

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 645 671**

51 Int. Cl.:

F03D 7/00 (2006.01)

F03D 9/00 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.06.2010 PCT/CN2010/073598**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.12.2010 WO10148933**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.06.2010 E 10791439 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.08.2017 EP 2447527**

54 Título: **Método de control de paso individual para gran conjunto generador eólico**

30 Prioridad:

22.06.2009 CN 200910100064

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
07.12.2017

73 Titular/es:

**ZHEJIANG WINDEY CO., LTD. (100.0%)
No. 558 Shunfeng Road, Hangzhou Yuhang
Economic-Technological, Development Area
(Qianjiang Economic, Development Area)
Hangzhou, Zhejiang 311106, CN**

72 Inventor/es:

**YE, HANGYE;
XU, GUODONG y
YING, YOU**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 645 671 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).

DESCRIPCION

Método de control de paso individual para gran conjunto generador eólico

5 Esta solicitud reivindica el beneficio de prioridad a la Solicitud de Patente China Nº. 200910100064.8, titulada "INDIVIDUAL PITCH CONTROL METHOD FOR LARGE WIND TURBINE GENERATOR SYSTEMS" presentada el 22 de junio de 2009 con la Oficina Estatal de Propiedad Intelectual de PRC, que se incorpora aquí como referencia en su totalidad.

Campo de la invención

La presente invención se refiere a un método de control para un gran sistema generador de turbina eólica, y particularmente a un método de control de paso individual para un gran sistema generador de turbina eólica.

10 Antecedentes de la invención

15 La cizalladura del viento, la turbulencia del viento, el efecto de sombra de la torre, la desviación de la guiñada y otros factores causarán carga desequilibrada en el rotor del gran sistema generador de turbina eólica. A medida que aumenta la capacidad de la unidad del sistema generador de turbina eólica, aumenta el diámetro del rotor, lo que da como resultado un nivel de desequilibrio más alto para la tensión en todo el plano del rotor y una carga desequilibrada más significativa en el rotor. La carga desequilibrada en el rotor causará una pesada carga de fatiga en componentes importantes tales como cojinete de paso, buje, árbol principal, cojinete de guiñada y torre.

20 En la actualidad, una técnica de control de paso colectivo, en la que las palas son accionadas individualmente, es decir, tres conjuntos independientes de mecanismos de ejecución de control de paso reciben las mismas instrucciones de posición, se usa en casi todos los grandes sistemas generadores de turbina eólica con control de palas de paso de velocidad variable. Sin embargo, tales sistemas generadores de turbina eólica no pueden eliminar la influencia de la carga desequilibrada durante la operación.

El análisis teórico muestra que la carga desequilibrada en el rotor puede ser reducida por el control de paso individual de cada pala según las condiciones de la pala.

25 En la actualidad, una manera sencilla de reducir la carga desequilibrada es medir un azimut del rotor. Aunque la variación de velocidad del viento del rotor no depende particularmente del azimut del rotor en régimen de viento funcional, algunos factores de influencia específicos (cizalladura del viento, efecto sombra de la torre e inclinación del rotor) en un cierto punto en una pala varían independientemente con respecto al azimut del rotor bajo condiciones aerodinámicas. Teóricamente, siempre y cuando estas variaciones sean constantes, el ángulo de paso de cada una de las palas puede ajustarse de acuerdo con su relación funcional con el azimut del rotor, para reducir la variación de carga causada por los factores anteriores. Aunque el efecto de cizalladura del viento varía con el ambiente, puede realizarse una corrección basada en la dirección del viento. También se puede realizar una corrección basada en la desviación de guiñada si se usa una señal de dirección del viento de una sala de máquinas.

30 Sin embargo, la variación aleatoria causada por la turbulencia del viento es predominante en el campo de viento funcional, por lo que es difícil para el enfoque anterior lograr el efecto ideal. Especialmente para una pala grande, el efecto óptimo difícilmente se puede lograr porque el ángulo de paso adecuado varía con la posición de la pala.

35 Si pueden medirse continuamente cargas asimétricas, se puede reducir significativamente la carga de fatiga sobre la pala, el buje, el árbol principal, el cojinete de guiñada y la torre, atenuando la asimetría mediante el control de paso individual. Sin embargo, el control de paso individual es difícil de implementar por la teoría de control clásica por sus múltiples entradas variables, múltiples salidas variables y parámetros del sistema con características de no linealidad, variabilidad de tiempo e histéresis, mientras que la complicada estrategia de control basada en la teoría moderna de control para implementar el control de paso individual aumentaría mucho la carga de cálculo del controlador principal y difícilmente podría ser puesta en aplicación práctica.

40 El artículo escrito por E.A. Bossanyi, titulado "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction", WIND ENERGY, WILEY, CHICHESTER, GB, vol. 6, 8 October 2002 (2002-10-08), páginas 119-128, XP008031928, ISSN: 1099-1824, DOI: 10.1002/WE.76 describe un control de paso individual para reducción de carga.

Compendio de la invención

45 Para superar los inconvenientes de que la carga desequilibrada en el rotor no pueda ser reducida eficazmente por el método de control de paso existente para el sistema generador de turbina eólica y de que la carga de fatiga relativamente fuerte sea propensa a ocurrir, la presente invención proporciona un método de control de paso individual para un gran sistema generador de turbina eólica, en el que se evita la carga de fatiga relativamente fuerte mediante la medición de la carga desequilibrada.

La presente invención proporciona un método de control de paso individual para un gran sistema generador de turbina eólica, que incluye:

descomponer un control de paso individual en un proceso de control de paso colectivo y un proceso de control de desviación de paso, en el que el proceso de control de paso colectivo incluye controlar una velocidad de rotación de un rotor en base a un control PI clásico y obtener un ángulo colectivo de paso que se desea sea producido para el control de paso colectivo; y el proceso de control de desviación de paso incluye: obtener una componente de carga de cabeceo y una componente de carga de guiñada mediante transformación de Park de los valores de carga medidos en la parte raíz de tres palas; obtener los ángulos de paso que se desea sean producidos en el eje d y en el eje q mediante control PI respectivo de la componente de carga de inclinación y de la componente de carga de guiñada; y obtener ángulos de desviación de paso que se desea sean producidos para el control de desviación de paso mediante transformación inversa de Park de ángulos de paso que se desea sean producidos en el eje d y en el eje q;

obtener ángulos de paso que se desea sean producidos para el control de paso individual según una suma del ángulo colectivo de paso deseado para ser producido para el control de paso colectivo y los ángulos de desviación de paso respectivos que se desea sean producidos para el control de desviación de paso; e

implementar el control de paso mediante operaciones de control de los respectivos servomotores de control de paso de acuerdo con los ángulos de paso que se desea sean producidos para el control de paso individual.

