de vector de referencia de flujo del estator primera y segunda.

Una ventaja con esta realización es que el vector de referencia de flujo del estator siempre tiene características óptimas con respecto a la generación de una corriente de estator mínima para una potencia activa dada proporcionada por el generador. Por tanto, las sobreintensidades en el sistema se evitan de manera eficaz.

Según una realización la primera componente de vector de referencia de flujo del estator puede estar basada en el flujo de magnetización y una posición angular del rotor.

Una ventaja de esta realización es que la primera componente de vector de referencia de flujo del estator puede determinarse fácilmente puesto que el flujo de magnetización está fijado por las características del rotor.

Según una realización la segunda componente de vector de referencia de flujo del estator se basa en el flujo del estator de producción de potencia y/o par motor y en una posición angular del rotor.

Una ventaja de esta realización es que el segundo vector de referencia de flujo del estator puede determinarse fácilmente a partir de la salida de potencia deseada del generador.

Según una realización la segunda componente de referencia de vector de flujo del estator está adelantada con respecto a la primera componente de vector de referencia de flujo del estator 90° .

Una ventaja de esta realización es que el flujo de magnetización se desacopla del flujo de producción de par motor/potencia, facilitando por tanto la determinación de la corriente de estator óptima.

- 5 Según una realización puede determinarse un valor de referencia de potencia correspondiente a una potencia de salida de una magnitud deseada del generador, el valor de referencia de potencia puede compararse con un valor de potencia real correspondiente a la potencia de salida real del generador y la magnitud de corriente equivalente puede determinarse basándose en la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real.

- 10 Según una realización la magnitud de la corriente equivalente se ajusta basándose en una velocidad de giro del generador.

Una ventaja de esta realización es que la corriente equivalente puede compensarse por el hecho de que la potencia activa entregada por el generador es una función tanto del par motor como de la velocidad.

- 15 Según una realización el estator del generador está conectado a conmutadores en un convertidor de potencia y los conmutadores se accionan en correspondencia con el vector de referencia de flujo del estator total determinado para adaptar al menos una magnitud eléctrica del estator para obtener dicha magnitud de potencia de generador deseada.

Una ventaja de esta realización es que el generador puede controlarse de manera eficiente con bajas pérdidas en el convertidor de potencia para conseguir la magnitud de potencia deseada.

- 20 Según una realización puede estimarse un vector de flujo del estator real del generador, puede determinarse un vector de diferencia de flujo del estator entre el vector de referencia de flujo del estator total determinado y el vector de flujo del estator estimado y dichos conmutadores pueden accionarse en correspondencia con el vector de diferencia de flujo del estator determinado para adaptar al menos una magnitud eléctrica de estator para obtener dicha magnitud de potencia de generador deseada.

- 25 Una ventaja de esta realización es que los conmutadores pueden controlarse de una manera fácil y eficiente por medio del vector de diferencia de flujo del estator. La determinación de los tiempos de conmutación para los conmutadores en el convertidor se facilita mediante el uso del vector de diferencia de flujo del estator.

Según una realización, se realiza un método para controlar un generador de velocidad variable de turbina eólica conectado a un convertidor de potencia que comprende conmutadores, comprendiendo dicho generador un estator y un conjunto de terminales conectados a dicho estator y a dichos conmutadores, comprendiendo dicho método:

- 30 determinar un valor de referencia de vector de flujo del estator correspondiente a una potencia de generador de una magnitud deseada,

determinar un valor de vector de flujo del estator estimado correspondiente a una potencia de generador real, y

- 35 accionar dichos conmutadores en correspondencia con el valor de referencia de flujo del estator determinado y el valor de flujo del estator estimado para adaptar al menos una magnitud eléctrica de estator para obtener dicha magnitud de potencia de generador deseada.

- Una ventaja de esta realización es que los conmutadores se accionan directamente basándose en el flujo del estator en un marco de referencia estacionario. Por tanto, se evita la necesidad de una transformación adicional en un marco de referencia síncrono (tal como en FOC) reduciendo los requisitos computacionales con respecto a la unidad de control. Además, puesto que los conmutadores se accionan directamente basándose en el flujo del estator no hay una limitación de mantener el desacoplamiento correcto entre componentes de producción de flujo y par motor de las corrientes de estator.

- 40 Según una realización de la invención, puede determinarse un valor de diferencia de flujo del estator entre el valor de referencia de flujo del estator determinado y el valor de flujo del estator estimado y los conmutadores pueden accionarse en correspondencia con dicho valor de diferencia de flujo del estator determinado.

- 45 Una ventaja de esta realización es que los conmutadores se accionan directamente basándose en un valor de diferencia de flujo del estator que hace posible derivar rápidamente los tiempos de conmutación correctos para los conmutadores.

- 50 Según una realización de la invención, puede determinarse un vector de diferencia de flujo del estator con una magnitud y dirección por medio de la diferencia entre el valor de referencia de vector de flujo del estator y el valor de vector de flujo del estator estimado, y dichos conmutadores pueden accionarse basándose en dicho vector de diferencia de flujo del estator.

Una ventaja de esta realización es que los conmutadores se accionan directamente basándose en la fase y amplitud

de un vector de diferencia de flujo del estator que facilita una rápida determinación de los tiempos de conmutación correctos para los conmutadores.

Según una realización de la invención, los conmutadores pueden accionarse según un esquema de modulación por ancho de pulso para generar una forma de onda de tensión sintetizada en los terminales del estator.

- 5 Una ventaja de esta realización es que la forma de onda sintetizada puede generarse con un alto grado de eficiencia debido a las bajas pérdidas asociadas con la conmutación PWM.

Según una realización de la invención, los conmutadores pueden accionarse según un esquema de modulación por vector espacial para controlar un patrón de conmutación de dichos conmutadores.

- 10 Una ventaja de esta realización es que el esquema de modulación por vector espacial hace posible generar el patrón de conmutación con una potencia de procesamiento mínima.

Según una realización de la invención, el patrón de conmutación puede formarse aplicando uno o más vectores durante uno o más tiempos de conmutación, y pueden determinarse dichos tiempos de conmutación para el patrón de conmutación a partir de la magnitud y dirección del vector de diferencia de flujo del estator.

- 15 Una ventaja de esta realización es que el patrón de conmutación puede determinarse de manera sencilla a partir del esquema de modulación por vector espacial teniendo en cuenta la información de fase y amplitud del vector de diferencia de flujo del estator.

- 20 Según una realización de la invención, los conmutadores pueden comprender un primer y un segundo conjunto de conmutadores y el primer conjunto de los conmutadores puede accionarse a un estado activado durante un primer intervalo de tiempo, τ_a y el segundo conjunto de los conmutadores a un estado activado durante un segundo intervalo de tiempo, τ_b .

Una ventaja de esta realización es que el esquema de modulación por vector espacial puede implementarse de manera eficiente con una baja exigencia de potencia computacional.

Según una realización de la invención los intervalos de tiempo primero y segundo pueden determinarse según

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

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

- 25 Una ventaja de esta realización es que los tiempos activado y desactivado para los conmutadores pueden determinarse de manera rápida y directa a partir del vector de diferencia de flujo del estator.

- 30 La presente invención se realiza mediante un aparato según la reivindicación 12 para generar un vector de referencia de flujo del estator para controlar un generador que comprende un estator y un rotor, comprendiendo dicho aparato:

un primer generador de vector para determinar una primera componente de vector de referencia de flujo del estator correspondiente a un flujo de magnetización de una magnitud deseada para el generador,

un controlador de potencia para determinar una magnitud de corriente equivalente correspondiente a un flujo del estator de producción de potencia y/o par motor de una magnitud deseada para el generador,

- 35 un limitador de corriente para determinar una corriente de estator real y limitar la magnitud de la corriente equivalente si la corriente de estator real está por encima de un umbral predefinido,

un segundo generador de vector para determinar una segunda componente de vector de referencia de flujo del estator basándose en la corriente equivalente limitada, y

- 40 un combinador para determinar un vector de referencia de flujo del estator basándose en las componentes de vector de referencia de flujo del estator primera y segunda.

Otra realización de un aparato para controlar un generador de velocidad variable de turbina eólica conectado a un convertidor de potencia comprende conmutadores, comprendiendo dicho generador un estator y un conjunto de terminales conectados a dicho estator y a dichos conmutadores, comprendiendo dicho aparato:

5 un controlador de potencia adaptado para determinar un valor de referencia de vector de flujo del estator correspondiente a una potencia de generador de una magnitud deseada,

un estimador de vector de flujo adaptado para determinar un valor de vector de flujo del estator estimado correspondiente a una potencia de generador real, y

10 una unidad de control de conmutación adaptada para accionar dichos conmutadores en correspondencia con el valor de referencia de flujo del estator determinado y el valor de flujo del estator estimado para adaptar al menos una magnitud eléctrica de estator para obtener dicha magnitud de potencia de generador deseada.

Un programa informático comprende código de programa informático para llevar a cabo las etapas del método mencionado anteriormente cuando se ejecuta en un dispositivo con capacidades de procesamiento de datos.

A partir de la siguiente descripción detallada, de las reivindicaciones adjuntas así como de los dibujos resultarán evidentes otros objetivos, características y ventajas de la presente invención.

