

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 669 026**

51 Int. Cl.:

H02J 3/38 (2006.01)

H02P 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.09.2010** **PCT/SG2010/000338**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.03.2011** **WO11034500**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.09.2010** **E 10766364 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.04.2018** **EP 2478609**

54 Título: **Un método para controlar un generador de turbina eólica y aparato para controlar la potencia eléctrica generada por un generador de turbina eólica**

30 Prioridad:

18.09.2009 DK 200901044

18.09.2009 US 200961243555 P

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

23.05.2018

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N , DK

72 Inventor/es:

CAO, SHU YU;

TRIPATHI, ANSHUMAN;

LARSEN, KIM B.;

ANDERSEN, GERT KARMISHOLT y

HELLE, LARS

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 669 026 T3

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

DESCRIPCIÓN

Un método para controlar un generador de turbina eólica y aparato para controlar la potencia eléctrica generada por un generador de turbina eólica

Campo técnico

La presente invención se refiere, generalmente, a un método para controlar un generador de turbina eólica, así como un aparato para controlar la potencia eléctrica o el par generado por un generador de turbina eólica.

Antecedentes

En los últimos años, los generadores de turbina eólica de imán permanente interior (IPM) han sido objeto de investigaciones cada vez más de intensas.

En comparación con los generadores de turbina eólica de imanes permanentes de montaje superficial (PM), una ventaja significativa de los generadores de turbina eólica IPM es que los generadores de turbina eólica IPM permiten una mayor densidad de potencia. Sin embargo, una máquina de imán permanente interior (IPM) tiene un rotor magnético saliente. Como resultado, la potencia electromagnética generada por esta máquina se puede clasificar en dos tipos. La potencia del campo magnético (indicada como FP) se genera por la interacción del campo magnético y la corriente o flujo del estator perpendicular a él. La potencia de reluctancia (indicada como RP) se genera por la interacción de la corriente o flujo del estator que se alinea con el campo magnético y la corriente o flujo del estator que es perpendicular al campo magnético. La potencia de reluctancia es proporcional a la diferencia de inductancias en el eje 'd' y el eje 'q', es decir L_d y L_q . Por un lado, la potencia de reluctancia mejora la densidad de potencia de la máquina, pero por otro lado, es una cantidad no lineal que hace que la máquina IPM se convierta en una planta de control no lineal. Por lo tanto, es difícil construir un sistema de control de potencia lineal para asegurar la respuesta dinámica predecible y la estabilidad del sistema en todas las condiciones operativas.

En funcionamiento estable, se desea que el controlador IPM funcione con una restricción de mínimas pérdidas en el cobre (MCL) a baja velocidad y funcione con una restricción de limitación de tensión (VL) a alta velocidad. Con el aumento de la velocidad de funcionamiento del generador de IPM, se incrementa en consecuencia la tensión del estator. La velocidad del generador en la que comienza el funcionamiento de debilitamiento del campo en un estado de alta potencia se ha denominado la velocidad de debilitamiento del campo parcial. Por encima de la velocidad de debilitamiento del campo parcial, la tensión del convertidor del lado de máquina tiene que limitarse dentro del intervalo de modulación PWM lineal para minimizar los armónicos de la corriente del estator aplicando una corriente de desmagnetización al generador. En la operación con debilitamiento del campo, el convertidor del lado de máquina funciona con un valor del índice de modulación PWM más cercano a la unidad. Más aún, la variación del parámetro debido a saturación y cambios de temperatura pueden provocar un deterioro significativo del rendimiento en estado estable del IPM.

Se ha dedicado un esfuerzo de investigación intensiva en el control IPM para lograr el control MCL a baja velocidad y el control de debilitamiento del campo basado en VL a alta velocidad para mejorar la eficiencia de operación en estado estable. La mayoría de las soluciones de control publicadas no han considerado la no linealidad del IPM. Para este tipo de sistema de control, el rendimiento dinámico del controlador es impredecible. Puede no asegurarse el margen de estabilidad del sistema de control del IPM y el rendimiento dinámico de la máquina IPM depende en gran medida de las condiciones de funcionamiento. El rendimiento en estado estable puede deteriorarse con la saturación del generador y los cambios de temperatura. La bibliografía sugiere el uso de métodos de ajuste de curva bidimensionales. El cambio entre las tablas de consulta bidimensionales o las funciones polinómicas se decide por la velocidad de funcionamiento que lleva a cambios repentinos de las señales de referencia de corriente. Esto da como resultado problemas de estabilidad en el sistema de control de la potencia.

El documento US2006/0028025 describe un método según el preámbulo de la reivindicación 1.

El objetivo de la presente invención es proporcionar una solución para mitigar los problemas mencionados anteriormente.

Sumario

La invención se refiere a un método según la reivindicación 1 y a un aparato según la reivindicación 15.

De acuerdo con una realización de la presente invención, se proporciona un método para linealizar el sistema de control de la potencia del IPM que añade una unidad de compensación no lineal en el bucle de control de potencia invirtiendo la ecuación de la potencia del IPM no lineal y cancelando la no linealidad de la generación de potencia del IPM.

Se describen dos planteamientos para implementar el método de control de la potencia del IPM. Un planteamiento es implementar el método en un sistema de control del IPM basado en la referencia del vector de flujo que es

aplicable para el control del flujo del estator. Otro planteamiento es implementar el método en un sistema de control de la potencia del generador IPM basado en la referencia del vector de corriente que es aplicable para el control de la corriente del estator.

5 De acuerdo con una realización de la presente invención, el control de potencia linealizado se logra mediante la adición de una curva de tabla de consulta o una curva polinómica basada en un bloque de compensación de ganancia no lineal en el bucle de control de la potencia para generar la referencia de corriente o flujo del estator para la potencia de campo. Se aplican dos restricciones diferentes para la linealización del sistema de control de potencia del IPM. Por debajo de la velocidad de debilitamiento del campo parcial, se aplica la restricción de pérdida de cobre
10 mínima (MCL) para deducir la ecuación característica del IPM para la curva de la tabla de consulta MCL o la generación de la curva polinómica. Por encima de la velocidad de debilitamiento del campo parcial, se aplica la restricción de VL para deducir la ecuación característica del IPM para las curvas de la tabla de consulta VL o la generación de las curvas polinómicas. Las curvas de la tabla de consulta o las curvas polinómicas pueden generarse en línea para tener en cuenta los cambios de parámetros de la máquina.

15 De acuerdo con una realización de la presente invención, en el sistema linealizado de control de potencia, la referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia (RP) se calcula analíticamente por una unidad de control MCL y una unidad de control de debilitamiento de campo (FW) utilizando la referencia de la corriente o flujo de FP como señal de entrada.

20 De acuerdo con una realización de la presente invención, en funcionamiento estable, el cálculo analítico determina la relación entre la referencia de la corriente o flujo de FP y la referencia de la corriente o flujo de RP. Utilizando los parámetros del IPM identificados en línea en el cálculo analítico de la unidad de control MCL y la unidad de control de FW, se tiene en cuenta la variación del parámetro IPM en el control de la potencia en una operación en estado
25 estable.

De acuerdo con una realización de la presente invención, en el control de potencia lineal, se garantiza una transición suave de la estructura del controlador entre operaciones MCL a la operación de debilitamiento del campo VL mediante la elección de la señal de referencia de corriente o flujo del estator basada en la limitación MCL o basada
30 en la limitación VL de la amplitud más pequeña como la señal de referencia de la corriente o flujo de salida del estator para tanto la generación de la potencia de campo como la generación de potencia de reluctancia.

Las ventajas de las realizaciones de la presente invención son:

35 a) El control linealizado de la potencia hace posible aplicar la teoría de control lineal clásica en el diseño del controlador de potencia. Por lo tanto, el sistema de control de potencia resultante es predecible y tiene la misma respuesta dinámica en todas las condiciones de operación con los márgenes de estabilidad deseados.

40 b) Puede mantenerse la simplicidad del cálculo analítico del control MCL y el control de debilitamiento del campo basado en VL para la generación de la referencia de corriente o flujo de potencia de reluctancia, de modo que la adaptación del parámetro IPM dentro de este cálculo analítico se pueda aplicar fácilmente para asegurar la máxima eficiencia del IPM en la operación en estado estable.

45 c) Puede usarse una transición suave de las señales de referencia entre el control MCL y el control de la operación de debilitamiento del campo basado en VL para asegurar la estabilidad del sistema en el cambio de la estructura de control.

50 d) Se usa una generación en línea de curvas de tabla de consulta o funciones polinómicas usadas en la unidad de compensación de no linealidad basándose en la ecuación característica de IPM para adaptarse a cambios en el parámetro de IPM.

De acuerdo con una realización de la presente invención, se proporciona un método para controlar un generador de turbina eólica, el generador de turbina eólica convierte la energía mecánica en energía eléctrica, comprendiendo el
55 método:

- determinar una referencia de potencia electromagnética que representa la potencia electromagnética generada por el generador de turbina eólica, en el que la referencia de potencia electromagnética se determina basándose en una salida deseada (potencia o par) del generador de turbina eólica,

60 - controlar la potencia eléctrica generada por el generador de turbina eólica utilizando una señal de control, en el que la señal de control se deriva de la referencia de potencia electromagnética y se modifica dependiendo de una función de la potencia inversa del generador de turbina eólica de modo que se compense la no linealidad del generador de turbina eólica.

