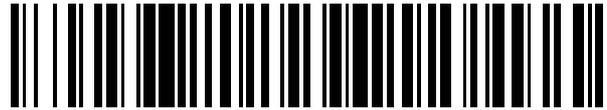


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 550 506**

51 Int. Cl.:

H02M 7/5387 (2007.01)

H02J 3/38 (2006.01)

H02M 7/483 (2007.01)

H02M 7/539 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.08.2011 E 11746158 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.09.2015 EP 2606548**

54 Título: **Método de control de un convertidor de lado de red de una turbina eólica y sistema adecuado para el mismo**

30 Prioridad:

18.08.2010 US 374646 P
18.08.2010 DK 201070365

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
10.11.2015

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

GUPTA, AMIT KUMAR;
ANSHUMAN, TRIPATHI y
CAO, SHU YU

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 550 506 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de control de un convertidor de lado de red de una turbina eólica y sistema adecuado para el mismo

Campo técnico

5 La presente invención se refiere de manera general a un método de control de un convertidor de lado de red de una turbina eólica y a un sistema adecuado para el mismo. Además, la presente invención se refiere a una turbina eólica. El documento IEEE "Control of Grid Interactive AC Micro-grids" da a conocer un sistema de control para el convertidor de lado de red de una turbina eólica cuyo sistema de control calcula una tensión-seg de convertidor.

Antecedentes

10 Con el fin de conectar eléctricamente un generador de turbina eólica a una red eléctrica, pueden usarse varias disposiciones de conexión eléctrica. Una disposición de conexión eléctrica típica (por ejemplo, para una turbina basada en convertidor de escala completa) comprende un convertidor de lado de generador, un enlace de CC (corriente continua), un convertidor de lado de red y un transformador de red que están situados entre el generador de turbina eólica y la red eléctrica en este orden. El convertidor de lado de generador controla la potencia del generador y la transfiere a la red a través del enlace de CC y el convertidor de lado de red. El control del convertidor de lado de red debe llevarse a cabo de manera que la calidad de la energía eléctrica suministrada a la red se mantiene dentro de intervalos de tolerancia predeterminados incluso durante condiciones anómalas de la tensión de red como condiciones de sobretensión y caídas de tensión simétricas/asimétricas. En caso de condiciones anómalas de la tensión de red, puede ser necesario un soporte de potencia reactiva para satisfacer los requisitos de la red. Es decir, es necesario que la potencia que se suministra a la red tenga, además de una componente de potencia activa, una componente de potencia reactiva. Durante condiciones de trabajo normales, podría ser necesaria la componente de potencia reactiva dependiendo del requisito de soporte de red. El soporte de potencia reactiva es cada vez más importante debido a los requisitos de conexión a red que son cada vez más estrictos a medida que aumenta la adopción de la energía eólica.

25 Por tanto, es un objeto proporcionar un método de control de una turbina eólica que pueda soportar la calidad de potencia demandada incluso durante condiciones de tensión anómalas. Además, este método debería ser fácil de llevar a cabo.

Sumario

30 Según una realización de la presente invención, se proporciona un método de control de un convertidor de lado de red de una turbina eólica, en el que una salida del convertidor de lado de red está conectada o puede conectarse a través de una línea eléctrica a una entrada de un transformador de red, comprendiendo el método: a) determinar los voltio-seg de convertidor que tienen lugar en la salida del convertidor de lado de red basándose en una tensión de convertidor que tiene lugar en la salida del convertidor de lado de red; b) determinar un error en voltio-seg entre los voltio-seg de convertidor determinados/reales y una referencia en voltio-seg de convertidor, en el que la referencia en voltio-seg de convertidor se determina basándose en una referencia de potencia activa, una referencia de potencia reactiva, una corriente de línea y una tensión de línea que tienen lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica); y c) controlar, basándose en el error en voltio-seg determinado, el convertidor de lado de red de manera que se compensa (parcial o totalmente) el error en voltio-seg. El término "voltio-seg" significa voltio-segundos. Es una entidad vectorial y es equivalente al flujo magnético en máquinas de CA. Según una realización de la presente invención, este procedimiento puede estar soportado por una predicción de voltio-seg, tal como resultará evidente más adelante.

Según una realización de la presente invención, la referencia en voltio-seg de convertidor se determina basándose en una referencia en voltio-seg de potencia activa, una referencia en voltio-seg de potencia reactiva, una corriente de línea y una tensión de línea.

45 Según una realización de la presente invención, la referencia en voltio-seg de potencia activa se determina basándose en una diferencia entre una referencia de demanda de potencia activa en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica) y una potencia activa que tiene lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica).

50 Según una realización de la presente invención, la referencia en voltio-seg de potencia reactiva se determina basándose en una diferencia entre una referencia de demanda de potencia reactiva en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica) y una potencia reactiva que tiene lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica).

Según una realización de la presente invención, la referencia en voltio-seg de potencia activa y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva se congelan respectivamente si la amplitud de la corriente de línea que tiene lugar en la entrada del transformador de red supera un valor umbral predeterminado.

55 Según una realización de la presente invención, la potencia activa y la potencia reactiva se determinan basándose

en la corriente de línea y la tensión de línea que tienen lugar en la entrada del transformador de red.

Según una realización de la presente invención, determinar la referencia en voltio-seg de convertidor comprende generar una primera referencia en voltio-seg que depende de la referencia en voltio-seg de potencia activa y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva.

- 5 Según una realización de la presente invención, la primera referencia en voltio-seg se genera como vector de voltio-seg de marco $\alpha\beta$.

Según una realización de la presente invención, determinar la referencia en voltio-seg de convertidor comprende generar una segunda referencia en voltio-seg añadiendo los voltio-seg de red a la primera referencia en voltio-seg.

- 10 Según una realización de la presente invención, los voltio-seg de red se determinan basándose en al menos una de la corriente de línea y la tensión de línea que tienen lugar en la entrada del transformador de red.

Según una realización de la presente invención, determinar la referencia en voltio-seg de convertidor comprende realizar una predicción de los voltio-seg de convertidor que deberían tener lugar en el siguiente ciclo de muestreo basándose en la segunda referencia en voltio-seg, una velocidad angular de la tensión de línea que tiene lugar en la entrada del transformador de red y un periodo de muestreo del convertidor de lado de red, y usar los voltio-seg de convertidor predichos como referencia en voltio-seg de convertidor.

- 15

Según una realización de la presente invención, controlar el convertidor de lado de red se lleva a cabo suministrando, dependiendo del error en voltio-seg determinado, señales de modulación por ancho de pulso al convertidor de lado de red que ajustan la tensión de salida del convertidor de lado de red en consonancia.

- 20 Según una realización de la presente invención, la compensación del error en voltio-seg ($\Delta\phi_c$) se lleva a cabo usando una técnica de conmutación PWM en la región lineal del funcionamiento del convertidor de lado de red, y usando una técnica de sobremodulación en la región no lineal del funcionamiento del convertidor de lado de red. Por tanto, a diferencia de enfoques convencionales de controles de corriente, esta realización extiende de manera natural el funcionamiento del convertidor de lado de red para usar mejor el enlace de CC. Además, la técnica de compensación de error en voltio-seg ($\Delta\phi_c$) encaja muy bien de manera natural con la modulación de vectores espaciales.
- 25

Según una realización de la presente invención, se proporciona un sistema de control para controlar un convertidor de lado de red de una turbina eólica, estando conectada o pudiendo conectarse una salida del convertidor de lado de red a través de una línea eléctrica a una entrada de un transformador de red. El sistema de control comprende un lazo de control interno y un lazo de control externo. El lazo de control interno comprende: una unidad de determinación de voltio-seg de convertidor que determina los voltio-seg de convertidor que tienen lugar en la salida del convertidor de lado de red basándose en una tensión de convertidor que tiene lugar en la salida del convertidor de lado de red; una unidad de determinación de error en voltio-seg que determina un error en voltio-seg entre los voltio-seg de convertidor determinados y una referencia en voltio-seg de convertidor; y una unidad de control que controla, basándose en el error en voltio-seg determinado, el convertidor de lado de red de manera que se compensa el error en voltio-seg, en el que el lazo de control externo está configurado para determinar la referencia en voltio-seg de convertidor basándose en la demanda de potencia activa y la demanda de potencia reactiva (referencia de potencia activa y reactiva), una tensión de línea y una corriente de línea que tienen lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica).

- 30
- 35

Según una realización de la presente invención, el lazo de control externo comprende una unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia activa y una unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia reactiva que determinan una referencia en voltio-seg de potencia activa y una referencia en voltio-seg de potencia reactiva basándose en (1) una referencia de potencia activa y la potencia activa que tiene lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica) (2) una referencia de potencia reactiva y la potencia reactiva que tiene lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica).

- 40

Según una realización de la presente invención, la unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia activa determina la referencia en voltio-seg de potencia activa basándose en una diferencia entre una referencia de potencia activa y una potencia activa que tiene lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica).

- 45

Según una realización de la presente invención, la unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia reactiva determina la referencia en voltio-seg de potencia reactiva basándose en una diferencia entre una referencia de potencia reactiva y una potencia reactiva que tiene lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica).

- 50

Según una realización de la presente invención, el lazo de control externo comprende una unidad de limitación de corriente que hace que la referencia en voltio-seg de potencia activa y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva se congelen respectivamente si la amplitud de la corriente de línea que tiene lugar en la entrada del transformador de red supera un valor umbral predeterminado.

- 55

Según una realización de la presente invención, el lazo de control externo comprende una unidad de determinación de potencia activa y una unidad de determinación de potencia reactiva que determinan la potencia activa y potencia reactiva basándose en la corriente de línea y la tensión de línea que tienen lugar en la entrada del transformador de red, respectivamente.

- 5 Según una realización de la presente invención, el lazo de control externo comprende una unidad de generación de vector de voltio-seg de marco $\alpha\beta$ que genera una primera referencia en voltio-seg como vector de voltio-seg de marco $\alpha\beta$ que depende de la referencia en voltio-seg de potencia activa, la referencia en voltio-seg de potencia reactiva y un ángulo de la tensión de línea.