15 Generalmente, todos los términos usados en las reivindicaciones deben interpretarse según su significado habitual en el campo técnico, a menos que explícitamente se defina de otro modo en el presente documento. Todas las referencias a "un/una/el/la [elemento, dispositivo, componente, medio, etapa, etc.]" deben interpretarse de manera amplia haciendo referencia a al menos un ejemplo de dicho elemento, dispositivo, componente, medio, etapa, etc., a menos que explícitamente se indique de otro modo. Las etapas de cualquier método dado a conocer en el presente
20 documento no tienen que realizarse en el orden exacto dado a conocer, a menos que se indique de otro modo.

Breve descripción de los dibujos

Los anteriores así como otros objetos, características y ventajas de la presente invención se entenderán mejor mediante la siguiente descripción detallada ilustrativa y no limitativa de realizaciones preferidas de la presente invención, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se usan los mismos números de referencia para
25 elementos similares, en los que:

La figura 1 ilustra un sistema convertidor de generador según 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.

30 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 del lado del generador ilustrado en la figura 1.

La figura 4b ilustra ocho estados de conmutación que determinan un hexágono de vectores espaciales.

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

La figura 5b ilustra un vector de tensión normalizada.

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

La figura 7 ilustra un gráfico de flujo de señal de un controlador de potencia de generador y vector de flujo del estator según una realización de la invención.

40 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 limitación de corriente en la generación de vector de flujo del estator de referencia.

La figura 10 ilustra el algoritmo de control para el bloque de controlador de potencia mostrado en la figura 7.

Descripción detallada de realizaciones preferidas

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

Un árbol 10 transmite energía mecánica desde una fuente de energía, preferiblemente un conjunto de palas de una turbina eólica (no mostradas), a un rotor de un generador de velocidad variable 11. El árbol está conectado

preferiblemente a las palas de la turbina eólica, y al rotor por medio de una caja de engranajes para adaptar la velocidad de giro del árbol 10 (es decir la velocidad de las palas de la turbina eólica) a un rango de velocidad adecuado para el generador 11. Entonces, el generador 11 convierte la energía mecánica suministrada por medio del árbol 10 en energía eléctrica y entrega la energía eléctrica a un conjunto de terminales del estator 12a, 12b, 12c. Para un rendimiento óptimo con respecto a la conversión de la energía eólica en energía eléctrica el árbol 10 variará su velocidad en función de la velocidad del viento. Puesto que la velocidad de giro del rotor del generador 11 es proporcional a la velocidad de giro del árbol 10, la amplitud y la frecuencia de la señal de tensión proporcionada por el generador 11 en los terminales del estator 12a, 12b, 12c variará según la velocidad de giro del árbol 10. El generador puede ser un generador síncrono de alimentación simple o doble, un generador de imanes permanentes (PM), un generador de inducción o cualquier otro tipo de generador que comprende un devanado de 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 trifásico 13 que incluye seis conmutadores ilustrados por motivos de claridad mediante un único conmutador y diodo en la figura 1. Tal como se dará a conocer en más detalle a continuación, los conmutadores están dispuestos en un conjunto de conmutadores superiores e inferiores que preferiblemente tienen forma de dispositivos de estado sólido, tales como MOSFET, GTO o IGBT. Sin embargo, otros tipos de conmutadores, tales como BJT, son igualmente posibles dependiendo de las consideraciones de diseño del convertidor 13. El convertidor 13 se comportará en funcionamiento normal como un rectificador activo que convierte la tensión de CA de frecuencia variable suministrada por el generador 11 en una tensión de CC. La conversión se controla usando un esquema de modulación por ancho de pulso, en el que las señales de control se aplican a los conmutadores en el convertidor 13 para proporcionar la funcionalidad de conversión deseada. En una realización preferida los conmutadores se controlan empleando un esquema de modulación por vector espacial, tal como se dará a conocer a continuación.

La salida del convertidor 13 se suministra a un enlace de CC 14, que comprende un condensador de enlace para reducir el armónico de tensión en el enlace 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 a la del convertidor de potencia del lado del generador 13 dado a conocer anteriormente. El convertidor de potencia del lado de la red 15 normalmente funciona como inversor para convertir la tensión de CC en el enlace de CC 14 en una tensión de CA regulada para entregar potencia activa y reactiva a la red 18. A los conmutadores del convertidor de potencia del lado de la red 15 se les suministran tensiones de control adecuadas para suministrar la tensión y potencia deseadas a una red 18.

La salida del convertidor de potencia del lado de la red 15 se filtra por medio de bobinas de inductancia 16a, 16b, 16c para por ejemplo eliminar armónicos de orden superior de la señal de potencia de salida. La señal de potencia de salida se suministra entonces a la red 18 por medio de un transformador 19. La señal de potencia de salida puede filtrarse, si fuera necesario, mediante un segundo filtro 17 para mantener la interferencia o 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 como α y β . La transformación del marco de referencia abc trifásico estacionario al marco de referencia $\alpha\beta$ puede realizarse tal como se dio a conocer anteriormente.

Un primer vector representa el flujo de magnetización, indicado como 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 generarse por medio de un imán permanente, como en un generador PM, por excitación de una bobina de campo en el rotor (es decir un generador bobinado) o, si la invención se usa junto con un generador de inducción, por excitación del flujo magnético giratorio del estator que induce corrientes en el rotor y de ese modo también produce un campo magnético. El arco en la punta del vector de flujo del rotor ilustra que el vector gira sobre el origen de coordenadas en la figura. El desplazamiento angular del vector de flujo del rotor con respecto al eje α se indica como θ_r en la figura.

De manera correspondiente el vector de flujo del estator, indicado como Ψ_s en la figura, se representa mediante un vector que gira sobre el origen de coordenadas. En un funcionamiento de estado estacionario el vector de flujo del estator gira en el marco de referencia estacionario con una velocidad angular igual al vector de flujo del rotor. El desplazamiento angular del vector de flujo del estator con respecto al vector de flujo del rotor se indica mediante δ en la figura.

La potencia electromagnética de un generador síncrono puede expresarse como:

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

que da

$$P_{EM} = f(|\psi_s|, |\psi_r|, \delta)$$

Se observa a partir de la ecuación de potencia anterior que para una velocidad de funcionamiento dada, la potencia electromagnética depende de la magnitud del vector de flujo del estator y su ubicación con respecto al vector de flujo del rotor. Si se conoce la posición del vector de flujo del rotor, es posible aplicar una tensión que colocará el vector de flujo del estator para dar la magnitud deseada de la potencia a una velocidad dada. Por tanto, controlando el vector de flujo del estator, la potencia electromagnética (EM), que corresponde a la potencia de carga, puede obtenerse según se requiera.

Puesto que el control se lleva a cabo en el marco de referencia estacionario, puede ser necesario compensar el retardo 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. Para 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 por vector espacial (SVM) es un algoritmo de promediado eficaz para proporcionar una señal de salida de CA a partir de una tensión de CC. La SVM también minimiza el contenido de armónicos que determina las pérdidas en el cobre en el generador. La SVM también es eficaz en cuanto a que minimiza pérdidas de conmutación en los conmutadores del convertidor de potencia del lado del generador 13.

Para un generador trifásico, las tensiones en el marco de referencia abc estacionario pueden representarse como tres vectores con desfase de 120° (direcciones u_a , u_b y u_c) en el espacio, tal como se muestra en la figura 3. Para un sistema trifásico equilibrado, la suma de estos vectores da cero. Esto implica que los tres vectores pueden representarse como un único vector de referencia espacial (u_s). La idea detrás de la SVM es controlar la amplitud y la frecuencia de V_s , que implica que pueden controlarse la amplitud, fase y frecuencia de la tensión en los terminales del estator 12a, b, c y por tanto el flujo en el estator.

Haciendo referencia a la figura 4a, que es una ilustración más detallada del convertidor del lado del generador 13 mostrado en la figura 1. Los conmutadores 52ab b, c y 53a, b, c en la figura se ilustran como BJT. Sin embargo, es igualmente posible usar MOSFET, GTO, IGBT, etc. como dispositivos de conmutación. Independientemente de la tecnología usada para fabricar los conmutadores 52a, b, c, y 53 a, b, c, la secuencia de conmutación, o el patrón de conmutación, de los dispositivos debe seguir ciertas reglas. Más específicamente, siempre que uno de los conmutadores superiores 52a, b, c esté conduciendo (es decir en un estado activado) el correspondiente conmutador inferior 53a, b, c debe estar desactivado y viceversa. Además tres de los conmutadores siempre deben estar activados y tres conmutadores siempre deben estar desactivados. Estas reglas dan lugar a ocho combinaciones distintas para los estados de conmutación de los dispositivos 52a, b, c y 53a, b, c. Estas combinaciones se indican como (abc) donde por ejemplo a=1, b=0 y c=0 indica que el conmutador superior 52a está activado (desactivando de ese modo el conmutador 53a) mientras que los conmutadores 52b y c están desactivados. 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 conmutadores superiores 52a, b, c están desactivados y todos los conmutadores inferiores 53a, b, c están activados, o viceversa.

Los ocho estados de conmutación definidos anteriormente determinan ocho configuraciones de tensiones de fase tal como se ilustra en la figura 4b. Como se observa en la figura, los vectores definen un hexágono con seis sectores del mismo tamaño desplazados 60°. Cada sector está limitado por dos vectores activos. Los estados inactivos se representan mediante los vectores (000) y (111) que son nulos y están ubicados en el origen del hexágono. Se eligen dos vectores de tensión adyacentes dependiendo del sector en el que esté ubicado el vector u_s (100 y 110 en la figura 4b). A partir de la figura 4b resulta evidente que sólo uno de los conmutadores superiores e inferiores cambia de estado cuando el patrón de conmutación se mueve de un sector al sector adyacente, en el que las pérdidas de conmutación se mantienen en un mínimo.

