

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 673 694**

51 Int. Cl.:

**H02P 21/28** (2006.01)

**H02P 21/18** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.07.2012 E 12177833 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.05.2018 EP 2552015**

54 Título: **Método de control de posición sin sensor de una máquina eléctrica**

30 Prioridad:

**28.07.2011 DK 201170415**

**28.07.2011 US 201161512438 P**

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

**25.06.2018**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**CAO, SHU YU;**

**LI, BING y**

**TRIPATHI, ANSHUMAN**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 673 694 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 posición sin sensor de una máquina eléctrica

**Campo de la invención**

5 Las realizaciones de la presente invención se refieren a una metodología de control de posición sin sensor para una máquina eléctrica, en particular a la determinación de una posición de rotor a partir de observaciones de flujo de estator y mediciones de corriente de estator.

**Antecedentes de la invención**

10 En general, para la mayoría de los esquemas de control de posición sin sensor de imanes permanentes interiores (IPM) basados en el modelo de fuerza contraelectromotriz (bemf) conocidos, la posición del rotor se estima a partir de la relación entre la tensión de estator y la corriente de estator.

Debido a la cuestión de la saliencia del rotor de una máquina de IPM, el modelo de bemf basado en la ecuación de tensión ha de simplificarse ignorando algunas cuestiones relacionadas con la transición dinámica. La exactitud de la posición se deteriora por tanto enormemente en la transición de carga dinámica y en la transición de velocidad dinámica.

15 Otra desventaja común de los métodos de bemf basados en la ecuación de tensión es que la exactitud de la posición es sensible a la variación de inductancia del generador, la variación de resistencia de estator del generador y la variación de la magnitud de flujo de rotor. En el funcionamiento práctico, la variación de inductancia del generador es significativa debido a la saturación del circuito magnético. La variación de resistencia de estator del generador y de la magnitud de flujo de rotor también puede ser significativa debido al cambio de temperatura en el funcionamiento del generador.

**Descripción de la invención**

Las realizaciones de la presente invención se refieren a una metodología de control de posición sin sensor para una máquina eléctrica, según las reivindicaciones.

25 Un primer aspecto de la invención proporciona un método para el control de posición sin sensor de una máquina eléctrica, comprendiendo el método

- medir una corriente de estator de la máquina eléctrica,
- determinar un flujo de estator de la máquina eléctrica a partir de la corriente de estator,
- calcular un error de posición de rotor total a partir de al menos el flujo de estator y la corriente de estator,
- determinar una señal de velocidad sin procesar estimada a partir del error de posición de rotor total,

30 - integrar la señal de velocidad sin procesar para deducir una posición de rotor angular estimada de un rotor de la máquina eléctrica, y

- aplicar la posición de rotor angular estimada para controlar la máquina eléctrica.

35 En un segundo aspecto, se proporciona una turbina eólica que comprende una máquina eléctrica y un aparato para el control de posición sin sensor de la máquina eléctrica, estando adaptado el aparato para llevar a cabo los métodos del primer aspecto.

En otro aspecto, se proporciona un medio legible por ordenador que tiene un programa informático registrado en el mismo, programa informático que comprende instrucciones que, cuando se ejecutan por un procesador, hacen que el procesador realice un método para el control de posición sin sensor de una máquina eléctrica en una turbina eólica según los métodos del primer aspecto.

40 **Breve descripción de los dibujos**

Las realizaciones de la presente invención se explican, a modo de ejemplo, y con referencia a los dibujos adjuntos. Ha de observarse que los dibujos adjuntos ilustran sólo ejemplos de realizaciones de esta invención y por tanto no han de considerarse limitativos de su alcance, ya que la invención puede admitir otras realizaciones igualmente eficaces.

45 La figura 1 muestra una relación del sistema de referencia para un generador de IPM,  
la figura 2 muestra un esquema de estimación de velocidad y posición,  
la figura 3 ilustra un esquema de control de posición sin sensor aplicado en un sistema de control de vector de

corriente,

la figura 4 ilustra un esquema de control de posición sin sensor aplicado en un sistema de control de vector de flujo de estator, y

la figura 5 muestra un diagrama de flujo para el control de posición sin sensor.

5 **Descripción detallada de la invención**

Antes de ir a la descripción detallada de los dibujos, se comentarán algunas cuestiones más generales de la realización.

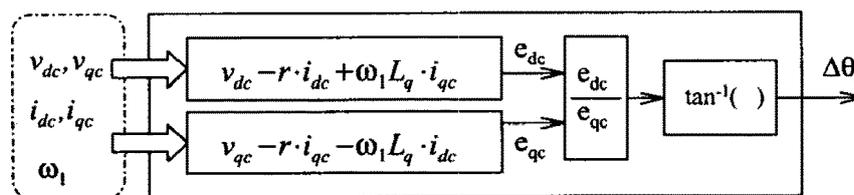
Los métodos de cálculo del error de posición directo para el control sin sensor de máquinas de IPM se han desarrollado basándose en la ecuación de tensión de estator en el sistema de referencia de flujo de rotor estimado (indicado como sistema de referencia dc/qc) como:

10

$$\Delta\theta_c = \tan^{-1} \left[ \frac{v_{dc} - (r + pL_d) \cdot i_{dc} + \left\{ \begin{matrix} \omega_1 L_q \\ + (L_d - L_q)(p\Delta\theta) \end{matrix} \right\} \cdot i_{qc}}{v_{qc} - (r + pL_d) \cdot i_{qc} - \left\{ \begin{matrix} \omega_1 L_q \\ + (L_d - L_q)(p\Delta\theta) \end{matrix} \right\} \cdot i_{dc}} \right]$$

En implementación, ha de hacerse una simplificación para ignorar la transición dinámica de la corriente de estator y el error en la estimación de la velocidad de modo que el error de posición se calcula directamente a partir de las señales de tensión de estator y corriente de estator en el sistema de referencia de rotor estimado, tal como se ilustra a continuación:

15



Aun cuando este método es sencillo en implementación, la exactitud de posición en la transición de carga dinámica se deteriora debido a la simplificación que se hace en el cálculo del error de posición. El rendimiento de este método es sensible a la exactitud de resistencia del estator y también a la transición de velocidad. No se ha tenido en cuenta el efecto de saturación significativo de la inductancia de estator en Lq para máquinas de IPM. Por tanto, se ha observado que la exactitud de posición de este método cambia significativamente con el cambio de estado de carga en el funcionamiento en estado estacionario.

20

Codificadores de posición montados en árbol reducen la robustez del sistema de control de generador de la turbina debido a la vibración mecánica significativa existente en el tren accionado por la turbina. Volver a la operación sin sensor durante un estado de fallo de la señal de codificador es una característica de control deseable que potencia la fiabilidad y disponibilidad del sistema de la turbina. También pueden lograrse ahorros de coste adicionales con fiabilidad de producto mejorada comenzando la operación sin sensor directamente en la fase de conexión de potencia del generador y eliminando por tanto el conjunto de codificador del árbol de generador.