- 10 Según una realización de la presente invención, el lazo de control externo comprende una segunda unidad de generación de referencia en voltio-seg que genera una segunda referencia en voltio-seg añadiendo los voltio-seg de red a la primera referencia en voltio-seg.

Según una realización de la presente invención, el lazo de control externo comprende una unidad de determinación de voltio-seg de red que determina los voltio-seg de red basándose en al menos una de la corriente de línea y la tensión de línea que tienen lugar en la entrada del transformador de red.

- 15 Según una realización de la presente invención, el lazo de control externo comprende una unidad de predicción de referencia en voltio-seg de convertidor que predice los voltio-seg de convertidor para el siguiente ciclo de muestreo basándose en la segunda referencia en voltio-seg, una velocidad angular de la tensión de línea que tiene lugar en la entrada del transformador de red y un periodo de muestreo del convertidor de lado de red, y emite los voltio-seg de convertidor predichos como referencia en voltio-seg de convertidor.

- 20 Según una realización de la presente invención, el lazo de control interno comprende una unidad de PWM que controla, dependiendo del error en voltio-seg determinado, la tensión de salida del convertidor de lado de red suministrando señales de modulación por ancho de pulso al convertidor de lado de red.

- 25 Según una realización de la presente invención, se proporciona una turbina eólica que comprende un generador de potencia (máquina de CA) y un convertidor de lado de red, en la que el generador de potencia está conectado al convertidor de lado de red a través de un convertidor de lado de generador y un enlace de CC que conecta el convertidor de lado de generador con el convertidor de lado de red, y en la que la turbina eólica comprende un sistema de control para controlar el convertidor de lado de red de la turbina eólica.

- 30 Según una realización de la presente invención, con el fin de compensar el error en voltio-seg (es decir, compensar el error en voltio-seg entre los voltio-seg de convertidor determinados y una referencia en voltio-seg de convertidor, también denominado "compensación en voltio-seg (voltio-segundos)"), puede usarse cualquier técnica de PWM. De entre las diversas técnicas de PWM, se conoce la modulación de vectores espaciales (SVM) por sus diversas ventajas. El enfoque de compensación en voltio-seg encaja de manera natural con la técnica de SVM.

- 35 Según una realización de la presente invención, el lazo de control externo puede hacerse funcionar a un ancho de banda bajo, mientras que el lazo de control interno puede hacerse funcionar a un ancho de banda alto que ayuda a obtener una buena respuesta dinámica. El lazo de control interno simplemente puede comprender o consistir en un bloque de compensación en voltio-seg que puede ejecutarse muy rápido.

Según una realización de la presente invención, casi todas las corrientes, tensiones y voltio-segs que usan las realizaciones de la presente invención son respectivamente vectores.

- 40 Según una realización de la presente invención, se usa un PLL (lazo de fase fija) con un separador de secuencia positiva y negativa. También se denomina PLL con calculador de secuencia positiva y negativa (PNSC).

Según una realización de la presente invención, se calculan una potencia activa p y una potencia reactiva q usando las expresiones $p=1,5(v_{\alpha}i_{\alpha}+v_{\beta}i_{\beta})$ y $q=1,5(v_{\alpha}i_{\beta}-v_{\beta}i_{\alpha})$ donde $[v_{\alpha}, v_{\beta}]$ son tensiones de red de secuencia real o positiva y $[i_{\alpha}, i_{\beta}]$ son corrientes de línea de secuencia real o positiva. En este caso, α y β indican las componentes α y β de las señales de corriente y tensión en el marco $\alpha\beta$ estacionario, respectivamente.

- 45 En el alcance de las realizaciones de la presente invención, el término "voltio-seg" significa "voltio-segundos". "Voltio-seg" significa una entidad vectorial, cuya unidad es el voltio*segundo. En generadores de potencia de CA, el término "voltio-seg" es equivalente al término "flujo magnético".

- 50 Según una realización de la presente invención, dependiendo de los requisitos de regulación y sistema, controlar la potencia activa p con respecto a la referencia de potencia activa p^* tiene prioridad sobre controlar la potencia reactiva q con respecto a la referencia de potencia reactiva q^* , o viceversa. Es decir, según una realización de la presente invención, dependiendo de las situaciones, la referencia de potencia activa p^* y la referencia de potencia reactiva q^* pueden tener prioridad una sobre la otra. Por ejemplo, cuando se requiere un soporte de red, q^* puede tener prioridad sobre p^* , y en condiciones en las que se requiere un control de potencia activa para reducir el esfuerzo mecánico sobre el tren de engranajes/la estructura de la turbina, p^* puede tener prioridad sobre q^* .
55 Evidentemente, también es posible otorgar la misma prioridad a controlar tanto la potencia activa como la potencia

reactiva. Muchas otras situaciones son posibles.

En lo sucesivo, se describirán aspectos adicionales de realizaciones de la presente invención.

5 Tal como ha resultado evidente en la descripción anterior, realizaciones de la presente invención proporcionan una filosofía de control de convertidor de lado de red para controlar directamente la potencia real y reactiva intercambiada con la red. Debido a la simplicidad del control de lazo cerrado propuesto, puede implementarse fácilmente en convertidores de dos niveles así como en convertidores multinivel. El control de lazo cerrado propuesto puede mantener el funcionamiento en condiciones de sobretensión y caídas de tensión simétricas/asimétricas en la red. Esto garantiza una mejor conectividad de la turbina con la red en condiciones de fallo. Además, el enfoque es simple de realizar en cuanto a computación. Con respecto a controles convencionales, el control propuesto requiere menos controladores.

10 Según una realización de la presente invención, la potencia reactiva necesaria durante un evento en el que se experimente un fallo de red de baja tensión, se genera estableciendo una referencia de potencia reactiva en un valor deseado y limitando una referencia de potencia activa basándose en límites de corriente de convertidor de lado de red. En la condición de baja tensión, también puede usarse una resistencia de regulación ubicada en un enlace de CC de manera que la potencia activa procedente del generador puede disiparse en la resistencia de regulación. Lo mismo puede aplicarse a la condición de alta tensión.

20 Según una realización de la presente invención, puede usarse un algoritmo de PLL para estimar el ángulo de red (γ) y la velocidad angular (ω) de la tensión de red. El algoritmo de PLL puede implementarse usando una técnica de marco rotatorio síncrono (SRF) y puede usar una técnica de promedio móvil (MA) para eliminar componentes de armónicos y secuencia negativa de la tensión de red. Por tanto, el ángulo de red (γ) y la velocidad angular (ω) pueden calcularse basándose en la tensión de secuencia positiva. Sin embargo, el ángulo de red (γ) y la velocidad angular (ω) también pueden calcularse basándose en la tensión de secuencia negativa. Existen muchos otros métodos que pueden usarse para estimar el ángulo de red (γ) y la velocidad angular (ω) de la tensión de red.

25 Según realizaciones de la presente invención, el método de control de convertidor de lado de red puede manipular fácilmente condiciones de sobretensión y caídas de tensión simétricas/asimétricas. Además, la estructura de hardware/software para llevar a cabo el método de control de convertidor de lado de red es la misma para tensiones de red equilibradas/desequilibradas.

30 Según una realización de la presente invención, puede usarse una técnica de SVM para controlar el convertidor de lado de red que puede integrarse perfectamente en técnicas tales como de PWM de simetría de semionda, simetría trifásica y fijación de bus. Estas técnicas pueden ayudar a mejorar significativamente el rendimiento del convertidor.

Según una realización de la presente invención, la frecuencia de conmutación del convertidor de lado de red se mantiene constante durante el funcionamiento.

35 Según una realización de la presente invención, el algoritmo propuesto puede aplicarse fácilmente a inversores multinivel como convertidores de lado de red. Con el uso de inversores multinivel, pueden reducirse el peso y el tamaño de filtro de línea y puede conseguirse un ahorro de costes.

Las siguientes ventajas pueden conseguirse usando realizaciones de la presente invención:

- a) Puede conseguirse un control exhaustivo de potencia y tensión debido al uso del enfoque basado en voltio-segundos.
- 40 b) El método de control propuesto se comporta bien en LVRT (mantenimiento del funcionamiento a baja tensión) y HVRT (mantenimiento del funcionamiento a alta tensión) en condiciones de fallo tanto simétricas como asimétricas. Esta es una de las principales ventajas, en comparación con los enfoques de DPC (control directo de la potencia) convencionales. Además, la estructura de hardware/software para llevar a cabo el método de control de convertidor de lado de red propuesto es la misma para condiciones de red equilibradas/desequilibradas.
- 45 c) Puede conseguirse una buena respuesta dinámica del control de lado de red (rápida velocidad de control) debido a un lazo interno inherentemente rápido.
- d) El método de control propuesto puede hacerse funcionar fácilmente en una operación de hasta seis etapas que puede ayudar a conseguir una respuesta dinámica más rápida debido a una mejor utilización del enlace de CC. Esto se debe al hecho de que en el intervalo de modulación normal puede utilizarse hasta el 90,7% de la capacidad del enlace de CC instalado. Sin embargo, a través del funcionamiento en la región de sobremodulación hasta la operación de seis etapas puede usarse el 100% de la capacidad del enlace de CC instalado. El error en voltio-seg es significativamente grande en una condición de red dinámica. Por tanto, es necesario un rendimiento dinámico rápido del controlador de lado de red. Este rendimiento dinámico rápido puede conseguirse en vista de la simplicidad del método de control propuesto. El algoritmo propuesto garantiza que el equilibrio de voltio-seg se mantiene incluso en una condición dinámica, por ejemplo, fallos de red. En cuanto a lo que se refiere a detalles de sobremodulación y técnicas de seis etapas que pueden emplear realizaciones de la presente invención, cabe mencionar las siguientes

referencias: (1) N. Mohan, T. M. Undeland y W. P. Robbins, Power electronics : converters, applications, and design. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, tercera ed., 2003. (2) J. Holtz, "Pulsewidth modulation-a survey", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 39, págs. 410 - 420, oct. de 1992. (3) J. Holtz, W. Lotzkat y A. M. Khambadkone, "On continuous control of pwm inverters in overmodulation range including six-step", IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 8, págs. 546-553, 1993.

