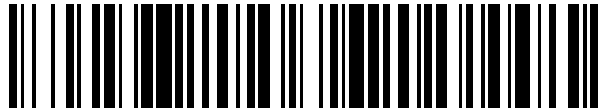


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 656 682**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.06.2015 PCT/DK2015/050167**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.12.2015 WO15192856**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.06.2015 E 15730051 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.12.2017 EP 3158191**

54 Título: **Control de turbinas eólicas en respuesta a la cizalladura de viento**

30 Prioridad:

19.06.2014 DK 201470367

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

28.02.2018

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**KRISTOFFERSEN, JACOB KROGH y
SØRENSEN, SØREN**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 656 682 T3

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

DESCRIPCIÓN

Control de turbinas eólicas en respuesta a la cizalladura de viento

Campo de la invención

5 Esta invención se refiere a turbinas eólicas y a métodos de control de turbinas eólicas. Se refiere particularmente al control de turbinas eólicas en respuesta a la cizalladura de viento.

Antecedentes de la invención

10 Generalmente, es deseable optimizar la salida de potencia por una turbina eólica. Durante periodos de alta cizalladura de viento, puede optimizarse la salida de potencia cambiando el ángulo de paso de las palas. Se conoce bien el control de paso de pala en el campo de turbinas eólicas. La mayoría de las turbinas eólicas comerciales usan control de paso colectivo en el que el paso de todas las palas se controla cambiando una referencia de paso común. Sin embargo, también se conoce usar un control de paso individual cíclico según el cual el paso de cada pala se controla cíclicamente a medida que rota. Las tres palas de turbina pueden tener un control común que aplica un control cíclico a cada desplazamiento de pala de 120°.

15 Actualmente se conoce optimizar la salida de potencia basándose en un ángulo de paso colectivo óptimo que se determina a partir de la velocidad de viento de góndola y la velocidad de rotor. Por tanto, la velocidad de viento en la que se basa la corrección es la velocidad de viento medida en la góndola. Sin embargo, la velocidad de viento a lo largo de la longitud de la pala y alrededor del plano de rotación puede variar enormemente. Con un perfil de cizalladura de viento inducida de rugosidad habitual, la velocidad de viento en la parte superior y la parte inferior del plano de rotor, es decir, lo más alejado y más cercano del suelo, puede variar de +10% a -15% respectivamente en comparación con la velocidad de viento medida en la góndola. En casos de cizalladuras más altas, estas desviaciones pueden ser de +30% en la parte superior y -40% en la parte inferior. En consecuencia, ya que los puntos establecidos de paso de funcionamiento se determinan por la velocidad de viento de góndola, la turbina no se hace funcionar en puntos establecidos óptimos sobre el barrido completo del plano de rotor. El documento WO 2011/150931 A2 da a conocer un método para hacer funcionar una turbina eólica que comprende las etapas de proporcionar una curva que define el ángulo de paso óptimo en función de la relación de velocidad de punta para las palas de turbina eólica o en función de la velocidad de viento y modificar al menos una parte de la curva de ángulo de paso óptimo aplicando un amortiguador de seguridad.

25 El documento EP 2 175 131 A2 da a conocer una turbina eólica que puede ajustar un primer ángulo de paso y al menos un segundo ángulo de paso de al menos una pala de rotor en función de la posición de rotación del rotor mientras está rotando el rotor de la turbina eólica.

Sumario de la invención

35 Según la invención, se proporciona un método de control de una turbina eólica que tiene un rotor y una pluralidad de palas de rotor, que comprende obtener un valor de velocidad de viento, determinar la carga de pala que comprende determinar momentos de flexión de pala, estimar una componente de cizalladura de viento vertical a través del plano de rotor a partir del valor de velocidad de viento y una estimación de momento de inclinación de cojinete principal derivada de los momentos de flexión de pala, una medida de paso de pala y ángulo acimutal, determinar la relación de velocidad de punta a partir del valor de velocidad de viento y la velocidad de viento sobre el plano de rotor, seleccionar una curva de relación de velocidad de punta frente al ángulo de paso de pala basándose en la componente de cizalladura de viento vertical estimada, seleccionar un ángulo de paso de pala basándose en la curva seleccionada y la relación de velocidad de punta, y ajustar el paso de pala según el ángulo de paso de pala seleccionado.

45 La invención también proporciona un sistema de control para una turbina eólica que tiene un rotor y una pluralidad de palas de rotor, comprendiendo el sistema de control un sensor de carga de pala, un sensor de posición acimutal, un sensor de posición de paso de pala y un procesador para estimar una componente de cizalladura de viento vertical a través del plano de rotor, determinando el procesador momentos de flexión de pala en la dirección de batimiento a partir de señales de los sensores de carga de pala, determinar una estimación de momento de inclinación de cojinete principal a partir de los momentos de flexión de pala en la dirección de batimiento y la posición de paso de pala y la posición acimutal, y estimar la cizalladura de viento vertical a partir del momento de inclinación de cojinete principal y la velocidad de viento, determinando el procesador una relación de velocidad de punta a partir de una medida de velocidad de viento sobre el plano de rotor, y un almacenamiento de curvas de relación de velocidad de punta y referencia de paso de pala para una cizalladura de viento vertical dada, determinando el procesador un ángulo de paso de pala a partir de una del conjunto de curvas basándose en la cizalladura de viento vertical estimada y la relación de velocidad de punta, y un controlador para ajustar el ángulo de paso de al menos una de las palas de rotor según el ángulo de paso de pala determinado.

55 Las mediciones de la carga de pala pueden estar fácilmente disponibles para un controlador de turbina eólica. La carga de pala se mide para muchos otros fines de control. Por ejemplo, usando galgas extensiométricas o sensores de fibra óptica ubicados en las palas de rotor.

La medida de cizalladura de viento puede usarse para estimar la velocidad de viento sobre el plano de rotor que se usa en el cálculo de la relación de velocidad de punta. La relación de velocidad de punta (λ) es una relación bien conocida de la velocidad de rotación de la punta de las palas de rotor con respecto a la velocidad de viento.

5 Ventajosamente, la cizalladura de viento vertical estimada puede tener en cuenta el error de guiñada para mejorar adicionalmente la estimación.

Ventajosamente, la velocidad de viento se determina en la góndola de turbina eólica aunque se puede usar una medición de velocidad de viento derivada o detectada en otro lugar.

10 El ángulo de paso de pala puede ser un ángulo de paso de pala colectivo aplicado para ajustar todas de la pluralidad de palas de rotor. Alternativamente, el ángulo de paso de pala puede ser un ángulo de paso de pala individual y la selección del ángulo de paso de pala se realiza para cada una de la pluralidad de palas de rotor.

En la realización de ángulo de paso de pala individual, la relación de velocidad de punta puede determinarse en una pluralidad de posiciones en el plano de rotor y el ángulo de paso de pala puede seleccionarse para cada una de la pluralidad de posiciones. Esto hace posible que el ángulo de paso siga una curva de factor de coeficiente de potencia óptima de C_p en una relación de velocidad de punta dada.