La etapa de control de una velocidad de rotación de un rotor basada en un control PI clásico y de obtención de un ángulo colectivo de paso deseado para ser producido para el control de paso colectivo incluye además:

detectar una velocidad de rotación del generador ω_g , obtener una desviación de velocidad de rotación $\Delta\omega$ restando una velocidad de rotación de referencia ω_{ref} de la velocidad de rotación del generador ω_g , y obtener el ángulo colectivo de paso β_c deseado para ser producido para el control de paso colectivo según la siguiente fórmula de Laplace: $\frac{\beta_c(s)}{\Delta\omega(s)} = \frac{K_c}{sT_c} (1 + sT_c)$, donde K_c es un coeficiente de proporción de un controlador PI y T_c es una constante de integración de tiempo del controlador PI.

El proceso de control de desviación de paso incluye:

1) transmitir valores de carga medidos (M_{y1}, M_{y2}, M_{y3}) en la parte raíz de las tres palas y un azimut ψ del rotor a un controlador principal, realizando una transformación de Park en los valores de carga (M_{y1}, M_{y2}, M_{y3}) de la parte raíz de tres palas por el controlador principal, y obtener la componente de carga de cabeceo M_{tilt} y la componente de carga de guiñada M_{yaw} ;

2) obtener ángulos de paso deseados ($\beta_1^{cmd}, \beta_2^{cmd}$) para ser producidos en el eje d y en el eje q respectivamente de acuerdo con las siguientes fórmulas de Laplace: $\frac{\beta_1^{cmd}(s)}{M_{tilt}(s)} = \frac{K_d}{sT_d} (1 + sT_d)$, $\frac{\beta_2^{cmd}(s)}{M_{yaw}(s)} = \frac{K_q}{sT_q} (1 + sT_q)$, donde K_d y K_q son coeficientes de proporción de un controlador PI, y T_d y T_q son constantes de integración de tiempo del controlador PI, en donde el eje d y el eje q son ejes de un sistema de coordenadas fijo de un buje; y

3) obtener los ángulos de desviación de paso ($\beta_1', \beta_2', \beta_3'$) que se desea sean producidos para el control de desviación de paso mediante transformación inversa de Park de los ángulos de paso deseados ($\beta_1^{cmd}, \beta_2^{cmd}$) para ser producidos en el eje d y en el eje q.

La etapa de obtener ángulos de paso que se desea sean producidos para el control de paso individual según el ángulo colectivo de paso deseado para ser producido para el control de paso colectivo y los ángulos de desviación de paso que se desea sean producidos para el control de desviación de paso según las fórmulas siguientes: ($\beta_1 = \beta_1' + \beta_c$, $\beta_2 = \beta_2' + \beta_c$, $\beta_3 = \beta_3' + \beta_c$);

donde β_c es el ángulo colectivo de paso deseado para ser producido para el control de paso colectivo; ($\beta_1', \beta_2', \beta_3'$) son los ángulos de desviación de paso que se desea sean producidos para el control de desviación de paso; y $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ son los ángulos de paso que se desea sean producidos para el control de paso individual.

El método comprende adicionalmente una etapa de filtrado de la velocidad de rotación (ω_g) del generador según la siguiente fórmula de Laplace:

$$\frac{\omega_{gf}(s)}{\omega_g(s)} = \frac{\omega_1^2}{s^2 + 2\eta_1\omega_1 + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + 2\eta_2s/\omega_2 + s^2/\omega_2^2}{1 + 2\eta_3s/\omega_3 + s^2/\omega_3^2}$$

donde ω_{gf} es una velocidad del generador post-filtro, ω_1 es una frecuencia natural de un filtro de paso bajo, η_1 es una relación de amortiguamiento del filtro de paso bajo, ω_2 y ω_3 son frecuencias naturales de un filtro supresor, y η_2 y η_3 son relaciones de amortiguamiento del filtro supresor.

Preferiblemente, antes de la etapa de realización de la transformación de Park sobre los valores de carga (M_{y1} , M_{y2} , M_{y3}) en la parte raíz de las tres palas por el controlador principal, el método incluye adicionalmente una etapa de filtrado de paso bajo de los valores de carga en la parte raíz de las tres palas según la siguiente fórmula de Laplace:

$$\frac{M_{yif}(s)}{M_{yi}(s)} = \frac{\omega_d^2}{s^2 + 2\eta_d\omega_d s + \omega_d^2},$$

- 5 donde $i=1,2,3$, M_{yi} y M_{yif} son respectivamente el valor de la carga pre-filtro y el valor de la carga post-filtro en la parte raíz de la pala i -ésima, ω_d es una frecuencia natural de un filtro de paso bajo y η_d es una frecuencia natural de un filtro de paso bajo.

- 10 Preferiblemente, antes de la etapa de obtener ángulos de paso que se desea sean producido en el eje d y ene l eje q respectivamente según las fórmulas de Laplace, el método incluye además una etapa de filtrado supresor de la componente de cabeceo M_{tilt} y de la componente de guiñada M_{yaw} según las siguientes fórmulas de Laplace:

$$\frac{M_{tilt}(s)}{M_{tilt}(s)} = \frac{1 + 2\eta_\xi s/\omega_\xi + s^2/\omega_\xi^2}{1 + 2\eta_\xi s/\omega_\xi + s^2/\omega_\xi^2}, \quad \frac{M_{yaw}(s)}{M_{yaw}(s)} = \frac{1 + 2\eta_\xi s/\omega_\xi + s^2/\omega_\xi^2}{1 + 2\eta_\xi s/\omega_\xi + s^2/\omega_\xi^2}$$

donde M_{tilt} es una componente de carga de inclinación post-filtro, M_{yaw} es un componente de carga de guiñada post-filtro, ω_ξ y ω_ξ son frecuencias naturales de un filtro supresor, y η_ξ y η_ξ son relaciones de amortiguación del filtro supresor.

- 15 Preferiblemente, la transformación de Park es una transformación de Park de 3/2..

Preferiblemente, los valores de carga (M_{y1} , M_{y2} , M_{y3}) en la parte raíz de las tres palas son detectados por un sensor de carga de fibra óptica montado en la parte raíz de las palas.

Preferiblemente, el azimut ψ del rotor se detecta mediante un codificador incremental montado sobre un anillo deslizante.