e) Debido al uso de compensación en voltio-segundos, el algoritmo propuesto es inherentemente adecuado para modulación de vectores espaciales (SVM), lo que puede aplicarse fácilmente a convertidores de lado de red basados en dos niveles o multinivel.

f) La frecuencia de conmutación del convertidor de lado de red puede mantenerse constante, en contraposición a algunos algoritmos de control basados en DPC en los que la frecuencia de conmutación no es constante. Una frecuencia de conmutación constante conduce a una simplicidad del diseño de filtro de red. Esto también ayuda a limitar y reducir la pérdida por conmutación que tiene lugar en convertidores de potencia.

g) El enfoque propuesto es simple en cuanto a computación.

h) El concepto propuesto puede usarse fácilmente junto con una técnica de SVM síncrona que ayuda a eliminar los subarmónicos e interarmónicos incluidos en la señal de tensión emitida por el convertidor de lado de red. Estos armónicos son difíciles de filtrar mediante un filtro de lado de red y pueden crear varios problemas para el control de red y aplicaciones conectadas a la red.

i) Dado que el concepto propuesto usa voltio-seg como base, es inherentemente adecuado para la SVM. La implementación de fijación de bus es muy fácil para SVM. Con SVM de bus fijado, el concepto propuesto puede conseguir una reducción de pérdidas por conmutación del 33%. En la fijación de bus, una de las fases no se conmuta en absoluto durante un periodo de conmutación dado mientras que todavía forma el vector de referencia dado con estados de conmutación discretos. En cuanto a lo que se refiere a detalles de técnicas de fijación de bus basadas en SVM que pueden emplear realizaciones de la presente invención, cabe mencionar las siguientes referencias: (1) A. Beig, G. Narayanan y V. Ranganathan, "Space vector based synchronized pwm algorithm for three level voltage source inverters: principles and application to v/f drives", IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the], vol. 2, págs. 1249 - 1254, nov. de 2002. (2) G. Narayanan y V. T. Ranganathan, "Synchronised bus-clamping pwm strategies based on space vector approach for modulation up to six-step mode", Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1998. Proceedings. 1998 International Conference on, vol. 2, págs. 996 - 1001, dic. de 1998. (3) G. Narayanan y V. T. Ranganathan, "Synchronised pwm strategies based on space vector approach. i. principles of waveform generation", Electric Power Applications, IEE Proceedings-, vol. 146, págs. 267 - 275, mayo de 1999. (4) G. Narayanan y V. T. Ranganathan, "Two novel synchronized busclamping pwm strategies based on space vector approach for high power drives", Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 17, págs. 84 - 93, ene. de 2002.

j) Debido a la ausencia de término de acoplamiento cruzado, el controlador propuesto es más robusto especialmente considerando una saturación de inductancia de red y variaciones de frecuencia.

Según una realización de la presente invención, la compensación del error en voltio-seg (error en voltio-seg $\Delta\psi$) se entiende tal como sigue: según la ley de Faraday, el vector de tensión es igual al cambio del vector de voltio-seg a lo largo del tiempo, es decir $v = d\psi/dt$. Puede escribirse de manera equivalente como $\Delta\psi = v\Delta t$, es decir, puede compensarse el error en voltio-seg $\Delta\psi$ manteniendo el vector de tensión v durante el corto periodo de tiempo Δt . Esto explica el principio de la implementación de SVM basada en error en voltio-seg.

Breve descripción de los dibujos

En los dibujos, caracteres de referencia similares se refieren generalmente a las mismas partes en la totalidad de las diferentes vistas. Los dibujos no son necesariamente a escala, enfatizándose más bien generalmente la ilustración de los principios de la invención. En la siguiente descripción, se describen diversas realizaciones de la invención con referencia a los siguientes dibujos, en los que:

la figura 1 ilustra un dibujo esquemático de una configuración común de una turbina eólica convencional.

La figura 2 muestra un dibujo esquemático de una disposición que comprende un convertidor de lado de red, un transformador de red y una línea eléctrica que conecta el convertidor de lado de red al transformador de red así como tensiones y corrientes correspondientes que tienen lugar en esta disposición.

La figura 3 muestra un dibujo esquemático de un sistema de control de convertidor de red según una realización de la presente invención.

Las figuras 4A y 4B muestran dibujos esquemáticos de ejemplos de convertidores de lado de red que pueden usarse dentro de un sistema de control según una realización de la presente invención.

La figura 5 muestra la relación entre tensiones, corrientes y voltio-seg que tienen lugar en el sistema de control

mostrado en la figura 6.

La figura 6 muestra un dibujo esquemático de un ejemplo de un sistema de control según una realización de la presente invención.

5 La figura 7 muestra un diagrama de flujo de un método para controlar un convertidor de lado de red de una turbina eólica según una realización de la presente invención.

La figura 8 muestra un dibujo esquemático de un algoritmo de PLL que puede usarse dentro del sistema de control mostrado en la figura 6 según una realización de la presente invención.

La figura 9 muestra un dibujo esquemático de una función de detección de error que puede usarse dentro del algoritmo de PLL mostrado en la figura 8 según una realización de la presente invención.

10 Descripción detallada

La figura 1 ilustra una configuración común de una turbina eólica 100 convencional. La turbina eólica 100 está montada sobre una base 102. La turbina eólica 100 incluye una torre 104 que tiene varias secciones de torre, tales como anillos de torre. Una góndola de turbina eólica 106 está situada encima de la torre 104. El rotor de turbina eólica incluye un buje 108 y al menos una pala de rotor 110, por ejemplo tres palas de rotor 110. Las palas de rotor 15 110 están conectadas al buje 108 que está conectado a su vez a la góndola 106 a través de un árbol de baja velocidad que se extiende fuera de la parte frontal de la góndola 106.

La figura 2 muestra una disposición 200 que comprende un convertidor de lado de red 202, un lado de baja tensión 204 de un transformador de red (no mostrado) y una línea eléctrica 206 que conecta el convertidor de lado de red 202 a la red 204 así como tensiones y corrientes correspondientes que tienen lugar en esta disposición. En la figura 2, u_g indica la tensión que tiene lugar en la entrada o lado de baja tensión 204 del transformador de red (también denominada "tensión de red"), u_c indica la tensión que tiene lugar en la salida del convertidor de lado de red 202 (también denominada "tensión de convertidor") e i_g indica la corriente de línea que fluye a través de la línea eléctrica 206. x_s indica una reactancia de la línea eléctrica 206 y u_x indica la caída de tensión sobre la reactancia x_s . La componente principal de x_s es la reactancia de regulación de red.

25 En condiciones normales, puede suponerse que la tensión de red u_g es constante. En general, para cualquier condición de red, u_g puede considerarse como la tensión de referencia de red para el control del convertidor de red. La tensión u_x cambia si la corriente de línea i_g cambia. La corriente de línea i_g cambia en sí misma con respecto a la potencia demandada que ha de suministrarse por el convertidor de lado de red 202 al lado de baja tensión 204 del transformador de red. Por tanto, la tensión u_c ha de adaptarse debido a un cambio de la potencia demandada, i_g y por tanto u_x cambia.

30 Con el fin de adaptar la tensión u_c , el convertidor de lado de red 202 ha de controlarse en consonancia. En lo sucesivo, se describen métodos/sistemas para controlar el convertidor de lado de red 202 que pueden soportar la calidad de potencia demandada incluso durante condiciones de tensión anómalas, y que son fáciles de llevar a cabo.

La figura 7 muestra una realización de un método 700 para controlar un convertidor de lado de red de una turbina eólica. Una salida del convertidor de lado de red está conectada o puede conectarse a través de una línea eléctrica a una entrada de un transformador de red. En 702, se determinan los voltio-seg de convertidor que tienen lugar en la salida del convertidor de lado de red basándose en una tensión de convertidor que tiene lugar en la salida del convertidor de lado de red. En 704, se determina un error en voltio-seg (es decir, una diferencia entre los voltio-seg de convertidor y una referencia en voltio-seg de convertidor), en el que se determina la referencia en voltio-seg de convertidor basándose en una referencia de potencia activa, una referencia de potencia reactiva, una corriente de línea y una tensión de línea que tiene lugar en la entrada del transformador de red (o en terminales de la turbina eólica). En 706, basándose en el error en voltio-seg determinado, el convertidor de lado de red se controla de manera que se compensa el error en voltio-seg.

La figura 3 muestra un sistema de control 300 según una realización de la presente invención que es un ejemplo para llevar a cabo el método tal como se indica en la figura 7. El sistema de control 300 controla un convertidor de lado de red 302 de una turbina eólica. Una salida 306 del convertidor de lado de red 302 está conectada o puede conectarse a través de una línea eléctrica 304 a una entrada 308 de un transformador de red 310. El sistema de control 300 comprende una disposición de lazo de control interno 312 y una disposición de lazo de control externo 314. La disposición de lazo de control interno 312 comprende una unidad de determinación de voltio-seg de convertidor 316 que determina los voltio-seg de convertidor φ_c que tienen lugar en la salida 306 del convertidor de lado de red 302 basándose en una tensión de convertidor u_c que tiene lugar en la salida 306 del convertidor de lado de red 302. El lazo de control interno 312 comprende además una unidad de determinación de error en voltio-seg 318 que determina un error en voltio-seg $\Delta\varphi_c$ entre los voltio-seg de convertidor determinados φ_c y una referencia en voltio-seg de convertidor φ_{pc}^* , y una unidad de control 320 que controla, basándose en el error en voltio-seg determinado $\Delta\varphi_c$, el convertidor de lado de red 302 de manera que se compensa el error en voltio-seg $\Delta\varphi_c$. La disposición de lazo de control externo 314 comprende una unidad 322 para determinar la referencia en voltio-seg de convertidor φ_{pc}^* basándose en una referencia de potencia activa p^* , una referencia de potencia reactiva q^* , una

corriente de línea i_g y una tensión de línea u_g que tienen lugar en la entrada 308 del transformador de red 310.

La unidad 322 para determinar la referencia en voltio-seg de convertidor φ_{pc}^* puede comprender varias subunidades, tal como resultará evidente a continuación junto con la figura 6 en la que se explicará un ejemplo más detallado de una implementación de la realización mostrada en la figura 3. También debe observarse que la disposición de lazo de control externo 314 puede comprender no sólo una, sino varias líneas de realimentación, tal como resultará evidente a continuación junto con la figura 6.

