

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 987 880**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.05.2020 PCT/DK2020/050147**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.12.2020 WO20239177**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.05.2020 E 20729622 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.08.2024 EP 3976959**

54 Título: **Reducción de las vibraciones en el sentido lateral utilizando señal de carga de pala**

30 Prioridad:

28.05.2019 DK PA201970335

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

18.11.2024

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**THOMSEN, JESPER SANDBERG;
BRO, MORTEN y
COUCHMAN, IAN**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 987 880 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

Reducción de las vibraciones en el sentido lateral utilizando señal de carga de pala

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere al control de una turbina eólica para reducir la carga estructural debido a vibraciones de las palas a lo largo de la dirección en el sentido lateral.

10 **Antecedentes de la invención**

Las turbinas eólicas como se conocen en la técnica comprenden una torre de turbina eólica que soporta una góndola y un rotor con un número de palas de rotor de paso ajustable.

15 Una turbina eólica es propensa a vibraciones, ya que comprende una gran masa colocada en el extremo de una torre delgada. Ejemplos de estas vibraciones incluyen el movimiento de góndola y el movimiento de pala. Se conoce en la técnica que ciertos tipos de vibraciones pueden amortiguarse regulando activamente el paso de las palas y/o ajustando el par de fuerzas de generador. Las vibraciones en el sentido lateral generalmente no son deseables ya que las palas están típicamente débilmente amortiguadas en esa dirección, y existe un mayor riesgo de dañar las palas debido a
20 vibraciones a lo largo de la dirección en el sentido lateral, que a lo largo de la dirección en el sentido de la aleta.

Para eliminar las vibraciones dañinas de las palas, se conoce apagar la turbina eólica durante un período de tiempo si se detectan vibraciones en el sentido lateral potencialmente dañinas de las palas. Pero si estas vibraciones se detectan a menudo, este método reducirá la producción global de la turbina eólica. Como alternativa, se puede aplicar
25 una regulación de paso activa para amortiguar las vibraciones en el sentido lateral.

El documento WO 2018/019345 da a conocer un ejemplo de una solución para mitigar la vibración en el sentido lateral mediante el uso de paso. En el presente documento se da a conocer que, basándose en un parámetro de movimiento de la vibración de pala de rotor en el sentido lateral, se genera una señal de control de ángulo de paso de pala de modo que una fuerza resultante sobre la pala de rotor es opuesta y proporcional a la velocidad de vibración de pala de rotor en el sentido lateral.
30

Ejemplos relevantes adicionales de la técnica anterior se encuentran en los documentos EP 2 447 527 A1, WO 2017/092773 A1, JASON LAKS *et al.*: "Multi-Blade Coordinate and direct techniques for asymptotic disturbance rejection in wind turbines" and Kausihan Selvam: "Individual Pitch Control for Large scale wind turbines Multivariable control approach".
35

No obstante, existe la necesidad en la técnica de formas adicionales de mitigar vibraciones de pala en el sentido lateral.
40

Sumario de la invención

Sería ventajoso lograr una manera mejorada de reducir vibraciones en una turbina eólica. A este respecto, sería deseable proporcionar un sistema de control que pueda dar instrucciones a un accionador de paso de manera que ayude a reducir las vibraciones en el sentido lateral de las palas de rotor de una turbina eólica.
45

Por consiguiente, en un primer aspecto, se proporciona un sistema de control de rotor para accionar el paso de las palas de rotor de paso ajustable de una turbina eólica, el sistema de control de rotor comprende una unidad de accionamiento de paso para determinar una señal de modificación de paso que va a aplicarse a un accionador de paso para accionar el paso de las palas de rotor de paso ajustable;
50

estando dispuesta la unidad de accionamiento de paso para:

recibir una señal de carga en el sentido lateral para cada una de las palas de rotor ajustables, midiéndose la señal de carga en el sentido lateral en un marco de referencia de rotación;
55

aplicar una transformación de coordenadas de m-palas a la señal de carga en el sentido lateral para transformar la señal a un marco de referencia de giro a lo largo de una primera y una segunda dirección de referencia;

60 seleccionar la componente de señal de o bien la primera o bien la segunda dirección de referencia para obtener una componente de señal seleccionada;

filtrar la componente de señal seleccionada a o bien una frecuencia de giro hacia atrás o bien una frecuencia de giro hacia delante para obtener una componente de señal filtrada;
65

aplicar una transformación de coordenadas de m-palas inversa a la componente de señal filtrada para obtener la señal

de modificación de paso;

aplicar la señal de modificación de paso al accionador de paso.