15 La invención también proporciona un método de control de una turbina eólica que tiene un rotor y una pluralidad de palas de rotor, que comprende obtener un valor de velocidad de viento, determinar la carga de pala que comprende determinar momentos de flexión de pala, estimar una componente de cizalladura de viento horizontal a través del plano de rotor a partir de una estimación de momento de guiñada de cojinete principal derivada de la posición de paso de pala, ángulo acimutal y los momentos de flexión de pala, determinar la relación de velocidad de punta a partir de la velocidad de viento y la velocidad de viento sobre el plano de rotor, seleccionar una curva de relación de velocidad de punta frente al ángulo de paso de pala basándose en la componente de cizalladura de viento horizontal estimada, seleccionar un ángulo de paso de pala basándose en la curva seleccionada y la relación de velocidad de punta, y ajustar el paso de pala según el ángulo de paso de pala seleccionado.

25 La invención proporciona además un sistema de control, en el que el procesador determina la relación de velocidad de punta de una pluralidad de posiciones en el plano de rotor y determina un ángulo de paso para cada una de la pluralidad de posiciones.

30 Realizaciones de la invención tienen la ventaja de que una medida de cizalladura de viento puede estimarse fácilmente usando sensores y parámetros que están fácilmente disponibles en una turbina eólica. La cizalladura de viento estimada puede usarse entonces de manera conjunta con una estrategia de paso de pala individual o colectivo para controlar las palas de turbina de modo que la salida de potencia pueda aumentarse cuando las condiciones de cizalladura estén presentes a través del pala de rotor o bien en dirección horizontal o bien en vertical o bien en ambas

Breve descripción de los dibujos

35 Ahora se describirán realizaciones de la invención únicamente a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una vista esquemática de un estimador de cizalladura de viento vertical que representa la invención;

la figura 2 es un dibujo a modo de ejemplo que ilustra los ejes x y z de un rotor de turbina eólica;

la figura 3 es una vista esquemática de un caso generalizado del estimador de la figura 1 que puede estimar cizalladura horizontal y vertical;

40 la figura 4 es una vista esquemática de un controlador de paso colectivo dependiente de la cizalladura que representa la invención;

la figura 5 es una vista esquemática de un controlador de paso individual dependiente de la cizalladura que representa la invención;

la figura 6 es un gráfico que muestra la correlación entre el momento de inclinación y la cizalladura de viento;

45 la figura 7 es una vista esquemática que ilustra cómo la cizalladura de viento vertical afecta a la relación de velocidad de punta;

la figura 8 muestra una superficie de coeficiente de potencia para controladores de paso individual y colectivo;

la figura 9 es un gráfico de revolución de rotor y posición de paso que ilustra un control de paso cíclico; y

la figura 10 muestra una curva θ - λ óptima dependiente de la cizalladura;

La siguiente descripción aborda la optimización de salida de potencia en condiciones de cizalladura de viento a partir de tres aspectos: la estimación de cizalladura; un funcionamiento de controlador de paso colectivo en cizalladura estimada; y, alternativamente, un controlador de paso individual basado en la cizalladura. Aunque las realizaciones descritas son adecuadas para su uso en condiciones de alta cizalladura de viento, la invención no está limitada a condiciones de alta cizalladura de viento. Sin embargo, se apreciará que la contribución a la optimización de potencia hecha por las realizaciones de la invención disminuirá a medida que disminuya la cizalladura. Para evitar toda duda, la invención no está limitada a ningún tipo particular de cizalladura e incluye, pero no está limitada a cizalladura de viento horizontal y vertical.

La figura 1 muestra un esquema de un estimador de cizalladura de viento vertical. Como con todas las realizaciones de la invención descritas en el presente documento, este puede realizarse en un controlador de turbina eólica a bordo o bien de manera independiente o bien de manera adicional a funciones de control existentes. Alternativamente, puede formar parte de un controlador de planta de energía y estar ubicado alejado de la turbina. El controlador comprende un procesador y componentes de hardware relacionados que incluyen memoria y recibe entradas de una pluralidad de sensores que detectan parámetros que afectan al funcionamiento de la turbina eólica.

La figura 1 muestra un estimador de momento de inclinación de cojinete principal 10 que recibe como su entrada la posición acimutal, la posición de paso y un momento de flexión en la dirección de batimiento y en la dirección de arrastre de pala de cada pala. En este ejemplo, hay tres palas que proporcionan tres momentos de flexión en la dirección de batimiento, $M_{\text{batimiento}1}$, $M_{\text{batimiento}2}$ y $M_{\text{batimiento}3}$, y tres momentos de flexión en la dirección de arrastre, $M_{\text{arrastre}1}$, $M_{\text{arrastre}2}$ y $M_{\text{arrastre}3}$. El momento de flexión en la dirección de batimiento es el momento de flexión fuera del plano de rotación y, por tanto, muy susceptible a la regulación de paso de pala. El cálculo de momentos de flexión de pala en la dirección de batimiento se conoce bien en la técnica y puede calcularse usando sensores extensiométricos, por ejemplo. Los momentos de flexión en la dirección de arrastre de pala pueden calcularse, o estimarse, usando también sensores extensiométricos, por ejemplo. El momento de inclinación se define como el momento de inclinación del cojinete principal alrededor del eje x. Para facilitar la comprensión, la figura 2 ilustra un rotor de turbina eólica que muestra las tres palas como pala 1, pala 2 y pala 3 junto con los ejes x y z.

La posición acimutal es una medida de la posición de las palas en cualquier momento dado mientras rotan. La posición acimutal en el plano de rotor se define como el ángulo entre una primera pala y el eje z. Pueden calcularse posiciones acimutales independientes para cada pala aunque todas las posiciones pueden calcularse a partir de una medición única.

El estimador de momento de inclinación estima momentos de inclinación a partir de los momentos de flexión en la dirección de batimiento, una estimación o medida de momentos de flexión en la dirección de arrastre, la posición de paso y posiciones acimutales y emite una señal de momento de inclinación $M_{\text{inclinación}}$. Los momentos de inclinación pueden estimarse usando la conocida transformación de coordenadas de Coleman.

Los momentos de inclinación estimados forman una entrada a una función de transferencia de cizalladura de viento 12 que también recibe una medida de la velocidad de viento de góndola. La posición de paso puede ser individual o colectiva. La velocidad de viento de góndola puede medirse por una variedad de medios tales como un anemómetro montado en una góndola. La velocidad de viento necesita medirse en la góndola, pero puede medirse, por ejemplo, en otro punto en la turbina eólica, o incluso por adelantado usando un Lidar u otro dispositivo de detección remota. Alternativamente, puede estimarse la velocidad de viento.

La función de transferencia de cizalladura de viento estima la cizalladura de viento vertical α para una velocidad de viento de entrada dada. Esto puede comprender un almacenamiento o una memoria que almacena curvas de cizalladura de viento frente a momento de inclinación para una pluralidad de velocidades de viento.

Con referencia a la figura 3, se muestra una realización genérica que puede usarse para estimar o bien la cizalladura horizontal o bien la vertical. Como antes, la cizalladura vertical se estima a partir de una estimación de momentos de inclinación basándose en los momentos de flexión de pala en la dirección de batimiento y la dirección de arrastre, posición de paso y posición acimutal. Sin embargo, también puede estimarse la cizalladura horizontal usando los momentos de flexión de pala en la dirección de batimiento y en la dirección de arrastre, las posiciones de paso de pala y las posiciones acimutales para estimar momentos de guiñada. El momento de guiñada se define como el momento de cojinete principal alrededor del eje z. En la figura 3, esto se representa mediante el estimador de momento de guiñada e inclinación 11 que tiene como entradas los momentos de batimiento y arrastre de pala $M_{\text{batimiento}1}$, 2 y 3, y $M_{\text{arrastre}1}$, 2 y 3 junto con la posición acimutal y de paso tal como en la figura 1.