Tal como puede deducirse a partir de la figura 3, el sistema de control 300 es un sistema de control basado en voltio-seg. Es decir, el sistema de control 300 controla la salida de potencia por el convertidor de lado de red 302 no basándose en el control de tensión continua o el control de corriente continua, sino en el control de los voltio-seg. Esto significa que no se controla la salida de tensión o corriente por el convertidor de lado de red 302, sino que se controla los voltio-seg (también denominados "voltio-segundos" ("voltio-seg")) emitidos por el convertidor de lado de red 302.

La figura 4A muestra un ejemplo 400 de un convertidor de lado de red 302 que puede emplearse en realizaciones de la presente invención. En esta realización, el convertidor de lado de red 400 es un convertidor de tres niveles que tiene tres ramas, es decir, 402, 404, y 406 (puesto que se supone que se usa un sistema de generación de potencia trifásico). La presente invención no se limita al convertidor de lado de red 400; en su lugar, pueden usarse convertidores que tienen dos niveles o más de tres niveles, dependiendo del sistema de generación de potencia usado. Por ejemplo, la figura 4B muestra un convertidor de dos niveles.

La figura 6 muestra un sistema de control 600 para controlar un convertidor de lado de red 602 de una turbina eólica 100. Una salida 606 del convertidor de lado de red 602 está conectada o puede conectarse a través de una línea eléctrica 604 (que incluye una bobina de regulación de red 634) a una entrada 608 de un transformador de red 640. El convertidor de lado de red 602 está conectado a través de un enlace de CC (no mostrado) a un generador de potencia CA (no mostrado) a través de un convertidor de lado de generador. Se mide una tensión de enlace de CC 636 a través del enlace de CC conectado al convertidor de lado de red 602. Una salida 638 del transformador de red 640 (que puede ser una salida de la góndola de turbina eólica) está conectada a una red eléctrica (no mostrada).

El sistema de control 600 comprende una disposición de lazo de control interno 610 y una disposición de lazo de control externo 612. La disposición de lazo de control interno 610 comprende: una unidad de determinación de voltio-seg de convertidor 614 que determina los voltio-seg de convertidor φ_c que tiene lugar en la salida 606 del convertidor de lado de red 602 basándose en una tensión de convertidor u_c que tiene lugar en la salida 606 del convertidor de lado de red 602. Los voltio-seg de convertidor φ_c pueden determinarse, por ejemplo, usando la siguiente fórmula:

$$\varphi_c = \int u_c dt$$

Es decir, los voltio-seg de convertidor φ_c pueden obtenerse mediante la integración de la tensión de convertidor u_c medida que tiene lugar en la salida 606 del convertidor de lado de red 602 a lo largo del tiempo. Los voltio-seg de convertidor φ_c también pueden estimarse a través de relaciones de trabajo de convertidor y la tensión de enlace de CC. Los voltio-seg de convertidor φ_c también pueden calcularse con diferentes enfoques.

La disposición de lazo de control interno 610 comprende además una unidad de determinación de error en voltio-seg 616 que determina un error en voltio-seg $\Delta\varphi_c$ (es decir, una diferencia entre los voltio-seg de convertidor φ_c y una referencia en voltio-seg de convertidor φ_{pc}^* (φ_{pc}^* son los voltio-seg objetivo que va a emitir el convertidor de lado de red 602)). La diferencia en voltio-seg $\Delta\varphi_c$ también se denomina "error en voltio-seg". Parte de la disposición de lazo de control interno 610 es también una unidad de control 618 que controla, basándose en el error en voltio-seg determinado $\Delta\varphi_c$, el convertidor de lado de red 602 de manera que se compensa el error en voltio-seg $\Delta\varphi_c$. La unidad de control 618 es esencialmente una unidad de PWM que determina las relaciones de trabajo para los conmutadores de potencia del convertidor de lado de red 602.

La disposición de lazo de control externo 612 comprende varias unidades para determinar la referencia en voltio-seg de convertidor φ_{pc}^* basándose en la referencia de potencia activa p^* , la referencia de potencia reactiva q^* , la corriente de línea i_g y una tensión de línea u_g que tiene lugar en la entrada 608 del transformador de red 640. Estas unidades se describirán a continuación.

La disposición de lazo de control externo 612 comprende una unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia activa 620 y una unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia reactiva 622 que determinan una referencia en voltio-seg de potencia activa φ_{xq}^* (proyección de los voltio-seg φ_x^* sobre el eje q) y una referencia en voltio-seg de potencia reactiva φ_{xd}^* (proyección de los voltio-seg φ_x^* sobre el eje d) basándose en una referencia de potencia activa p^* y una referencia de potencia reactiva q^* demandadas en la entrada 608 del transformador de red 640 (o en terminales de la turbina eólica), respectivamente.

La unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia activa 620 determina la referencia en voltio-seg de potencia activa φ_{xq}^* basándose en una diferencia entre una referencia de potencia activa p^* y una potencia activa p que tiene lugar en la entrada 608 del transformador de red 640 (o en terminales de la turbina eólica). La diferencia entre una referencia de potencia activa p^* y una potencia activa p se calcula mediante una unidad de cálculo de diferencia de potencia activa 642. La referencia de potencia activa p^* se genera mediante una unidad de controlador de tensión de enlace de CC 646 y se suministra a la unidad de cálculo de diferencia de potencia activa 642. La unidad de controlador de tensión de enlace de CC 646 se acciona en sí misma por una diferencia entre una referencia de tensión de enlace de CC V_{cc}^* y la tensión de enlace de CC V_{cc} determinada por una unidad de cálculo de diferencia de tensión de CC 648. El controlador de enlace de CC puede implementarse de muchas maneras diferentes pero la salida del controlador es p^* . La referencia de potencia activa p^* puede reducirse en ciertas condiciones, por ejemplo, soporte de red. Esto puede realizarse a través de un bloque de modificación (no mostrado).

La unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia reactiva 622 determina la referencia en voltio-seg de potencia reactiva φ_{xd}^* basándose en una diferencia entre una referencia de potencia reactiva q^* y una potencia reactiva q que tienen lugar en la entrada 608 del transformador de red 640 (o en terminales de la turbina eólica). La diferencia entre una referencia de potencia reactiva q^* y una potencia reactiva q se calcula mediante una unidad de cálculo de diferencia de potencia reactiva 644. La referencia de potencia reactiva q^* se determina principalmente basándose en requisitos de soporte de red.

La disposición de lazo de control externo 612 comprende una unidad de limitación de corriente 624 que hace que la referencia en voltio-seg de potencia activa φ_{xq}^* y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva φ_{xd}^* se congelen respectivamente si la amplitud de la corriente de línea i_g que tiene lugar en la entrada 608 del transformador de red 640 supera un valor umbral predeterminado.

La disposición de lazo de control externo 612 comprende además una unidad 626 que comprende una subunidad de determinación de potencia activa y una subunidad de determinación de potencia reactiva que determinan la potencia activa p y la potencia reactiva q basándose en la corriente de línea i_g y la tensión de línea u_g que tienen lugar en la entrada 608 del transformador de red 640, respectivamente. La unidad 626 comprende además una subunidad de determinación de amplitud que determina la amplitud de la corriente de línea i_g que se suministra a la unidad de limitación de corriente 624.

La amplitud de la corriente de línea i_g puede calcularse, por ejemplo, basándose en la siguiente ecuación:

$$|i_g| = \sqrt{i_{g\alpha}^2 + i_{g\beta}^2},$$

donde $i_{g\alpha}$ es la componente α de la corriente de línea e $i_{g\beta}$ es la componente β de la corriente de línea. Sin embargo, la corriente de línea i_g también puede calcularse de diferente manera.

La potencia activa p puede calcularse, por ejemplo, basándose en la siguiente ecuación:

$$p = 1,5 * (v_{g\alpha}^+ i_{g\alpha}^+ + v_{g\beta}^+ i_{g\beta}^+),$$

donde $v_{g\alpha}^+$ es la componente α de secuencia positiva de la tensión de línea u_g , $v_{g\beta}^+$ es la componente β de secuencia positiva de la tensión de línea u_g , $i_{g\alpha}^+$ es la componente α de secuencia positiva de la corriente de línea i_g , y $i_{g\beta}^+$ es la componente β de secuencia positiva de la corriente de línea i_g . En general "+" indica la componente de secuencia positiva de las corrientes/tensiones respectivas. La potencia activa p también puede calcularse de diferente manera.

La potencia reactiva q puede calcularse, por ejemplo, basándose en la siguiente ecuación:

$$q = 1,5 * (v_{g\alpha}^+ i_{g\beta}^+ - v_{g\beta}^+ i_{g\alpha}^+),$$

donde $v_{g\alpha}^+$ es la componente α de secuencia positiva de la tensión de línea u_g , $v_{g\beta}^+$ es la componente β de secuencia positiva de la tensión de línea u_g , $i_{g\alpha}^+$ es la componente α de secuencia positiva de la corriente de línea i_g , y $i_{g\beta}^+$ es la componente β de secuencia positiva de la corriente de línea i_g . La potencia reactiva q también puede calcularse de diferente manera.

En las ecuaciones anteriores, se mostró anteriormente que sólo se usan las tensiones y corrientes de secuencia positiva para calcular potencia activa y reactiva. Sin embargo, las realizaciones de la presente invención no se limitan a ello: también es posible usar la tensión y corriente de secuencia negativa para calcular la potencia activa y reactiva. Así, puede usarse o bien la secuencia positiva o bien la secuencia negativa o la combinación para calcular la potencia activa y reactiva.

La disposición de lazo de control externo 612 comprende además una unidad de generación de vector de voltio-seg de marco $\alpha\beta$ 628 que genera una primera referencia en voltio-seg φ_x^* como vector de voltio-seg de marco $\alpha\beta$ que depende de la referencia en voltio-seg de potencia activa φ_{xq}^* y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva φ_{xd}^* .