Normalmente, los conmutadores funcionan a una frecuencia F que es sustancialmente superior a la frecuencia de la red. La frecuencia de conmutación F define el periodo de muestra τ_s por medio de la relación $\tau_s = 1/F$. El periodo de muestra τ_s se usa al generar el vector V_s a partir de los diversos vectores de tensión (100, 110, etc.). Más específicamente el vector u_s se forma ponderando en el tiempo los vectores durante un periodo de muestra τ_s . El vector u_s puede expresarse matemáticamente 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 se aplica cada vector $u_0, u_1 \dots u_7$, respectivamente. Los vectores u_0 y u_7 son los vectores nulos (000, 111) que se aplican para dar como resultado una tensión cero.

Cuando se conocen u_s y τ_s es posible determinar el tiempo de activación 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 vectores espaciales mostrado en la figura 4b. El vector de flujo del estator Ψ_s deseado en dos instancias de tiempo posteriores se ilustra como los vectores $\Psi_s(k)$ y $\Psi_s(k+1)$. El flujo de referencia Ψ_s^* se representa mediante un arco circular en la figura. La diferencia entre el vector de flujo del estator deseado y el flujo de referencia crea un vector de error de flujo $\Delta\Psi_s^*(k)$ con una dirección perpendicular a la dirección del flujo deseado. El flujo en el estator se refiere a la EMF del generador mediante 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 puede obtenerse como promedio en una muestra usando vectores adyacentes y está desplazado 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 funcionamiento. Por tanto γ varía de 0 a 60 grados en un sector. El tiempo que se aplica cada vector activo, por ejemplo u_1 y u_2 en la figura 5 se indica mediante τ_a y τ_b en la figura.

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

$$u_{pico} = \frac{2}{\pi} U_{CC}$$

donde U_{CC} es la tensión de enlace CC de un inversor de dos niveles dado a conocer anteriormente. En el esquema de modulación por vector espacial puede mostrarse que la longitud de cada uno de los seis vectores (u_1 - u_6) es

$$u_n = \frac{2}{3} U_{CC}$$

25 donde la normalización de la tensión pasa a ser

$$Normalización = \frac{\pi}{3}$$

A partir de la figura puede observarse 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 pueden derivarse los tiempos de conmutación para cada uno de los vectores activos, de manera que definen las señales de control que se aplican a los conmutadores en el convertidor de potencia del lado del generador 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 que se aplica el primer vector (por ejemplo el vector u_1 en la figura 4b) y τ_b es el tiempo que se aplica el segundo vector (por ejemplo el vector u_2 en la figura 4b).

Haciendo referencia brevemente a las figuras 1, 4a y 7, los tiempos de conmutación determinados los usa como señales de control una unidad de control de conmutación indicada mediante el bloque PWM 82. El bloque PWM 82 usa la señal de control para controlar los conmutadores 52, 53 en el convertidor de potencia del lado del generador 13. Conmutando los estados de los conmutadores en el convertidor de potencia del lado del generador 13 es posible establecer magnitudes eléctricas del estator de manera que se consiga un nivel de potencia de generador deseado. Más específicamente, las señales de control hacen que los conmutadores 52, 53 del convertidor de potencia del lado del generador 13 ajusten la magnitud de fase y tensión de su tensión de CA en terminal con respecto a la EMF del generador 11 para suministrar 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. Tal conmutación ha de llevarse a cabo para mitigar el error en el vector de flujo del estator $\Delta\Psi_s^*(k)$. Este enfoque de control de vector de flujo puede extenderse a cualquier índice de modulación. Durante el rango de modulación por vector espacial normal, el error puede compensarse 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 según una realización de la presente invención.

La demanda de potencia al control de convertidor se compara con la potencia estimada suministrada por el generador 71. El hecho de que las dinámicas mecánicas del sistema sean más lentas permite usar el controlador de potencia 79 directamente para dar la referencia de vector de flujo del estator.

El generador 71 no necesita potencia reactiva excepto a velocidades muy altas cuando se necesita debilitar el campo. El diseño EM satisface este aspecto del generador. Por tanto es el requisito de potencia activa el que acciona el controlador de potencia a dinámicas del generador más lentas. El vector de flujo del estator aún se controla de manera similar a como se explicó anteriormente. La conmutación llevada a cabo usando el error de vector de flujo del estator es la misma que la descrita anteriormente.

La figura 7 ilustra un gráfico de flujo de señal de una realización del controlador de potencia de generador y vector de flujo del estator.

La entrada para el gráfico de flujo de señal es un valor de referencia de potencia (P_e^*) correspondiente a una potencia de salida de una magnitud deseada desde el generador. El valor de referencia de potencia se compara con un valor de potencia real (P_e) correspondiente a la potencia de salida real desde el generador y la diferencia entre estos dos valores se proporciona a un bloque controlador de potencia y limitador de corriente (PCCL) 81.

El bloque PCCL 81 se indica con líneas de trazos en la figura 7 y está diseñado para conseguir el mismo ancho de banda a cualquier frecuencia de funcionamiento. El bloque PCCL 81 comprende un bloque controlador proporcional e integral (PI) 82. Las ganancias de PI son funciones de la velocidad debido al hecho de que la potencia activa entregada por el generador es una función tanto del par motor como de la velocidad. Por tanto, es necesario compensar las ganancias de PI para la velocidad de funcionamiento del generador. Incluso aunque la velocidad tenga una dinámica muy lenta, aumenta la no linealidad en el bucle de control. Para reducir/eliminar esta no linealidad, las ganancias del controlador PI se ajustan mediante el bloque de compensación de velocidad 83 dependiendo de la velocidad de funcionamiento del generador. La salida del bloque PI es una corriente equivalente correspondiente a un flujo del estator de producción de potencia y/o par motor de una magnitud deseada para el generador.

La corriente de estator de generador real $|i_s|$ se determina en un bloque calculador de corriente, flujo y potencia 84 y se suministra de vuelta a un bloque de detección de límite de corriente 85. El bloque de detección de límite de corriente 85 monitoriza la corriente de estator real para detectar si la magnitud de la corriente se hace demasiado grande. Si la magnitud de la corriente de estator real aumenta por encima de un umbral predefinido se envía una señal a un bloque lógico de limitación de corriente 86. El bloque lógico de limitación de corriente 86 está conectado a la salida del bloque PI 82 y limita la corriente equivalente de manera que la corriente de funcionamiento máxima del generador se fija al valor nominal. De manera alternativa, el bloque de detección de límite de corriente 85, si la corriente de estator real aumenta por encima del umbral predefinido, puede enviar una señal al bloque PCCL 81, tal como se indica mediante la flecha 85a, para sustituir la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real por un valor cero para limitar la corriente equivalente. Tal como se dio a conocer anteriormente, limitar la corriente equivalente permitirá fijar la corriente de funcionamiento máxima del generador al valor nominal.

Cuando se fija la corriente de funcionamiento del generador, el bloque PCCL 81 preferiblemente monitoriza el signo de la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real para eliminar el valor cero y restaurar el valor de la diferencia cuando el signo cambia.

Para obtener una corriente de estator mínima para una potencia activa dada proporcionada por el generador, se define un vector de flujo del estator de referencia (Ψ^*_s) como una suma vectorial de una primera componente de vector de flujo del estator (Ψ^*_{s1}) y una segunda componente de vector de flujo del estator (Ψ^*_{s2}) que se sitúa a un ángulo de 90 grados con respecto a la primera componente de vector de flujo del estator tal como se indica mediante el bloque de adelanto de fase indicado como "j" en la figura. La suma vectorial se logra en el marco de referencia estacionario.

En un primer bloque de generación de vector 87, el vector de referencia de flujo del estator Ψ^*_{s1} se calcula a partir de la magnitud de componente de flujo de magnetización y el ángulo del eje del flujo del rotor (θ_r) en relación con el eje α . Más específicamente, el vector de referencia de flujo del estator Ψ^*_{s1} puede calcularse como:

$$\psi_{\alpha_s1} = \psi_{mag} * \cos(\theta_{rotor}) \quad y \quad \psi_{\beta_s1} = \psi_{mag} * \sin(\theta_{rotor})$$

Dependiendo del tipo de generador usado, el flujo de magnetización puede determinarse de muchas maneras diferentes. Más específicamente, en caso de que el generador sea un generador de imanes permanentes, el flujo de magnetización se fija mediante el material magnético en el rotor y la construcción real del generador. Si el generador es por ejemplo un generador de inducción, el flujo de magnetización puede determinarse mediante mediciones del flujo del estator y la posición del rotor.