5 La presente invención proporciona un sistema de control de rotor que usa una señal de modificación de paso para accionar el paso de palas de rotor de paso ajustable para obtener una reducción en vibraciones en el sentido lateral de las palas de la turbina. La señal de modificación de paso se basa en una transformación de coordenadas de m-palas basada en una señal de entrada. Una transformación de coordenadas de m-palas transforma una señal entre marcos de referencia de coordenadas. Aunque generalmente se conoce la aplicación de transformaciones de coordenadas de m-palas en relación con el accionamiento de paso, generalmente se realiza en relación con la transformación de las mismas cantidades entre los marcos de referencia de rotación y estacionario. Los inventores de la presente invención se han dado cuenta de que mediante la aplicación adecuada de transformaciones de coordenadas de m-palas, junto con el filtrado de señal, es posible usar el sistema de paso para crear un momento (o fuerza en el plano) en respuesta a una señal de carga en el sentido lateral, posiblemente en forma de un momento de flexión de raíz de pala en el sentido lateral medido, que tienen un efecto de atenuación sobre las vibraciones en el sentido lateral en las palas. Y en el presente documento debe observarse que, dado que las señales de entrada se basan en una señal de carga, y no una señal de velocidad, el efecto de atenuación resultante no debe entenderse como un efecto de amortiguación, en su lugar el sistema crea una perturbación que reduce la vibración de la pala.

20 La transformación de coordenadas de m-palas transformará la señal en un marco de referencia. Este marco de referencia no se visualiza fácilmente ya que depende de la velocidad rotacional y el ángulo de paso. Se denomina un marco de referencia de giro (del inglés, *whirling reference frame*) a lo largo de una primera y una segunda dirección de referencia. Se ha observado que al filtrar una componente de señal de o bien la primera o bien la segunda dirección de referencia a o bien una frecuencia de giro hacia atrás o bien una frecuencia de giro hacia delante, el controlador tendrá como objetivo solo el modo de giro seleccionado de giro o bien hacia atrás o bien hacia delante.

Por lo tanto, los inventores de la presente invención se han dado cuenta de que mediante el tratamiento de señal adecuado de una señal de carga en el sentido lateral, se puede determinar una señal de paso que elimine o al menos reduzca las vibraciones en el sentido lateral de las palas. A medida que las palas de turbina eólica se hacen más grandes, y a medida que las torres de turbina eólica se hacen más altas, aumenta el problema con las vibraciones de pala en el sentido lateral. Las torres altas corren el riesgo de aumentar las vibraciones de pala en el sentido lateral a través de un acoplamiento entre el movimiento de torsión de la torre y los modos de vibración en el sentido lateral. La invención proporciona una solución que se basa en sensores de pala y un controlador puede determinar una señal de modificación de paso que va a aplicarse al accionador de paso. Esta es una solución más rentable que la rigidización de palas de turbina eólica o la torre de turbina eólica.

La transformación de m-palas también se denomina en la técnica como una transformación de múltiples palas. En una realización, la transformación de coordenadas de m-palas es una transformación de Coleman. Sin embargo, otras transformaciones también pueden caer en la categoría de transformaciones de coordenadas de m-palas, a continuación, la denominada transformación d-q y transformación Park o transformaciones similares. Esto está dentro de las capacidades del experto en la técnica determinar una transformación alternativa que puede no ser estrictamente una transformación de Coleman, pero que funciona de manera equivalente.

45 Como se usa en el presente documento, la transformación de m-palas se aplica como es (es decir, sin un prefijo) y en una forma inversa. En general, la transformación de m-palas es una transformación entre un primer marco de coordenadas y un segundo marco de coordenadas, y la transformación de m-palas toma la señal del primer marco al segundo marco, mientras que la transformación de m-palas inversa toma la señal del segundo marco al primer marco. A este respecto, pueden medirse, modificarse y accionarse señales en los mismos o diferentes marcos de coordenadas. En una realización, la transformación de coordenadas de m-palas toma una señal que comprende tres componentes medidas en un marco de coordenadas de rotación, es decir, una señal obtenida para cada pala de rotación, y transforma la señal en un marco de referencia de dos componentes. La transformación de m-palas inversa toma las dos componentes de señal y las transforma de vuelta al marco de rotación de tres componentes para proporcionar componentes de señal (las señales de modificación de paso) que pueden imponerse sobre los tres accionadores de paso. Esta realización es aplicable a una turbina eólica de tres palas. Para una turbina con un número diferente de palas, por consiguiente, es necesario que se ajusten las transformaciones de m-palas.