65 De acuerdo con una realización de la presente invención, se determina una primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en un primer criterio dependiente de la referencia de potencia

electromagnética; se determina una segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en un segundo criterio dependiente de la referencia de potencia electromagnética; se selecciona una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator; y se controla una corriente o flujo del estator del generador de la turbina eólica en función de la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator se determinan de modo que se compense la no linealidad del generador de la turbina eólica.

De acuerdo con una realización de la presente invención, determinar la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator comprende: determinar una primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en la referencia de potencia electromagnética obtenida a la velocidad de debilitamiento de campo parcial del generador de turbina eólica; determinar una segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en la referencia de potencia electromagnética obtenida a una velocidad máxima del generador de turbina eólica; determinar un promedio ponderado de la primera referencia preliminar de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia preliminar de corriente o flujo de potencia de campo del estator con el fin de obtener la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator.

De acuerdo con una realización de la presente invención, seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator comprende: comparar un valor absoluto de la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y un valor absoluto de la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator; y seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator que tenga el valor absoluto más pequeño.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el método comprende, además, los siguientes procesos: determinar una primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia basándose en un tercer criterio y la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada; determinar una segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia basándose en un cuarto criterio y en la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada; seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia; y controlar la corriente o flujo del estator del generador de turbina eólica basado en la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada y la referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia seleccionada.

De acuerdo con una realización de la presente invención, seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia comprende: comparar un valor absoluto de la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y un valor absoluto de la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia; y seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia que tenga el valor absoluto más pequeño.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el cálculo de la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia se llevan a cabo analíticamente.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator se determinan usando tablas de consulta o funciones polinómicas.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el primer criterio es la solución de restricción de mínimas de pérdidas en el cobre y la ecuación de la potencia del IPM.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el segundo criterio es la solución de restricción de limitación de tensión y la ecuación de la potencia del IPM.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el generador de turbina eólica es un generador de turbina eólica que tiene un componente de potencia de reluctancia, por ejemplo, un generador de imanes permanentes interiores.

De acuerdo con una realización de la presente invención, se proporciona un aparato para controlar la potencia eléctrica o el par generado por un generador de turbina eólica, comprendiendo el aparato: un controlador de potencia lineal para generar una referencia de potencia electromagnética, en el que la referencia electromagnética de potencia representa la potencia electromagnética generada por el generador de turbina eólica y se determina

basándose en una salida deseada del generador de turbina eólica; una unidad de control adaptada para controlar la potencia eléctrica que genera el generador de turbina eólica utilizando una señal de control, en el que la señal de control se deriva de la referencia de potencia electromagnética y se modifica dependiendo de una función de la potencia inversa del generador de turbina eólica de modo que se compense la no linealidad del generador de turbina eólica.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la unidad de control comprende una subunidad de control lineal y una subunidad de linealización acoplada a la subunidad de control lineal, en el que la señal de control se dirige desde una unidad de control lineal a través de la subunidad de linealización y luego se suministra al subsistema de control lineal, en el que la unidad de linealización está adaptada para linealizar la no linealidad del generador de turbina eólica.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la unidad de control comprende: una primera subunidad de determinación adaptada para determinar una primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en un primer criterio que depende de la referencia de potencia electromagnética; una segunda subunidad de determinación adaptada para determinar una segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en un segundo criterio que depende de la referencia de potencia electromagnética; una subunidad de selección adaptada para seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator; y una subunidad de control adaptada para controlar una corriente o flujo del estator del generador de la turbina eólica en función de la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la primera subunidad de determinación y la segunda subunidad de determinación están adaptadas para determinar la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator de manera que se compensan los elementos no lineales de la potencia eléctrica generada.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la segunda subunidad de determinación está adaptada para determinar la segunda corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en los siguientes procesos: determinar una primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en la referencia de potencia electromagnética obtenida a una velocidad de debilitamiento de campo parcial; determinar una segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en la referencia de potencia electromagnética obtenida a una máxima velocidad; determinar un promedio ponderado de la primera referencia preliminar de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia preliminar de corriente o flujo de potencia de campo del estator con el fin de obtener la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la subunidad de selección está adaptada para seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en los procesos siguientes: comparar una amplitud de la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y una amplitud de la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator; y seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator que tenga el valor absoluto más pequeño.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el aparato además comprende: una tercera subunidad de determinación adaptada para determinar una primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia basándose en un tercer criterio y la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada; una cuarta subunidad de determinación adaptada para determinar una segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia basándose en un cuarto criterio y en la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada; una subunidad de selección adaptada para seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia; y una subunidad de control adaptada para controlar el flujo del estator del generador basándose en la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada y la referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia seleccionada.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el tercer criterio es la restricción de mínimas pérdidas en el cobre del generador.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el cuarto criterio es la restricción de limitación de tensión del generador.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la subunidad de selección está adaptada para realizar los siguientes procesos: comparar una amplitud de la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y una amplitud de la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia; y seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda

referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia que tenga la amplitud más pequeña.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la tercera subunidad de determinación y la cuarta subunidad de determinación están adaptadas para calcular analíticamente la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia, respectivamente.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la tercera subunidad de determinación y la cuarta subunidad de determinación están adaptadas de modo que los parámetros de máquina del IPM utilizados en las fórmulas de cálculo analítico para determinar la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia se modifican durante el proceso de control de la potencia eléctrica o del par dependiendo del estado actual del generador de turbina eólica.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la primera subunidad de determinación y la segunda subunidad de determinación están adaptadas de tal manera que la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator se calculan usando las tablas de consulta o ecuaciones polinómicas.

De acuerdo con una realización de la presente invención, el generador de turbina eólica es un generador de imanes permanentes interior.

Breve descripción de los dibujos

En los dibujos, los caracteres de referencia similares se refieren, generalmente, a las mismas partes en todas las diferentes vistas. Los dibujos no están necesariamente a escala, poniéndose en su lugar, en general, el énfasis en 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 una configuración común de una turbina eólica convencional.

La Figura 2 muestra un diagrama de bloques esquemático que ilustra el principio de trabajo del control de potencia linealizado de un generador de turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 3 muestra un diagrama de bloques esquemático que ilustra una posible implementación del principio de trabajo del control de potencia linealizado que se muestra en la figura 2 de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 4 muestra un diagrama de bloques esquemático que ilustra una posible implementación de partes del esquema de control de potencia linealizado que se muestra en la figura 3 basado en el control del flujo del estator de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 5 muestra un diagrama de bloques esquemático que ilustra una posible implementación de partes del esquema de control de potencia linealizado que se muestra en la figura 3 basado en el control de la corriente del estator de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 6 muestra gráficos de curvas de tabla de consulta ilustrativas o curvas polinómicas usadas cuando se realiza el método de linealización del control de potencia para controlar la potencia eléctrica de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 7 muestra gráficos de curvas de ganancia de compensación del bucle de potencia equivalentes de ejemplo correspondientes a las curvas de la tabla de consulta o curvas polinómicas mostradas en la figura 6 cuando se lleva a cabo el método para el control de la potencia eléctrica de acuerdo con una realización de la presente invención.

Descripción detallada

Se describirán en detalle más adelante con referencia a las figuras adjuntas realizaciones ilustrativas de una pala del rotor de turbina eólica, una turbina eólica y un método para el control del generador de turbina eólica de acuerdo con la presente invención. Las realizaciones de ejemplo descritas a continuación pueden modificarse en diversos aspectos sin cambiar la esencia de la invención.

La Figura 1 ilustra una configuración común de una turbina eólica convencional 100. La turbina eólica 100 está montada sobre una base 102. La turbina eólica 100 incluye una torre 104 que tiene una cantidad de secciones de torre, tales como anillos de torre. Se coloca una góndola de turbina eólica 106 en la parte superior de la torre 104. El rotor de la turbina eólica incluye un buje 108 y al menos una pala del rotor 110, por ejemplo, tres palas del rotor 110. Las palas del rotor 110 están conectadas al buje 108 que a su vez está conectado a la góndola 106 a través de un árbol de baja velocidad que se extiende hacia el exterior de la parte frontal de la góndola 106.

La Figura 2 muestra un sistema 200 de control de potencia para un generador de turbina eólica 220 IPM de acuerdo con una realización de la presente invención. En la Figura 2, el sistema dinámico eléctrico de la máquina IPM 220 se representa esquemáticamente en tres unidades funcionales, a saber, una unidad de respuesta dinámica eléctrica lineal 212 con la señal de tensión del estator como entrada y las señales del vector de corriente o flujo del estator como salida, una unidad de respuesta dinámica eléctrica no lineal 214 con señales del vector de corriente o flujo del estator como entrada y la potencia electromagnética como salida, y una respuesta dinámica mecánica de la unidad de generador de turbina eólica 216 con la potencia electromagnética del generador y la potencia mecánica obtenida desde el árbol generador como entrada y las señales de velocidad del generador y de posición del rotor del generador como salida.

En el marco de referencia síncrona del flujo del rotor, la unidad dinámica eléctrica lineal del IPM 212 con la tensión del estator como entrada y el vector de flujo del estator como salida se puede representar como:

$$u_{RP} = R_s * (\psi_{RP} - \psi_r) / L_d - \omega_r * \psi_{FP} + \frac{d\psi_{RP}}{dt}$$

$$u_{FP} = R_s * \psi_{FP} / L_q + \omega_r * \psi_{RP} + \frac{d\psi_{FP}}{dt}$$

En estas ecuaciones, las variables "u" y "ψ" indican la señal de tensión y flujo respectivamente; el subíndice "r" indica que la variable está asociada con el rotor, el subíndice RP indica que la variable está asociada con la potencia de reluctancia, el subíndice FP indica que la variable está asociada con la potencia del campo; y ω_r indica la velocidad eléctrica del generador; "L_d" y "L_q" indican la inductancia de eje d y la inductancia de eje q, respectivamente. R_s indica la resistencia del estator.