De manera similar un segundo bloque de generación de vector 88 calcula el vector de referencia de flujo del estator Ψ^*_{s2} a partir de la magnitud de componente de flujo de producción de potencia/par motor (correspondiente a la salida de corriente equivalente del PCCL 81) como:

$$\psi_{\alpha_s2} = \psi_{par\ motor} * \cos(\theta_{rotor} + 90^\circ) \quad y \quad \psi_{\beta_s2} = \psi_{par\ motor} * \sin(\theta_{rotor} + 90^\circ)$$

El vector de referencia de flujo total Ψ^*_s se calcula entonces según:

$$\psi_{\alpha}^* = \psi_{\alpha_s1} + \psi_{\alpha_s2} \quad y \quad \psi_{\beta}^* = \psi_{\beta_s1} + \psi_{\beta_s2}$$

Puesto que la corriente de estator se refiere al flujo del estator mediante

$$\psi_{s2}^* = I_s * L_s$$

una limitación de la salida del PCCL 81 limitará por tanto el vector de referencia de flujo del estator.

El error de fase impuesto en la implementación de tiempo discreta puede mitigarse usando una extrapolación lineal en el bloque de "Compensación de predicción de fase de vector de flujo" 83.

Tal como se dio a conocer anteriormente, el vector de flujo del estator de referencia puede usarse entonces junto con el vector de flujo del estator real para determinar un vector de diferencia de flujo del estator que puede usarse mediante un bloque PWM 89 para controlar los conmutadores del convertidor del lado del generador.

El control predictivo para mitigar el error de fase del vector de flujo del estator se consigue tal como se muestra en la

figura 8. La predicción se lleva a cabo en coordenadas polares y genera el vector de flujo del estator Ψ_{ps}^* . El vector de flujo del estator estimado Ψ_s se compara tal como se muestra con el vector de flujo del estator de referencia predicho y el vector de error $\Delta\Psi_s$ define los estados de conmutación para controlar la potencia activa y el vector de flujo del estator en el marco de referencia estacionario.

El principio de la limitación de corriente en la generación de vector de flujo del estator de referencia se muestra en la figura 9. El hecho de que no sea necesaria la magnetización para una máquina de rotor magnetizado como la máquina PM montada en superficie o una máquina síncrona alimentada por rotor, puede aprovecharse para definir la magnitud de vector de flujo de referencia deseada. La figura 9 ilustra esto. El vector de corriente necesario en tal control es sólo para satisfacer la demanda de potencia activa y no para establecer ningún flujo en la máquina. Por tanto, la magnitud de vector de corriente mínima que puede conseguir este requisito debería trazarse a lo largo de una dirección perpendicular al vector de flujo del rotor.

Si la máquina ha de usarse como motor, el vector de corriente adelantará el vector de flujo del rotor, en caso contrario retrasará el vector de flujo del rotor tal como se muestra en la figura. Por tanto, la componente del vector de flujo de referencia que contribuye al par motor o potencia activa puede derivarse directamente con la información de esta ubicación del vector de corriente. Esto implica la entrada de la ubicación del vector de flujo del rotor, que está disponible de la posición y/o el codificador incremental unido al árbol de la máquina. Para generadores con saliencias en la estructura del rotor, puede incorporarse un funcionamiento sin sensores midiendo la tensión y las corrientes eliminando de ese modo 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 una componente de desmagnetización del vector de flujo del estator. Tal componente también puede ser necesaria cuando se emplea una máquina PM interior para la generación de potencia.

La figura 10 muestra el algoritmo de implementación del bloque controlador PI (Proporcional e Integral) de potencia 82 con la característica de limitación de la corriente de estator según la presente invención. En condiciones de funcionamiento normales, la salida del controlador de potencia 81 define la magnitud de la referencia de flujo del estator de producción de par motor. La referencia de flujo del estator de magnetización se fija a un valor nominal constante. Puesto que sólo se permite cambiar la referencia de flujo del estator de producción de par motor, la corriente de estator se limita de manera eficaz cuando se congela el flujo del estator.

En la figura 10 el algoritmo comienza en la etapa 1010 en la que se determina si la corriente de estator es mayor que un límite superior predeterminado de la corriente de estator.

De ser así, el algoritmo continúa a la etapa 1015 en la que se establece una variable para indicar que se ha alcanzado el límite superior de la corriente, tras lo cual el algoritmo continúa a la etapa 1020. Si no, el algoritmo continúa directamente a la etapa 1020 en la que se determina si la corriente de estator es inferior a un límite bajo de la corriente de estator predeterminado.

De ser así, el algoritmo continúa a la etapa 1025 en la que se establece una variable para indicar que se ha alcanzado el límite inferior de la corriente, tras lo cual el algoritmo continúa a la etapa 1030. Si no, el algoritmo continúa directamente a la etapa 1030 en la que se determina si se ha alcanzado el límite alto de la corriente y, de ser así, las variables del regulador se reestablecen en la etapa 1035.

En la etapa 1040 la salida del regulador se calcula usando un algoritmo PI (proporcional e integral). En el algoritmo el valor proporcional determina la reacción al error de señal multiplicando la entrada por una ganancia proporcional discreta (k_p_d). El valor integral determina la reacción basándose en la suma de errores recientes multiplicando la diferencia entre la entrada de corriente y la entrada anterior por una ganancia integral discreta (k_i_d).

En la etapa 1050 el algoritmo determina si la salida del controlador ha alcanzado un valor correspondiente a una magnitud de componente de flujo de producción de potencia/par motor máxima.

De ser así, el algoritmo continúa a la etapa 1055 en la que la salida se fija a un valor límite positivo predeterminado tras lo cual el algoritmo continúa a la etapa 1060. Si no, el algoritmo continúa directamente a la etapa 1060 en la que se determina si la salida del controlador ha alcanzado un valor correspondiente a una magnitud de componente de flujo de producción de potencia/par motor mínima.

De ser así, el algoritmo continúa a la etapa 1065 en la que la salida se fija a un valor límite negativo predeterminado tras lo cual el algoritmo continúa a la etapa 1070. Si no, el algoritmo continúa directamente a la etapa 1070 en la que las variables del regulador se actualizan.

La invención se ha descrito anteriormente con referencia principalmente a algunas realizaciones. Sin embargo, como apreciará fácilmente un experto en la técnica, son posibles igualmente otras realizaciones distintas de las dadas a conocer anteriormente dentro del alcance de la invención, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método para generar un vector de referencia de flujo del estator Ψ_s^* para controlar un generador (11, 51, 71) que comprende un estator y un rotor, comprendiendo dicho método:

5 determinar una primera componente de vector de referencia de flujo del estator Ψ_{s1}^* correspondiente a un flujo de magnetización Ψ_{mag} de una magnitud deseada para el generador (11, 51, 71),

determinar una magnitud de una corriente equivalente correspondiente a un flujo del estator de producción de potencia y/o par motor $\Psi_{par\ motor}$ de una magnitud deseada para el generador,

determinar una corriente de estator real $|i_s|$ y limitar la magnitud de la corriente equivalente si la corriente de estator real está por encima de un umbral predefinido ($I_{sm\acute{a}x}$),

10 determinar una segunda componente de vector de referencia de flujo del estator $\Psi_{s2}^* = I_s \cdot L_s$ basándose en la corriente equivalente limitada, y

determinar un vector de referencia de flujo del estator Ψ_s^* basándose en las componentes de vector de referencia de flujo del estator primera y segunda.
- 15 2. Método según la reivindicación 1, en el que la primera componente de vector de referencia de flujo del estator se basa en el flujo de magnetización y una posición angular del rotor.
3. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 ó 2, en el que la segunda componente de vector de referencia de flujo del estator se basa en el flujo del estator de producción de potencia y/o par motor y una posición angular del rotor.
- 20 4. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en el que la segunda componente de referencia de vector de flujo del estator está adelantada con respecto a la primera componente de vector de referencia de flujo del estator en 90°.
5. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-4, que comprende

determinar un valor de referencia de potencia correspondiente a una potencia de salida de una magnitud deseada del generador (11, 51, 71),

25 comparar el valor de referencia de potencia con un valor de potencia real correspondiente a la potencia de salida real del generador (11, 51, 71) y

determinar la magnitud de la corriente equivalente basándose en la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real.
- 30 6. Método según la reivindicación 5, en el que la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real se sustituye por un valor cero para determinar la magnitud de la corriente equivalente si la corriente de estator real está por encima del umbral predefinido.
7. Método según la reivindicación 6, en el que la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real se restaura para determinar la magnitud de la corriente equivalente si se altera el signo de la diferencia.
- 35 8. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-7, en el que la magnitud de la corriente equivalente se ajusta basándose en una velocidad de giro del generador (11, 51, 71).
9. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5-8, en el que el estator del generador (11, 51, 71) está conectado a conmutadores (52, 53) en un convertidor de potencia (13) y los conmutadores (52, 53) se accionan en correspondencia con el vector de referencia de flujo del estator total determinado para adaptar

40 al menos una magnitud eléctrica de estator para obtener dicha magnitud de potencia de generador deseada.
10. Método según la reivindicación 9, que comprende

estimar un vector de flujo del estator real del generador (11, 51, 71),

45 determinar un vector de diferencia de flujo del estator entre el vector de referencia de flujo del estator total determinado y el vector de flujo del estator estimado, y

accionar dichos conmutadores (52, 53) en correspondencia con el vector de diferencia de flujo del estator determinado para adaptar al menos una magnitud eléctrica de estator para obtener dicha magnitud de potencia de generador deseada.

11. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-10, en el que el generador (11, 51, 71) es un generador de imanes permanentes (11, 51, 71), un generador bobinado (11, 51, 71) o un generador de inducción (11, 51, 71).
- 5 12. Aparato para generar un vector de referencia de flujo del estator Ψ_s^* para controlar un generador (11, 51, 71) que comprende un estator y un rotor, comprendiendo dicho aparato:

un primer generador de vector (87) para determinar una primera componente de vector de referencia de flujo del estator Ψ_{s1}^* correspondiente a un flujo de magnetización Ψ_{mag} de una magnitud deseada para el generador (11, 51, 71),

10 un controlador de potencia (79, 81, 82) para determinar una magnitud de corriente equivalente correspondiente a un flujo del estator de producción de potencia y/o par motor $\Psi_{par\ motor}$ de una magnitud deseada para el generador (11, 51, 71), y

un combinador para determinar un vector de referencia de flujo del estator Ψ_s^* basándose en la primera componente de vector de referencia de flujo del estator Ψ_{s1}^* y una segunda componente de vector de referencia de flujo del estator, caracterizado por

15 un limitador de corriente (86) para determinar una corriente de estator real $|i_s|$ y limitar la magnitud de la corriente equivalente si la corriente de estator real está por encima de un umbral predefinido ($i_{s\ max}$) y

un segundo generador de vector (88) para determinar la segunda componente de vector de referencia de flujo del estator $\Psi_{s2}^* = i_s \cdot L_s$ basándose en la corriente equivalente limitada.
- 20 13. Aparato según la reivindicación 12, en el que el primer generador de vector (87) está adaptado para determinar la primera componente de vector de referencia de flujo del estator basándose en el flujo de magnetización y una posición angular del rotor.
14. Aparato según la reivindicación 12 ó 13, en el que el segundo generador de vector (88) está adaptado para determinar la segunda componente de vector de referencia de flujo del estator basándose en el flujo del estator de producción de potencia y/o par motor y una posición angular del rotor.
- 25 15. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12-14, que comprende un bloque de adelanto de fase para situar la segunda componente de referencia de vector de flujo del estator con un adelanto de 90° con respecto a la primera componente de vector de referencia de flujo del estator.
16. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12-15, que comprende

30 una entrada para recibir un valor de referencia de potencia correspondiente a una potencia de salida de una magnitud deseada del generador (11, 51, 71),

un comparador para comparar el valor de referencia de potencia con un valor de potencia real correspondiente a la potencia de salida real del generador (11, 51, 71), en el que el controlador de potencia (79, 81, 82) está adaptado para determinar la magnitud de corriente equivalente basándose en la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real.
- 35 17. Aparato según la reivindicación 16, en el que el controlador de potencia (79, 81, 82) está adaptado para sustituir la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real por un valor cero para determinar la magnitud de la corriente equivalente si la corriente de estator real está por encima del umbral predefinido.
- 40 18. Aparato según la reivindicación 17, en el que el controlador de potencia (79, 81, 82) está adaptado para restaurar la diferencia entre el valor de referencia de potencia y el valor de potencia real i para determinar la magnitud de la corriente equivalente si se altera el signo de la diferencia.
19. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12-18, en el que el controlador de potencia (79, 81, 82) está adaptado para ajustar la magnitud de la corriente equivalente basándose en una velocidad de giro del generador (11, 51, 71).
- 45 20. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 16-19, en el que el estator del generador (11, 51, 71) está conectado a conmutadores (52, 53) en un convertidor de potencia (79, 81, 82) y el convertidor de potencia (79, 81, 82) está adaptado para accionar los conmutadores (52, 53) en correspondencia con el vector de referencia de flujo del estator total determinado para adaptar al menos una magnitud eléctrica de estator para obtener dicha magnitud de potencia de generador deseada.
- 50 21. Aparato según la reivindicación 20, que comprende:

un calculador de flujo (78) para estimar un vector de flujo del estator real del generador,

- 5 un comparador para determinar un vector de diferencia de flujo del estator entre el vector de referencia de flujo del estator total determinado y el vector de flujo del estator estimado, en el que el convertidor de potencia (79, 81, 82) está adaptado para accionar dichos conmutadores (52, 53) en correspondencia con el vector de diferencia de flujo del estator determinado para adaptar al menos una magnitud eléctrica de estator para obtener dicha magnitud de potencia de generador deseada.
22. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12-21, en el que el generador (11, 51, 71) es un generador de imanes permanentes (11, 51, 71), un generador bobinado (11, 51, 71) o un generador de inducción.