- 20 La presente invención tiene las siguientes ventajas: 1. la carga desequilibrada sobre el rotor puede reducirse eficazmente, y la carga de fatiga sobre el cojinete de paso, el árbol principal, el buje, el cojinete de guiñada y la torre puede reducirse, por lo tanto, la fiabilidad del dispositivo se mejora y la vida útil del dispositivo se prolonga; y 2. la carga de guiñada M_{yaw} , que refleja el error de orientación frente al viento, puede generarse, de manera que el sistema generador de turbina eólica puede mantenerse enfrenteado al viento sin utilizar accionamientos de guiñada en el aerogenerador.
- 25

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 muestra una distribución ejemplar de la velocidad instantánea del viento, donde el eje X representa la altura, el eje Y representa la distancia horizontal desde el centro del buje, y el eje Z representa la velocidad del viento;

- 30 La Figura 2(a) muestra un espectrograma de una carga de pala M_y ;

La Figura 2(b) muestra un espectrograma de una carga de cabeceo de buje M_{tilt} ;

La Figura 3(a) muestra un sistema de coordenadas giratorio para analizar la carga de pala;

La Figura 3(b) muestra un sistema de coordenadas fijo del cubo para analizar la carga del buje, la torre y otros componentes estáticos de la turbina eólica;

- 35 La Figura 4 es un diagrama esquemático que muestra el principio del control de paso individual en la presente invención; y

La Figura 5 es diagrama que muestra las funciones de transferencia del controlador de desviación.

- 40 En las Figuras, β es un valor promedio de ángulos de paso reales de tres palas, β_c es un ángulo colectivo de paso deseado para ser producido para el control de paso colectivo, y β_1^r , β_2^r y β_3^r son ángulos de desviación de paso que se desea sean producidos para el control de desviación de paso, β_1 , β_2 y β_3 son ángulos de paso que se desea sean producidos para el control de paso individual, β_1^{cm} y β_2^{cm} son los ángulos de paso que se desea sean producidos en el eje d y en el eje q, M_{y1} , M_{y2} y M_{y3} son valores de carga en la parte raíz de las tres palas, M_{tilt} y M_{yaw} son componentes de carga en el eje d y el eje q, ω_g es una velocidad de rotación del generador, ω_{ref} es un valor de referencia de rotor, $\Delta\omega$ es una desviación de la velocidad de rotación, ψ es un azimut del rotor, K_c , K_q y K_d son ganancias del controlador PI, T_c , T_q y T_d son constantes de integración de tiempo del controlador PI, ω_1 y ω_4 son frecuencias naturales del filtro de paso bajo, η_1 y η_4 son relaciones de amortiguación del filtro de paso bajo, ω_2 , ω_3 ,
- 45

ω_5 y ω_6 son frecuencias naturales de un filtro supresor, y η_1 , η_2 , η_5 y η_6 son relaciones de amortiguación del filtro supresor.

Descripción detallada de la invención

5 El concepto inventivo y el principio básico de la presente invención serán descritos a continuación para facilitar la comprensión y la implementación de la presente invención por aquellos expertos en la técnica.

10 El concepto técnico de la presente invención es el siguiente: el control de paso individual adoptado está compuesto por un control de paso colectivo y un control de desviación paso, es decir, las salidas del control de paso individual (los ángulos de paso que se desea sean producidos para las tres palas) se obtienen añadiendo la salida del control de paso colectivo (la porción común de los ángulos de paso que se desea sean producidos para las tres palas) a las salidas del control de desviación de paso (la porción de desviación de los ángulos de paso que se desea sean producidos para las tres palas). Además, el control de paso colectivo y el control de paso de desviación se descomponen: el control de paso colectivo se utiliza para implementar la función de control de paso convencional, en la que la velocidad de rotación del rotor se controla en base a un control PI clásico; y el control de desviación de paso se utiliza para reducir las cargas desequilibradas sobre el rotor.

15 Las cargas desequilibradas M_{tilt} y M_{yaw} sobre el rotor son causadas por la fluctuación de la carga sobre las palas (la cual causa tensiones desequilibradas en las tres palas). Si la componente armónica 1P (nP representa n veces la frecuencia de rotación del rotor) que es dominante en la carga de pala se puede reducir mediante el control de desviación de paso, las cargas desequilibradas sobre el rotor pueden reducirse eficazmente. La carga de pala M_y está correlacionada con el ángulo de paso β y la velocidad relativa del viento v . En el caso de una velocidad de viento relativa v constante, la carga de pala M_y y el ángulo de paso β pueden linealizarse para ser linealmente proporcionales cerca del punto de trabajo, por lo tanto es necesario regular el ángulo de paso β en la misma frecuencia (1P) para reducir la componente armónica 1P en la carga de pala.

20 Por consiguiente, el concepto técnico del control de desviación de paso es el siguiente: sólo se reduce la componente armónica 1P que es dominante en la carga sobre la pala. Las cargas (M_{y1} , M_{y2} , M_{y3}) sobre las tres palas se transforman en los ejes d-q en el sistema de coordenadas fijo del buje mediante la transformación de Park que se utiliza habitualmente en electromecánica, para obtener la componente de carga del eje d y la componente de carga del eje q, que representan respectivamente las cargas desequilibradas M_{tilt} y M_{yaw} sobre el rotor. La componente de carga del eje d y la componente de carga del eje q son sometidas respectivamente al control PI clásico (el valor objeto del control es 0), para obtener los ángulos de paso (β_1^{dm} y β_2^{qm}) que se desea sean producidos sobre el eje d y sobre el eje q, que son transformados inversos de Park en los ángulos de desviación de paso β_1^d , β_2^d y β_3^d de la variación de frecuencia 1P a su vez, reduciendo así la componente armónica 1P dominante en la carga de pala. El filtro de paso bajo para reducir la sensibilidad del controlador en perturbaciones de frecuencia relativamente alta y el filtro supresor para filtrar la componente armónica 3P se introducen en el control de desviación, porque una vez son amplificadas por el controlador, la componente armónica 3P de la carga en el sistema de coordenadas fijo del buje puede inducir carga de fatiga relativamente fuerte sobre el buje de la rueda, el cojinete de guiñada y la torre.

25 Para una mejor comprensión de los objetos, características y ventajas anteriores de la presente invención, las realizaciones de la presente invención serán descritas en detalle conjuntamente con los dibujos de aquí en adelante.

30 Con referencia a las Figuras 1-5, una realización de la presente invención proporciona un método de control de paso individual para un sistema generador de turbina eólica de gran tamaño. El método de control de paso individual incluye un proceso de control de paso colectivo y el proceso de control de paso colectivo incluye: detectar una velocidad de rotación ω_g del generador, obtener una desviación $\Delta\omega$ de velocidad de rotación restando una velocidad de rotación ω_{ref} de referencia de la velocidad de rotación ω_g del generador y obtener el ángulo de paso colectivo β_c deseado para ser producido para el control de paso colectivo de acuerdo con la siguiente fórmula de

35 Laplace: $\frac{\beta_c(s)}{\Delta\omega(s)} = \frac{K_c}{sT_c} (1 + sT_c)$, donde K_c es un coeficiente de proporción de un controlador PI y T_c es una constante de integración de tiempo del controlador PI.