La estimación de cizalladura de viento vertical se hace tal como en la figura 1, excepto porque la estimación puede mejorarse teniendo en cuenta un error de guiñada, siendo una medida del desalineamiento del rotor con la dirección del viento. Por tanto, en la figura 2, la estimación de cizalladura de viento vertical 12 se muestra como que tiene entradas de velocidad de viento de góndola, error de guiñada y momento de inclinación, y una salida de cizalladura de viento vertical α_v .

La velocidad de viento puede calcularse mediante una variedad de técnicas mencionadas anteriormente y puede medirse en otra ubicación distinta a la góndola.

El estimador de cizalladura de viento horizontal 14 toma como entrada el momento de guiñada $M_{\text{guiñada}}$ proporcionado por el estimador de momento de guiñada. Este momento se usa, con la medición de velocidad de viento de góndola, u otra medición velocidad de viento descrita, para estimar la cizalladura de viento horizontal. Aunque no es esencial, la estimación puede mejorarse teniendo en cuenta el ángulo de flujo de entrada que se muestra como tercera entrada al estimador. El ángulo de flujo de entrada es el ángulo en el que el flujo de aire medio entra en el rotor. Tal como el estimador de cizalladura vertical, el estimador de cizalladura de viento horizontal puede comprender un almacenamiento de curvas del momento de guiñada frente a la cizalladura de viento horizontal a diversas velocidades de viento.

En una realización alternativa, los momentos de inclinación y/o guiñada pueden medirse directamente, por ejemplo, usando galgas extensiométricas.

En la generalización de la figura 3, el error de guiñada y el ángulo de flujo de entrada inducen un momento de inclinación y guiñada adicional que se tiene en cuenta en la función de transferencia respectiva, pero puede omitirse.

Por tanto, la cizalladura de viento se estima basándose en una determinación de carga de pala. Esta carga puede ser la carga de batimiento de pala y la carga de arrastre de pala. La carga de arrastre puede estimarse en lugar de medirse. La carga de batimiento puede estimarse también, pero las turbinas eólicas actuales generalmente tienen sensores disponibles para medir la carga.

Tal como se muestra en la figura 3, la señal de cizalladura de viento horizontal α_h y la señal de cizalladura de viento vertical α_v pueden usarse para estimar el vector de velocidad de viento en cualquier posición en el plano de rotor. Esto se representa en la figura 3 mediante un estimador de velocidad de viento 16 que determina la velocidad de viento sobre el plano de rotor y que tiene entradas de posición acimutal, velocidad de viento, error de guiñada y ángulo de flujo de entrada y salida de una velocidad de viento.

El ángulo de flujo de entrada puede medirse o determinarse a partir del terreno en el que se monta la turbina eólica. El error de guiñada puede medirse a partir de un sensor de dirección de viento. Con el fin de calcular los vectores de velocidad de viento, el estimador de velocidad de rotor requiere un modelo de perfil de cizalladura de viento. Pueden usarse diversos modelos. Para el cálculo de cizalladura de viento horizontal puede usarse un perfil lineal; para el cálculo de cizalladura de viento vertical puede usarse un perfil de viento logarítmico o un perfil de ley potencial tal como se especifica en el documento IEC61400-1-ed3, sección 3,62. Son posibles otros perfiles. Se muestra un ejemplo en la figura 7 que se describe a continuación.

La velocidad de viento estimada se usa para calcular la relación de velocidad de punta λ y ángulo de paso θ óptimos. Este valor óptimo puede encontrarse para un ángulo de paso colectivo o ángulos de paso de pala individuales. Un ejemplo de un controlador de paso colectivo es la figura 4. La entrada para el dispositivo de cálculo de paso 18 es el valor de cizalladura de viento estimado α . Este puede ser la cizalladura de viento vertical α_v , la cizalladura de viento horizontal α_h o ambas. La estimación de velocidad de viento tal como se describe anteriormente se usa, junto con la velocidad de viento medida, para determinar la relación punta-velocidad λ en la unidad 20 y la referencia de paso colectivo se genera a partir de un conjunto de curvas optimizadas de relación de velocidad de punta con respecto al ángulo de paso ($\lambda:\theta$) para un valor dado de cizalladura de viento. Estas curvas optimizadas son curvas predeterminadas que están prealmacenadas en una memoria del sistema de control.

La figura 5 muestra un ejemplo de un controlador de paso de pala individual basado en una entrada de cizalladura de viento. En este ejemplo, el ángulo de paso individual óptimo se determina para una posición de pala específica en el plano de rotor. Por tanto, mientras una pala, el ángulo de paso óptimo, rota basándose en cambios de cizalladura de viento estimada. Por tanto, en la figura 5, el dispositivo de cálculo de relación de velocidad de punta 22 tiene entradas de cizalladura de viento estimada (o bien vertical y/o bien horizontal), velocidad de viento estimada tal como se describe anteriormente, y velocidad de viento medida. Entonces calcula las relaciones de velocidad de punta en las partes superior e inferior del plano de rotor ($\lambda_{\text{superior}}$ y $\lambda_{\text{inferior}}$) y en el buje ($\lambda_{\text{buj e}}$). Estos tres valores forman las entradas a un dispositivo de cálculo de ángulo de paso 24 que calcula los ángulos de paso óptimos en las posiciones superior, inferior y de buje basándose en las entradas de relación de velocidad de punta y una curva óptima predeterminada de relación de velocidad de punta con respecto al ángulo de paso ($\lambda:\theta$). Esta curva óptima también está prealmacenada en una memoria del controlador. El dispositivo de cálculo de ángulo de paso 24 emite ángulos de paso para las tres posiciones, θ_{superior} , $\theta_{\text{buj e}}$, θ_{inferior} que se proporcionan a una unidad de interpolación que calcula ángulos de paso reales θ_1 , θ_2 , θ_3 basándose en los valores calculados y una entrada de posición acimutal.

Con referencia de nuevo a las figuras 1 y 3, la estimación de cizalladura de viento vertical se basa en una estimación de momentos de inclinación. El momento de inclinación se calcula a partir de los momentos de pala en la dirección de batimiento y en la dirección de arrastre, por ejemplo, los momentos de raíz de pala en la dirección de batimiento/en la dirección de arrastre. Estos momentos pueden medirse usando sensores de carga de pala, que se conocen bien en la técnica. Una galga extensométrica es un ejemplo de muchos sensores adecuados y están ubicados normalmente en la raíz de pala, aunque son posibles otras ubicaciones.