La unidad de respuesta dinámica eléctrica lineal del generador IPM 212 con la tensión del estator como entrada y el vector de corriente del estator como salida se puede representar como:

$$u_{RP} = R_s * i_{RP} + L_d \frac{di_{RP}}{dt} - L_q * \omega_r * i_{FP}$$

$$u_{FP} = R_s * i_{FP} + L_q \frac{di_{FP}}{dt} + L_d * \omega_r * i_{RP} + \omega_r * \psi_r$$

En estas ecuaciones, la variable "i" indica la señal de corriente.

La unidad de respuesta eléctrica no lineal del generador IPM 214 con el vector de flujo del estator como entrada y la potencia electromagnética del generador PEM como salida se puede representar como:

$$PEM = \omega_r * \frac{3}{2} \left(\frac{1}{L_q} * \psi_r + \frac{(L_d - L_q)}{L_d * L_q} * (\psi_{RP} - \psi_r) \right) * \psi_{FP}$$

La unidad de respuesta eléctrica no lineal del generador IPM 214 con el vector de corriente del estator como entrada y la potencia electromagnética del generador PEM como salida se puede representar como:

$$PEM = \omega_r * \frac{3}{2} \left(\psi_r i_{FP} + (L_d - L_q) * i_{RP} * i_{FP} \right)$$

La respuesta dinámica mecánica de la unidad de generador de turbina eólica 216 puede representarse como:

$$P_{\text{mech}} / \omega_m = PEM / \omega_m + J * \frac{d\omega_m}{dt} + K * \omega_m$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$$

En la que, $\theta_m = \theta_r / PP$ y $\omega_m = \omega_r / PP$ son la posición mecánica y la velocidad mecánica del generador, respectivamente, PP son los pares de polos del generador, P_{mech} es la potencia mecánica obtenida en el árbol del generador, y J y K son los coeficientes de inercia y de viscosidad del sistema generador de turbina eólica, respectivamente.

El sistema de control de potencia del generador IPM 200 incluye una unidad de cálculo de error de potencia de generador 202, una unidad 204 de controlador de potencia que normalmente se implementa como un controlador Proporcional Integral (PI), una unidad de compensación no lineal 206, el bucle de control lineal de realimentación de control de corriente o flujo del estator 218, y la unidad de respuesta de potencia no lineal de la máquina IPM 214.

El bucle de control lineal de realimentación de control de corriente o flujo del estator 218 se compone de una unidad de cálculo del error del vector de corriente o flujo del estator 208, una unidad de control de corriente o flujo del estator 210, y la unidad de respuesta dinámica eléctrica lineal de la máquina IPM 212. Normalmente, los controladores proporcionales-integrales (PI) se utilizan en la unidad 210 para el control del vector de la corriente o flujo del estator.

Durante la operación, la señal de realimentación de potencia se resta de la señal de referencia de potencia en la unidad 202. La salida de la unidad 202 es la diferencia entre la señal de referencia de potencia y la señal de realimentación de potencia. Basándose en la señal de salida de la unidad de resta 202, la unidad 204 de control de potencia genera y envía una señal de control en función de la que se controla la potencia generada por el generador de turbina eólica IPM 220 para que coincida con el valor objetivo de potencia (la señal de referencia de potencia). La salida de la señal de control por la unidad 204 de control de potencia se suministra a la unidad 206 de compensación no lineal que modifica la señal de control y genera los componentes del vector de corriente o flujo del estator de manera que se invierta la relación no lineal del vector de corriente o flujo del estator a la potencia electromagnética de la máquina IPM. Por lo tanto, en el sistema de control de potencia IPM 200, la ganancia combinada de la unidad de compensación no lineal 206 en la parte de control del sistema de control de potencia IPM 200 y de la unidad de respuesta dinámica eléctrica lineal de máquina IPM 212 en la parte de generador IPM del sistema de control de potencia IPM 200 está cercana a la unidad (es decir, ganancia combinada ≈ 1). La señal de control después de la compensación no lineal en 206 se suministra a la unidad del bucle de control de realimentación lineal de la corriente o flujo 214 que controla el vector de corriente o flujo del estator del generador de turbina eólica 220 de modo que la potencia generada por el generador de turbina eólica IPM 220 coincida con el valor objetivo de potencia (la señal de referencia de potencia).

Un efecto de esta realización es que, la unidad de compensación no lineal 206 linealiza el sistema de control de potencia generador 200 de manera que tanto la unidad de control de potencia 204 como el subsistema de control de realimentación de corriente y flujo 218 pueden diseñarse usando la teoría de control lineal clásica.

La figura 3 muestra un sistema de control de potencia linealizado más detallado 300 para controlar la potencia eléctrica o el par de un generador de turbina eólica IPM 310 de acuerdo con una realización de la presente invención.

En el sistema 300 de control de potencia, la señal de realimentación de potencia se genera en la unidad de estimación de potencia el generador 326 basándose en la medición de corriente del estator y la referencia de tensión del estator. La fórmula para la estimación de potencia electromagnética IPM en la unidad de cálculo de potencia del generador 326 puede representarse en el marco de referencia α/β fijo del estator como:

$$PEM = (3/2) * (I_{s\alpha} * U_{s\alpha}^* + I_{s\beta} * U_{s\beta}^*)$$

En el caso de usar el enfoque de control de corriente del estator para realizar el sistema 300 de control de potencia, el vector de corriente del estator se obtiene directamente mediante la medición en la unidad 318 y se transfiere al marco de referencia correspondiente con el fin de controlar la corriente.

En el caso de usar el enfoque del vector de flujo del estator para realizar el sistema 300 de control de potencia, las señales del vector de realimentación de flujo del estator se generan en la unidad 318 usando un método de observación del flujo del estator convencional. Las señales de entrada suministradas a un observador de flujo del estator correspondiente incluyen la referencia de tensión del estator, la corriente del estator de la medición y la posición del generador y la velocidad estimada a partir de una medición del codificador montado en el árbol. Tanto el

observador del flujo del estator en modo corriente como un observador del flujo del estator en modo tensión se utilizan para observación del flujo del estator. El observador en modo de corriente se utiliza a baja velocidad. El observador en modo de tensión se utiliza a alta velocidad.

- 5 El observador del flujo del estator en el modo de corriente IPM implementado en la unidad 318 se puede representar en el marco de referencia α/β fijo del estator como ("CM indica el modo de corriente"):

$$\Psi_{s\alpha_CM} = -(L_d * \sin^2(\theta_r) + L_q * \cos^2(\theta_r)) * i_{s\alpha} + \left(\frac{\sin(2 * \theta_r) * (L_d - L_q)}{2} \right) * i_{s\beta} + \Psi_{rm} * \sin(\theta_r)$$

$$\Psi_{s\beta_CM} = \left(\frac{\sin(2 * \theta_r) * (L_d - L_q)}{2} \right) * i_{s\alpha} - (L_q * \sin^2(\theta_r) + L_d * \cos^2(\theta_r)) * i_{s\beta} - \Psi_{rm} * \cos(\theta_r)$$

- 10 El observador de flujo del estator en el modo de tensión IPM implementado en la unidad 318 se puede representar en el marco de referencia α/β fijo del estator, como ("VM indica el modo de tensión"):

$$\Psi_{s\alpha_VM} = \int (U_{s\alpha} - i_{s\alpha} * R_s) dt$$

$$\Psi_{s\beta_VM} = \int (U_{s\beta} - i_{s\beta} * R_s) dt$$

- 15 El sistema de control de potencia 300 incluye una unidad de resta 302, una unidad de controlador de potencia 304, una unidad de compensación no lineal 306, y una unidad de bucle de control de flujo o corriente 308, la unidad de respuesta eléctrica no lineal IPM 320, el sistema dinámico mecánico del generador IPM 324 y la unidad de estimación de la potencia del generador 326 que genera la señal de realimentación de potencia.

- 20 La unidad de bucle de control de corriente o flujo del estator 308 comprende la unidad de cálculo de la señal de error del vector de corriente o flujo 322, una unidad controladora del vector de corriente o flujo del estator 312, una unidad inversora de modulación de ancho de impulsos (PWM) 314, una unidad de respuesta dinámica eléctrica lineal de tensión de máquina IPM a corriente o flujo del estator 316, una unidad de medición de corriente del estator u observación del flujo del estator 318.

- 25 La señal de retroalimentación de potencia PEM refleja la potencia actualmente generada por el generador de turbina eólica IPM 310. La señal de realimentación de potencia PEM es recibida por la unidad de resta 302 y se resta de la señal de referencia de potencia que representa la potencia objetivo que debiera generarse por el generador de turbina eólica IPM 310. La salida de la unidad de resta 302 refleja la diferencia entre la señal de referencia de potencia y la señal de realimentación de potencia. Basándose en la señal de salida de la unidad de resta 302, la unidad controladora de potencia 304 genera una señal de control de referencia de potencia del generador PEM* de modo que se controla la potencia generada por el generador de turbina eólica IPM 310 para que coincida con el valor objetivo de potencia (la señal de referencia de potencia).