25

Determinados esquemas de control de posición sin sensor convencionales utilizan el método de estimación basado en modelo de bemb para máquinas de IPM y máquinas de imanes permanentes montados en superficie (SPM) en medio para operación a velocidad alta. Es difícil lograr una estimación de posición exacta para una máquina de IPM tanto en funcionamiento en estado estacionario como en transición de carga dinámica y transición de velocidad debido a las simplificaciones realizadas en el modelo de bemb de IPM. Se genera un error de estimación de posición significativo debido al desajuste de los parámetros del generador en el modelo de bemb que descuida la cuestión derivada de la corriente en las estimaciones de bemb. En el peor estado, el control de posición sin sensor puede llegar a ser inestable en la transición dinámica de la velocidad y la potencia debido a grandes errores de estimación de velocidad y posición.

30

35

A continuación, se hace referencia a realizaciones de la invención. Sin embargo, debe entenderse que la invención no se limita a las realizaciones descritas específicas. En cambio, se contempla cualquier combinación de las características y elementos siguientes, ya estén relacionados con realizaciones diferentes o no, para implementar y poner en práctica la invención.

40

Además, en diversas realizaciones la invención proporciona numerosas ventajas con respecto a la técnica anterior. Sin embargo, aunque las realizaciones de la invención pueden lograr ventajas con respecto a otras posibles soluciones y/o con respecto a la técnica anterior, si una ventaja particular se logra o no por una realización dada no es limitativo de la invención. Por tanto, los siguientes aspectos, características, realizaciones y ventajas son

45

- meramente ilustrativos y no se consideran elementos o limitaciones de las reivindicaciones adjuntas excepto cuando se cite explícitamente en una reivindicación/unas reivindicaciones. Asimismo, la referencia a “la invención” no debe interpretarse como una generalización de ningún contenido inventivo dado a conocer en el presente documento y no debe considerarse que es un elemento o limitación de las reivindicaciones adjuntas excepto cuando se cite explícitamente en una reivindicación/unas reivindicaciones.
- 5
- Un primer aspecto de la invención proporciona un método para el control de posición sin sensor de una máquina eléctrica, comprendiendo el método
- medir una corriente de estator de la máquina eléctrica,
  - determinar un flujo de estator de la máquina eléctrica a partir de la corriente de estator,
- 10
- calcular un error de posición de rotor total a partir de al menos el flujo de estator y la corriente de estator,
  - determinar una señal de velocidad sin procesar estimada a partir del error de posición de rotor total,
  - integrar la señal de velocidad sin procesar para deducir una posición de rotor angular estimada de un rotor de la máquina eléctrica, y
  - aplicar la posición de rotor angular estimada para controlar la máquina eléctrica.
- 15
- En una realización, el método puede comprender además la filtración de paso bajo de la señal de velocidad sin procesar con el fin de reducir la fluctuación. En otra realización, la señal de velocidad filtrada y la posición de rotor angular estimada se aplican en un algoritmo de control para controlar la máquina eléctrica.
- En una realización, la máquina eléctrica comprende una máquina de imanes permanentes interiores. En otra realización, la máquina eléctrica comprende una máquina de reluctancia. Aún en otra realización, la máquina de imanes permanentes comprende una máquina de imanes permanentes montados en superficie. En una realización, la máquina eléctrica comprende un generador eléctrico.
- 20
- En una realización, calcular el error de posición de rotor total comprende
- calcular un error de posición relacionado con el flujo de estator, y un error de posición relacionado con la corriente de estator,
- 25
- deducir un ángulo de compensación de desplazamiento dependiente de la velocidad para el error de posición, y
  - calcular el error de posición de rotor total a partir del error de posición relacionado con el flujo de estator, el error de posición relacionado con la corriente de estator y el ángulo de compensación de desplazamiento dependiente de la velocidad.
- 30
- El error de posición relacionado con el flujo puede ser un error de posición angular en el sistema de referencia de flujo de rotor estimado con respecto al eje de flujo magnético del rotor real a partir del vector de flujo de estator observado.
- En una realización, el ángulo de compensación de desplazamiento dependiente de la velocidad está correlacionado con un intervalo de ajustes de velocidad de máquina, desde un ángulo de cero a un nivel de velocidad bajo, hasta un ángulo de compensación predeterminado a un nivel de velocidad alto.
- 35
- En una realización, determinar la señal de velocidad sin procesar estimada comprende
- aplicar un regulador PI al error de posición de rotor total para deducir un error de velocidad, y
  - filtración de paso bajo de una señal de velocidad de transición para deducir una señal de prealimentación de velocidad.
- 40
- Pueden almacenarse conjuntos de valores de ganancia de regulador PI,  $K_p$  y  $K_i$ , en una tabla de consulta para diferentes niveles de velocidad para tener en cuenta la no linealidad en la estimación de velocidad y posición. A velocidades bajas, se aplican mayores ganancias  $K_p$  y ganancias  $K_i$ . A niveles de velocidad superiores, es necesario reducir la ganancia  $K_p$  y la ganancia  $K_i$  para la regulación del error de posición. Durante el funcionamiento sin sensor, la ganancia  $K_p$  y la ganancia  $K_i$  cambian suavemente con la velocidad del generador mediante interpolación lineal según una tabla de consulta que contiene valores de ganancia  $K_p$  y ganancia  $K_i$  con respecto a la velocidad del generador.
- 45
- En una realización, la señal de velocidad de transición se obtiene durante una inicialización como iteración inicial. En otra realización, la inicialización comprende obtener una velocidad de rotor inicial a partir de cualquiera de una medición de tensión de estator en un estado de circuito abierto, y una medición de codificador antes de un fallo de codificador. Aún en otra realización, la inicialización comprende además obtener una posición de rotor inicial.

En una realización, se identifica una inductancia de estator y se aplica al cálculo del error de posición de rotor total. En otra realización, la inductancia de estator se identifica con una tabla de consulta bidimensional basándose en el flujo de estator y la corriente de estator.

5 Para mejorar la exactitud de la posición estimada en el cálculo del error de posición angular puede obtenerse la inductancia de eje q del generador a partir de la interpolación lineal de una consulta bidimensional que se ha estimado en un ensayo en banco.

En una realización, determinar el flujo de estator comprende

- determinar un flujo de estator a partir de un observador de flujo de modo de corriente,

- determinar un flujo de estator a partir de un observador de flujo de modo de tensión,

10 - combinar el flujo de estator a partir del observador de flujo de modo de corriente con el flujo de estator a partir del observador de flujo de modo de tensión basándose en una velocidad de rotor de máquina.

Se aplica una denominada "razón mínima de resultados de observación en modo de tensión" en los resultados de observación de flujo de estator totales a velocidad baja de modo que el control sin sensor permite el aumento y la disminución de la velocidad a funcionamiento a velocidad muy baja.

15 En un segundo aspecto, se proporciona una turbina eólica que comprende una máquina eléctrica, y un aparato para el control de posición sin sensor de la máquina eléctrica, estando adaptado el aparato para llevar a cabo los métodos del primer aspecto.