La figura 6 muestra una correlación entre el momento de inclinación de cojinete principal y el exponente de cizalladura de viento para un perfil de ley potencial. Las correlaciones se muestran en un intervalo de velocidades de

viento con la curva 30 que se refiere a una velocidad de viento $V_{buje} = 4$ m/s; la curva 32 que se refiere a una velocidad de viento $V_{buje} = 6$ m/s; la curva 34 que se refiere a una velocidad de viento $V_{buje} = 8$ m/s; la curva 36 que se refiere a una velocidad de viento $V_{buje} = 10$ m/s y la curva 38 que se refiere a una velocidad de viento $V_{buje} = 12$ m/s. El cojinete principal es el cojinete que conecta el rotor al árbol principal.

- 5 Aunque no se muestra, el momento de guiñada se usa de manera similar para calcular la cizalladura de viento horizontal y hay una correlación similar entre el exponente de cizalladura de viento horizontal y el momento de guiñada.

10 El controlador de paso individual de la figura 5 se comentará ahora con más detalle. Los comentarios siguientes se refieren a una estimación de cizalladura vertical, pero es igualmente aplicable a la estimación de cizalladura horizontal o vertical y horizontal.

15 La figura 7 muestra una curva de velocidad de viento y la relación de velocidad de punta a diferentes alturas a lo largo del plano de rotor de turbina eólica en condiciones de alta cizalladura de viento positiva. La velocidad de viento en la parte inferior del plano de rotor es la más baja debido a efectos de suelo y aumenta hacia la parte superior. La relación de velocidad de punta es proporcional a la inversa de la velocidad de viento. Por tanto, tal como se muestra en la figura 7, $V_{inferior} \sim 1/\lambda_{inferior}$; $V_H \sim 1/\lambda_H$; y $V_{superior} \sim 1/\lambda_{superior}$. Por tanto, la relación de velocidad de punta λ varía a través del plano del rotor. Esto se cumple porque la velocidad de punta es la misma para todas las posiciones en el plano de rotor y así la relación de velocidad de punta disminuye en la parte superior del plano de rotor en comparación con el buje y aumenta en la parte inferior del plano de rotor.

20 La figura 8 ilustra las ventajas de la regulación de paso de pala individual dependiente de la cizalladura de viento. La figura 8 muestra la superficie de coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \theta)$. En la figura 8, se muestran valores para una velocidad de viento de buje medida de 10 m/s, y una cizalladura vertical estimada $\alpha = 0,6$. Las referencias 40, 42, 44 indican puntos establecidos en las posiciones de plano de rotor inferior, de buje y superior respectivamente usando un control de ángulo de paso colectivo. El punto establecido 42 es el punto establecido de buje que se usa en sistemas conocidos para determinar un ángulo de paso colectivo basándose en la velocidad de viento de buje para optimizar el coeficiente de potencia.

25 Los puntos establecidos 46, 42, 48 son los puntos de funcionamiento para control de paso individual. El punto establecido 42 es el punto establecido de buje y es el mismo valor que el ejemplo colectivo y el ejemplo de la técnica anterior que sólo usa velocidad de buje. Sin embargo, los puntos de funcionamiento superior e inferior 46, 48 están marcadamente en diferentes ángulos de paso. Se observará que los tres puntos de funcionamiento 46, 42, 48 se encuentran sobre una curva 50 de ángulo de paso óptimo en relación a la relación de velocidad de punta. Se observará que en el ejemplo de control colectivo en la parte superior del plano de rotor la turbina está funcionando en una entrada en pérdida (punto establecido 44) y que en la parte inferior el viento se está bloqueando debido a la alta inducción (punto establecido b 40). Usando control de ángulo de paso individual, la turbina puede funcionar a lo largo de la curva óptima de ángulo de paso : relación de velocidad de punta ($\theta : \lambda$) y por tanto aumentar el valor de C_p total.

30 La figura 9 muestra cómo la referencia de paso individual es cíclica. Como ejemplo, para un coeficiente de cizalladura de 0,6, una referencia de paso 2P actualmente se considera óptima, tal como se ilustra en la figura 9, donde P es la frecuencia de rotor fundamental. Esta figura muestra una curva de paso que está optimizada para C_p máximo. En la práctica, puede ser necesario suavizar las transiciones entre las partes superior e inferior del plano de rotor.

35 La regulación de paso cíclico provoca actividad de paso aumentada que puede tener consecuencias adversas en áreas tales como la vida útil de cojinete de paso. Una curva de ángulo de paso : relación de velocidad de punta optimizada dependiente de la cizalladura de viento puede proporcionar un coste de energía (CoE) más bajo durante la vida útil de una turbina. Esta curva se deriva calculando un ángulo de paso colectivo óptimo de C_p para diversos valores de relación de velocidad de punta a altura de buje y se ilustra en la figura 10. Esta figura es un mapa de la superficie de C_p similar a la figura 8 con curvas dependientes de la cizalladura óptimas mostradas para cizalladuras verticales de $\alpha = 0, 0,3, \text{ y } 0,6$ en curvas 80, 83, y 86 respectivamente.

40 Tal como en el ejemplo anterior, los resultados se refieren a cizalladura de viento vertical, pero también se aplican a control de paso dependiente de la cizalladura de viento horizontal o control de paso dependiente de la cizalladura vertical y horizontal.

REIVINDICACIONES

1. Método de control de una turbina eólica que tiene un rotor y una pluralidad de palas de rotor, que comprende
 - obtener un valor de velocidad de viento,
- 5
 - obtener una velocidad de rotación de una punta de las palas de rotor,
 - determinar la carga de pala que comprende determinar momentos de flexión de pala,
 - estimar una componente de cizalladura de viento vertical a través del plano de rotor a partir del valor de velocidad de viento y una estimación de momento de inclinación de cojinete principal derivada de los momentos de flexión de pala, una medida de paso de pala y ángulo acimutal,
- 10
 - estimar una velocidad de viento sobre el plano de rotor a partir de la componente de cizalladura de viento vertical,
 - determinar una relación de velocidad de punta a partir del valor de velocidad de viento y la velocidad de viento estimada sobre el plano de rotor,
- 15
 - seleccionar una curva de relación de velocidad de punta frente al ángulo de paso de pala basándose en la componente de cizalladura de viento vertical estimada,
 - seleccionar un ángulo de paso de pala basándose en la curva seleccionada y la relación de velocidad de punta, y ajustar el paso de pala según el ángulo de paso de pala seleccionado.
2. Método según la reivindicación 1, en el que la cizalladura de viento vertical se estima adicionalmente a partir de una medida de error de guiñada.
- 20 3. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que el valor de velocidad de viento es la velocidad de viento determinada en la góndola de turbina eólica.
4. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que el ángulo de paso de pala es un ángulo de paso de pala colectivo aplicado para ajustar todas de la pluralidad de palas de rotor.
- 25 5. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el ángulo de paso de pala es un ángulo de paso de pala individual y la selección del ángulo de paso de pala se realiza para cada una de la pluralidad de palas de rotor.
6. Método según la reivindicación 5, en el que la relación de velocidad de punta se determina en una pluralidad de posiciones en el plano de rotor y el ángulo de paso de pala se selecciona para cada una de la pluralidad de posiciones.
- 30 7. Método de control de una turbina eólica que tiene un rotor y una pluralidad de palas de rotor, que comprende
 - obtener un valor de velocidad de viento,
 - obtener una velocidad de rotación de una punta de las palas de rotor,
 - determinar la carga de pala que comprende determinar momentos de flexión de pala,
- 35
 - estimar una componente de cizalladura de viento horizontal a través del plano de rotor a partir de una estimación de momento de guiñada de cojinete principal derivada de los momentos de flexión de pala, el ángulo acimutal y la posición de paso de pala,
 - estimar una velocidad de viento sobre el plano de rotor a partir de la componente de cizalladura de viento horizontal,
- 40
 - determinar una relación de velocidad de punta a partir de la velocidad de viento y la velocidad de viento estimada sobre el plano de rotor,
 - seleccionar una curva de relación de velocidad de punta frente al ángulo de paso de pala basándose en la componente de cizalladura de viento horizontal estimada,
- 45
 - seleccionar un ángulo de paso de pala basándose en la curva seleccionada y la relación de velocidad de punta, y ajustar el paso de pala según el ángulo de paso de pala seleccionado.
8. Método según la reivindicación 7, en el que la cizalladura de viento horizontal se estima a partir del

momento de guiñada, la velocidad de viento y una medida de ángulo de flujo de entrada.