- 35 La señal de control PEM* producida por el controlador de potencia 304 se suministra a la unidad de compensación no lineal 306 (realizaciones concretas de la unidad 306 de compensación no lineal se muestran, por ejemplo, en la Figura 4 y la Figura 5 y se explicarán más adelante) que modifica la señal de control de manera que se compense la no linealidad del generador IPM. Como resultado, la unidad de compensación no lineal 306 produce las señales de referencia del vector de corriente o flujo del estator y las suministra a una unidad de resta 322. En la unidad 322, las señales del vector de realimentación del estado de la corriente o flujo del estator que se obtienen de la unidad de medición de corriente del estator u observación del flujo del estator 318 se restan de las señales del vector de referencia de la corriente o flujo del estator. Las señales de error del vector de corriente o flujo del estator producidas por la unidad de resta 322 se suministran a la unidad controladora de la corriente o flujo del estator 312 que genera las señales del vector de referencia de tensión del estator U_s^* que se suministran a la unidad de inversor de modulación del ancho de impulsos (PWM) 314. La unidad de inversor de PWM 314 envía la señal de tensión del estator modulada de PWM U_s que se aplica a los terminales de la fase de la máquina IPM. Dentro de la máquina IPM, las señales del vector de corriente o flujo del estator se generan de acuerdo con la ecuación dinámica de tensión IPM en la unidad 316 que representa la respuesta de la máquina IPM a la señal de tensión del estator modulada U_s aplicada. Las señales del vector de corriente o flujo del estator de la máquina IPM se introducen en la ecuación de potencia no lineal en la unidad 320 que representa la respuesta de la máquina IPM a las señales del vector de corriente o flujo del estator para generar la potencia del generador. La potencia electromagnética IPM del generador IPM se estima en la unidad 326 y se usa como la señal de realimentación de potencia PEM para el bucle de control de potencia 300. Las señales del vector de corriente o flujo del estator IPM se observan en la unidad 318 que genera las señales del vector de realimentación del estado de corriente o flujo del estator para el bucle de control de realimentación de corriente o flujo del estator 308.

Como se ha hecho evidente, debido a la unidad de compensación no lineal 306, de manera que **g(flujo/corriente) ***

$g^{-1}(\text{PEM}) = 1$ (inversión de la ganancia no lineal de la máquina IPM), el bucle de control de potencia 300 se convierte en un sistema de control lineal.

La Figura 4 muestra una primera realización posible de la unidad 306 de compensación no lineal cuando realiza el principio de trabajo de la Figura 3 utilizando el enfoque de control del flujo del estator. En esta realización, la unidad de compensación no lineal 306 comprende una primera subunidad de determinación 402 que se usa para determinar una primera referencia del flujo de potencia de campo que toma la señal de control PEM* como su señal de entrada. La unidad de compensación no lineal 306 comprende además una segunda subunidad de determinación 404 que se usa para determinar una segunda referencia del flujo de potencia de campo que toma la señal de control PEM* como su señal de entrada.

La ecuación de flujo del estator que satisface la restricción de mínimas pérdidas en el cobre (restricción MCL) viene dada por:

$$\psi_{\text{st}} = \frac{2L_q - L_d}{2(L_q - L_d)} \psi_r - L_d \sqrt{\frac{\psi_r^2}{4(L_q - L_d)^2} + \left(\frac{\psi_{\text{FP}}}{L_q}\right)^2}$$

La solución del flujo de potencia de campo del estator (FP) que satisface tanto la ecuación de potencia del generador de IPM como la restricción MCL se deduce como la siguiente función característica de IPM basada en MCL:

$$16 * (L_q)^4 * \left(\frac{\text{PEM}^*}{\omega_r}\right)^4 - 12 * P * (L_q)^3 * \psi_r * \psi_{\text{FP_MCL}} * \left(\frac{\text{PEM}^*}{\omega_r}\right) - 9 * P^2 * (L_d - L_q)^2 * (\psi_{\text{FP_MCL}})^4 = 0$$

Para una determinada velocidad, la función característica de IPM basada en MCL es una función cuadrática de la potencia/velocidad para un valor de flujo del estator de FP determinado. Por lo tanto, basándose en la función característica de IPM basada en MCL, se puede construir una tabla de consulta de los pares de datos de potencia/velocidad respecto al flujo de estator de FP usando la solución de la función cuadrática anterior:

$$\frac{\text{PEM}}{\omega_r} = \frac{12 * P * (L_q)^3 * \psi_r * \psi_{\text{FP}} - \sqrt{(-12 * P * (L_q)^3 * \psi_r * \psi_{\text{FP}})^2 + 4 * 16 * (L_q)^4 * 9 * P^2 * (L_d - L_q)^2 * (\psi_{\text{FP}})^4}}{2 * 16 * (L_q)^4}$$

Para mejorar la eficiencia de cálculo de la primera subunidad de determinación 402 para la compensación de la no linealidad IPM, se aplica un ajuste de curvas polinómico de segundo orden (o tercer orden) de los valores de la tabla de consulta anterior tomando el flujo de potencia de campo del estator como la señal de salida y la potencia/velocidad como la señal de entrada. Utilizando un ajuste de curvas polinómico de segundo orden como ejemplo, se obtienen de ese modo los coeficientes de la función polinómica de linealización MCL y se usan como la función en la primera subunidad de determinación 402 para determinar la primera referencia del flujo de potencia del campo basándose en la siguiente ecuación:

$$\Psi_{\text{FP_MCL}} = a_{\text{MCL}} * (\text{PEM} / \omega_r)^2 + b_{\text{MCL}} * (\text{PEM} / \omega_r)$$

En la que a_{MCL} y b_{MCL} son coeficientes polinómicos.

Cuando IPM funciona en modo de funcionamiento de debilitamiento del campo, las ecuaciones de linealización basadas en VL se aplican como se implementa en la segunda subunidad de determinación 404. La ecuación de flujo del estator que satisface la restricción de limitación de tensión (VL) viene dada por la siguiente ecuación:

$$\psi_{\text{st}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{dc}}}{\sqrt{3} * \omega_r}\right)^2 - (\psi_{\text{FP}})^2}$$

La ecuación característica de IPM basada en VL que satisfaga tanto la ecuación de potencia de IPM como la restricción de limitación de tensión se deduce como:

$$16 * L_d^2 * L_q^2 * \left(\frac{PEM}{\omega_r} \right)^2 - 24 * P * L_d * L_q^2 * \psi_r * \psi_{FP} * \left(\frac{PEM}{\omega_r} \right) + 9 * P^2 * (L_d - L_q)^2 * (\psi_{FP})^4 - 3 * P^2 * (L_d - L_q)^2 * \frac{Udc^2}{\omega_r^2} * (\psi_{FP})^2 + 9 * P^2 * L_q^2 * \psi_r^2 * (\psi_{FP})^2 = 0$$

La ecuación característica de IPM basada en VL anterior se puede reescribir como:

$$a_{VL_org} * \left(\frac{PEM}{\omega_r} \right)^2 + b_{VL_org} * \frac{PEM}{\omega_r} + c_{VL_org} = 0$$

5

En la que,

$$a_{VL_org} = 16 * L_d^2 * L_q^2$$

$$b_{VL_org} = -24 * (2 * PP) * L_d * L_q^2 * \psi_r * \psi_{FP}$$

$$c_{VL_org} = 9 * (2 * PP)^2 * (L_d - L_q)^2 * \psi_{FP}^4 - 3 * (2 * PP)^2 * (L_d - L_q)^2 * \frac{Udc^2}{\omega_r^2} * \psi_{FP}^2 + 9 * P^2 * L_q^2 * \psi_r^2 * \psi_{FP}^2$$

10

A velocidad parcial de debilitamiento del campo $\omega_r = \omega_{FWL}$ (en la que, el subíndice "FWL" indica límite de baja velocidad para la operación de debilitamiento del campo), puede generarse un conjunto de valores de datos de la tabla de consulta basándose en la ecuación característica de IPM basada en VL anterior proporcionando un conjunto de valores de flujo del estator de FP como entrada usando la solución siguiente:

15

$$\frac{PEM}{\omega_{FWL}} = \frac{-b_{VL_org} + \sqrt{b_{VL_org}^2 - 4 * a_{VL_org} * c_{VL_org}(\omega_{FWL})}}{2 * a_{VL_org}}$$

De manera similar, a velocidad máxima $\omega_r = \omega_{FWH}$, puede generarse un conjunto de valores de datos de la tabla de consulta basándose en la ecuación característica de IPM basada en VL anterior proporcionando un conjunto de valores de flujo de potencia de campo del estator como entrada mediante la aplicación de la solución siguiente:

20

$$\frac{PEM}{\omega_{FWH}} = \frac{-b_{VL_org} + \sqrt{b_{VL_org}^2 - 4 * a_{VL_org} * c_{VL_org}(\omega_{FWH})}}{2 * a_{VL_org}}$$

25

Para el cálculo de la eficiencia, se aplica el ajuste de la curva polinómica para valores de datos de la tabla de consulta de las curvas VL tanto a la velocidad de debilitamiento del campo parcial $\omega_r = \omega_{FWH}$ como a la velocidad máxima $\omega_r = \omega_{FWH}$ (en las que, el subíndice "FWH" indica un límite de velocidad alta máximo para la operación de debilitamiento del campo).

30

Cuando se aplica el ajuste de curvas polinómico de segundo orden, la subunidad de determinación 404 determina la primera y segunda referencias de flujo de potencia de campo del estator preliminar en el nivel de velocidad de debilitamiento de campo parcial y nivel de velocidad máxima basándose respectivamente en las siguientes funciones de linealización polinómica de VL:

$$(1) \psi_{FP_VL_FWL}^* = a_{FWL} * (PEM^* / \omega_r)^2 + b_{FWL} * (PEM^* / \omega_r)$$

$$(2) \psi_{FP_VL_FWH}^* = a_{FWH} * (PEM^* / \omega_r)^2 + b_{FWH} * (PEM^* / \omega_r)$$

En la que a_{FWL} , b_{FWL} , a_{FWH} y b_{FWH} son coeficientes polinómicos.