20 En otro aspecto, se proporciona un medio legible por ordenador que tiene un programa informático registrado en el mismo, programa informático que comprende instrucciones que, cuando se ejecutan por un procesador, hacen que el procesador realice un método para el control de posición sin sensor de una máquina eléctrica en una turbina eólica según los métodos del primer aspecto.

Las siguientes ventajas están asociadas con los métodos según aspectos de la presente invención:

25 1. La función de error de posición se deduce directamente a partir de la ecuación lineal del flujo de estator y la corriente de estator en el sistema de referencia de flujo de rotor estimado sin ninguna simplificación. La exactitud del error de posición se decide por la exactitud del parámetro  $L_q$  del generador y la exactitud de la observación del flujo de estator.

30 2. La exactitud de la observación del flujo de estator a velocidad baja se mejora por la combinación del observador de flujo de modo de tensión y el observador de flujo de modo de corriente. La aceleración y deceleración de la velocidad a velocidad baja en el control sin sensor se garantiza forzando una razón mínima de resultados de observación de flujo de modo de tensión.

3. La exactitud de  $L_q$  se mejora con la tabla de consulta de  $L_q$  2-D identificada en banco.

4. La exactitud de señal de posición estimada no es sensible a la variación de parámetros del generador incluyendo  $L_d$  (inductancia de eje d),  $R_s$  (resistencia de estator) y  $\psi_r$  (magnitud de flujo de rotor). Por tanto, el control sin sensor tiene rendimiento sistemático con respecto a la variación de temperatura del generador.

35 5. La exactitud de señal de posición estimada no es sensible a la respuesta dinámica de corriente en el procedimiento de aumento/disminución de potencia.

6. La exactitud de señal de posición estimada es menos sensible a la aceleración de velocidad y la deceleración de la velocidad aplicando el prealimentación de velocidad en la estimación de velocidad.

40 7. El error de posición de tránsito al comienzo de control de posición sin sensor se reduce enormemente aplicando transición suave de señal de velocidad con respecto a su valor inicial.

8. El esquema de control de posición sin sensor propuesto es aplicable para máquinas tanto de IPM como de SPM.

9. El esquema de control de posición sin sensor propuesto es independiente del método de control de generador de IPM/SPM principal. Es aplicable tanto para el sistema de control de vector de corriente como para el sistema de control de vector de flujo de estator.

45 Una ventaja para el esquema de control de posición sin sensor propuesto es que la exactitud de velocidad y posición es menos sensible a la variación de parámetros del generador y la transición de corriente. El error de velocidad y posición de tránsito en la aceleración y deceleración de la velocidad se minimiza aplicando el control de prealimentación de velocidad. El error de posición al comienzo del control sin sensor se minimiza mediante la inicialización apropiada de la estimación de velocidad y posición y aplicando una transición de velocidad suave desde su valor inicial.

50

En la presente realización, la máquina eléctrica es un generador de imanes permanentes interiores, donde están montados imanes permanentes en ranuras dentro del rotor del generador, el rotor está diseñado para rotar alrededor de un eje dentro de un estator del generador, convirtiendo la energía del movimiento de rotación en energía eléctrica. En otras realizaciones, puede usarse un generador de imanes permanentes montados en superficie o un generador sin imanes permanentes de reluctancia, configurado de manera similar.

En la presente realización, una turbina eólica comprende un generador de imanes permanentes interiores y el generador de imanes permanentes comprende además un codificador de posición física para la medición de la posición de rotor. Se prevé que los esquemas de control sin sensor pueden comenzar el funcionamiento en el sistema de control de generador de la turbina eólica siempre y cuando el codificador de posición sufra un fallo de funcionamiento y deje de proporcionar un funcionamiento fiable.

La figura 1 ilustra la relación del ángulo de posición de una máquina de IPM en el sistema de referencia de rotor estimado. El eje para el sistema de referencia estacionario de estator se indica como eje  $\alpha/\beta$ . El eje magnético está alineado con el vector de flujo de rotor  $\vec{\psi}_r$  con ángulo de posición de flujo de rotor desconocido  $\theta_r$  en relación con el eje  $\alpha$  y que rota en la velocidad de rotor del generador  $\omega_r$ . El eje magnético estimado está alineado con el vector de flujo de rotor estimado  $\vec{\psi}_{r\_est}$  que está rotando en la velocidad estimada  $\omega_{r\_est}$ . El ángulo de posición de rotor estimado  $\theta_{r\_est}$  es el ángulo entre el vector de flujo de rotor y el eje  $\alpha$ .

En el sistema de referencia de flujo de rotor estimado, la ecuación de flujo de estator se representa como:

$$\begin{bmatrix} \psi_{mag\_est} \\ \psi_{FP\_est} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{prom} + L_{dif} * \cos(2 * \Delta\theta) - L_{dif} * \text{sen}(2 * \Delta\theta) \\ -L_{dif} * \text{sen}(2 * \Delta\theta) L_{prom} - L_{dif} * \cos(2 * \Delta\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{mag\_est} \\ i_{FP\_est} \end{bmatrix} + \psi_r * \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta \\ -\text{sen} \Delta\theta \end{bmatrix}$$

Donde,  $L_{prom} = \frac{L_d + L_q}{2}$ ,  $L_{dif} = \frac{L_d - L_q}{2}$ , y  $L_d$  y  $L_q$  son la inductancia de estator correspondiente en el sistema de referencia de flujo de rotor.

Eliminando el flujo de rotor de la ecuación de flujo de estator anterior, se obtiene la siguiente relación:

$$\begin{aligned} & \psi_{mag\_est} * \text{sen} \Delta\theta - L_{prom} * i_{mag\_est} * \text{sen} \Delta\theta - L_{dif} * \cos(2 * \Delta\theta) * \text{sen} \Delta\theta * i_{mag\_est} + \\ & L_{dif} * \text{sen}(2 * \Delta\theta) * \text{sen} \Delta\theta * i_{FP\_est} \\ & = -\psi_{FP\_est} * \cos \Delta\theta - L_{dif} * \text{sen}(2 * \Delta\theta) * \cos \Delta\theta * i_{mag\_est} + L_{prom} * i_{FP\_est} * \cos \Delta\theta - \\ & L_{dif} * \cos(2 * \Delta\theta) * \cos \Delta\theta * i_{FP\_est} \end{aligned}$$

Utilizando las identidades trigonométricas, se obtiene la siguiente relación:

$$\begin{aligned} & \psi_{mag\_est} * \text{sen} \Delta\theta - L_{prom} * i_{mag\_est} * \text{sen} \Delta\theta - L_{dif} * \frac{\text{sen}(3 * \Delta\theta) - \text{sen} \Delta\theta}{2} * i_{mag\_est} + \\ & L_{dif} * \frac{\cos \Delta\theta - \cos 3 * \Delta\theta}{2} * i_{FP\_est} \\ & = -\psi_{FP\_est} * \cos \Delta\theta - L_{dif} * \frac{\text{sen}(3 * \Delta\theta) + \text{sen} \Delta\theta}{2} * i_{mag\_est} + L_{prom} * i_{FP\_est} * \cos \Delta\theta - \\ & L_{dif} * \frac{\cos \Delta\theta - \cos 3 * \Delta\theta}{2} * i_{FP\_est} \end{aligned}$$