- 5 9. Sistema de control para una turbina eólica que tiene un rotor y una pluralidad de palas de rotor, comprendiendo el sistema de control un sensor de carga de pala, un sensor de posición acimutal, un sensor de posición de paso de pala, y un procesador para estimar una componente de cizalladura de viento vertical a través del plano de rotor,
- en el que el procesador está dispuesto para:
- determinar momentos de flexión de pala en la dirección de batimiento a partir de señales de los sensores de carga de pala,
- 10 determinar una estimación de momento de inclinación de cojinete principal a partir de los momentos de flexión de pala en la dirección de batimiento y la posición de paso de pala y la posición acimutal,
- estimar una componente de la cizalladura de viento vertical a partir del momento de inclinación de cojinete principal y la velocidad de viento,
- estimar una velocidad de viento sobre el plano de rotor a partir de la componente de cizalladura de viento vertical,
- 15 determinar una relación de velocidad de punta a partir de la velocidad de viento estimada sobre el plano de rotor, y un almacenamiento de curvas de relación de velocidad de punta y referencia de paso de pala para una cizalladura de viento vertical dada,
- determinar un ángulo de paso de pala a partir de una del conjunto de curvas basándose en la componente de cizalladura de viento vertical estimada y la relación de velocidad de punta,
- 20 el sistema de control comprende además un controlador para ajustar el ángulo de paso de al menos una de las palas de rotor según el ángulo de paso de pala determinado.
10. Sistema de control según la reivindicación 9, que comprende un sensor de error de guiñada, en el que el procesador estima además la cizalladura de viento vertical basándose en el error de guiñada detectado.
- 25 11. Sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 10, en el que la velocidad de viento se mide por un sensor ubicado en la góndola de turbina eólica.
12. Sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en el que el controlador genera una referencia de ángulo de paso colectivo para ajustar el ángulo de paso de todas de la pluralidad de palas de rotor.
- 30 13. Sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en el que el controlador genera una referencia de ángulo de paso individual para ajustar individualmente el ángulo de paso de cada una de las palas de rotor.
14. Sistema de control según la reivindicación 13, en el que el procesador determina la relación de velocidad de punta de una pluralidad de posiciones en el plano de rotor y determina un ángulo de paso para cada una de la pluralidad de posiciones.
- 35 15. Sistema de control según la reivindicación 14, en el que el procesador determina la relación de velocidad de punta en las posiciones de buje, inferior y superior del plano de rotor.
- 40 16. Sistema de control para una turbina eólica que tiene un rotor y una pluralidad de palas de rotor, comprendiendo el sistema de control un sensor de carga de pala, un sensor de posición acimutal, un sensor de posición de paso de pala, y un procesador para estimar una componente de cizalladura de viento horizontal a través del plano de rotor,
- en el que el procesador está dispuesto para:
- determinar momentos de flexión a partir de señales de los sensores de carga de pala,
- determinar una estimación de momento de guiñada de cojinete principal a partir de los momentos de flexión de pala, la posición acimutal y la posición de paso de pala,
- 45 estimar una componente de la cizalladura de viento horizontal a partir del momento de guiñada, la velocidad de viento detectada y una medida de ángulo de flujo de entrada,
- estimar una velocidad de viento sobre el plano de rotor a partir de la componente de la cizalladura de viento horizontal,

determinar una relación de velocidad de punta a partir de una medida de velocidad de viento y la velocidad de viento estimada sobre el plano de rotor, y un almacenamiento de curvas de relación de velocidad de punta y referencia de paso de pala para una cizalladura de viento dada,

5 determinar un ángulo de paso de pala a partir de una del conjunto de curvas basándose en la componente de cizalladura de viento horizontal estimada y la relación de velocidad de punta,

el sistema de control comprende además un controlador para ajustar el ángulo de paso de al menos una de las palas de rotor según el ángulo de paso de pala determinado.

17. Turbina eólica que comprende un rotor, una pluralidad de palas de rotor y un sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 16.