- Los resultados de las ecuaciones (1) y (2) (primera referencia de flujo de potencia de campo del estator preliminar y segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator preliminar) se utilizan a continuación para determinar un promedio ponderado de la primera referencia de flujo del estator de potencia de campo preliminar y la segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator preliminar para obtener la segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator usando la siguiente ecuación:

$$\psi_{FP_VL}^* = (1 - KW(\omega_r)) * \psi_{FP_VL_FWL}^* + KW(\omega_r) * \psi_{FP_VL_FWH}^*$$

En la que el factor de peso $KW(\omega_r)$ se calcula como:

Si $\omega_r < \omega_{FWL}$ entonces $KW(\omega_r) = 0$

Si $\omega_r > \omega_{FWH}$ entonces $KW(\omega_r) = 1$

Si $\omega_{FWL} \leq \omega_r \leq \omega_{FWH}$ entonces $KW(\omega_r) = \frac{\omega_r - \omega_{FWL}}{\omega_{FWH} - \omega_{FWL}}$

La segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator así determinada y la primera referencia de flujo de potencia de campo del estator se suministran entonces a una subunidad de selección 406. La subunidad de selección 406 selecciona una de entre la primera referencia de flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator basada en la siguiente ecuación:

Si $|\psi_{FP_MCL}^*| \leq |\psi_{FP_VL}^*|$ entonces $\psi_{FP}^* = \psi_{FP_MCL}^*$

Si $|\psi_{FP_MCL}^*| > |\psi_{FP_VL}^*|$ entonces $\psi_{FP}^* = \psi_{FP_VL}^*$

La primera referencia de flujo de potencia de campo del estator así seleccionada o la segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator se suministra entonces a una tercera subunidad de determinación 408 y a una cuarta subunidad de determinación 410. La tercera subunidad de determinación 408 determina una primera referencia de flujo del estator de potencia de reluctancia basada en la siguiente ecuación:

$$\psi_{RP_MCL}^* = \frac{2L_q - L_d}{2(L_q - L_d)} \psi_r - L_d * \sqrt{\frac{\psi_r^2}{4(L_q - L_d)^2} + \left(\frac{\psi_{FP}^*}{L_q}\right)^2}$$

La cuarta subunidad de determinación 410 determina una segunda referencia de flujo del estator de potencia de reluctancia basada en la siguiente ecuación:

$$\psi_{RP_VL}^* = \sqrt{\left(\text{Max_PWM_modu_index} * \frac{U_{dc}}{\sqrt{3} * \omega_r}\right)^2 - (\psi_{FP}^*)^2}$$

En la que, U_{dc} es la señal de tensión del enlace en CC, y el índice de modulación máximo de PWM ($\text{max_PWM_modu_index}$) se fija más próximo a y menor que la unidad.

La primera referencia de flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de flujo del estator de potencia de reluctancia se suministran a continuación a una subunidad de selección 412 para seleccionar una de entre la primera referencia de flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de flujo del estator de potencia de reluctancia basándose en la siguiente ecuación:

$$\psi_{rp}^* = \min(\psi_{RP_MCL}^*, \psi_{RP_VL}^*)$$

La salida de las unidades de selección 406 y 412 se suministra a continuación a la unidad de controlador de flujo del estator 308 que controla el flujo del estator (y de este modo la potencia o par generado por el generador de turbina eólica IPM) dependiendo de estas señales de referencia del flujo del estator. La unidad de control del flujo del estator 308 de la Figura 4 corresponde al bucle de control de realimentación del flujo del estator 308 de la Figura 3. Como se muestra en la Figura 4, la corriente del estator medida, la frecuencia angular eléctrica del rotor del generador de turbina eólica IPM así como la posición eléctrica del rotor obtenida del codificador montado en el árbol se introducen en la unidad de control del flujo del estator 308.

La Figura 5 muestra una segunda realización posible de la unidad de compensación no lineal 306 de la Figura 3. En esta realización, la unidad de compensación no lineal 306 comprende una primera subunidad de determinación 502 adaptada para determinar una primera referencia de corriente de campo basándose en la señal de control PEM*. La unidad de compensación no lineal 306 comprende además una segunda subunidad de determinación 504 adaptada para determinar una segunda referencia de corriente de campo basándose en la señal de control PEM*.

La potencia electromagnética PEM del IPM con respecto a la corriente del estator se representa como:

$$PEM = \frac{3}{2} * \omega_r * (i_{FP} * \psi_r + (L_d - L_q) * i_{RP} * i_{FP})$$

La restricción de mínimas pérdidas en el cobre (restricción MCL) con respecto a la corriente del estator se representa como:

$$i_{RP} = \frac{1}{2(L_q - L_d)} \psi_r - \sqrt{\frac{\psi_r^2}{4(L_q - L_d)^2} + (i_{FP})^2}$$

La restricción limitadora de tensión IPM (restricción VL) con respecto a la corriente del estator se representa como:

$$i_{RP} = -\frac{\psi_r}{L_d} + \sqrt{\left(\frac{U_{dc}}{\sqrt{3} * \omega_r * L_d}\right)^2 - \left(\frac{L_q}{L_d} i_{FP}\right)^2}$$

Utilizando la ecuación de potencia IPM y la ecuación de restricción MCL, la ecuación característica IPM basada en MCL con respecto a la corriente del estator se deduce de:

$$16 * (L_q)^4 * \left(\frac{PEM}{\omega_r}\right)^2 - 12 * P * (L_q)^4 * \psi_r * i_{FP} * \left(\frac{PEM}{\omega_r}\right) - 9 * P^2 * (L_d - L_q)^2 * (L_q)^4 * (i_{FP})^4 = 0$$

Utilizando la ecuación de potencia IPM y la ecuación de restricción VL, la ecuación característica de IPM basada en VL con respecto a la corriente del estator se deduce de la siguiente manera:

$$16 * L_d^2 * L_q^2 * \left(\frac{PEM}{\omega_r}\right)^2 - 24 * P * L_d * L_q^3 * \psi_r * i_{FP} * \left(\frac{PEM}{\omega_r}\right) + 9 * P^2 * (L_d - L_q)^2 * L_q^4 * (i_{FP})^4 - 3 * P^2 * (L_d - L_q)^2 * \frac{U_{dc}^2}{\omega_r^2} * L_q^2 * (i_{FP})^2 + 9 * P^2 * L_q^4 * \psi_r^2 * (i_{FP})^2 = 0$$

Usando el método de generación de datos de la tabla de consulta similar al ajuste de curva polinómica, cuando se opera por debajo de la velocidad de debilitamiento del campo parcial, la ecuación característica del IPM basada en MCL se usa para deducir las ecuaciones polinómicas utilizadas en la unidad de sub-determinación 502 para linealizar el sistema de control de potencia IPM. Cuando se opera por encima de la velocidad de debilitamiento del campo parcial, la ecuación característica del IPM basada en MCL se usa para deducir las ecuaciones polinómicas utilizadas en la unidad de sub-determinación 504 a la velocidad de debilitamiento de campo parcial y a la velocidad máxima respectivamente para linealizar el sistema de control de potencia IPM.

Utilizando una función de ajuste de curvas polinómicas de segundo orden como un ejemplo, la primera subunidad de determinación 502 determina la primera referencia de corriente de potencia de campo basada en la siguiente ecuación (función polinómica de linealización de MCL):

$$i_{FP_MCL}^* = a_{i_{MCL}} * (PEM^* / \omega_r)^2 + b_{i_{MCL}} * (PEM^* / \omega_r)$$

en la que, $a_{i_{MCL}}$ y $b_{i_{MCL}}$ son coeficientes polinómicos de segundo orden.

La segunda subunidad de determinación 504 determina la primera referencia de corriente de potencia de campo preliminar basándose en la siguiente ecuación de linealización de VL polinómica:

$$(3) i_{FP_VL_FWL}^* = a_{i_{FWL}} * (PEM / \omega_r)^2 + b_{i_{FWL}} * (PEM / \omega_r)$$

En la que, $a_{i_{FWL}}$ y $b_{i_{FWL}}$ son coeficientes polinómicos de segundo orden obtenidos en el nivel de velocidad de debilitamiento del campo parcial.

La segunda subunidad de determinación 504 determina la segunda referencia de corriente de campo preliminar con respecto a la siguiente ecuación de linealización de VL polinómica:

$$5 \quad (4) \quad i_{FP_VL_FWH}^* = a_{iFWH} * (PEM/\omega_r)^2 + b_{iFWH} * (PEM/\omega_r)$$

En la que, a_{iFWH} y b_{iFWH} son coeficientes polinómicos de segundo orden obtenidos en el nivel de velocidad de operación máxima.