Reagrupando componentes, la función de error de posición puede calcularse directamente como:

$$g(\Delta\theta) = \tan \Delta\theta = \frac{\text{sen} \Delta\theta}{\cos \Delta\theta} = \frac{-\psi_{FP\_est} + (L_{prom} - L_{dif}) * i_{FP\_est}}{\psi_{mag\_est} + (L_{prom} - L_{dif}) * i_{mag\_est}} = \frac{-\psi_{FP\_est} + L_q * i_{FP\_est}}{\psi_{mag\_est} - L_q * i_{mag\_est}}$$

La función de error de posición se deduce a partir de la máquina de IPM, pero también es aplicable para máquinas de SPM.

La figura 2 ilustra el método de estimación de velocidad y posición para el control de posición sin sensor de un generador de IPM/SPM.

A continuación se enumeran determinadas características implementadas en una realización de la estimación de velocidad y posición.

- 5 1) Una combinación dependiente de la velocidad de los resultados de observación de flujo de modo de tensión y flujo de corriente con una razón mínima de resultados de observación de modo de tensión aplicados en intervalo de velocidad baja.

Si velocidad > velocidad\_MT

$$K_{MT}=1$$

10 si no

{

$$K_{MT}=(\text{velocidad}-\text{velocidad\_MC})/(\text{velocidad\_MT}-\text{velocidad\_MC})$$

Si ( $K_{MT} < K_{MT\_min}$ )

$$K_{MT} = K_{MT\_min}$$

15 }

$$\psi_{\alpha} = (1 - K_{MT}) * \psi_{\alpha\_MC} + K_{MT} * \psi_{\alpha\_MT}$$

$$\psi_{\beta} = (1 - K_{MT}) * \psi_{\beta\_MC} + K_{MT} * \psi_{\beta\_MC}$$

20 Donde, velocidad\_MT es el nivel de velocidad para aplicar completamente los resultados de observación de flujo de modo de tensión, velocidad\_MC es el nivel de velocidad para aplicar completamente los resultados de observación de flujo de modo de corriente,  $K_{MT}$  es la razón de los resultados de observación de modo de tensión aplicados, y  $K_{MT\_min}$  es la razón mínima de los resultados de observación de modo de tensión aplicados en funcionamiento a velocidad baja que se fija a aproximadamente 0,1 ~ 0,05.

2) El cálculo de la función de error de posición a partir del flujo observado y la corriente medida en el sistema de referencia de flujo de rotor estimado.

$$25 \quad \Delta\theta_1 \approx \tan \Delta\theta = \frac{-\psi_{FP\_est} + L_q * i_{FP\_est}}{\psi_{mag\_est} - L_q * i_{mag\_est}}$$

3) La compensación del error de posición dependiente de la velocidad para reducir el error de posición en estado estacionario.

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta + \theta_{desplaz} * \frac{\text{velocidad\_limitada} - \text{velocidad\_baja}}{\text{velocidad\_alta} - \text{velocidad\_baja}}$$

30 Donde, velocidad\_limitada es la velocidad del generador limitada en un intervalo determinado con velocidad\_alta como el nivel de velocidad alto al que el ángulo de compensación equivale a  $\theta_{desplaz}$  y velocidad\_baja como el nivel de velocidad bajo al que el ángulo de compensación equivale a cero.

Si (velocidad >= velocidad\_alta)

$$\text{Velocidad\_limitada}=\text{velocidad\_alta}$$

si no, si (velocidad <= velocidad\_baja)

$$35 \quad \text{velocidad\_limitada}=\text{velocidad\_baja}$$

si no, velocidad\_limitada =velocidad

4) La generación de la señal de error de velocidad basándose en la regulación PI de la señal de error de posición.

$$\omega_{r\_error} = K_p * \Delta\theta * K_i * \int (\Delta\theta) dt$$

En funcionamiento a velocidad baja, se prefieren una ganancia Kp y ganancia Ki más grandes para proporcionar una reducción suficiente de la componente de baja frecuencia de la señal de error de posición.

En funcionamiento a velocidad alta, se prefieren una ganancia Kp y ganancia Ki más pequeñas para reducir la sensibilidad al ruido incluido en la señal de error de posición.

- 5 Por tanto, se implementa una tabla de consulta de ganancia Kp y ganancia Ki dependiente de la velocidad para proporcionar un funcionamiento sin sensor estable en el intervalo de velocidad completa.

Se aplica una interpolación lineal unidimensional (1-D) de la tabla de consulta de Kp(velocidad) y la tabla de consulta de Ki(velocidad) en el funcionamiento de control sin sensor.

- 10 5) La generación de la señal de prealimentación de velocidad  $\omega_{FW}$  mediante filtración de paso bajo (LPF\_1) de la señal de velocidad  $\omega_r$  aplicada en el control de generador. El ancho de banda del filtro de paso bajo se fija a aproximadamente de 2 Hz a 5 Hz

$$\omega_{FW} = LPF\_1(\omega_{r\_est})$$

- 6) La generación de la señal de posición mediante la integración de la señal de velocidad estimada.

$$\theta_{r\_est} = \theta_{r\_inic} + \int (\omega_{r\_error} + \omega_{FW}) dt$$

- 15 Si el control sin sensor comienza en el estado de fallo de codificador, la medición de la posición antes del fallo de codificador se usa como la señal para inicializar la estimación de velocidad, es decir  $\theta_{r\_inic} = \theta_{r\_ENC}$ .

Si el control sin sensor comienza en la fase de conexión de potencia en el instante cuando se activa PWM, la posición inicial se obtiene a partir del control de seguimiento del bucle enganchado en fase de la posición de fase eléctrica de la tensión entre tres fases US12, US23, US31 del generador, considerando el avance de línea a fase de 30° considerado, es decir  $\theta_{r\_inic} = \theta_{r\_US\_PLL}$ .

20

- 7) La inicialización de la señal de velocidad y la transición suave para el control de generador.

La señal de velocidad estimada se obtiene a partir de la suma de la señal de error de velocidad y la señal de prealimentación de velocidad. Para minimizar el efecto de fluctuación de velocidad, la señal de velocidad estimada aplicada en el control de generador se somete a filtración de paso bajo, tal como se muestra a continuación, con el ancho de banda de filtro de paso bajo fijado a aproximadamente de 20 Hz a 50 Hz.

25

$$\omega_{r\_est\_1} = LPF\_2(\omega_{error} + \omega_{FW})$$

Si el control sin sensor comienza en el estado de fallo de codificador, la velocidad inicial para el control de generador se deduce a partir de la medición del codificador antes del fallo del codificador  $\omega_{r\_inic} = \omega_{r\_ENC}$ .