10

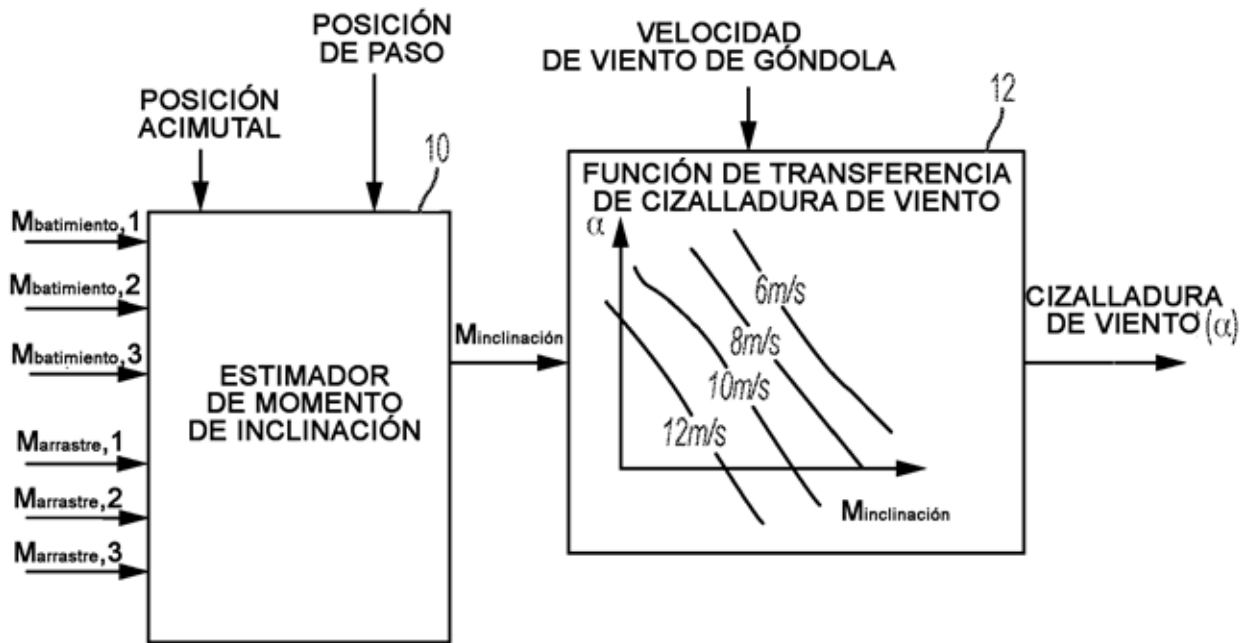


FIG. 1

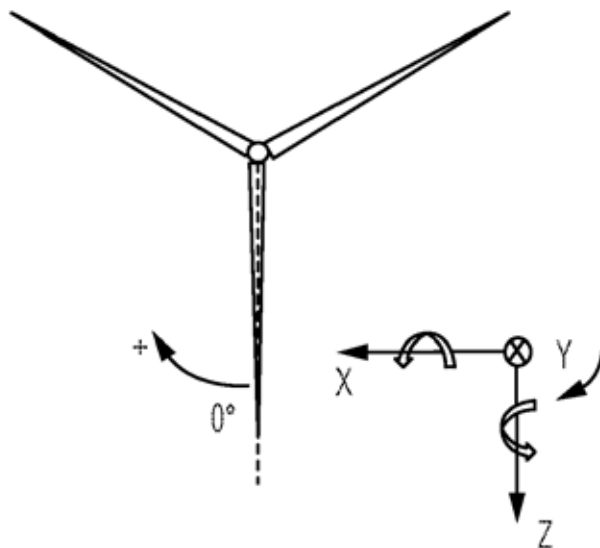


FIG. 2

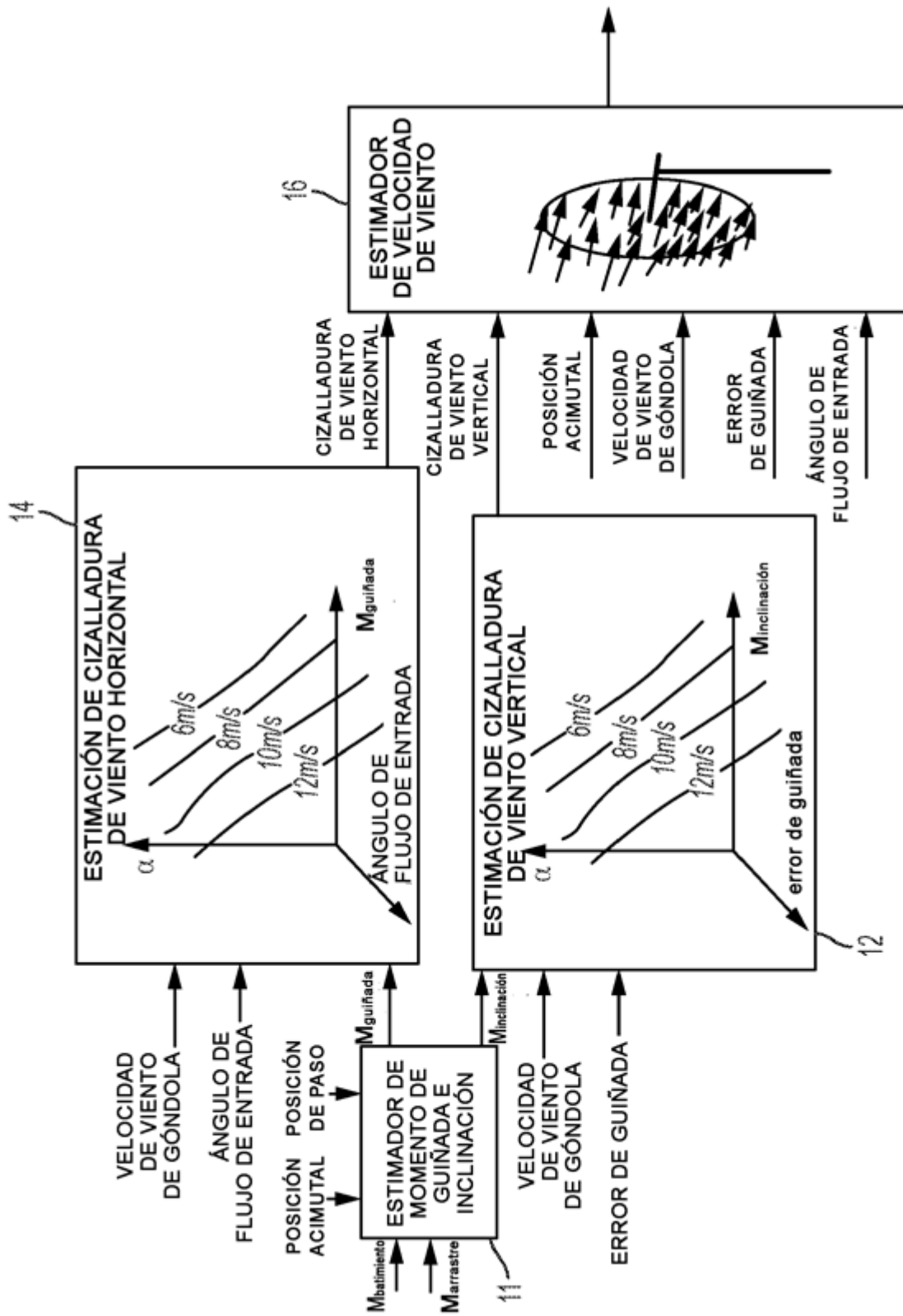


FIG. 3