- 10 Los resultados de las ecuaciones (3) y (4) (primera referencia de la corriente de potencia de campo del estator preliminar y la segunda referencia de la corriente de potencia de campo del estator preliminar) se utilizan a continuación para determinar la segunda referencia de corriente de potencia de campo del estator preliminar mediante el uso de un promedio ponderado de la primera referencia de corriente de potencia de campo del estator preliminar y la segunda referencia de corriente de potencia de campo preliminar usando la siguiente ecuación:

$$15 \quad i_{FP_VL}^* = (1 - KW(\omega_r)) * (i_{FP_VL_FWL}^*) + KW(\omega_r) * (i_{FP_VL_FWH}^*)$$

En la que el factor de ponderación $KW(\omega_r)$ se calcula como:

$$20 \quad Si \omega_r < \omega_{FWL} \text{ entonces } KW(\omega_r) = 0$$

$$Si \omega_r > \omega_{FWH} \text{ entonces } KW(\omega_r) = 1$$

$$25 \quad Si \omega_{FWL} \leq \omega_r \leq \omega_{FWH} \text{ entonces } KW(\omega_r) = \frac{\omega_r - \omega_{FWL}}{\omega_{FWH} - \omega_{FWL}}$$

La segunda referencia de corriente de así determinada y la primera referencia de corriente de potencia de campo del estator se suministran entonces a una subunidad de selección 506. La subunidad de selección 506 selecciona una de entre la primera referencia de corriente de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente de potencia de campo del estator basada en la siguiente ecuación:

$$30 \quad Si \quad |i_{FP_MCL}^*| \leq |i_{FP_VL}^*| \text{ entonces } i_{FP}^* = i_{FP_MCL}^*$$

$$Si \quad |i_{FP_MCL}^*| > |i_{FP_VL}^*| \text{ entonces } i_{FP}^* = i_{FP_VL}^*$$

La primera referencia de corriente de potencia de campo del estator así seleccionada o la segunda referencia de corriente de potencia de campo del estator se suministra entonces a una tercera subunidad de determinación 508 y a una cuarta subunidad de determinación 510. La tercera subunidad de determinación 508 determina una primera referencia de corriente del estator de potencia de reluctancia basada en la siguiente ecuación:

$$35 \quad i_{RP_MCL}^* = \frac{1}{2(L_q - L_d)} \Psi_r - \sqrt{\frac{\Psi_r^2}{4(L_q - L_d)^2} + (i_{FP}^*)^2}$$

La cuarta subunidad de determinación 510 determina una segunda referencia de corriente del estator de potencia de reluctancia basada en la siguiente ecuación:

$$40 \quad i_{RP_VL}^* = -\frac{\Psi_r}{L_d} + \sqrt{\left(\max_PWM_Modu_Index * \frac{U_{dk}}{\sqrt{3} * \omega_r * L_d} \right)^2 - \left(\frac{L_q}{L_d} * i_{FP}^* \right)^2}$$

La primera referencia de corriente del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente del estator de potencia de reluctancia se suministran a continuación a una subunidad de selección 512 para seleccionar una de entre la primera referencia de corriente del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente del estator de potencia de reluctancia basándose en la siguiente ecuación:

$$45 \quad Si \quad |i_{RP_MCL}^*| \leq |i_{RP_VL}^*| \text{ entonces } i_{RP}^* = i_{RP_MCL}^*$$

$$\text{Si } |\mathbf{i}_{RP_MCL}^*| > |\mathbf{i}_{RP_VL}^*| \text{ entonces } \mathbf{i}_{RP}^* = \mathbf{i}_{RP_VL}^*$$

La salida de las unidades de selección 506 y 512 se suministra a continuación a la unidad de control de la corriente del estator 308 que corresponde al bucle de control de la corriente del estator de la Figura 3 para controlar la corriente del estator (y, por lo tanto, la potencia generada por el generador de turbina eólica IPM) dependiendo de estas señales. Como se muestra en la Figura 5, también la frecuencia angular eléctrica del rotor del generador de turbina eólica IPM así como la posición eléctrica del rotor desde el codificador montado en el árbol se introducen en la unidad de control de la corriente del estator 308.

La figura 6 ilustra gráficos de curvas de tabla de consulta de ejemplo o curvas polinómicas usadas cuando se realiza el método para controlar la potencia eléctrica de acuerdo con una realización de la presente invención. Es decir, la Figura 6 muestra ejemplos de gráficos de curvas de tabla de consulta o curvas de polinómicas que se usan por la primera subunidad de determinación 402 de la Figura 4 o la unidad 502 de la Figura 5 y la segunda subunidad de determinación 404 de la Figura 4 o 504 de la Figura 5 cuando se generan referencias de flujo de potencia de campo del estator. En la Figura 6, la curva (a) indica una curva MCL usada por la primera subunidad de determinación 402 o 502 al generar las referencias de flujo de potencia de campo del estator debajo de la velocidad de debilitamiento del campo parcial. La curva (b) indica una curva VL por la segunda subunidad de determinación 404 o 504 cuando se generan referencias de flujo de potencia de campo del estator a una velocidad de debilitamiento del campo parcial. La curva (c) indica una curva VL utilizada por la segunda subunidad de determinación 404 o 504 cuando se generan referencias de flujo de potencia de campo del estator a velocidad máxima. La curva (d) indica una curva VL generada por el promedio ponderado de la curva (a) y la curva (c) usada por la segunda subunidad de determinación 404 o 504 cuando se generan referencias de flujo de potencia de campo del estator. Todos los gráficos de las curvas de la tabla de consulta o polinómicas (a) a (c) que se muestran en la Figura 6 pueden generarse en línea (es decir, las funciones polinómicas pueden adaptarse durante el funcionamiento del sistema de control a parámetros variables del generador de turbina eólica IPM).

La figura 7 muestra gráficos de curvas de ganancia de compensación de bucle de potencia equivalente del bloque 306 que se aplican para compensar la no linealidad del generador de turbina eólica IPM y que corresponden a las curvas de la tabla de consulta o curvas polinómicas mostradas en la Figura 6. Es decir, la curva (a) de la figura 6 produce la curva de ganancia de compensación (a) de la figura 7; la curva (b) de la figura 6 produce la curva de ganancia de compensación (b) de la figura 7; la curva (c) de la figura 6 produce la curva de ganancia de compensación (c) de la figura 7; y la curva (d) de la figura 6 produce la curva de ganancia de compensación (d) de la figura 7. A partir de la Figura 7, es obvio que la unidad de compensación lineal 306 efectúa diferentes ganancias de compensación en diferentes condiciones de potencia o diferentes velocidades de operación.

Aunque se han mostrado y descrito particularmente realizaciones de la invención con referencia a realizaciones específicas, los expertos en la materia entenderán que se pueden hacer varios cambios en la forma y detalle de las mismas sin desviarse del espíritu y alcance de la invención, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas. Por lo tanto, el alcance de la invención se indica mediante las reivindicaciones adjuntas y todos los cambios que entran dentro del significado y el intervalo de equivalencias de las reivindicaciones se consideran, por lo tanto, incluidos.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para controlar un generador de turbina eólica (220, 310), convirtiendo el generador de turbina eólica (220, 310) la potencia mecánica a potencia eléctrica, comprendiendo el método:
- determinar una referencia de potencia electromagnética que representa la potencia electromagnética generada por el generador de turbina eólica (220, 310), en el que la referencia de potencia electromagnética se determina basándose en una salida deseada del generador de turbina eólica (220, 310),
- 10 controlar la potencia eléctrica generada por el generador de turbina eólica (220, 310) utilizando una señal de control, en el que la señal de control se deriva de la referencia de potencia electromagnética caracterizada por que la señal de control se modifica dependiendo de una función de potencia inversa del generador de turbina eólica (220, 310) de manera que se compense la no linealidad del generador de turbina eólica (220, 310).
- 15 2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende:
- determinar una primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en un primer criterio dependiente de la referencia de potencia electromagnética;
- 20 determinar una segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en un segundo criterio dependiente de la referencia de potencia electromagnética;
- seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de flujo de potencia de campo del estator; y
- 25 controlar una corriente o flujo del estator del generador de turbina eólica (220, 310) en función de la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada.
3. El método según la reivindicación 2,
- en el que la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator se determinan de modo que se compense la no linealidad del generador de la turbina eólica (220, 310).
- 30 4. El método según la reivindicación 2 o 3,
- en el que la determinación de la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator comprende:
- 35 determinar una primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator preliminar basándose en la referencia de potencia electromagnética obtenida a la velocidad de debilitamiento de campo parcial (velocidad a la que comienza el funcionamiento de debilitamiento de campo) del generador de turbina eólica (220, 310);
- determinar una segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator basándose en la referencia de potencia electromagnética obtenida a una velocidad máxima del generador de turbina eólica (220, 310);
- 40 determinar un promedio ponderado de la primera referencia preliminar de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia preliminar de corriente o flujo de potencia de campo del estator con el fin de obtener la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator.
5. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4,
- 45 en el que la selección de una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator comprende:
- comparar un valor absoluto de la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y un valor absoluto de la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator; y
- 50 seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator que tenga el valor absoluto más pequeño.
6. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, que comprende además:
- determinar una primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia basándose en un tercer criterio y la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada;
- 55 determinar una segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia basándose en un cuarto criterio y en la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada;
- seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia; y
- 60 controlar el la corriente o flujo del estator del generador de turbina eólica (220, 310) basado en la referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator seleccionada y la referencia de flujo o corriente del estator de potencia de reluctancia seleccionada.
7. El método según la reivindicación 6,
- 65 en el que seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia comprende:

comparar un valor absoluto de la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y un valor absoluto de la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia; y seleccionar una de entre la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia que tenga el valor absoluto más pequeño.