El método de control de paso individual incluye además un proceso de control de desviación de paso, y el proceso de control de desviación de paso incluye:

40 1) transmitir valores de carga medidos (M_{y1} , M_{y2} , M_{y3}) en la parte raíz de las tres palas y un azimut ψ del rotor a un controlador principal, realizar una transformación de Park sobre los valores de carga (M_{y1} , M_{y2} , M_{y3}) de las tres palas por el controlador principal, y obtener la componente de carga de cabeceo M_{tilt} y la componente de carga de guiñada M_{yaw} ;

45 2) obtener ángulos de paso deseados (β_1^{dm} , β_2^{qm}) en el eje d y en el eje q, respectivamente, de acuerdo con las siguientes fórmulas de Laplace: $\frac{\beta_1^{dm}(s)}{M_{tilt}(s)} = \frac{K_d}{sT_d} (1 + sT_d)$, $\frac{\beta_2^{qm}(s)}{M_{yaw}(s)} = \frac{K_q}{sT_q} (1 + sT_q)$, donde K_d y K_q son coeficientes de proporción de un controlador PI, y T_d y T_q son constantes de integración de tiempo del controlador PI; y

3) obtener los ángulos de desviación de paso (β_1^i , β_2^i y β_3^i) que se desea sean producidos para el control de desviación de paso mediante transformación inversa de Park de los ángulos de paso (β_1^{pm} y β_2^{pm}) que se desea sean producidos sobre el eje d y el eje q;

5 obtener los ángulos de paso (β_1 , β_2 y β_3) que se desea sean producidos para el control de paso individual de acuerdo con el ángulo de paso colectivo β_c deseado para ser producido para el control de paso colectivo y los ángulos de desviación de paso (β_1^i , β_2^i y β_3^i) que se desea sean producidos para el control de desviación de paso:

$$(\beta_1 = \beta_1^i + \beta_c, \beta_2 = \beta_2^i + \beta_c, \beta_3 = \beta_3^i + \beta_c)$$

implementar el control de paso mediante operaciones de control de los servomotores de control de paso respectivos de acuerdo con los ángulos de paso (β_1 , β_2 y β_3) que se desea sean producidos para el control de paso individual.

10 La velocidad del viento en el área barrida por el rotor es variable en el espacio y en el tiempo. La Figura 1 muestra una distribución ejemplar de la velocidad instantánea del viento. Debido a que la velocidad del viento aumenta con el aumento de la altura debido a la cizalladura del viento, cuando el rotor está girando, la velocidad del viento experimentada sobre la pala verticalmente hacia arriba es mayor que sobre la pala verticalmente hacia abajo y la diferencia de la velocidad del viento causará una fuerza de cizalladura del viento sobre la pala giratoria. Además, a una cierta altura, la velocidad del viento se puede dividir en dos componentes, siendo la primera componente la velocidad media del viento a esta altura y la otra componente la velocidad aleatoria del viento provocada por la turbulencia. La distribución desigual de la velocidad del viento ocasionará cargas desequilibradas sobre el rotor.

20 Con referencia a la Figura 2(a) y a la Figura 2(b), se muestran los espectrogramas de la carga M_y sobre la pala y la carga de cabeceo M_{hit} sobre el buje del sistema generador de turbina eólica bajo una cierta condición de funcionamiento. Bajo esta condición de funcionamiento, la velocidad de rotación del rotor es de 17,2 rpm, es decir, 1P = 0,287 Hz. A partir de la Figura 2(a), se puede ver que excepto en la componente armónica dominante con la frecuencia de 1P, hay 2P, 3P, 4P y otras componentes armónicas en la carga sobre la pala. Bajo un régimen de viento ideal, para una turbina eólica de tres palas, la carga sobre el buje está compuesta principalmente de componentes armónicas 3P, 6P, ..., nP y otras componentes armónicas que se contrarrestan entre sí. Sin embargo, bajo régimen funcional de viento, no se contrarrestan otras componentes armónicas de la carga sobre el buje, de modo que se inducirá una carga desequilibrada (como se muestra en la Figura 2(b)). La carga desequilibrada causará una fuerte carga de fatiga sobre el buje, el árbol principal y el cojinete de guiñada, lo cual es perjudicial para la vida útil de la turbina eólica.

30 En referencia a la Figura 4, el control de paso individual se descompone en el control de paso colectivo y el control de desviación de paso. En el control de paso colectivo, el regulador PI clásico se utiliza para controlar la velocidad de rotación del rotor (la función del control de paso convencional); y el control de desviación de paso se utiliza para reducir la carga desequilibrada sobre el rotor. Los ángulos de paso que se desea sean producidos para el control de paso individual son la suma del ángulo de paso colectivo deseado para ser producido para el control de paso colectivo y los ángulos de desviación de paso respectivos que se desea sean producidos para el control de desviación de paso.

35 El proceso de control de paso colectivo incluye: detectar una velocidad de rotación ω_g del generador con un codificador montado en el generador, filtrado de paso bajo y supresor que filtra la velocidad de rotación ω_g del generador, obtener una desviación $\Delta\omega$ de velocidad de rotación restando una velocidad de rotación ω_{ref} de referencia del generador de la velocidad de rotación ω_g , y obtener el ángulo de paso colectivo β_c , deseado para ser producido para el control de paso colectivo después del control PI. El filtrado de paso bajo se utiliza para disminuir la sensibilidad del controlador a una frecuencia relativamente alta, y el filtrado supresor se utiliza para evitar la innecesaria operación de control de paso a una frecuencia cercana a 6P. Debido a la no linealidad del sistema de control de paso, la ganancia K_c del controlador PI se determina a partir de una tabla de consulta que está organizada como una función del valor medio β de los ángulos de paso reales de las tres palas.

45 El control de desviación de paso será descrito en detalle a continuación. En primer lugar, se analiza la carga sobre la pala de la turbina eólica. La Figura 3(a) muestra un sistema de coordenadas giratorio que se usa generalmente para analizar la carga de pala. En el sistema de coordenadas giratorio, el momento de flexión M_{yi} en la parte de raíz de la *i*-ésima pala es:

$$M_{yi} = \frac{1}{2} \rho R^2 \pi C_{My}(\lambda_i, \beta_i) v_{wi}^2 \quad (1)$$

50 donde ρ es la densidad del aire; R es el radio del rotor; $C_{My}(\lambda_i, \beta_i)$ es el coeficiente del momento flector de la pala; λ_i es la relación de velocidad de punta de la *i*-ésima pala; β_i es el ángulo de paso de la *i*-ésima pala; y v_{wi} es la velocidad efectiva del viento de la *i*-ésima pala. La carga gravitatoria y la carga de inercia de la pala son relativamente pequeñas y son despreciables. Se supone que las tres palas de la turbina eólica están dispuestas uniformemente, con un ángulo de 120 ° entre palas adyacentes.