5 La disposición de lazo de control externo 612 comprende una segunda unidad de generación de referencia en voltio-seg 630 que genera una segunda referencia en voltio-seg φ_c^* añadiendo los voltio-seg de red φ_g a la primera referencia en voltio-seg φ_x^* . La unidad 626 comprende además una subunidad de determinación de voltio-seg de red que determina los voltio-seg de red φ_g basándose en al menos una de la corriente de línea i_g y la tensión de línea u_g que tienen lugar en la entrada 608 del transformador de red 640.

Los voltio-seg de red se determinan, por ejemplo, basándose en la siguiente ecuación:

$$\varphi_g = \int u_g dt$$

10 Es decir, los voltio-seg de red φ_g pueden obtenerse mediante la integración de la tensión de convertidor u_g medida que tiene lugar en la entrada 608 del transformador de red 640 a lo largo del tiempo. Sin embargo, los voltio-seg de red φ_g también pueden calcularse de diferente manera.

15 La disposición de lazo de control externo 612 comprende una unidad de predicción de referencia en voltio-seg de convertidor 632 que realiza una predicción de los voltio-seg de convertidor del siguiente ciclo de muestreo φ_{pc}^* basándose en la segunda referencia en voltio-seg φ_c^* y se calcula una diferencia angular $\Delta\theta_s$. $\Delta\theta_s$ basándose en una velocidad angular ω_g de la tensión de línea u_g que tiene lugar en la entrada 608 del transformador de red 640 según la ecuación $\Delta\theta_s = \omega_g \cdot T_s$, donde T_s es el periodo de muestreo/ciclo del convertidor de lado de red 602. La unidad de predicción de referencia en voltio-seg 632 emite los voltio-seg de convertidor predichos φ_{pc}^* como referencia en voltio-seg de convertidor. La velocidad angular ω_g de la tensión de línea u_g se determina mediante una unidad PLL (lazo de enganche de fase) 650.

20 La unidad PLL 650 también determina, basándose en la tensión de línea u_g que tiene lugar en la entrada 608 del transformador de red 640, un ángulo de red γ_g^+ que es el ángulo de la tensión de secuencia positiva. El ángulo de red γ_g^+ se usa para transformar la referencia en voltio-seg de la representación en marco dq (la referencia en voltio-seg de potencia activa φ_{xq}^* y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva φ_{xd}^*) a la representación en marco $\alpha\beta$. Si se desea también el control de potencia con la secuencia negativa, un ángulo de red γ_g^- que es el ángulo de la tensión de secuencia negativa también puede calcularse fácilmente y usarse para transformar la referencia en voltio-seg de secuencia negativa de la representación en marco dq (la referencia en voltio-seg de potencia activa de secuencia negativa φ_{xq}^- y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva φ_{xd}^- respectivas) a la representación en marco $\alpha\beta$.

25 El uso de la unidad de predicción de referencia en voltio-seg 632 conduce a una respuesta de convertidor de lado de red más exacta especialmente cuando la frecuencia de conmutación es baja; también ayuda a obtener una mejor respuesta dinámica. Sin embargo, debe observarse que la unidad de predicción de referencia en voltio-seg 632 no es necesaria de manera absoluta, pero su presencia mejora el rendimiento.

35 En la siguiente descripción, haciendo referencia a las figuras 8 y 9, se describirá una posible realización de la unidad PLL 650. Ha de entenderse que también pueden usarse otros tipos de algoritmos de PLL (PNSC).

40 La unidad PLL 650 recibe tensiones trifásicas U_a , U_b , U_c extraídas de la tensión de línea u_g que tiene lugar en la entrada 608 del transformador de red 640. Las tensiones trifásicas U_a , U_b , U_c se transforman al marco $\alpha\beta$ con el fin de obtener una componente U_α de eje α de la tensión de línea u_g , y una componente U_β de eje β de la tensión de línea u_g usando una unidad de transformación abc/ $\alpha\beta$ 800.

Una primera unidad de transformación $\alpha\beta$ /qd 802 transforma las componentes de tensión de línea U_α y U_β al marco dq usando el ángulo de fase de vector de tensión γ_g^+ , por ejemplo según

$$\begin{bmatrix} ULQ \\ ULD \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_g^+ & \text{sen} \gamma_g^+ \\ \text{sen} \gamma_g^+ & -\cos \gamma_g^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}$$

45 donde ULD es la componente de eje d de la tensión de línea de secuencia positiva en el marco d/q, y ULQ es la componente de eje q de la tensión de línea de secuencia positiva en el marco d/q.

Además, un segundo bloque de transformación $\alpha\beta$ /qd 804 transforma las componentes de tensión de línea U_α y U_β

al marco dq usando el ángulo de fase de vector de tensión negativa $-\gamma_g^+$, por ejemplo según

$$\begin{bmatrix} \text{ULQ_NEG} \\ \text{ULD_NEG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\gamma_g^+) & \text{sen}(-\gamma_g^+) \\ \text{sen}(-\gamma_g^+) & -\cos(-\gamma_g^+) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U\alpha \\ U\beta \end{bmatrix}.$$

donde ULD_NEG es la componente de eje d de la tensión de línea de secuencia negativa en el marco d/q, y ULQ_NEG es la componente de eje q de la tensión de línea de secuencia negativa en el marco d/q.

- 5 Las componentes de tensión de línea ULD, ULQ se alimentan a una primera unidad de función promedio móvil de semiciclo 806, y las componentes de tensión de línea ULD_NEG, ULQ_NEG se alimentan a una segunda unidad de función promedio móvil de semiciclo 808. Las unidades de función promedio móvil de semiciclo 806, 808 respectivamente procesan las señales de entrada ULD, ULQ/ ULD_NEG, ULQ_NEG según la siguiente ecuación

$$y = f(x) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(t) * dt,$$

- 10 donde y es el promedio móvil de la señal de entrada respectiva, x(t) es la señal de entrada, T es el tiempo de un ciclo de muestreo, y t es el parámetro de integración (tiempo). La unidad de función promedio móvil de semiciclo 806 sirve para cancelar los efectos de secuencia negativa y los efectos de armónicos.

Con el fin de implementar las unidades de función promedio móvil de semiciclo 806, 808, puede usarse respectivamente una memoria intermedia que contiene datos de semiciclo, en la que la salida de las unidades de función promedio móvil de semiciclo 806, 808 es el promedio de los datos de semiciclo almacenados dentro de la memoria intermedia. La señal ULD_MA emitida por la unidad de función promedio móvil de semiciclo 806 representa la componente de eje d de la tensión de línea de secuencia positiva de un promedio móvil de semiciclo. La señal ULQ_MA emitida por la unidad de función promedio móvil de semiciclo 806 representa la componente de eje q de la tensión de línea de secuencia positiva de un promedio móvil de semiciclo. La señal ULD_MA_NEG emitida por la unidad de función promedio móvil de semiciclo 808 representa la componente de eje d de la tensión de línea de secuencia negativa de un promedio móvil de semiciclo. La señal ULQ_MA_NEG emitida por la unidad de función promedio móvil de semiciclo 808 representa la componente de eje q de la tensión de línea de secuencia negativa de un promedio móvil de semiciclo.

Un bloque de normalización 810 normaliza las señales ULD_MA y ULQ_MA según

$$\begin{aligned} \text{ULD_NOM} &= \text{ULD_MA} / \sqrt{(\text{ULD_MA}^2 + \text{ULQ_MA}^2)} \\ \text{ULQ_NOM} &= \text{ULQ_MA} / \sqrt{(\text{ULD_MA}^2 + \text{ULQ_MA}^2)}, \end{aligned}$$

con el fin de generar las señales de salida normalizadas ULD_NOM y ULQ_NOM. El proceso de normalización puede usarse para eliminar la influencia de la amplitud de tensión sobre el control de lazo de fase fija. Por tanto, la unidad PLL 650 tiene el mismo rendimiento para diferentes tensiones de línea u_g en diferentes plataformas.

- 30 Las señales de salida normalizadas ULD_NOM y ULQ_NOM se alimentan a una unidad de mapeo 812 que mapea estas señales con respecto a un valor de función de una función F que puede ser considerarse como una función del error de fase $\Delta\theta$ entre el ángulo de fase de tensión real (es decir, el ángulo de fase de la tensión de línea de corriente representado por ULD_NOM y ULQ_NOM) y el ángulo de fase de tensión estimado (es decir, la estimación realimentada para el ángulo de fase de tensión de línea γ_g^+) según

$$\begin{aligned} F(\Delta\theta) &= \tan(\Delta\theta), -\Delta\theta_1 < \Delta\theta < \Delta\theta_1 \\ F(\Delta\theta) &= \tan(\Delta\theta_1) = \omega_{Lim}, \Delta\theta_1 < \Delta\theta < \pi \\ F(\Delta\theta) &= \tan(-\Delta\theta_1) = -\omega_{Lim}, -\pi < \Delta\theta < -\Delta\theta_1 \end{aligned}$$

donde $\Delta\theta_1$ es un valor umbral predefinido. El error de fase $\Delta\theta$ se determina, por ejemplo, según $\tan(\Delta\theta) = \text{ULD_NOM} / \text{ULQ_NOM}$.

- 40 La función F se ilustra en la figura 9. La figura 9 muestra un gráfico que indica la salida de una función F(d,q) frente al error de fase según una realización. Un primer eje 902 (eje x) del gráfico 900 corresponde a los posibles valores del error de fase $\Delta\theta$, y un segundo eje 904 (eje y) del gráfico 900 corresponde a los valores de función de F. Puede observarse a partir del gráfico 900 que la salida de esta unidad de mapeo 812 sigue una función tangente cuando la diferencia de ángulo es menor que $\Delta\theta_1$; y cuando la diferencia angular es mayor que $\Delta\theta_1$, la salida se fija en el valor

máx. de ω_{Lim} . Este mecanismo ajustará la velocidad de sintonización dependiendo de la diferencia de ángulo, y cuando la diferencia angular es grande, producirá una velocidad de sintonización más rápida.

5 La salida de la unidad de mapeo 812 se compara con un valor de referencia ULD_REF (valor de referencia de eje d; es normalmente cero si no se considera el retardo del sensor de tensión) mediante una unidad de comparación 816, y se alimenta un resultado de comparación correspondiente a una unidad de controlador PI 814.