- 5 8. El método según la reivindicación 6 o 7,
en el que el cálculo de la primera referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia y la segunda referencia de corriente o flujo del estator de potencia de reluctancia se lleva a cabo analíticamente.
- 10 9. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 8,
en el que la primera referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator y la segunda referencia de corriente o flujo de potencia de campo del estator se determinan usando tablas de consulta o funciones polinómicas.
- 15 10. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9,
en el que el primer criterio es una solución de restricción de mínimas pérdidas en el cobre y la ecuación de la potencia del generador.
- 20 11. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10,
en el que el segundo criterio es una solución de restricción de limitación de tensión y la ecuación de la potencia del generador.
12. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11,
en el que el tercer criterio es la restricción de mínimas pérdidas en el cobre del generador.
- 25 13. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12,
en el que el cuarto criterio es la restricción limitadora de tensión del generador.
14. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13,
en el que el generador de turbina eólica (220, 310) es un generador de imanes permanentes interior.
- 30 15. Un aparato (200, 300) para controlar la potencia eléctrica generada por un generador de turbina eólica (220, 310), adaptado el aparato (200, 300) para realizar las etapas de cualquiera de las reivindicaciones 1-14.

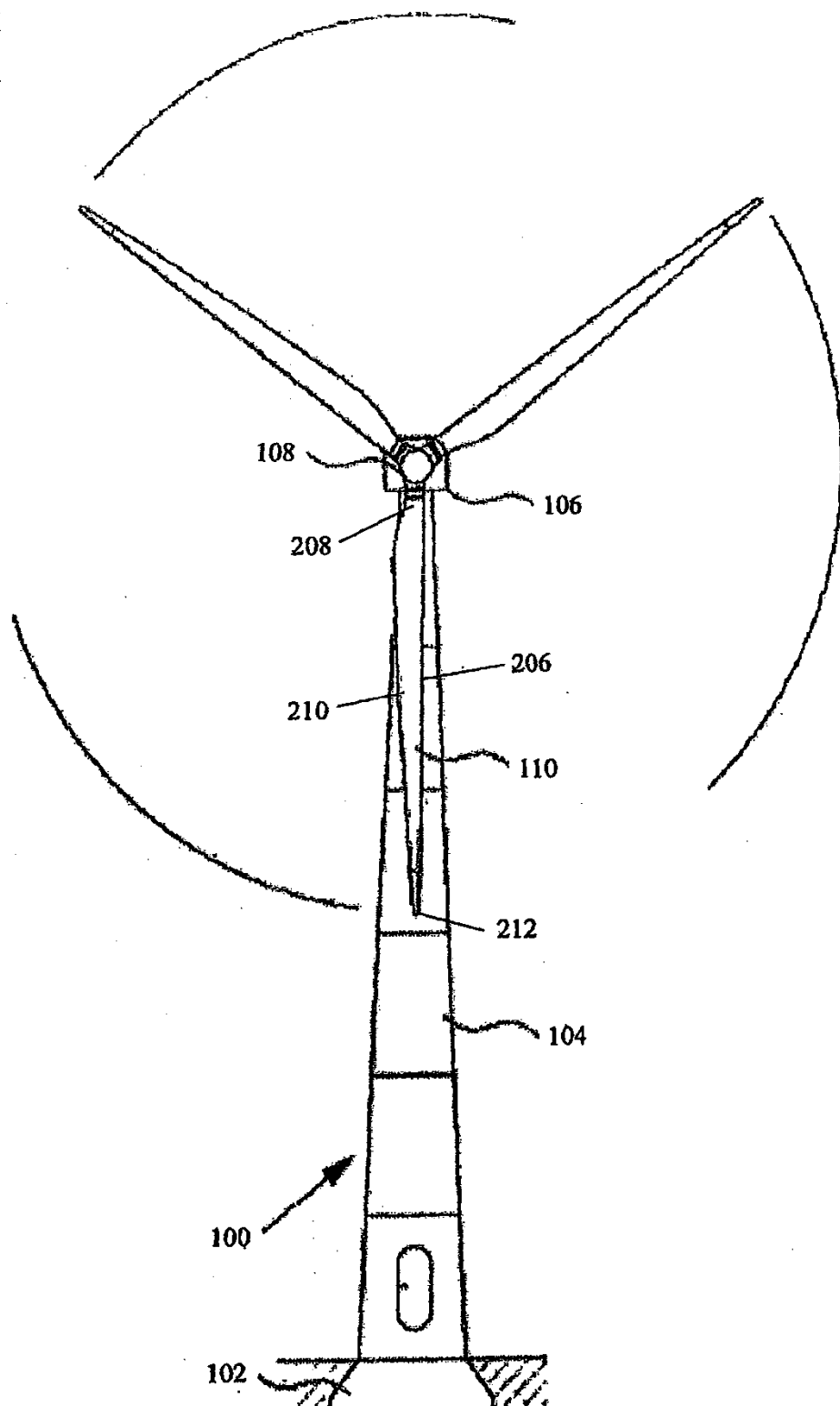
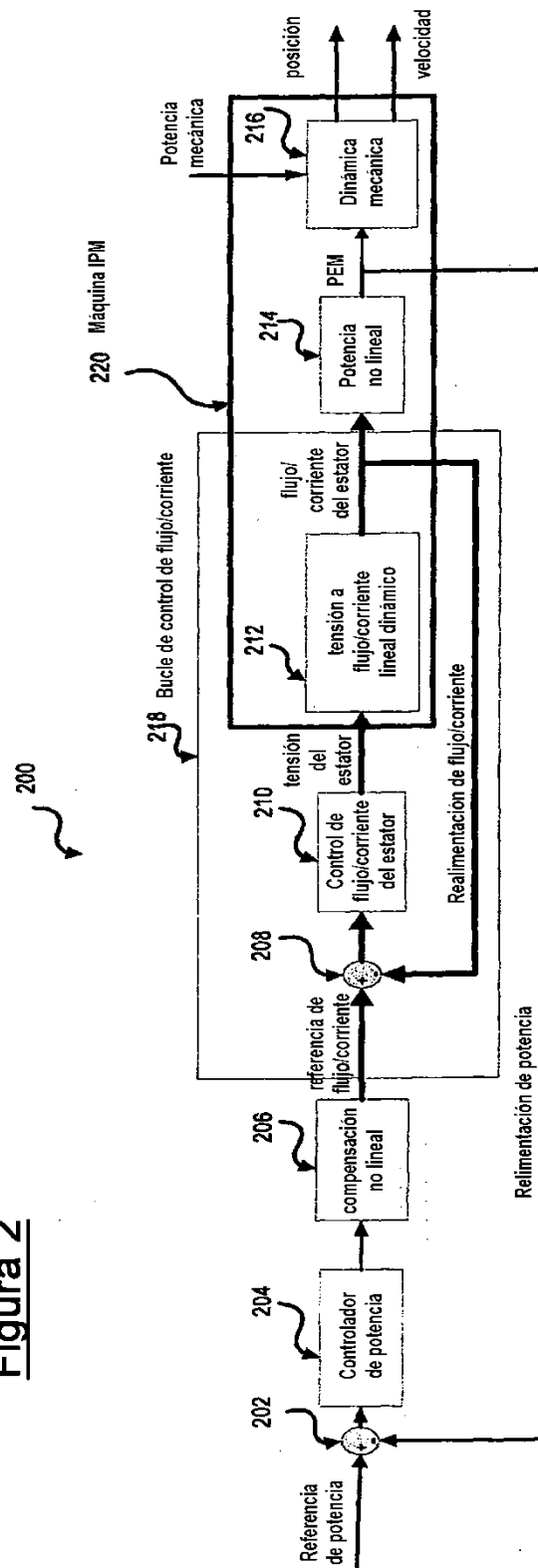