Para calcular la carga sobre el buje, el eje principal, el cojinete de guiñada y la torre de la turbina eólica, la carga de pala en el sistema de coordenadas giratorio debe ser transformada al sistema de coordenadas fijo del buje (como se muestra en la Figura 3(b)). Con la transformación de coordenadas, la carga de pala se transforma en una componente de carga en el eje y y una componente de carga en el eje x en el sistema de coordenadas fijo del buje, que representan respectivamente los significados físicos de la carga del momento de cabeceo M_{tit} y el momento de guiñada M_{yaw} , y las fórmulas de cálculo son las siguientes:

$$M_{tit} = \sum_i^3 M_{yi} \cos \left[\omega t - (i-1) \frac{2\pi}{3} \right] \quad (2)$$

$$M_{yaw} = \sum_i^3 M_{yi} \sin \left[\omega t - (i-1) \frac{2\pi}{3} \right] \quad (3)$$

donde ω es la velocidad de rotación de la turbina eólica, es decir, 1P.

- 10 De las fórmulas (2) y (3) se puede observar que la transformación de la carga de pala en el sistema de coordenadas giratorio a la carga en el sistema de coordenadas fijo del buje se puede implementar mediante la transformación de Park que se utiliza comúnmente en el control del vector motor.

La fórmula de transformación de Park de 3/2 usada aquí es:

$$\begin{bmatrix} M_d \\ M_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\psi + \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\psi) & \sin(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\psi + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

- 15 Y la fórmula de transformación inversa de Park de 3/2 utilizada en este documento es:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) \\ \cos(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\psi + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\psi + \frac{4\pi}{3}) & \sin(\psi + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_d \\ M_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde ψ es el azimut del rotor, $\psi = \omega t$; y M es la carga estándar.

- 20 La componente armónica 1P en la carga de pala es transformada de Park (con la fórmula (4)) en la componente armónica 0P de la carga de momento de cabeceo y la componente armónica 0P de la carga de momento de guiñada en el sistema de coordenadas fijo del buje, la cual es sometida a su vez a control PI para obtener las salidas (β_1^{cm} y β_2^{cm}) y luego sometida a transformación inversa de Park (con la fórmula (5)) para obtener la variación de los ángulos de paso de la misma frecuencia (1p) deseada para ser producida, reduciendo así la componente armónica 1P en la carga de pala. El objetivo del controlador PI es que la componente de la carga de momento de inclinación M_{tit} y de la carga de momento de guiñada M_{yaw} en el sistema de coordenadas fijas del buje, que se obtienen por la transformación de Park de la componente armónica 1P en la carga de pala, sean ambas 0, lo que significa que la entrada de referencia del controlador es 0. Debido a que el control de desviación de paso funciona bajo las condiciones operativas cuando la velocidad del viento es mayor o menor que la velocidad nominal del viento y el sistema de control de paso es un sistema no lineal, la ganancia del controlador PI y la magnitud limitante de amplitud en el proceso de limitación de amplitud necesitan ser ambas determinadas utilizando la tabla de búsqueda.

- 30 La implementación específica se muestra en la Figura 5. Los valores de carga (M_{y1} , M_{y2} , M_{y3}) en la parte raíz de las tres palas, que son detectados por el sensor de carga de fibra óptica montado en la parte de raíz, junto con el azimut ψ del rotor, que es detectado por el codificador incremental montado en el anillo deslizando, se transmiten al controlador principal; en el controlador principal, los valores de carga (M_{y1} , M_{y2} , M_{y3}) en la parte de raíz de las tres palas se filtran en paso bajo y luego se transforman en la componente de carga de M_{tit} y en la componente de carga de M_{yaw} mediante la transformación de Park (la fórmula 5)); entonces la componente de carga de M_{tit} y la componente de carga de M_{yaw} se filtran en supresión respectivamente para filtrar la componente armónica 3P y se someten a control PI del controlador PI, dando como resultado las salidas (β_1^{cm} y β_2^{cm}) y entonces los ángulos de desviación de paso (β_1^e , β_2^e y β_3^e) que se desea sean producidos se obtienen mediante la transformación inversa de Park (la fórmula (6)).

- 40 Por último, se obtienen los ángulos de paso ($\beta_1 = \beta_1^i + \beta_2$, $\beta_2 = \beta_2^i + \beta_2$, $\beta_3 = \beta_3^i + \beta_2$) de las tres palas que se desea sean producidos para el control de paso individual y se transforman secuencialmente en tensiones de control dentro

de un margen de $- 10V \sim + 10V$, en señales de corriente dentro de un cierto rango por el control del servocontrolador, y luego accionan el servomotor para implementar el control de paso.

- 5 Una de las ventajas de esta solución técnica es que la frecuencia requerida para la acción del nuevo sistema de control de paso añadido es 1P, que es generalmente inferior a 0,5 Hz para la gran turbina eólica existente. Por lo tanto, esta solución técnica es factible para el mecanismo de ejecución de control de paso adoptado en los sistemas generadores de turbinas eólicas existentes. Otra ventaja es que no es necesaria ninguna modificación en la estructura física de la turbina eólica para implementar el control de paso individual, ya que en la mayoría de los grandes sistemas generadores de turbinas eólicas existentes se utiliza un control de paso colectivo controlado individualmente.
- 10 Lo anterior son meramente las realizaciones preferidas de la presente invención, y no pretenden limitar la presente invención en forma alguna. Aunque la presente invención se describe en realizaciones preferidas como se mencionó anteriormente, las realizaciones preferidas no pretenden restringir la presente invención. Pueden realizarse numerosas modificaciones, variaciones y alternativas equivalentes por los expertos en la técnica basándose en el método y contenido técnico descritos anteriormente sin apartarse del alcance de las soluciones técnicas. Por lo tanto, cualquier contenido que no se desvíe de las soluciones técnicas de la presente invención, y cualesquiera variaciones simples, equivalencias y modificaciones hechas a las realizaciones anteriores basadas en la esencia de la presente invención entran en el ámbito de protección de la presente invención.
- 15

REIVINDICACIONES

1. Un método de control de paso individual para un gran sistema generador de turbina eólica, que comprende descomponer un control de paso individual en un proceso de control de paso colectivo y un proceso de control de desviación de paso, donde el proceso de control de paso colectivo comprende controlar una velocidad de rotación del rotor en base a un control clásico PI mediante detección de la velocidad de rotación (ω_g) del generador, obtener una desviación ($\Delta\omega$) de la velocidad de rotación restando una velocidad de rotación (ω_{ref}) de referencia de la velocidad de rotación (ω_g) del generador, y obtener el ángulo de paso colectivo deseado para ser producido para el control de paso colectivo según la siguiente fórmula de Laplace: $\frac{\beta_c(s)}{\Delta\omega(s)} = \frac{K_c}{sT_c} (1 + sT_c)$, donde K_c es un coeficiente de proporción de un controlador PI, y T_c es una constante de integración de tiempo del controlador PI,

donde el método de control de paso individual comprende además un proceso de control de desviación de paso, comprendiendo el proceso de desviación de paso :