- 30 Si el control sin sensor inicia la fase de conexión de potencia, la velocidad inicial para el control de generador se obtiene a partir del control de seguimiento de bucle enganchado en fase de la tensión de línea del generador (indicada como US12, US23, US31) en el estado de circuito abierto antes de que se conecte PWM.

$$\omega_{r\_inic} = \omega_{r\_US\_PLL}$$

Para minimizar el error de posición de tránsito al comienzo del control sin sensor, se aplica la señal de velocidad inicial en el control de generador durante algún tiempo. Tras esto, la señal de velocidad para el control de generador realiza un tránsito suave hasta la señal de velocidad estimada para el funcionamiento sin sensor.

35

Si el tiempo para el funcionamiento sin sensor (T\_sin sensor) es menor que el tiempo de comienzo de transición de velocidad (T\_comienzo\_transición\_velocidad), se aplica la velocidad inicial en el control de generación de potencia tal como se muestra a continuación.

$$\omega_{r\_est} = \omega_{r\_inic}$$

- 40 Si el tiempo para el funcionamiento sin sensor es mayor que el tiempo de comienzo de transición de velocidad (T\_comienzo\_transición\_velocidad) pero menor que el tiempo de finalización de transición de velocidad (T\_finalización\_transición\_velocidad), la razón por la velocidad inicial y la velocidad estimada se calcula tal como se muestra a continuación. La salida para la velocidad estimada aplicada en el control de generador  $\omega_{r\_est}$  se transfiere lentamente desde la velocidad inicial  $\omega_{r\_inic}$  hasta la velocidad estimada  $\omega_{r\_est\_1}$ .

$$K_{\_velocidad} = \frac{T_{\_finalización\_tránsito\_velocidad} - T_{\_sin\ sensor}}{T_{\_finalización\_tránsito\_velocidad} - T_{\_comienzo\_transición\_velocidad}}$$

$$\omega_{r\_est} = K_{\_velocidad} * \omega_{r\_inic} + (1 - K_{\_velocidad}) * \omega_{r\_est\_1}$$

Si el tiempo para el funcionamiento sin sensor es mayor que el tiempo de finalización de transición de velocidad (T\_finalización\_transición\_velocidad), la velocidad aplicada en el control de generador es a partir de la salida de regulación de error de posición, tal como se muestra a continuación

$$\omega_{r\_est} = \omega_{r\_est\_1}$$

8) La mejora de la exactitud del cálculo del error de posición con el perfil de Lq basado en la tabla de consulta bidimensional en el ensayo en banco con la señal de posición de codificador aplicada en el control de generador.

Para minimizar los efectos de saturación del circuito magnético sobre la exactitud del control sin sensor, se aplica el perfil de Lq identificado en banco para el control de posición sin sensor.

A partir de la medición en banco se ha observado un efecto de saturación cruzada significativa desde la corriente del eje d hasta la inductancia del eje q, se requiere implementar identificación de inductancia de estator bidimensional (2-D) para la identificación del perfil de Lq (i<sub>s\_FP</sub>, i<sub>s\_Mag</sub>). Se usan las derivadas de flujo y corriente para calcular el perfil de Lq. El método para la identificación del perfil de Lq es inyectar una señal de prueba sinusoidal en la señal de referencia de flujo y se aplican las respuestas sinusoidales en el flujo observado y la corriente medida para construir la tabla de consulta 2-D. Matemáticamente, el valor de Lq en un conjunto de nivel de corriente de prueba "is\_mag" y "is\_FP" se representa tal como se muestra a continuación.

$$L_q(i_{s\_iman} = IS\_ensayo\_mag, i_{s\_FP} = IS\_ensayo\_FP) = \frac{\partial \psi_{s\_FP}}{\partial i_{s\_FP}} = \frac{\psi_{FP\_sen\ e\_respuesta}}{i_{FP\_sen\ e\_respuesta}}$$

Los presentes solicitantes han presentado una solicitud de patente anterior, PCT/DK2011/050241, sobre un método de determinación del perfil de inductancia de una máquina eléctrica, en particular un generador de imanes permanentes interiores, y se incorpora completamente como referencia en esta solicitud. El método puede usarse de manera similar para otros tipos de máquina eléctricas.

En el funcionamiento sin sensor de posición, se aplica la interpolación lineal 2-D para obtener el valor de Lq correcto según el nivel de corriente de magnetización (IS\_MAG) medido y el nivel de corriente de potencia de campo (IS\_FP).

El rendimiento del esquema de estimación de velocidad y posición propuesto es independientemente del método de control de generador principal y puede aplicarse o bien para el sistema de control de corriente de estator o bien para el sistema de control de flujo de estator.

La figura 3 ilustra el esquema de control de posición sin sensor en un sistema de control de realimentación de corriente.

La figura 4 ilustra el esquema sin sensor de posición en un sistema de control de vector de flujo de estator.

La figura 5 muestra un diagrama de flujo para un sistema de control de posición sin sensor. En 602, se obtiene la medición de posición inicial y se proporciona como una inicialización del sistema de control. En la presente realización, la posición inicial se obtiene a partir de una medición de tensión de línea del estator, en particular, la medición de la tensión de Bemf del estator en un estado de circuito abierto del generador, también conocido como fase de conexión de potencia cuando se habilita el control de PWM del generador. Alternativamente, puede obtenerse la posición inicial a partir de una medición de codificador, antes de un fallo de codificador.

En 604, se determina el flujo de estator. En este caso, se mide una corriente de estator en un sistema de coordenadas abc natural y entonces se transforma en el sistema  $\alpha$ - $\beta$  estacionario. Entonces se lleva a cabo la observación del flujo de estator en el sistema de referencia  $\alpha$ - $\beta$  sistema de referencia. En particular, en la presente realización se usan un observador de flujo de modo de corriente y un observador de flujo de modo de tensión. Se lleva a cabo una combinación ponderada del flujo de estator de modo de corriente y el flujo de estator de modo de tensión, basándose en una velocidad de rotor estimada.

En 606, se determina el error de posición, basándose en al menos el flujo de estator y la corriente de estator. El flujo de estator obtenido a partir de la combinación ponderada se transforma adicionalmente en un sistema de flujo de rotor. La corriente de estator se transforma de manera similar. Después se obtiene un perfil de inductancia de eje q del estator a partir de una tabla de consulta y se calcula una función de error de posición.

Para reducir el error de posición en estado estacionario, se determina un ángulo de compensación de error de posición compensación dependiente de la velocidad y se combina con la función de error de posición calculada. De ese modo se obtiene una función de error de posición total.

5 En 608, se obtiene la velocidad de rotor del generador basándose en la regulación proporcional-integral (PI) de la señal de error de posición con compensación de prealimentación de velocidad apropiada. En esta realización, se realizan las etapas siguientes:

- regulación PI de la función de error de posición para obtener la señal de error de velocidad estimada
- obtener una señal de prealimentación de velocidad mediante filtración de paso bajo (LPF\_1) de la señal de velocidad aplicada en el control de generador de la muestra de control anterior

10 - obtener la señal de velocidad sin procesar estimada sumando la señal de error de velocidad estimada y la señal de prealimentación de velocidad.