Figura 1

Figura 2



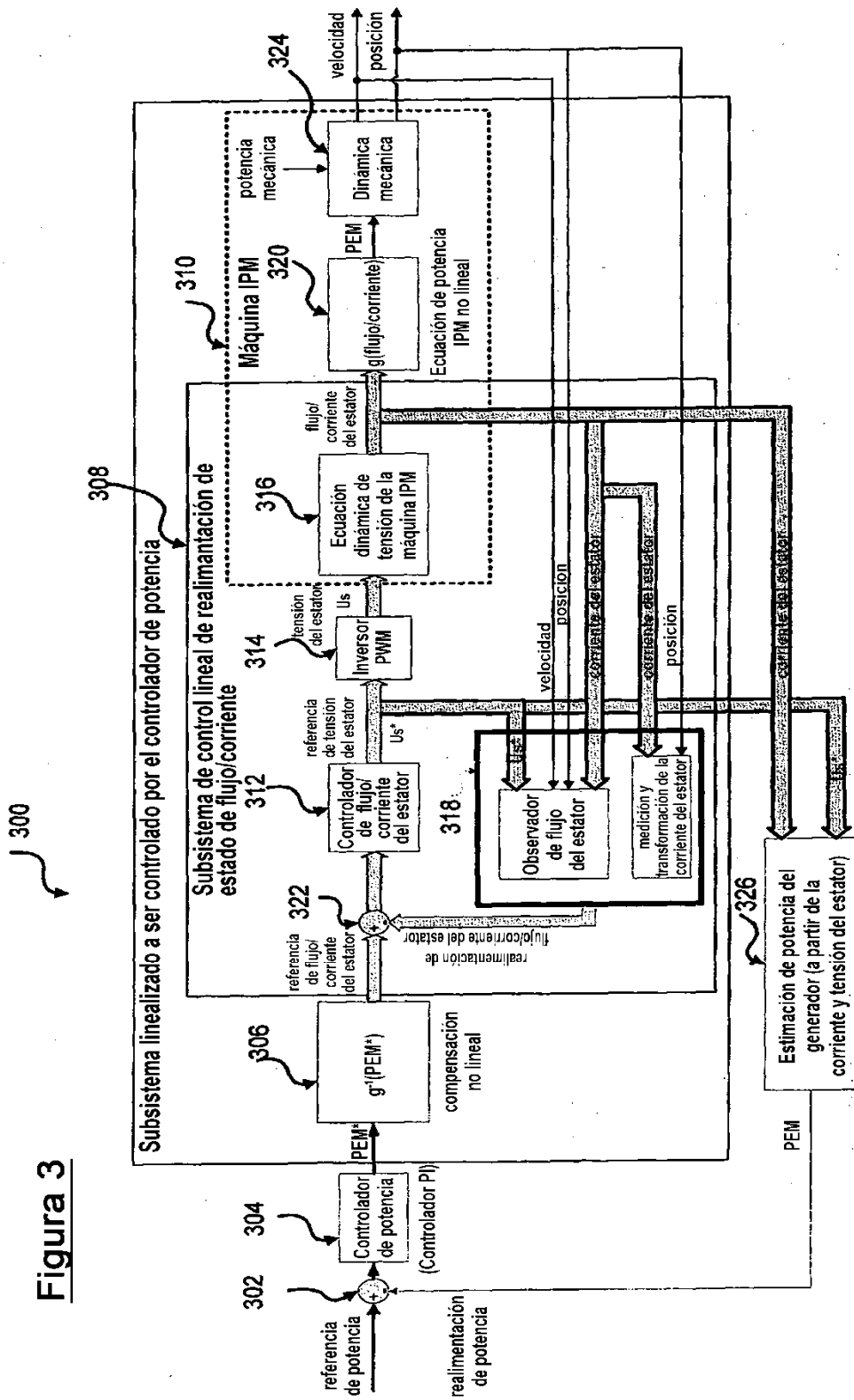


Figura 4

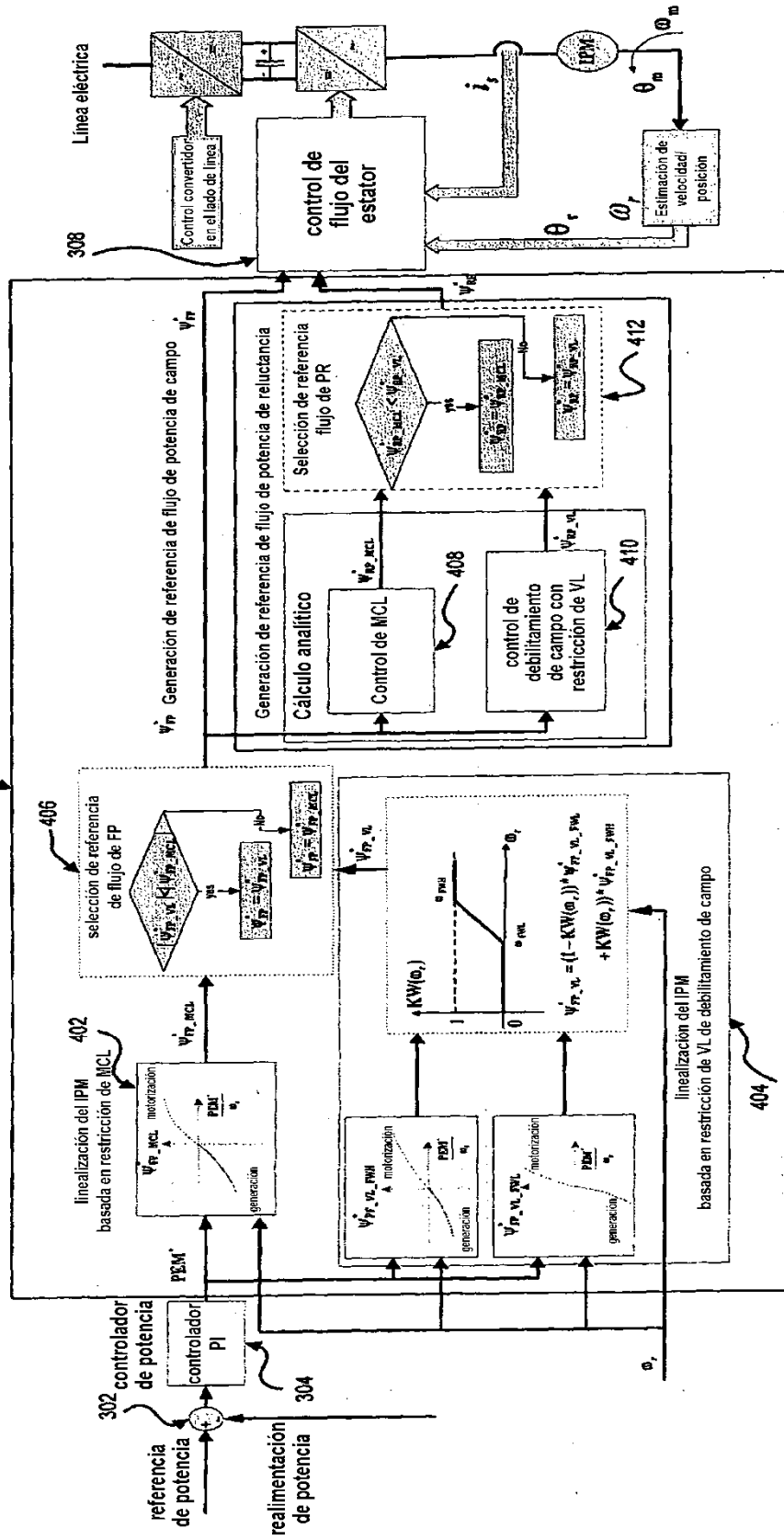


Figura 5

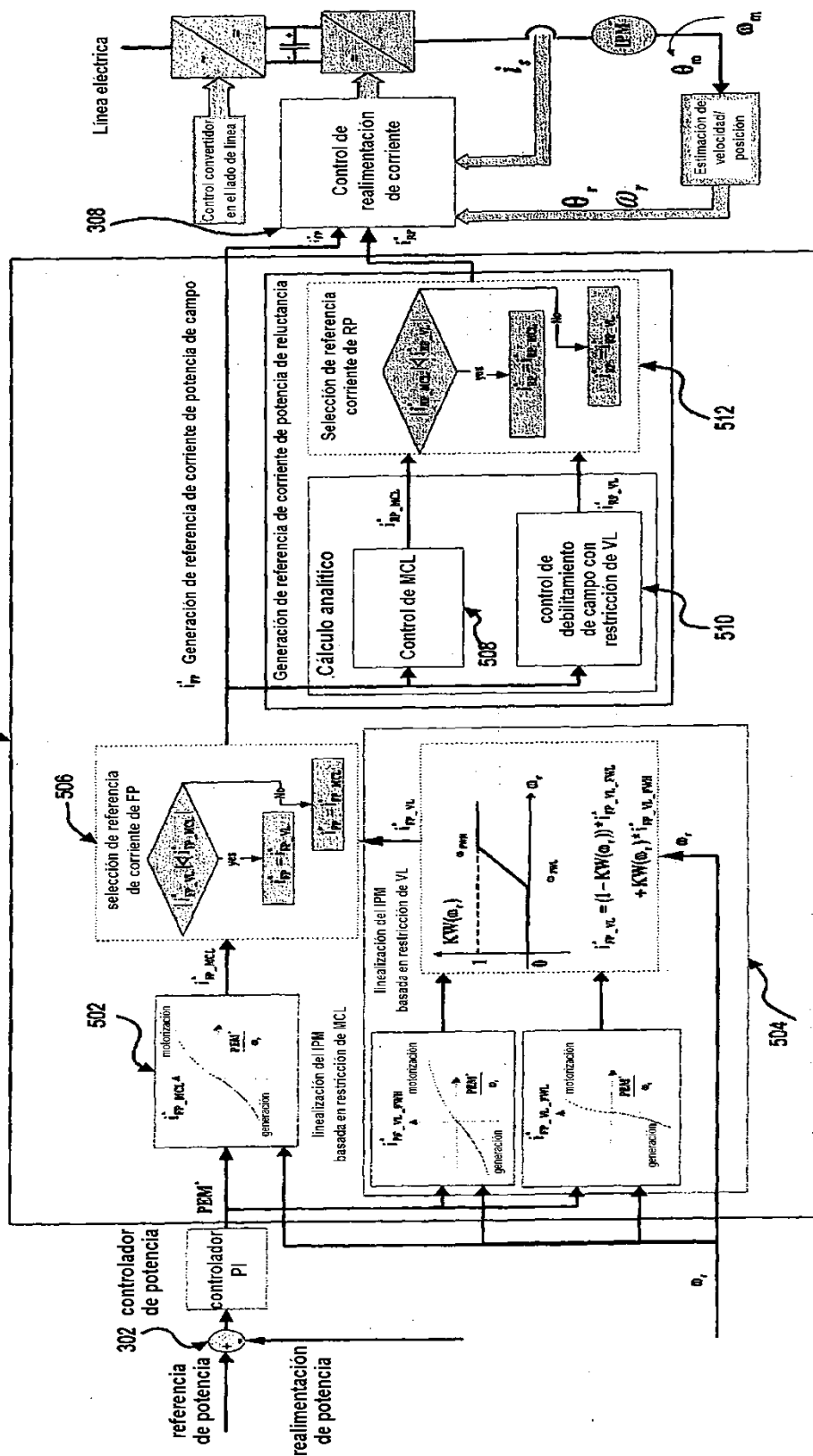


Figura 6