10 Una unidad de adición 818 añade a la salida de la unidad de controlador PI 814 la frecuencia de tensión nominal (50/60 Hz) con el fin de obtener la velocidad angular estimada ω_g del vector de tensión en el marco dq. La unidad de controlador PI 814 cambia (mediante aceleración o desaceleración) la velocidad angular estimada ω_g de manera que, dependiendo del error de fase $\Delta\theta$, el ángulo de fase estimado γ_g^+ (en el marco dq) se encuentra con el ángulo de vector de tensión.

Una unidad de integración 820 genera un ángulo de fase estimado γ_g^+ del vector de tensión mediante la integración de la velocidad angular ω_g en el marco dq.

15 En la descripción anterior de la unidad PLL 650, se ha usado la tensión de secuencia positiva con el fin de determinar el ángulo de fase estimado γ_g^+ y la velocidad angular ω_g . Es decir, se han usado las señales ULD_NOM y ULQ_NOM para determinar γ_g^+ y ω_g . Sin embargo, debe mencionarse que, con el fin de determinar γ_g^+ y ω_g , también podrían usarse las señales ULD_MA_NEG y ULQ_MA_NEG. En otras palabras, también pueden determinarse el ángulo de fase estimado γ_g^+ y la velocidad angular ω_g usando las tensiones de secuencia negativa.

20 En otras palabras, según una realización de la presente invención, el principio de funcionamiento de la realización de la figura 6 puede resumirse tal como sigue: la figura 6 muestra una implementación de un esquema de control directo de la potencia de convertidor de red usando un método basado en la compensación de voltio-seg. Un controlador de tensión de enlace de CC 646 genera una referencia de potencia activa p^* . La referencia de potencia activa p^* puede modificarse durante fallos de red/sistema. Se establece una referencia de potencia reactiva q^* según una demanda de potencia reactiva. Se usa un control de realimentación de potencia activa para generar una referencia en voltio-seg de eje q φ_{xq}^* , mientras que se usa un control de realimentación de potencia reactiva para generar una referencia en voltio-seg de eje d φ_{xd}^* . La suma vectorial de φ_{xq}^* y φ_{xd}^* y la subsiguiente transformación $dq \rightarrow \alpha\beta$ proporcionan los voltio-seg totales φ_x^* asociados con una bobina de regulación de red 634. Una limitación de corriente de línea se lleva a cabo congelando las salidas de controlador de potencia reactiva y activa cuando una corriente de línea medida i_g llega a una corriente máxima. Se usa un simple PLL 650 para estimar el ángulo de red, la velocidad angular de la tensión de red y la tensión de red. El PLL 650 puede implementarse en marco rotatorio síncrono (SRF) y puede usar promedio móvil (MA) para eliminar las componentes de secuencia negativa y armónicos de la tensión de red u_g . Se calculan la frecuencia angular de tensión de red omega ω_g y el ángulo de tensión de red gamma γ_g^+ basándose en una secuencia positiva de tensiones. Sin embargo, también es posible el uso de tensión de secuencia negativa. Un vector de voltio-seg de referencia φ_c^* para el convertidor es la suma del vector de voltio-seg de red φ_g y el vector de voltio-seg φ_x^* asociado con la bobina de regulación de red.

35 Posteriormente, se usa la predicción de voltio-seg para implementar un controlador de tiempo finito (*deadbeat*). El vector de error de voltio-seg de convertidor $\Delta\varphi_c$ se utiliza para generar un vector de referencia de tensión de convertidor. Usando $\Delta\varphi_c$, se producen las señales de PWM finales para el convertidor de lado de red 602.

REIVINDICACIONES

1. Método de control de un convertidor de lado de red (602) de una turbina eólica (100), en el que una salida del convertidor de lado de red (602) está conectada o es conectable a través de una línea eléctrica (604) a una entrada (608) de un transformador de red (640), que comprende:
 - 5 calcular los voltio-seg de un convertidor (φ_c) que tienen lugar en la salida del convertidor de lado de red (602) basándose en una tensión de convertidor (u_c) que tiene lugar en la salida (606) del convertidor de lado de red (602);
 - determinar un error en voltio-seg ($\Delta\varphi_c$) entre los voltio-seg de convertidor determinados (φ_c) y una referencia en voltio-seg de convertidor (φ_{pc}^*), en el que la referencia en voltio-seg de convertidor se determina basándose en una referencia de potencia activa (p^*), una referencia de potencia reactiva (q^*), una corriente de línea (i_g) y una tensión de línea (u_g) que tienen lugar en la entrada (608) del transformador de red (640);
 - 10 controlar, basándose en el error en voltio-seg determinado ($\Delta\varphi_c$), el convertidor de lado de red (602) de manera que se compensa parcial o totalmente el error en voltio-seg ($\Delta\varphi_c$).
2. Método según la reivindicación 1,
 - 15 en el que la referencia en voltio-seg de convertidor (φ_{pc}) se determina basándose en una referencia en voltio-seg de potencia activa ($\varphi_{\xi p}^*$) y una referencia en voltio-seg de potencia reactiva ($\varphi_{\xi q}^*$).
3. Método según la reivindicación 2,
 - 20 en el que la referencia en voltio-seg de potencia activa ($\varphi_{\xi p}^*$) se determina basándose en una diferencia entre una referencia de potencia activa (p^*) demandada en la entrada del transformador de red (608) y una potencia activa que tiene lugar en la entrada del transformador de red (608).
4. Método según la reivindicación 2 ó 3,
 - 25 en el que la referencia en voltio-seg de potencia reactiva ($\varphi_{\xi q}^*$) se determina basándose en una diferencia entre una referencia de potencia reactiva (q^*) demandada en la entrada del transformador de red (608) y una potencia reactiva que tiene lugar en la entrada del transformador de red (608).
5. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4,
 - 30 en el que la referencia en voltio-seg de potencia activa ($\varphi_{\xi p}^*$) y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva ($\varphi_{\xi q}^*$) se congelan respectivamente si la amplitud de la corriente de línea (i_g) que tiene lugar en la entrada del transformador de red (608) supera un valor umbral predeterminado.
6. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5,
 - 35 en el que la potencia activa (p) y la potencia reactiva (q) se determinan basándose en la corriente de línea (i_g) y la tensión de línea (u_g) que tienen lugar en la entrada del transformador de red (608).
7. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6,
 - 40 en el que determinar la referencia en voltio-seg de convertidor (φ_{pc}^*) comprende generar una primera referencia en voltio-seg (φ_x^*) en un marco dq que depende de la referencia en voltio-seg de potencia activa ($\varphi_{\xi p}^*$) y la referencia en voltio-seg de potencia reactiva ($\varphi_{\xi q}^*$).
8. Método según la reivindicación 7,
 - 45 en el que la primera referencia en voltio-seg (φ_x^*) se genera como un vector de voltio-seg de marco $\alpha\beta$, y en el que determinar la referencia en voltio-seg de convertidor (φ_{pc}^*) comprende generar una segunda referencia en voltio-seg (φ_c^*) añadiendo los voltio-seg de red a la primera referencia en voltio-seg (φ_x^*).
9. Método según la reivindicación 8,
 - en el que los voltio-seg de red se determinan basándose en al menos una de la corriente de línea y la tensión de línea (u_g) que tienen lugar en la entrada del transformador de red.
10. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 9,
 - en el que determinar la referencia en voltio-seg de convertidor (φ_{pc}^*) comprende realizar una predicción de los voltio-seg de convertidor del siguiente ciclo de muestreo basándose en la segunda referencia en voltio-seg (φ_c^*), una velocidad angular (ω_g) de la tensión de línea (u_g) que tiene lugar en la entrada del transformador de red (608) y un periodo de muestreo (T_s) del convertidor de lado de red (602), y usar los

voltio-seg de convertidor predichos (φ_{pc}^*) como referencia en voltio-seg de convertidor (φ_{pc}^*).

11. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10,
 5 en el que el control del convertidor de lado de red (602) se lleva a cabo suministrando, dependiendo del error en voltio-seg determinado, señales de modulación por ancho de pulso al convertidor de lado de red (602) que ajustan la tensión de salida del convertidor de lado de red (602) en consonancia.
12. Sistema de control (600) para controlar un convertidor de lado de red (602) de una turbina eólica (100), estando conectada o siendo conectable una salida del convertidor de lado de red (602) a través de una línea eléctrica (604) a una entrada (608) de un transformador de red (640);
 10 - en el que el sistema de control comprende un lazo de control interno (610) y un lazo de control externo (612);
 - en el que el lazo de control interno (610) comprende:
 una unidad de determinación de voltio-seg de convertidor (614) que determina los voltio-seg de convertidor (φ_c) que tienen lugar en la salida del convertidor de lado de red (602) basándose en una tensión de convertidor (u_c) que tiene lugar en la salida (606) del convertidor de lado de red (602);
 15 una unidad de determinación de error en voltio-seg (616) que determina un error en voltio-seg ($\Delta\varphi_c$) entre los voltio-seg de convertidor determinados (φ_c) y una referencia en voltio-seg de convertidor (φ_{pc}^*);
 una unidad de control (618) que controla, basándose en el error en voltio-seg determinado ($\Delta\varphi_c$), el convertidor de lado de red (602) de manera que se compensa parcial o totalmente el error en voltio-seg ($\Delta\varphi_c$);
 20 - en el que el lazo de control externo (612) está configurado para determinar la referencia en voltio-seg de convertidor (φ_{pc}^*) basándose en una referencia de potencia activa (p^*), una referencia de potencia reactiva (q^*), una corriente de línea (i_g) y una tensión de línea (u_g) que tienen lugar en la entrada del transformador de red (608).
13. Sistema de control según la reivindicación 12,
 25 en el que el lazo de control externo (612) comprende una unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia activa (620) y una unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia reactiva (622) que determina una referencia en voltio-seg de potencia activa ($\varphi_{\varepsilon p}^*$) y una referencia en voltio-seg de potencia reactiva ($\varphi_{\varepsilon q}^*$) en un marco dq basándose en una referencia de potencia activa (p^*) y una referencia de potencia reactiva (q^*) solicitadas en la entrada del transformador de red (608).
- 30 14. Sistema de control según la reivindicación 13,
 en el que la unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia activa (620) determina la referencia en voltio-seg de potencia activa ($\varphi_{\varepsilon p}^*$) basándose en una diferencia entre una referencia de potencia activa (p^*) y una potencia activa (p) que tiene lugar en la entrada del transformador de red (608), y en el que la unidad de determinación de referencia en voltio-seg de potencia reactiva (622) determina la
 35 referencia en voltio-seg de potencia reactiva ($\varphi_{\varepsilon q}^*$) basándose en una diferencia entre una referencia de potencia reactiva (q^*) y una potencia reactiva (q) que tiene lugar en la entrada del transformador de red (608).
15. Turbina eólica (100), que comprende un generador de potencia y un convertidor de lado de red (602),
 40 en el que el generador de potencia está conectado al convertidor de lado de red a través de un convertidor de lado de generador y un enlace de CC (636) que conecta el convertidor de lado de generador con el convertidor de lado de red (602), y en el que la turbina eólica (100) comprende un sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14.