En 610, se obtiene la posición angular del rotor estimada mediante una integración de la señal de velocidad sin procesar estimada con inicialización de posición apropiada.

15 Además, se reduce la fluctuación de velocidad mediante filtración de paso bajo (LPF\_2) antes de aplicarla en control. Además se proporciona una característica de transición de velocidad proporcionada para permitir una transición suave del rotor del generador hasta la velocidad estimada, con respecto a la velocidad inicial.

20 En 612, la señal de velocidad y posición estimada se aplica en el sistema de control de vector de flujo de la máquina eléctrica. El sistema de control sin sensor vuelve después al bloque 604 para determinar la siguiente muestra de control. También puede indicarse que los bloques 604 a 612 comprenden el bloque 614 de función de estimación de velocidad y posición.

25 Aunque la invención se ha ilustrado mediante una descripción de diversas realizaciones y aunque esas realizaciones se han descrito en detalle considerable, la intención del solicitante no es restringir ni limitar en modo alguno el alcance de las reivindicaciones adjuntas a tal detalle. A los expertos en la técnica les surgirán ventajas y modificaciones adicionales. La invención, en sus aspectos más amplios, no se limita por tanto a los detalles específicos, métodos representativos y ejemplos ilustrativos mostrados y descritos.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para el control de posición sin sensor de una máquina de imanes permanentes, comprendiendo el método las etapas siguientes:
  - medir una corriente de estator de la máquina de imanes permanentes,
- 5       - determinar (604) un flujo de estator de la máquina de imanes permanentes a partir de la corriente de estator,
- calcular (606) un error de posición de rotor total a partir de al menos el flujo de estator y la corriente de estator,
- caracterizado por:
  - 10       - calcular un error de posición relacionado con el flujo de estator, y un error de posición relacionado con la corriente de estator,
  - deducir un ángulo de compensación de desplazamiento dependiente de la velocidad para el error de posición, y
  - 15       - calcular el error de posición de rotor total a partir del error de posición relacionado con el flujo de estator, el error de posición relacionado con la corriente de estator y el ángulo de compensación de desplazamiento dependiente de la velocidad,
  - determinar (608) una señal de velocidad sin procesar estimada a partir del error de posición de rotor total, que incluye las etapas:
    - regulación PI de la función de error de posición para obtener la señal de error de velocidad estimada,
    - 20       - obtener una señal de prealimentación de velocidad mediante filtración de paso bajo de la señal de velocidad aplicada en el control de generador de la muestra de control anterior, y
    - obtener la señal de velocidad sin procesar estimada sumando la señal de error de velocidad estimada y la señal de velocidad,
    - integrar (610) la señal de velocidad sin procesar para deducir una posición de rotor angular estimada de un rotor de la máquina de imanes permanentes, y
    - 25       - aplicar la posición de rotor angular estimada para controlar la máquina de imanes permanentes.
2. Método según la reivindicación 1, que comprende además filtración de paso bajo de la señal de velocidad sin procesar con el fin de reducir la fluctuación.
3. Método según la reivindicación 2, en el que la señal de velocidad filtrada y la posición de rotor angular estimada se aplican (612) en un algoritmo de control para controlar la máquina de imanes permanentes.
- 30       4. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la máquina de imanes permanentes comprende una máquina de imanes permanentes interiores.
5. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la máquina de imanes permanentes comprende una máquina de imanes permanentes montados en superficie.
- 35       6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en la que la máquina de imanes permanentes comprende una máquina de reluctancia.
7. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la máquina de imanes permanentes comprende un generador eléctrico.
- 40       8. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el ángulo de compensación de desplazamiento dependiente de la velocidad está correlacionado con un intervalo de ajustes de velocidad de máquina, desde un ángulo de cero a un nivel de velocidad bajo, hasta un ángulo de compensación predeterminado a un nivel de velocidad alto.
9. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la señal de velocidad de transición se obtiene durante una inicialización como iteración inicial.
- 45       10. Método según la reivindicación 9, en el que la inicialización comprende obtener una velocidad de rotor inicial a partir de cualquiera de una medición de tensión de estator en un estado de circuito abierto, y una medición de codificador antes de un fallo de codificador.

11. Método según la reivindicación 10, en el que la inicialización comprende además obtener (602) una posición de rotor inicial.
12. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se identifica una inductancia de estator y se aplica al cálculo del error de posición de rotor total.
- 5 13. Método según la reivindicación 12, en el que la inductancia de estator se identifica con una tabla de consulta bidimensional basándose en el flujo de estator y la corriente de estator.
14. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la determinación del flujo de estator comprende
  - determinar un flujo de estator a partir de un observador de flujo de modo de corriente,
  - 10 - determinar un flujo de estator a partir de un observador de flujo de modo de tensión,
  - combinar el flujo de estator a partir del observador de flujo de modo de corriente con el flujo de estator a partir del observador de flujo de modo de tensión basándose en una velocidad de rotor de máquina.
15. Turbina eólica que comprende una máquina de imanes permanentes, y un aparato para el control de posición sin sensor de la máquina de imanes permanentes, estando adaptado el aparato para llevar a cabo el método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14.
16. Medio legible por ordenador que tiene un programa informático registrado en el mismo, programa informático que comprende instrucciones que, cuando se ejecutan por un procesador, hacen que el procesador realice un método para el control de posición sin sensor de una máquina de imanes permanentes en una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14.