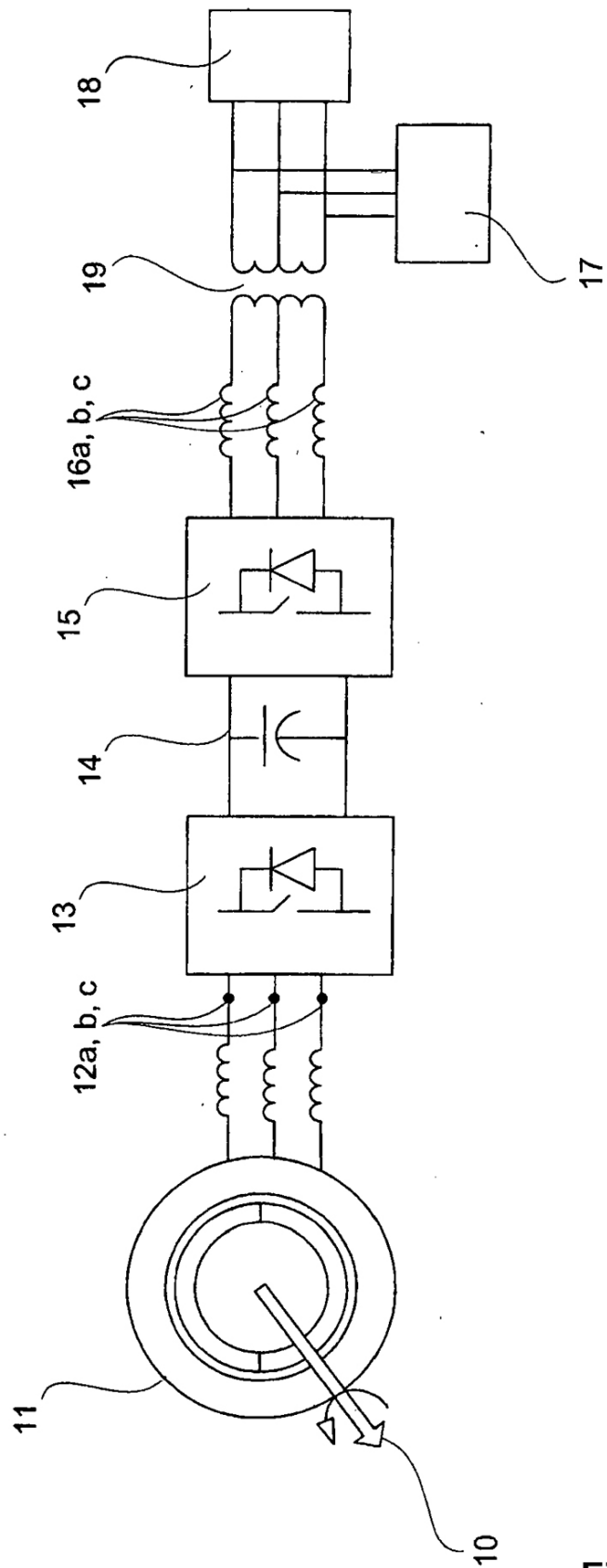


Figura 1

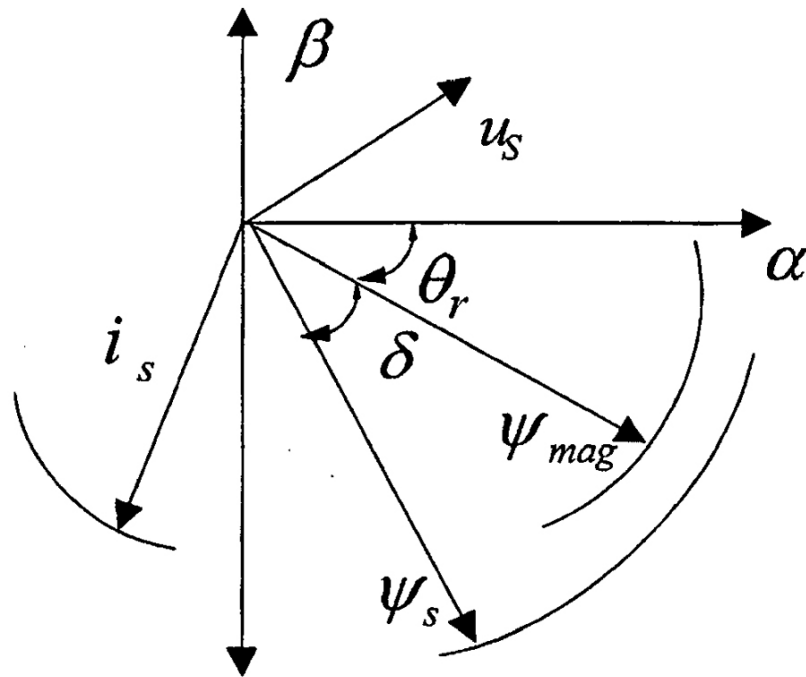


Figura 2

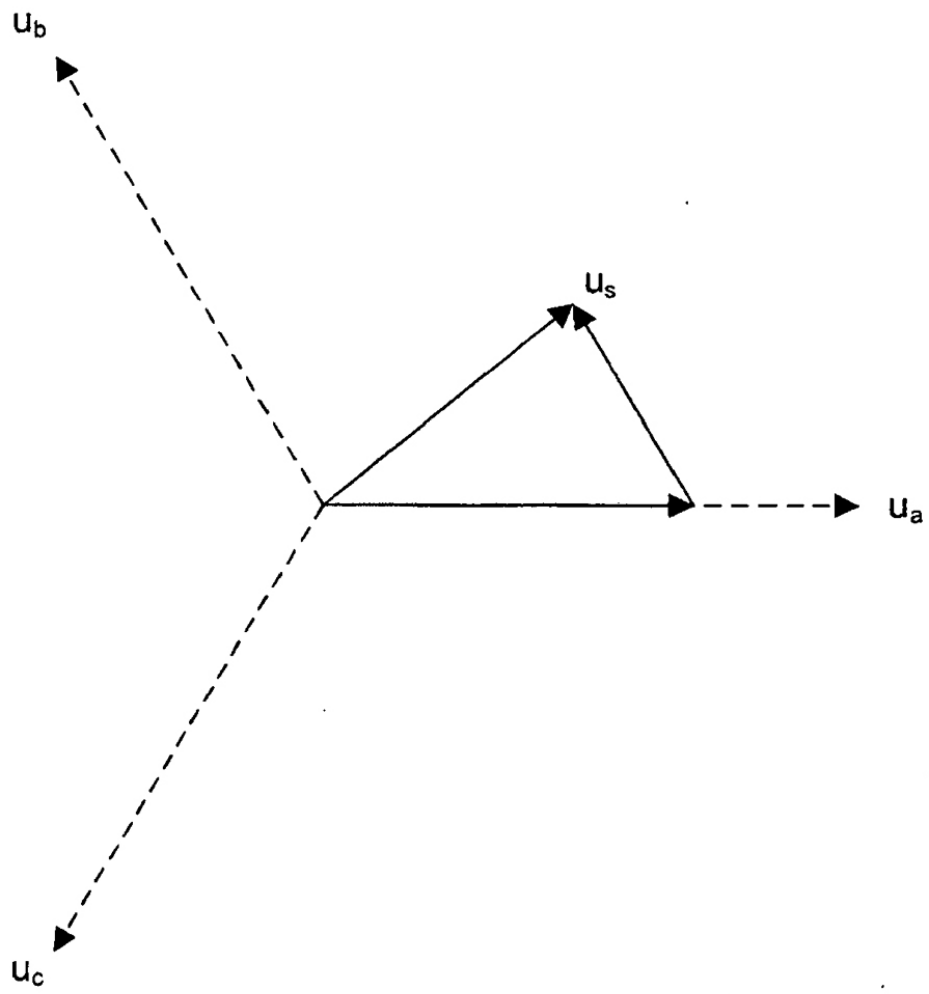


Figura 3

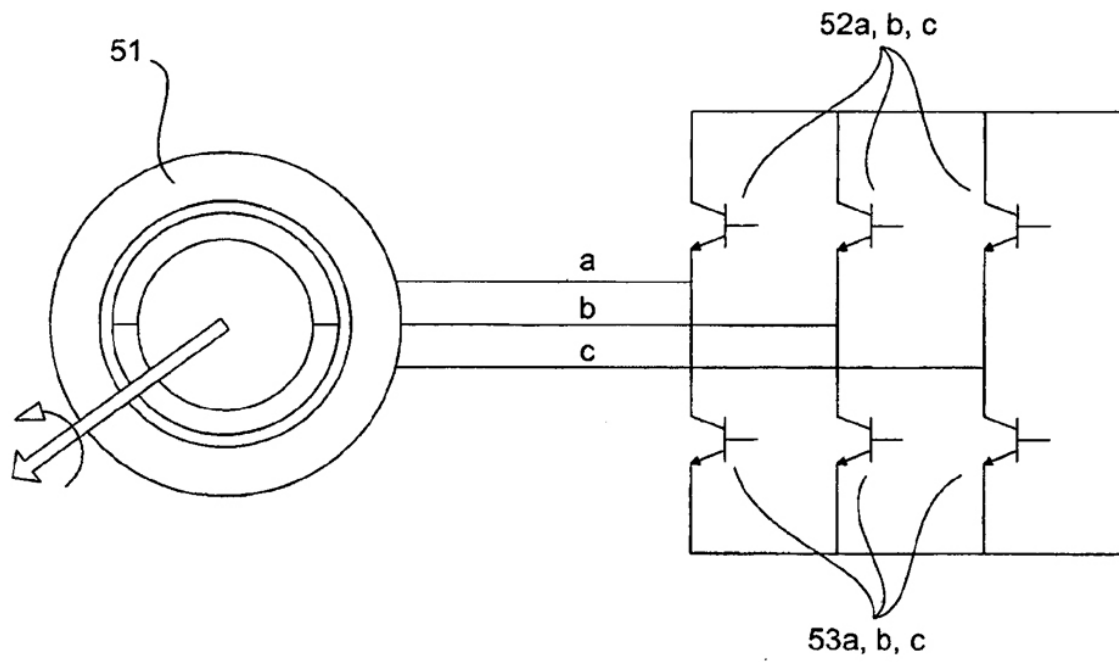


Figura 4a