1) transmitir valores de carga (M_{y1}, M_{y2}, M_{y3}) medidos en la parte raíz de las tres palas y el azimut ψ del rotor a un controlador principal, realizar una transformación de Park sobre los valores de carga (M_{y1}, M_{y2}, M_{y3}) en la parte raíz de las tres palas por el controlador principal, y obtener la componente de carga de cabeceo M_{tilt} y la componente de carga de guiñada (M_{yaw});

2) obtener ángulos de paso ($\beta_1^{cm}, \beta_2^{cm}$) que se desea sean producidos sobre los ejes d y q respectivamente según la siguiente fórmula de Laplace: $\frac{\beta_1^{cm}(s)}{M_{tilt}(s)} = \frac{K_d}{sT_d} (1 + sT_d)$, $\frac{\beta_2^{cm}(s)}{M_{yaw}(s)} = \frac{K_q}{sT_q} (1 + sT_q)$, donde K_d y K_q son coeficientes de proporción de un controlador PI, y T_d y T_q son constantes de integración de tiempo del controlador PI, donde los eje d y eje q son ejes de un sistema de coordenadas fijo de un buje;

3) obtener ángulos de desviación de paso ($\beta_1', \beta_2', \beta_3'$) que se desea sean producidos para el control de desviación de paso mediante transformación inversa de Park de los ángulos de paso ($\beta_1^{cm}, \beta_2^{cm}$) que se desea sean producidos sobre los ejes d y eje q.

4) obtener ángulos de paso ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) que se desea sean producidos para el control de paso individual según el ángulo colectivo de paso (β_c) deseado para ser producido para el control de paso colectivo y los ángulos de desviación ($\beta_1', \beta_2', \beta_3'$) que se desea sean producidos para el control de desviación de paso: $\beta_1 = \beta_1' + \beta_c$, $\beta_2 = \beta_2' + \beta_c$, $\beta_3 = \beta_3' + \beta_c$; y

5) implementar el control de paso mediante control de las operaciones de los respectivos servomotores de control de paso de acuerdo a los ángulos de paso ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) que se desea sean producidos,

caracterizado por que antes de la etapa de obtención de la desviación $\Delta\omega$ de la velocidad restando una velocidad de rotación ω_{ref} de referencia de la velocidad de rotación ω_g del generador, el método comprende además una etapa de filtrado de la velocidad de rotación (ω_g) del generador según la siguiente fórmula de Laplace:

$$\frac{\omega_{gf}(s)}{\omega_g(s)} = \frac{\omega_1^2}{s^2 + 2\eta_1\omega_1 + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + 2\eta_2s/\omega_2 + s^2/\omega_3^2}{1 + 2\eta_2s/\omega_2 + s^2/\omega_3^2}$$

donde ω_{gf} es la velocidad de rotación del generador post filtrado, ω_1 es una frecuencia natural de un filtro de paso bajo, η_1 es una porción de amortiguamiento del filtro de paso bajo, ω_2 y ω_3 son frecuencias naturales de un filtro supresor, y η_2 y η_3 son relaciones de amortiguamiento del filtro supresor.

2. El método de control de paso individual para un gran sistema generador de turbina eólica según la reivindicación 1, donde antes de realizar una transformación de Park sobre los valores de carga (M_{y1}, M_{y2}, M_{y3}) en la parte raíz de las tres palas, el método comprende además una etapa de realización de filtrado de paso bajo según la siguiente fórmula de Laplace: $\frac{M_{yif}(s)}{M_{yi}(s)} = \frac{\omega_4^2}{s^2 + 2\eta_4\omega_4 + \omega_4^2}$, donde $i=1,2,3$, M_{yi} y M_{yif} son respectivamente el valor de carga pre-filtrado

y el valor de carga post-filtrado en la parte raíz de la pala i -ésima, ω_4 es una frecuencia natural de un filtro de paso bajo, y η_4 es una relación de amortiguamiento del filtro de paso bajo.

3. El método de control de paso individual para el gran sistema generador de energía eólica según la reivindicación 1 ó 2, donde el método comprende adicionalmente una etapa de filtrado supresor de la componente de carga de cabeceo (M_{tilt}) y de la componente de carga de guiñada (M_{yaw}) según las siguientes fórmulas de Laplace:

$$\frac{M_{tiltf}(s)}{M_{tilt}(s)} = \frac{1 + 2\eta_5s/\omega_5 + s^2/\omega_6^2}{1 + 2\eta_5s/\omega_5 + s^2/\omega_6^2} \text{ y } \frac{M_{yawf}(s)}{M_{yaw}(s)} = \frac{1 + 2\eta_6s/\omega_6 + s^2/\omega_5^2}{1 + 2\eta_6s/\omega_6 + s^2/\omega_5^2}$$

donde M_{tiltf} es una componente de carga de inclinación post-filtrado, M_{yawf} es una componente de carga de guiñada post-filtrado, ω_5 y ω_6 son frecuencias naturales de un filtro supresor, y η_5 y η_6 son porciones de amortiguamiento del filtro supresor.

4. El método de control de paso individual para el gran sistema generador de turbina eólica según la reivindicación 1 ó 2, donde la transformación de Park es una transformación de Park de 3/2.