20

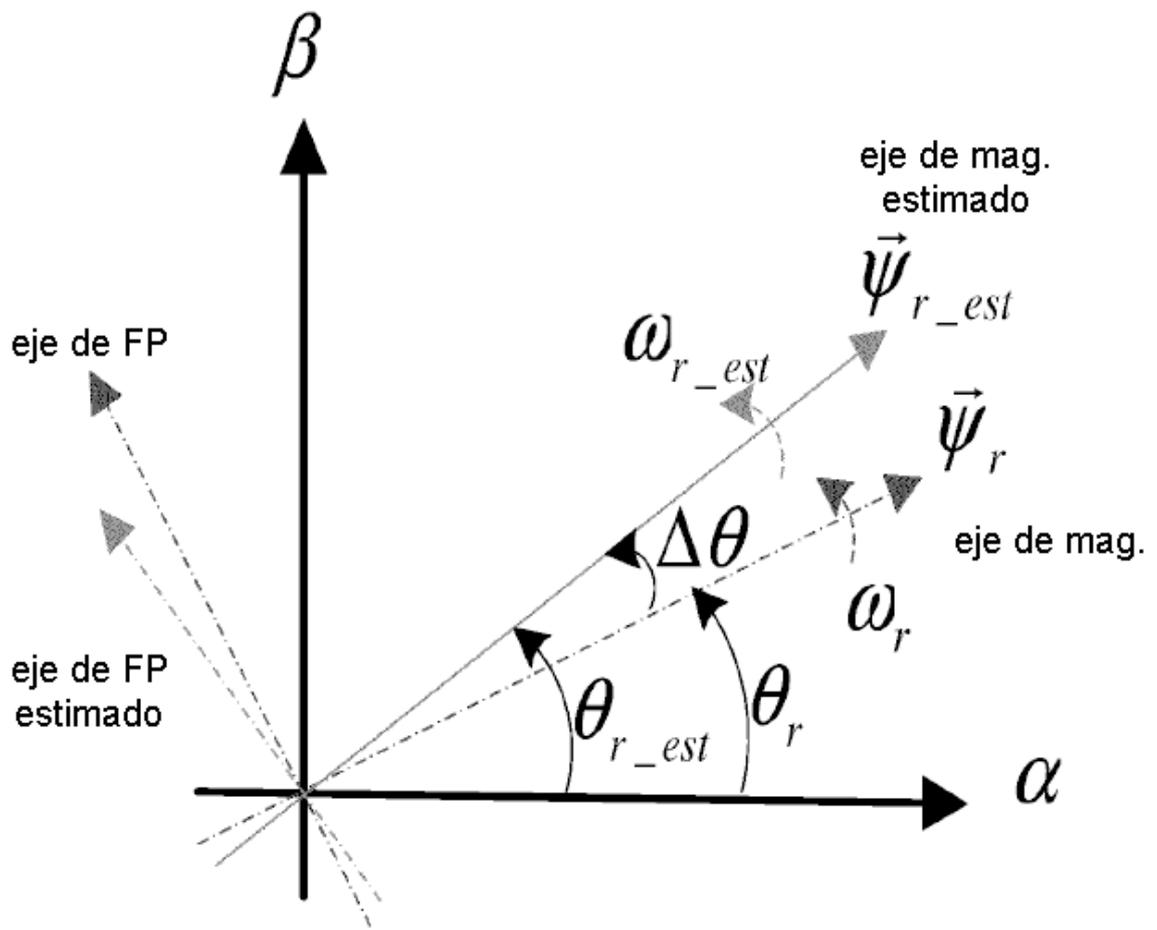


Fig. 1

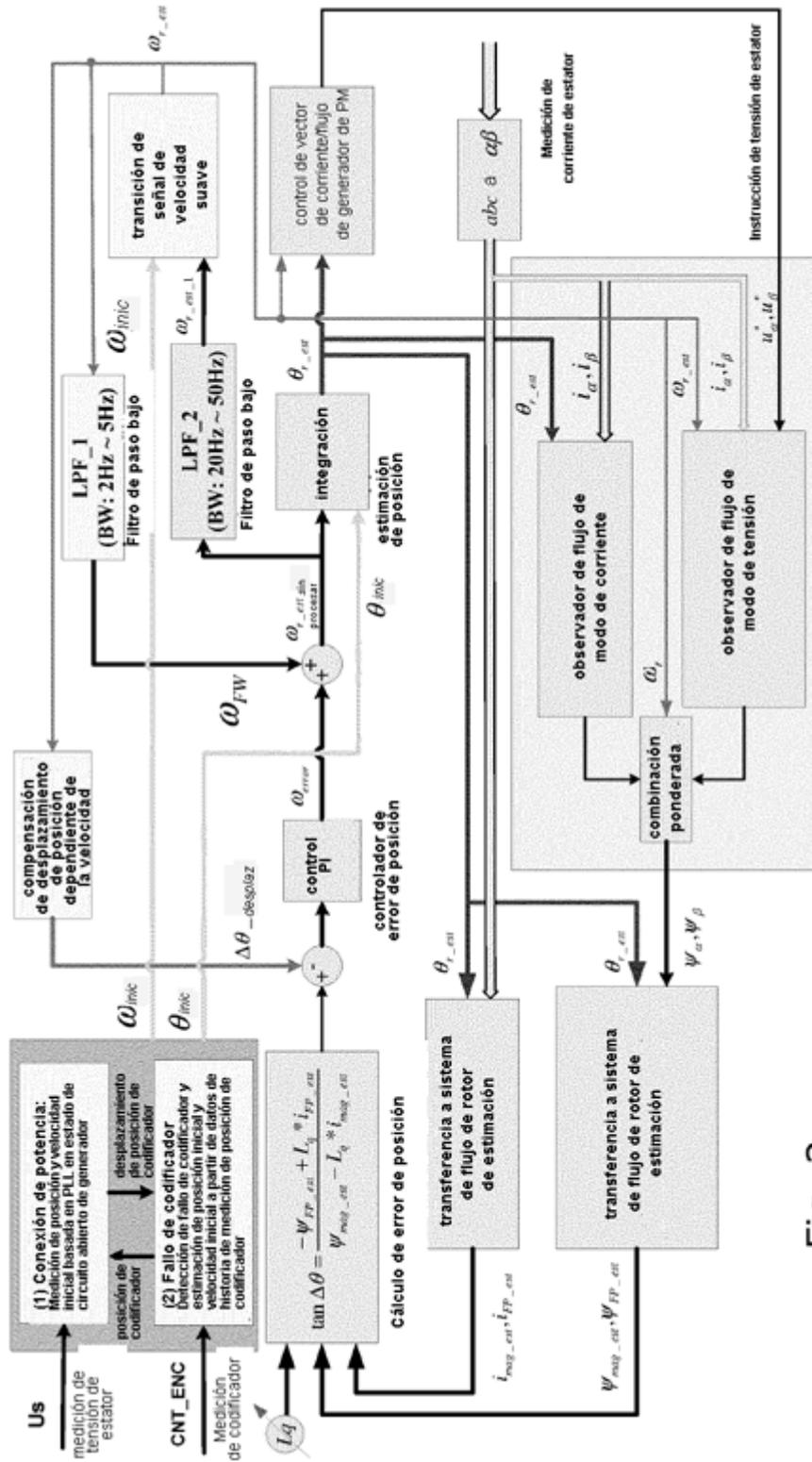


Fig. 2