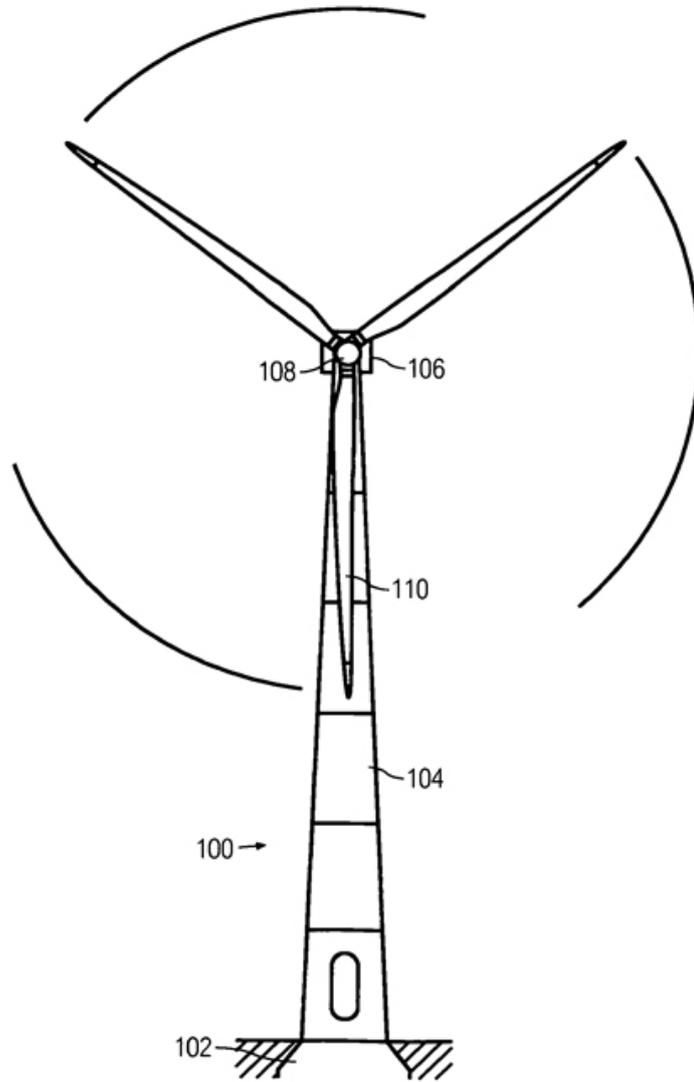


FIGURA 1

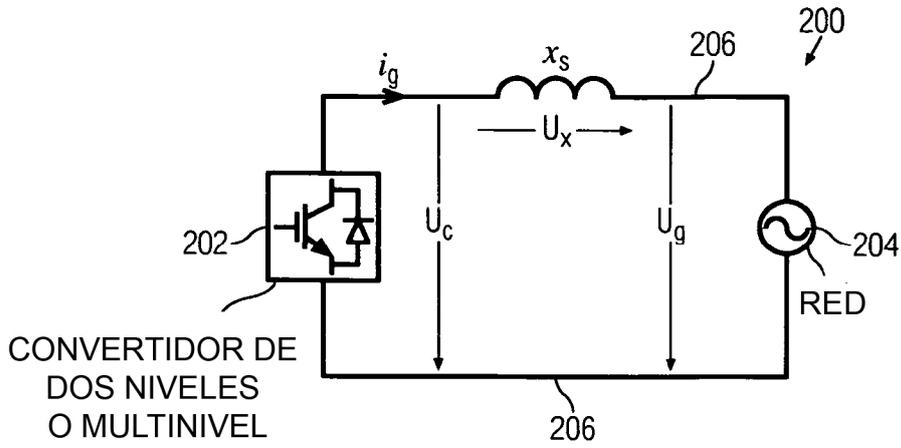


FIGURA 2

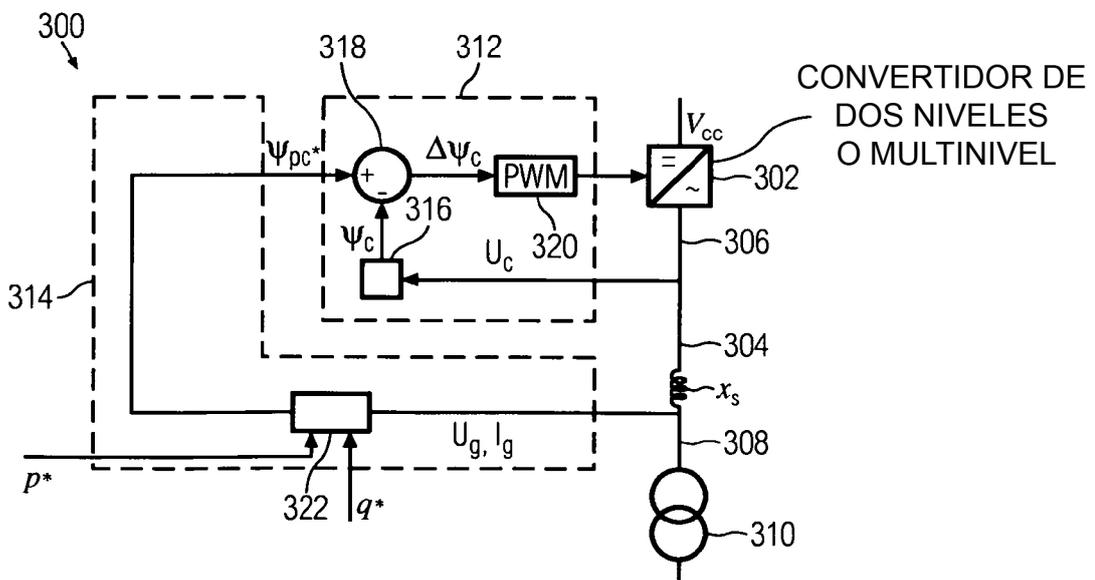


FIGURA 3

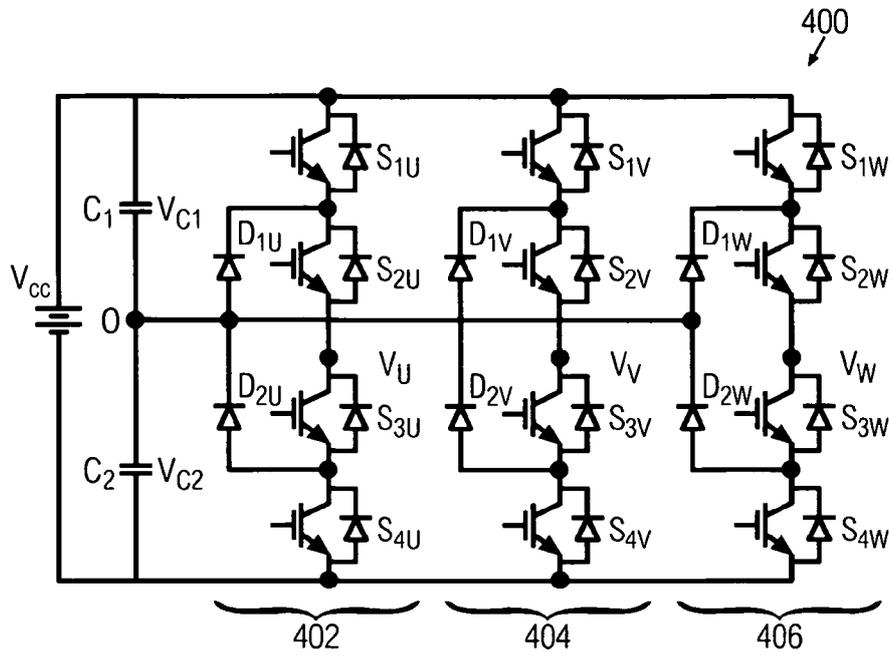


FIGURA 4A

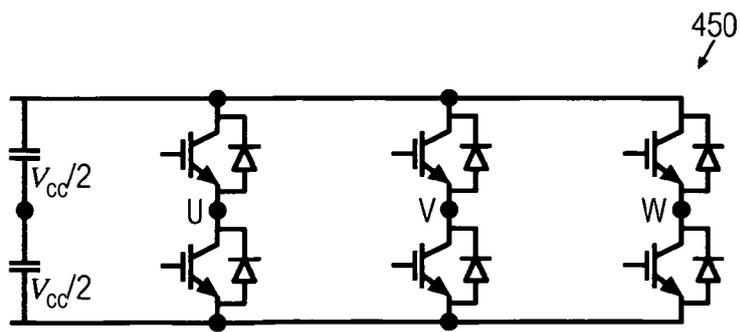