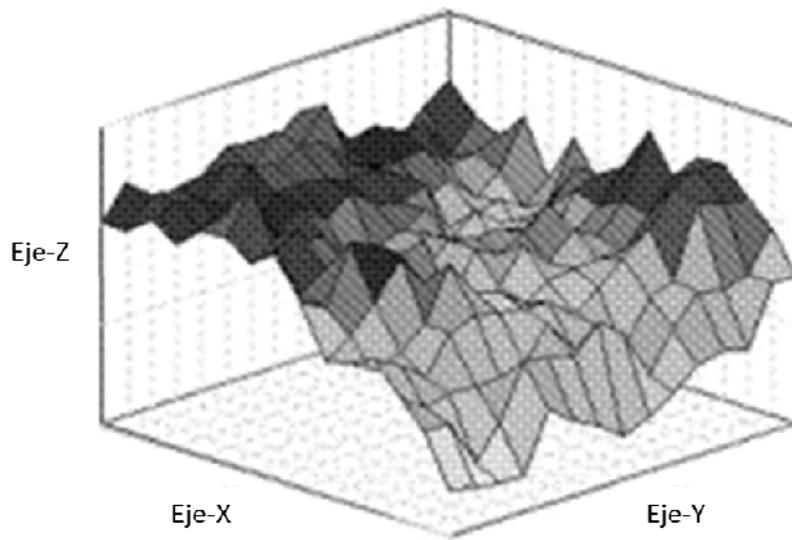


Figura 1

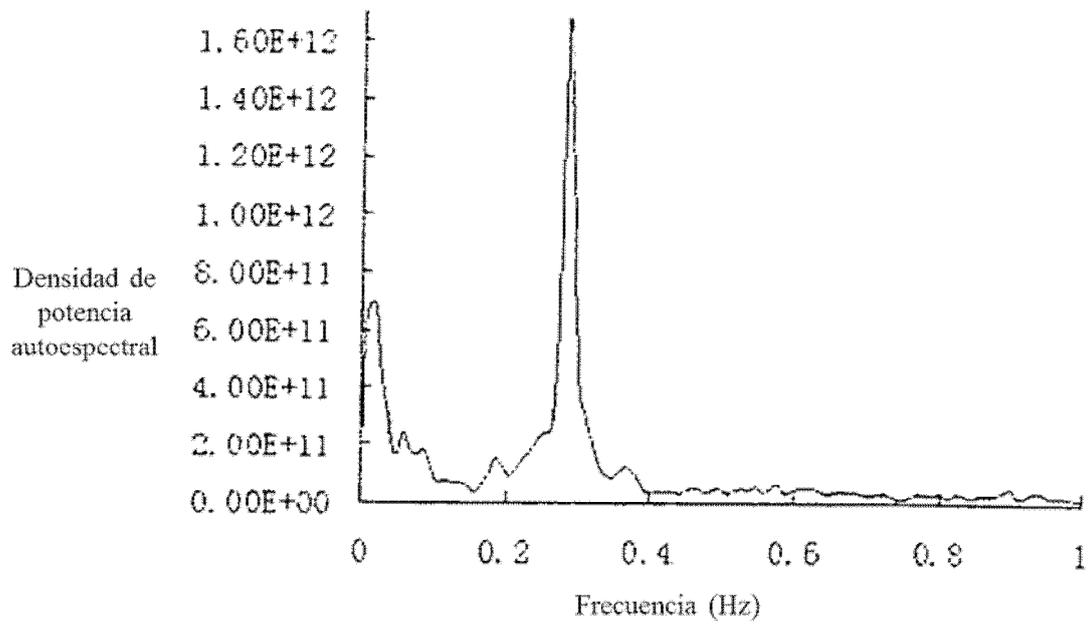


Figura 2(a)

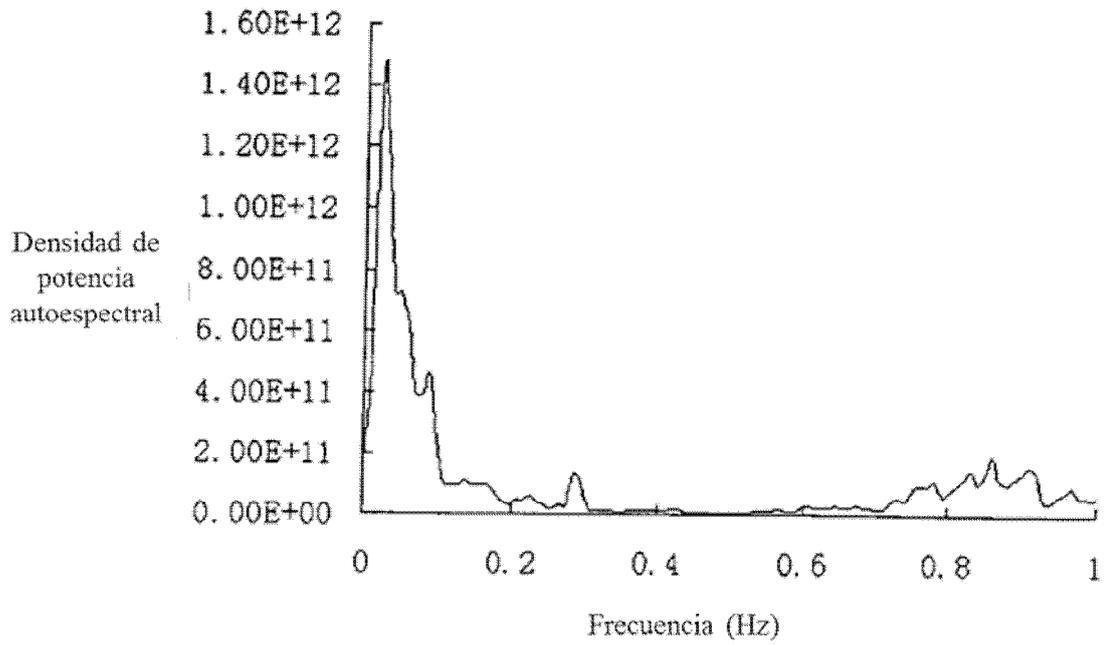


Figura 2(b)

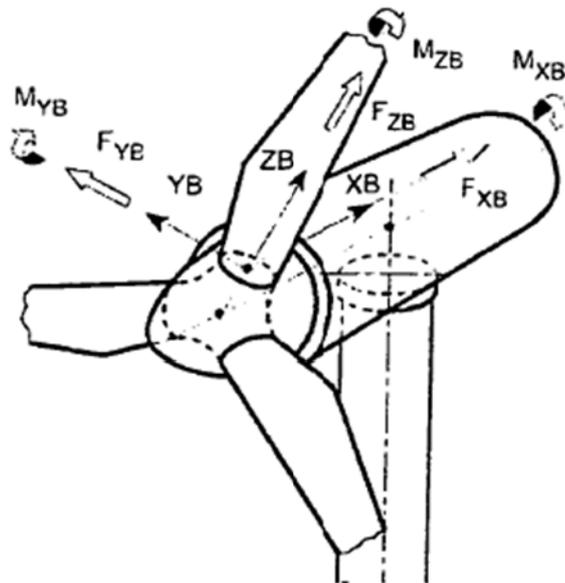


Figura 3(a)

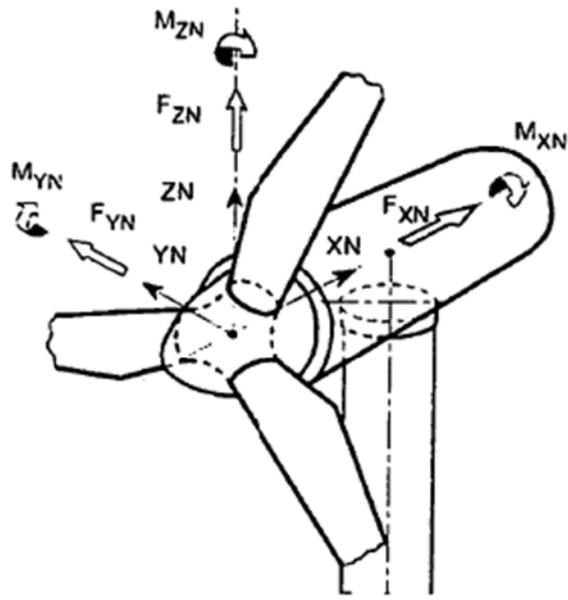


Figura 3(b)