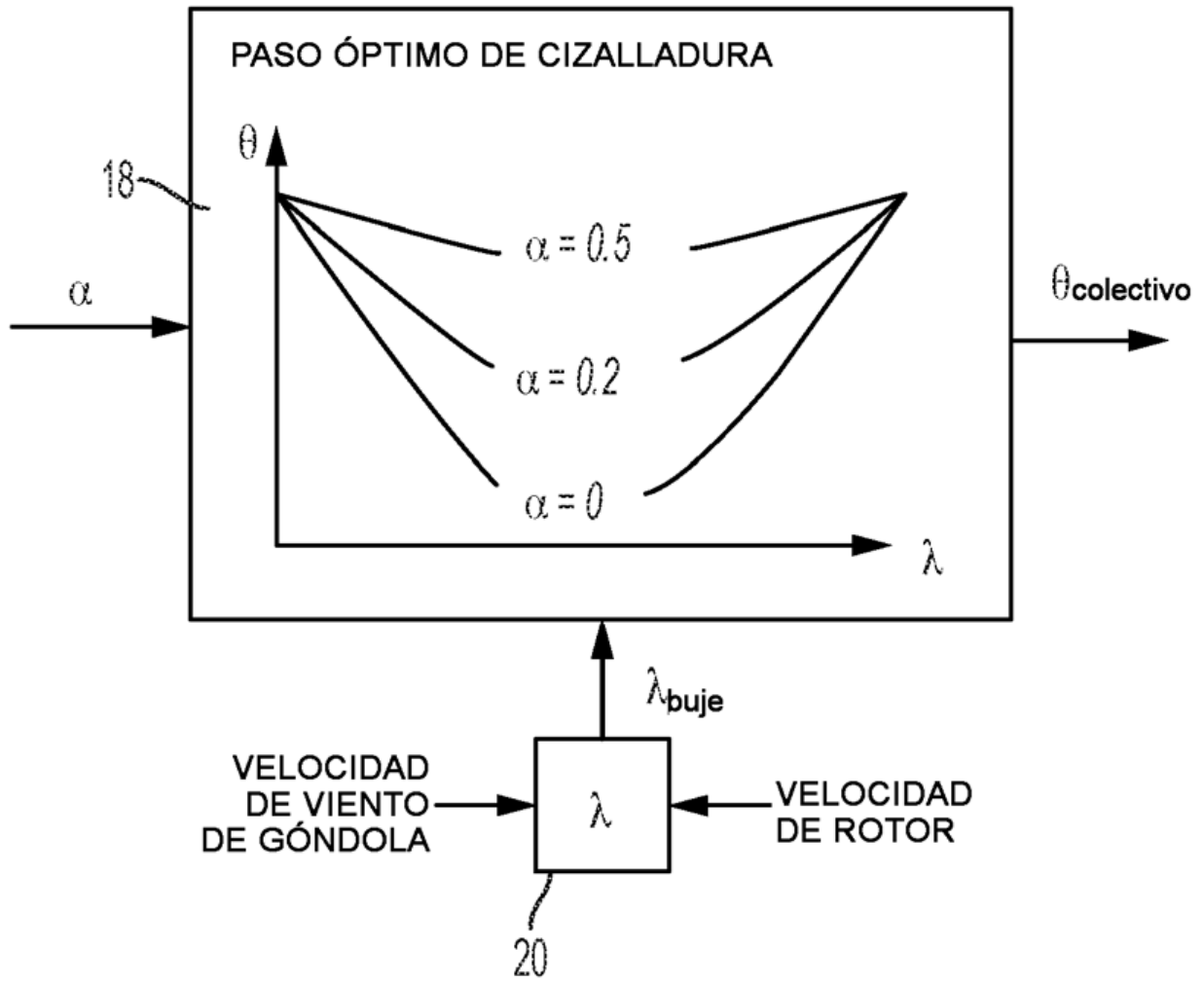


FIG. 4

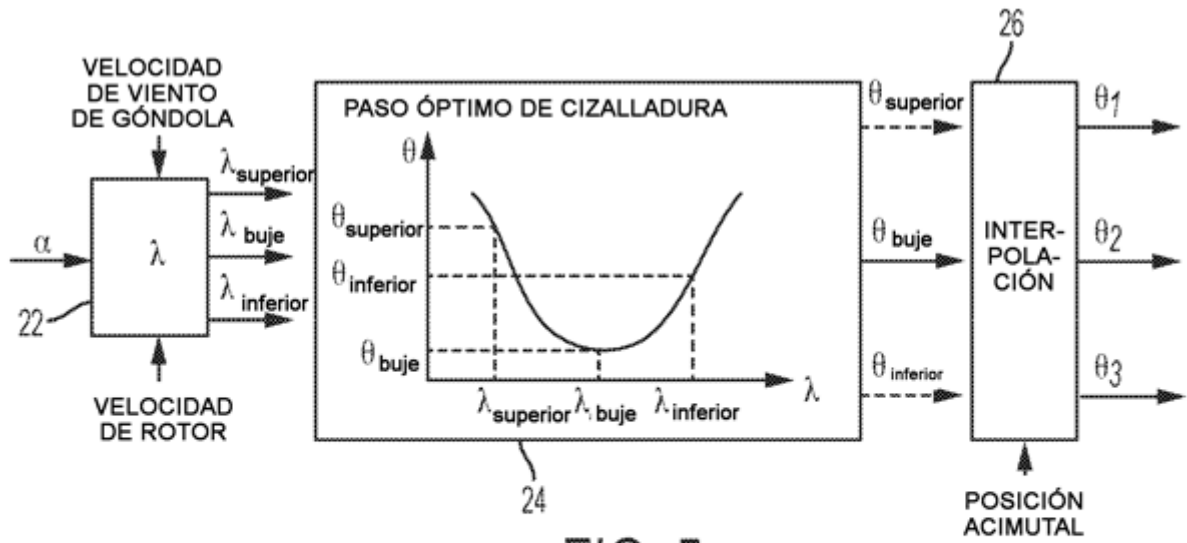


FIG. 5

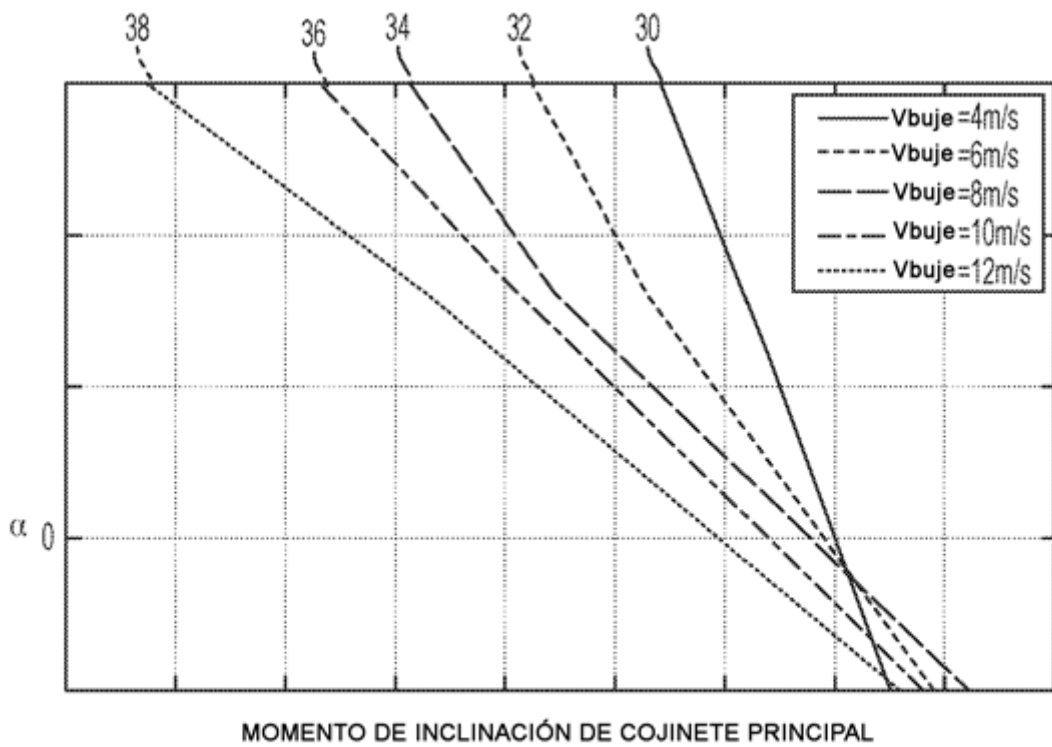


FIG. 6

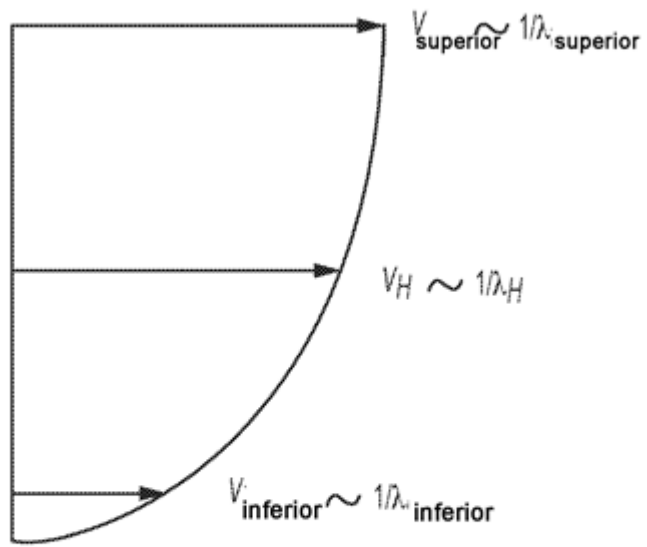