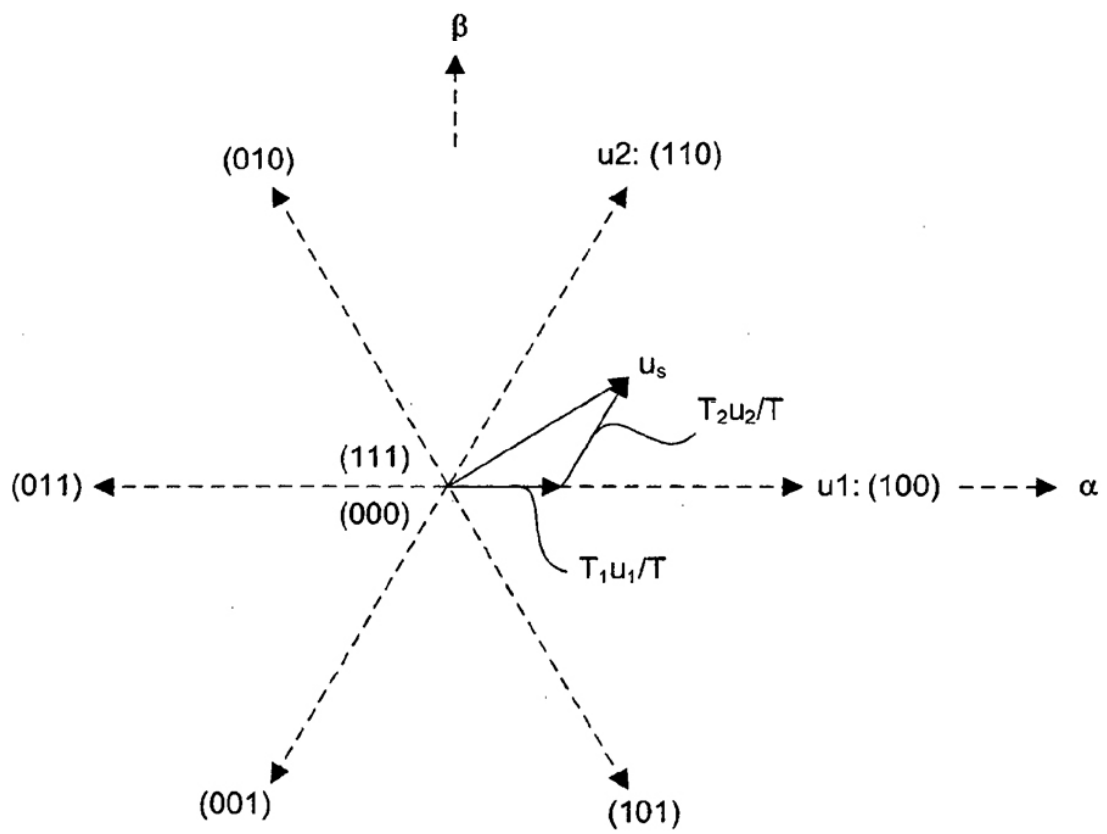


Figura 4b

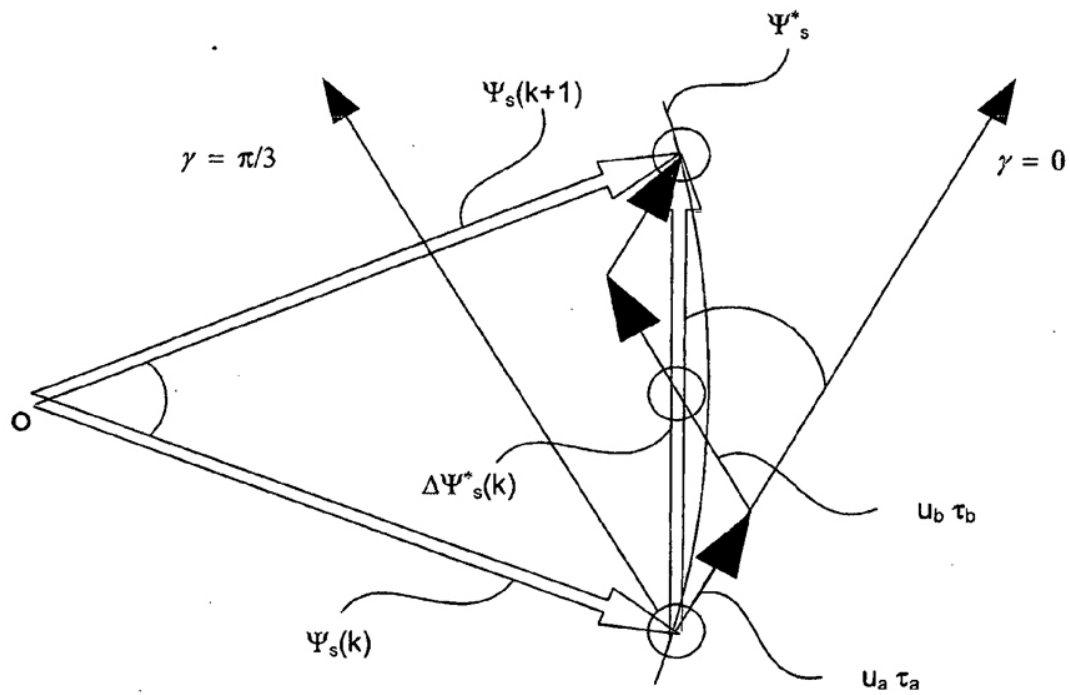


Figura 5a

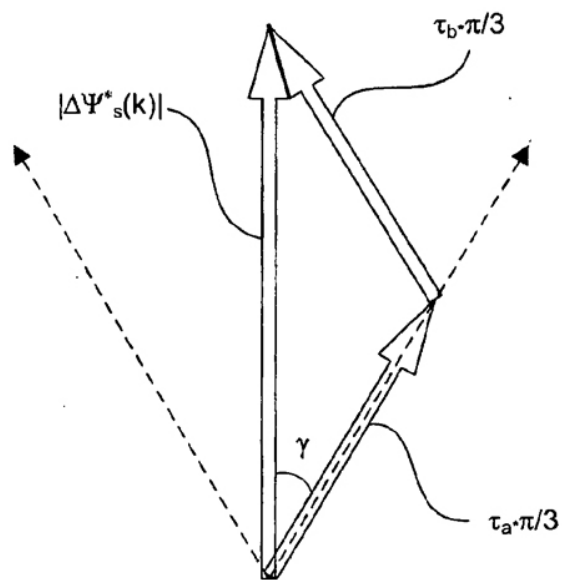


Figura 5b

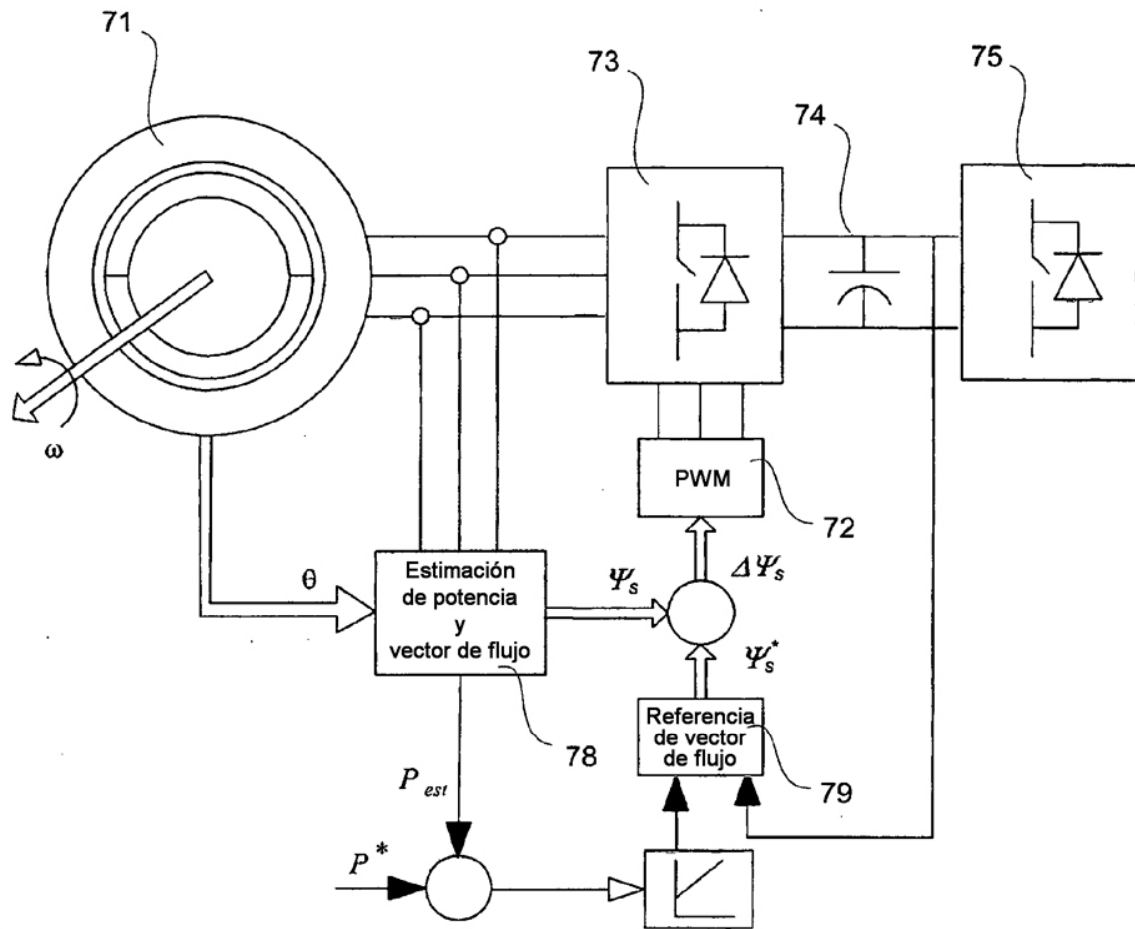


Figura 6