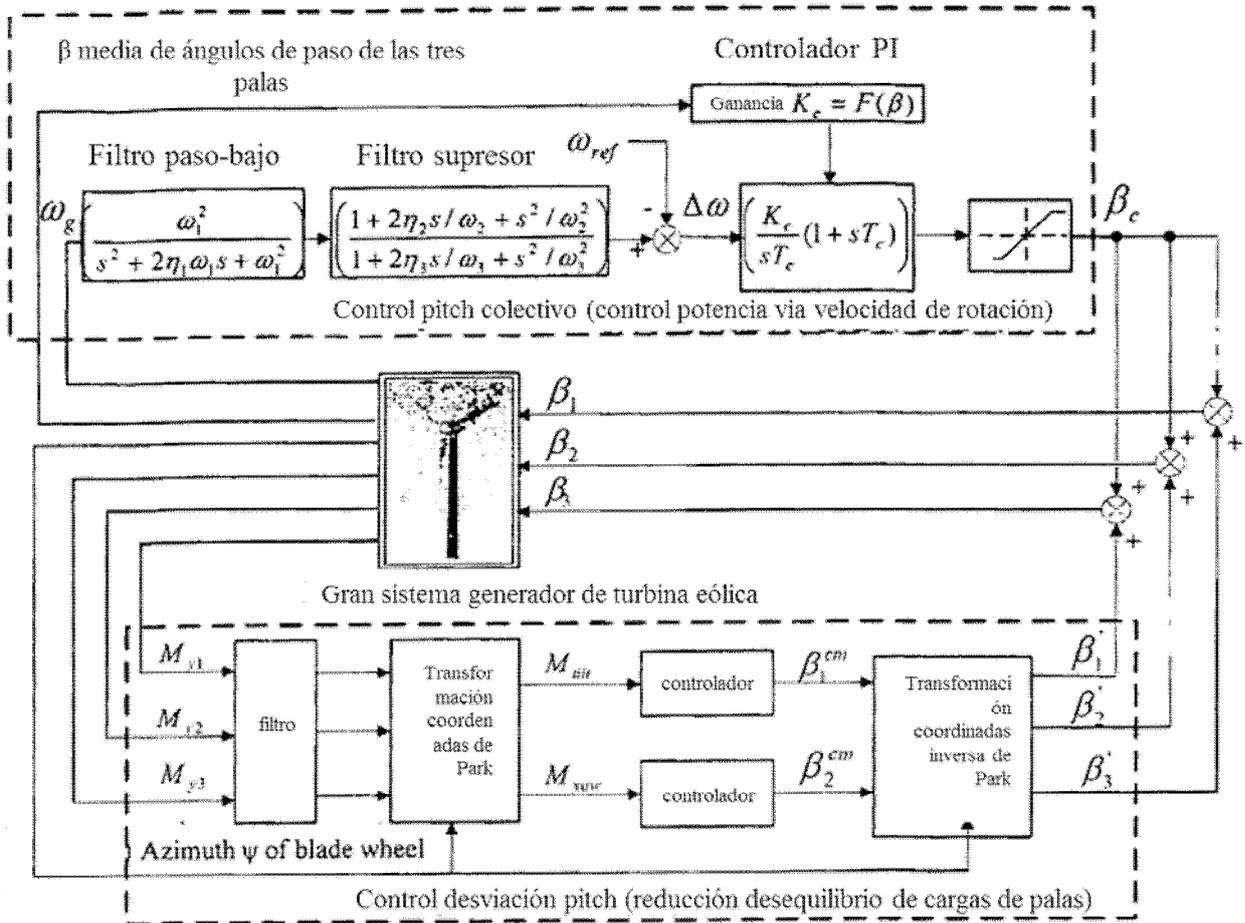


Figura 4

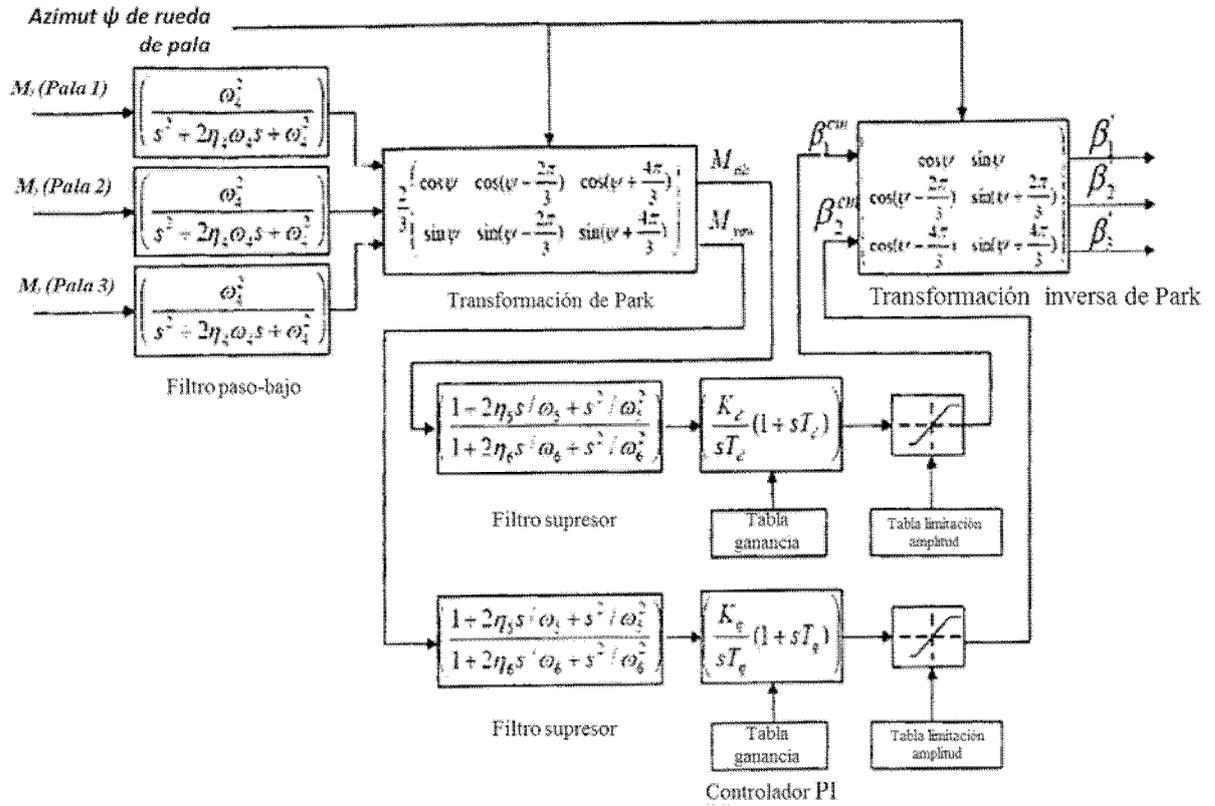


Figura 5