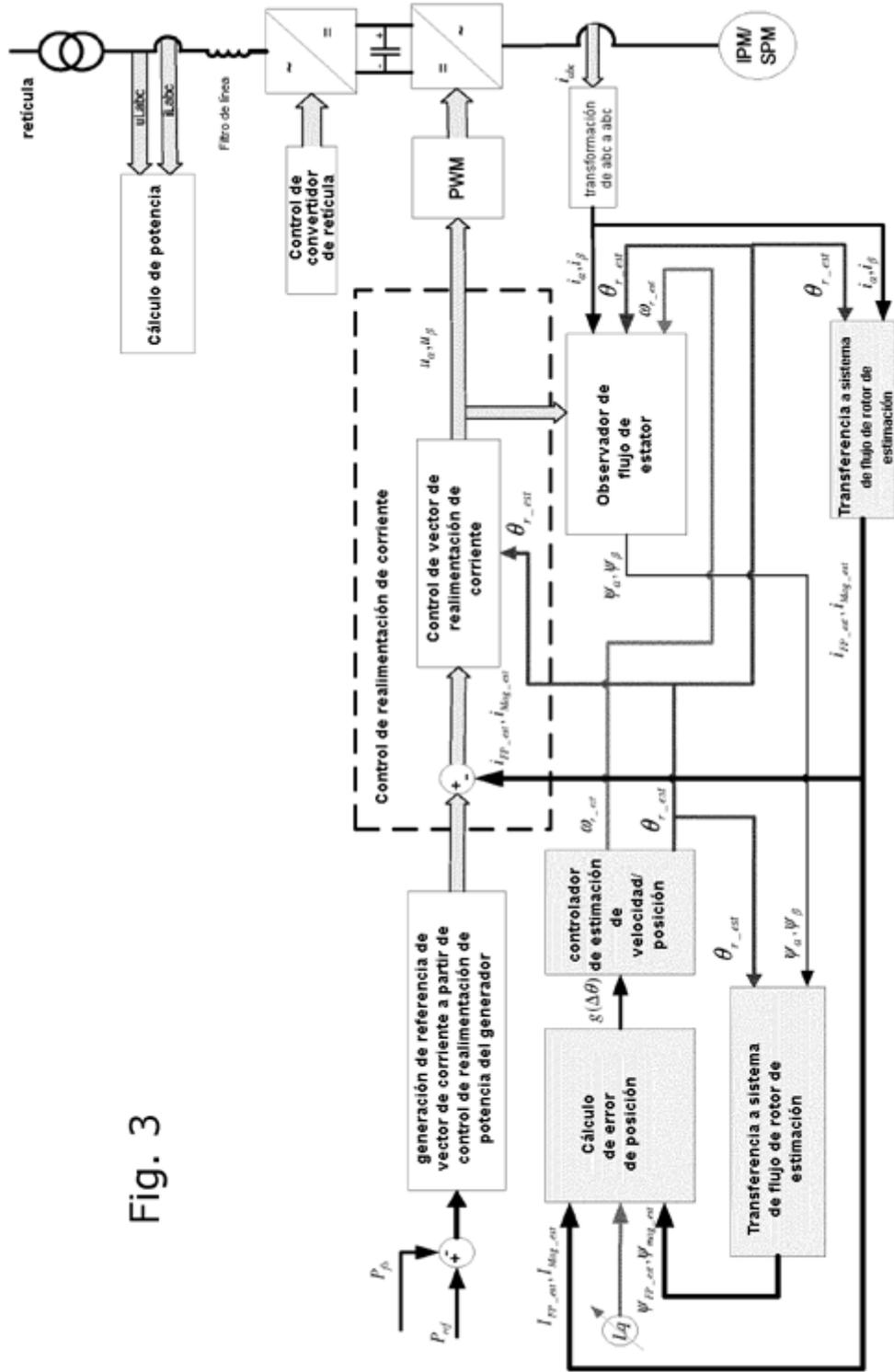


Fig. 3

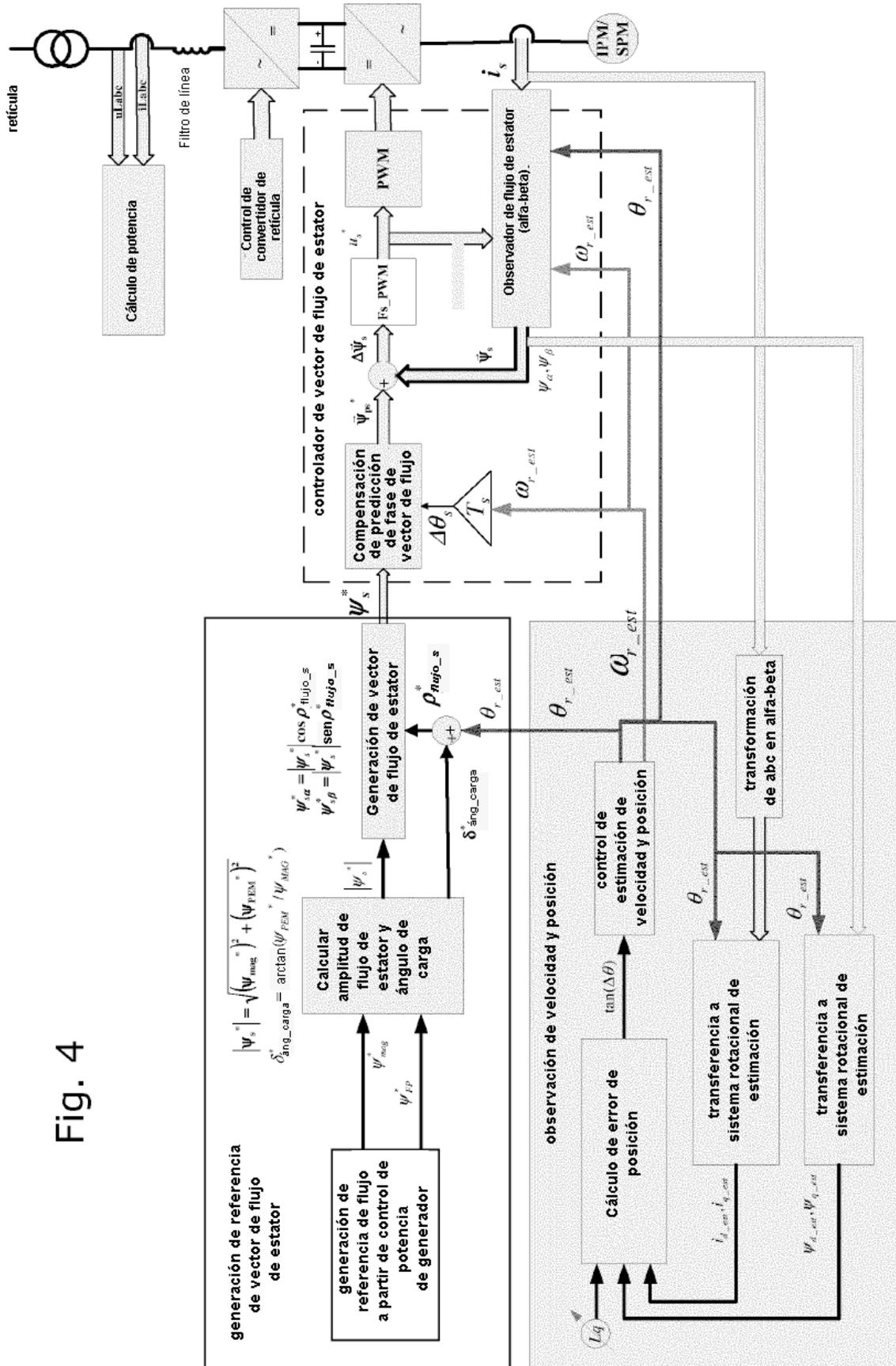


Fig. 4