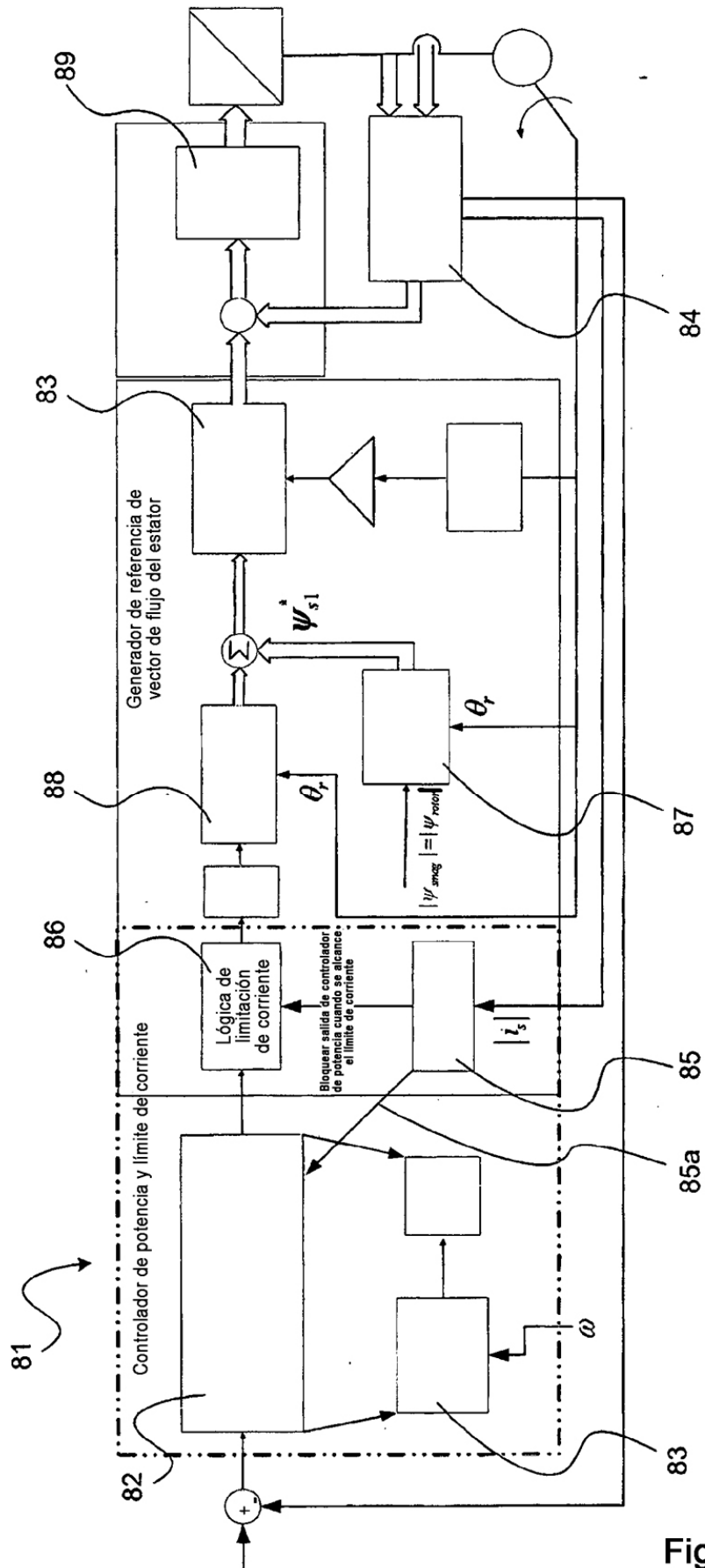


Figura 7

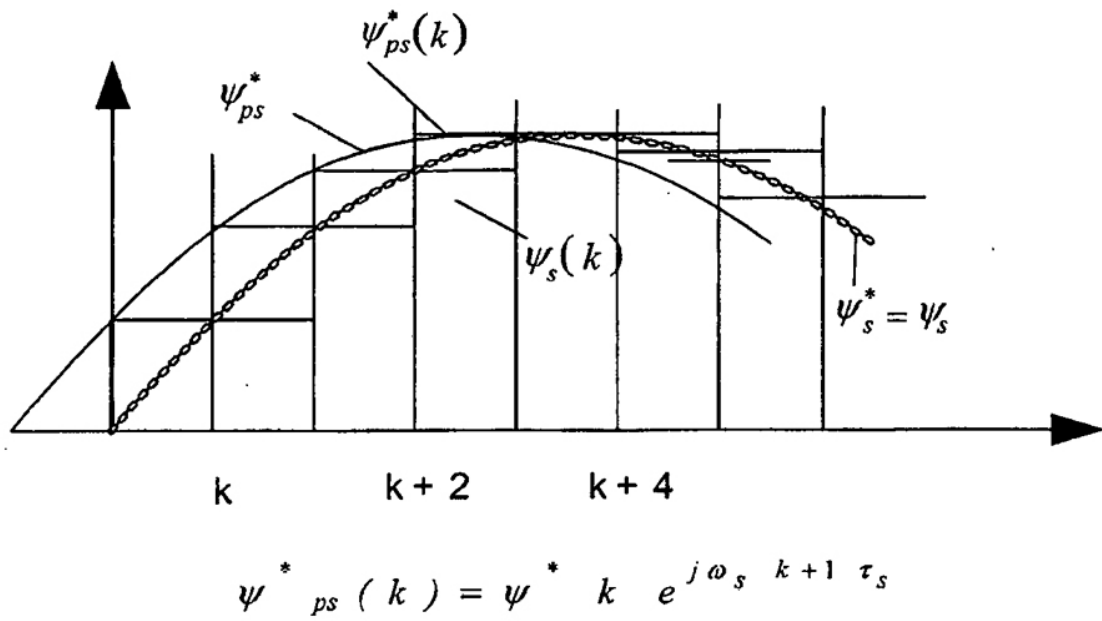


Figura 8

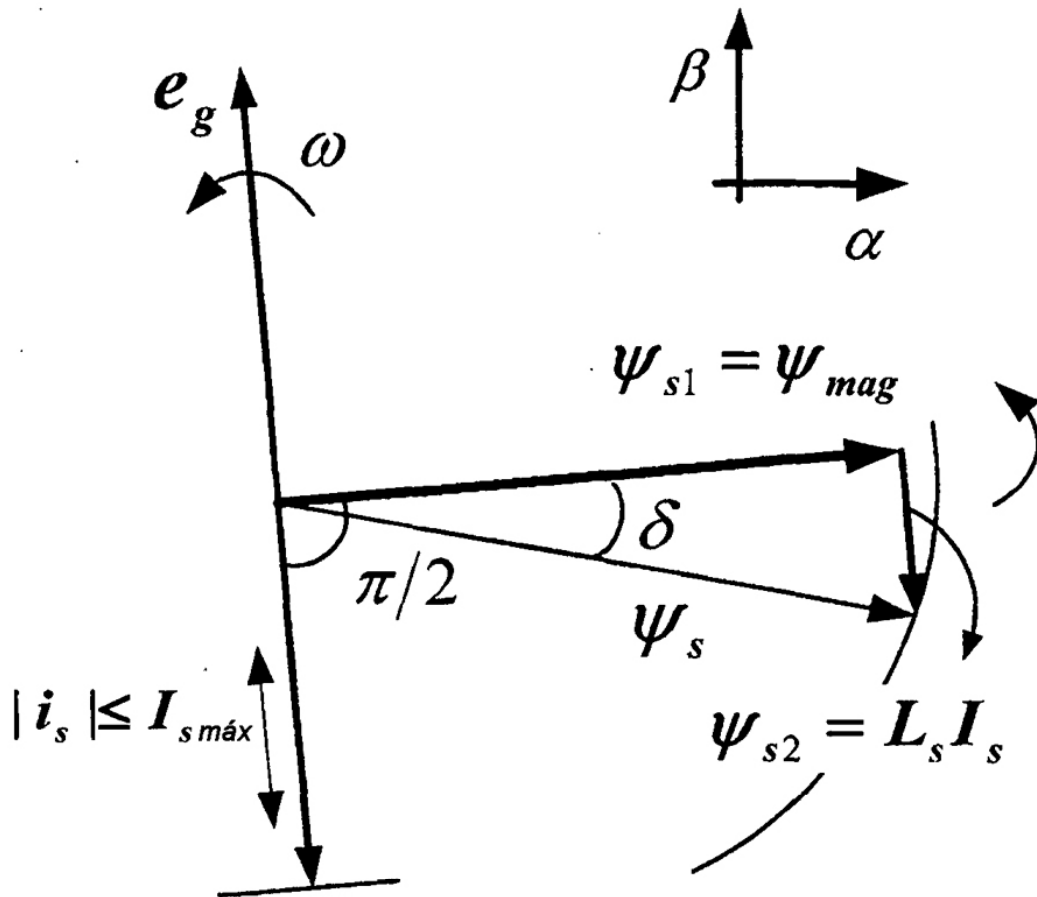


Figura 9

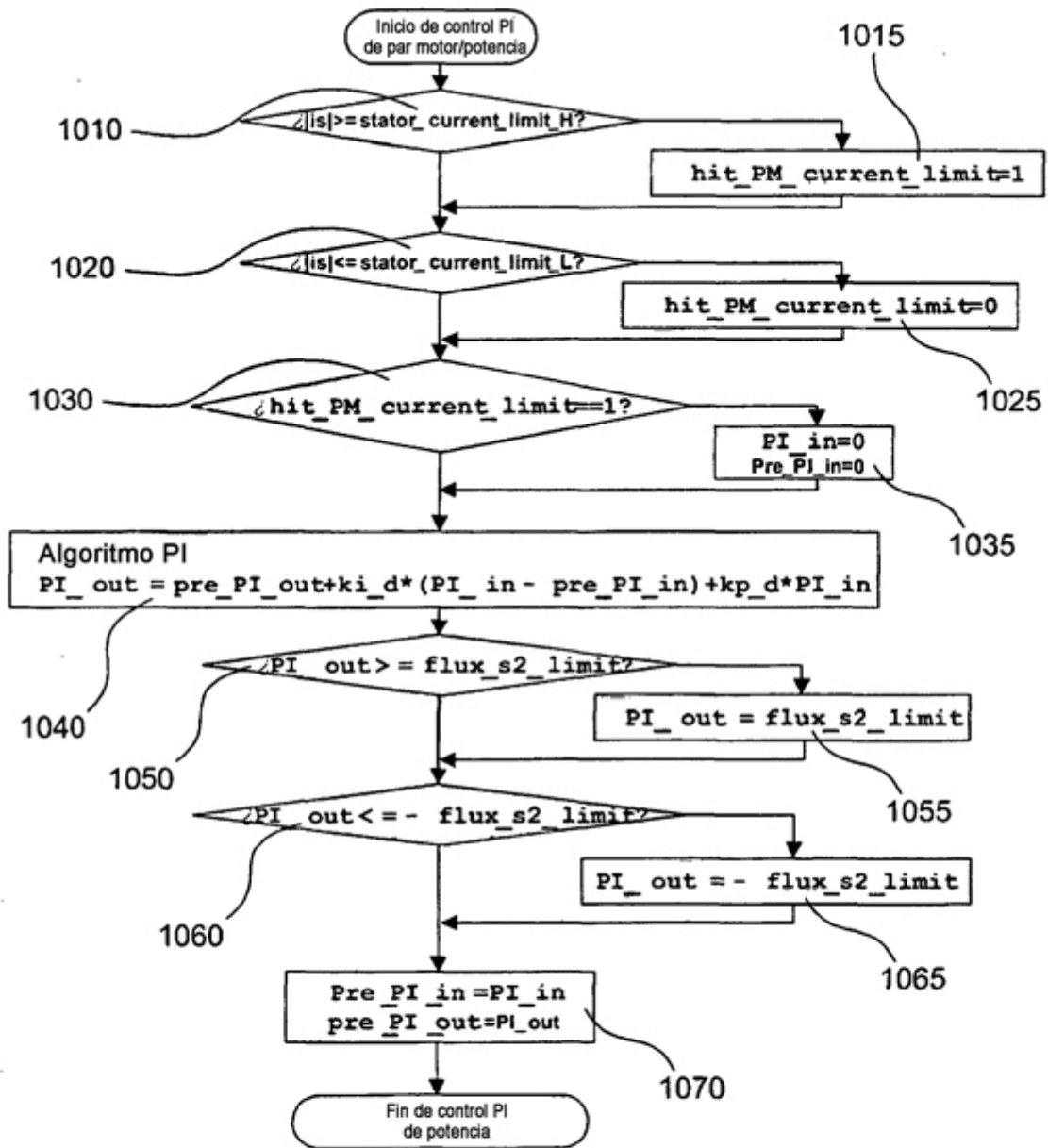


Figura 10