FIGURA 4B

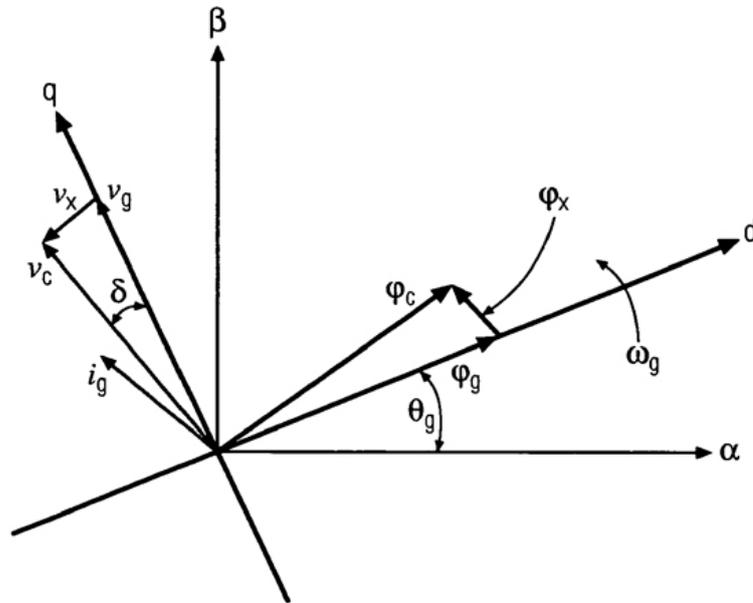


FIGURA 5

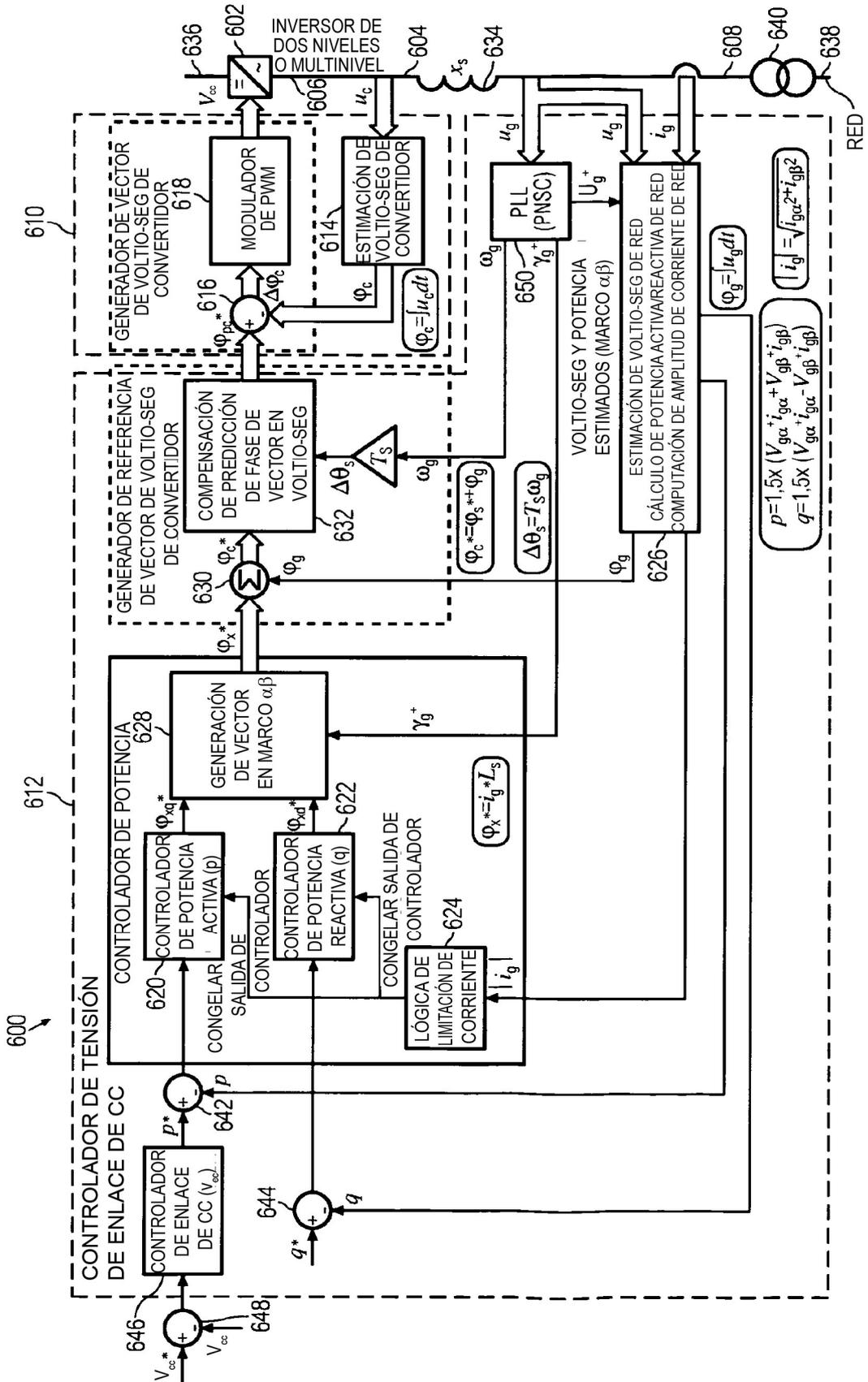


FIGURA 6

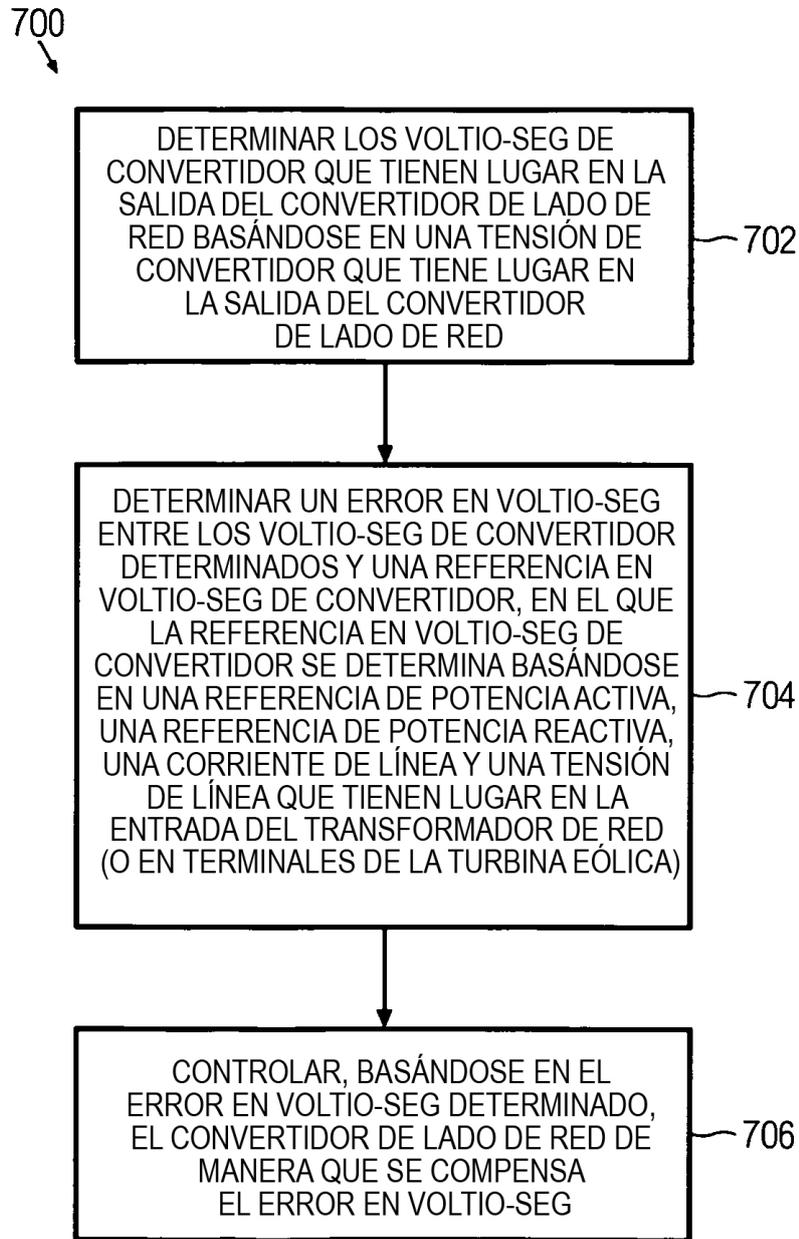


FIGURA 7

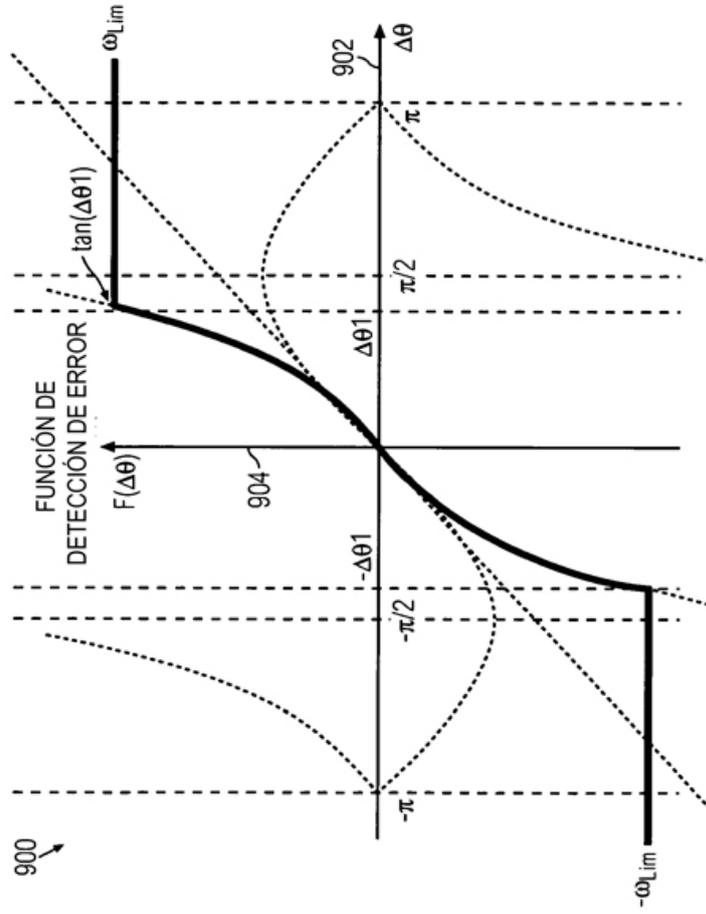


FIGURA 9