FIG. 7

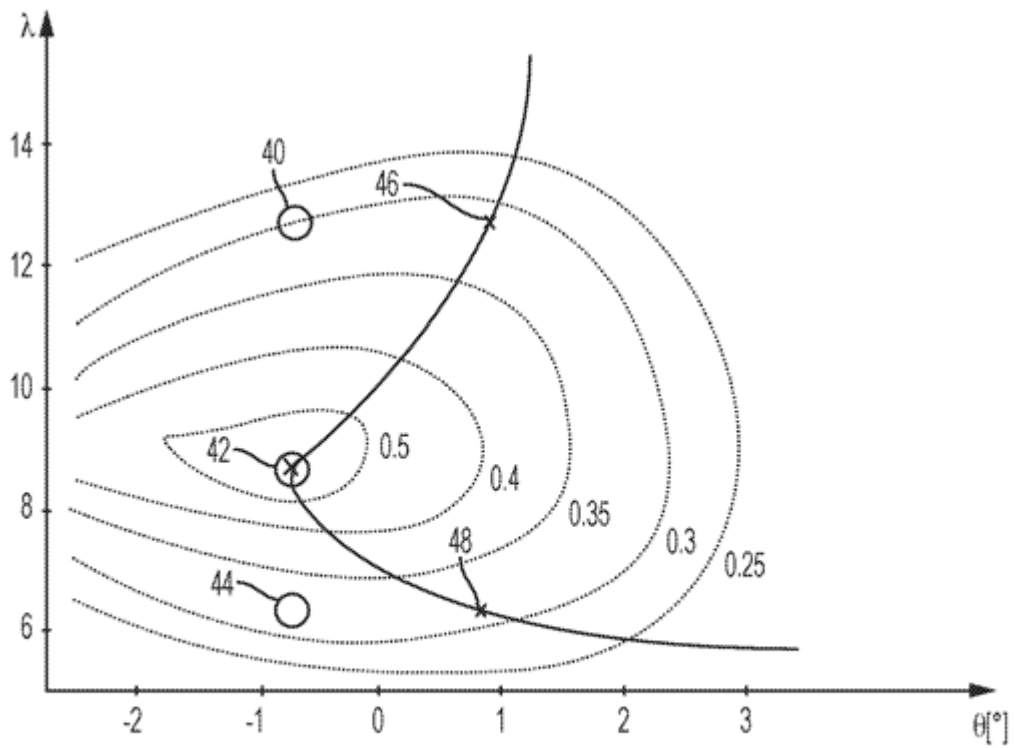


FIG. 8

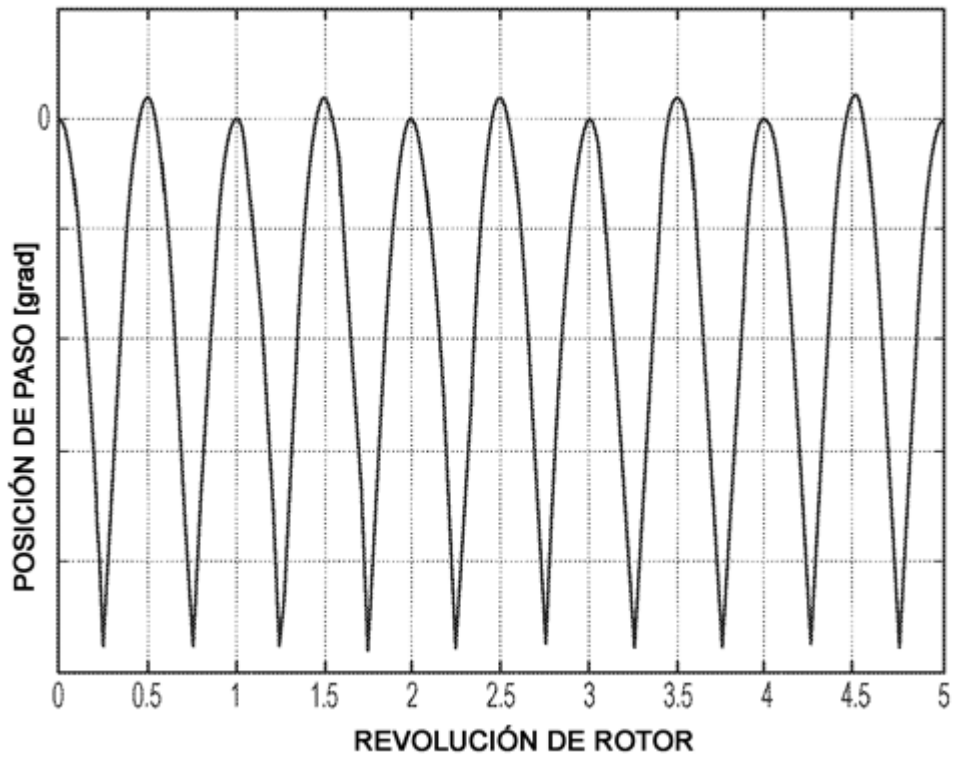


FIG. 9

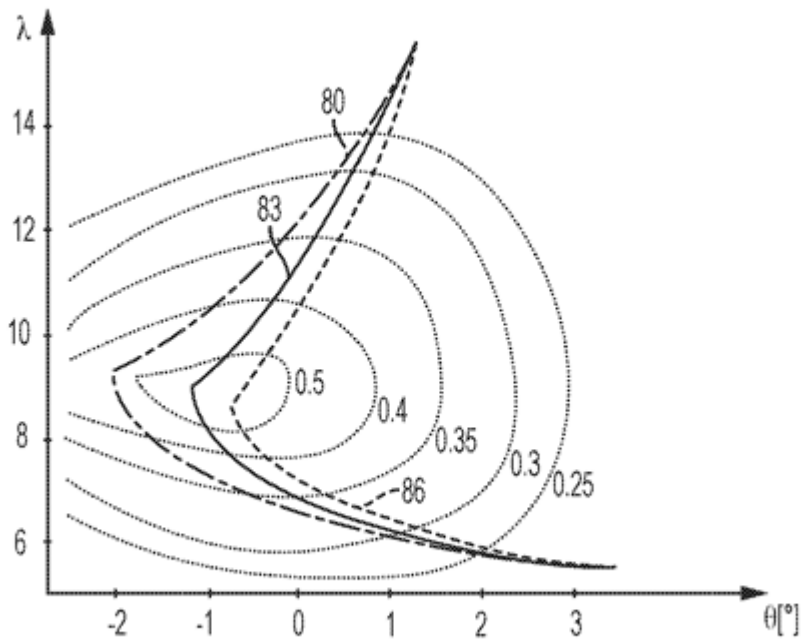


FIG. 10