En una realización, la transformación de coordenadas de m-palas inversa está tomando como entrada una primera señal y una segunda señal. En una realización de este tipo, la segunda señal puede determinarse filtrando adicionalmente la señal filtrada con un filtro de señal adicional con una respuesta de fase de filtro de desplazamiento de fase en cuadratura.

Los inventores de la presente invención se han dado cuenta de que al determinar la segunda señal filtrando la primera señal con un filtro de señal con una respuesta de fase de filtro de desplazamiento de fase en cuadratura, a continuación, la señal de accionamiento de paso se altera de una manera en la que el accionamiento en una de las dos frecuencias de accionamiento se reduce o incluso se elimina mientras todavía se obtiene un efecto de reducción de vibraciones. De esta manera, se puede reducir la actividad de regulación de paso del accionador, y de ese modo

reducir la exposición a la fatiga sobre los accionadores de regulación de paso.

La segunda señal se determina filtrando la primera señal con un filtro de señal con una respuesta de fase de filtro de desplazamiento de fase en cuadratura. Un filtro de desplazamiento de fase en cuadratura también puede denominarse filtro de desplazamiento de fase de 90° , sin embargo, debe entenderse, que no siempre se obtiene un desplazamiento de fase de 90° ya que el desplazamiento de fase exacto puede depender de las condiciones en las que se aplica el filtro. Sin embargo, en situaciones ideales, un filtro de desplazamiento de fase en cuadratura desplaza 90° la señal filtrada. En general, el filtro de desplazamiento de fase en cuadratura puede entenderse como un filtro con un desplazamiento de fase ideal de 90° , pero que en condiciones de trabajo, puede obtener un desplazamiento de fase que no es exactamente de 90° , pero puede ser de aproximadamente 90° , tal como $90^\circ \pm 15^\circ$.

En una realización, el filtro de señal es un integrador con fuga. En general, también se pueden usar otros tipos de filtros con un desplazamiento de fase en cuadratura, ejemplos incluyen un filtro de paso bajo de primer orden general y un filtro diferencial.

En un aspecto adicional, la invención se refiere a una turbina eólica que comprende el sistema de control de rotor según el primer aspecto. En otros aspectos adicionales, la invención se refiere a un método de accionamiento de paso de las palas de rotor de paso ajustable de una turbina eólica y a un producto de programa informático. El producto de programa informático puede proporcionarse en un medio de almacenamiento legible por ordenador o ser descargable desde una red de comunicación. El producto de programa informático comprende instrucciones para provocar que un sistema de procesamiento de datos, por ejemplo, en forma de un controlador, lleve a cabo la instrucción cuando se carga en un sistema de procesamiento de datos.

En general, el sistema de control de rotor puede implementarse en una unidad o conjunto de unidades funcionales que comprende uno o más procesadores, la(s) interfaz/interfaces de entrada/salida y una memoria capaz de almacenar instrucciones pueden ejecutarse por un procesador.

En general, los diversos aspectos de la invención pueden combinarse y acoplarse de cualquier manera posible dentro del alcance de la invención. Estos y otros aspectos, características y/o ventajas de la invención serán evidentes y se aclararán con referencia a las realizaciones descritas a continuación en el presente documento.

Breve descripción de los dibujos

Se describirán realizaciones de la invención, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos, en los que

la figura 1 ilustra, en una vista esquemática, un ejemplo de una turbina eólica;

la figura 2 es un diagrama que ilustra esquemáticamente una realización de un controlador de velocidad de retroalimentación;

la figura 3 ilustra esquemáticamente una realización de una unidad de accionamiento de paso con un bloque de cálculo de transformación de Coleman;

la figura 4 ilustra una realización del selector S_2 ; y

la figura 5 ilustra señales simuladas aplicando la realización ilustrada en las figuras 3 y 4.

Descripción de realizaciones

La figura 1 ilustra, en una vista esquemática, un ejemplo de una turbina eólica 1. La turbina eólica 1 incluye una torre 2, una góndola 3 dispuesta en el ápice de la torre, y un rotor 4 acoplado operativamente a un generador alojado dentro de la góndola 3. Además del generador, la góndola aloja diversos componentes necesarios para convertir la energía eólica en energía eléctrica y diversos componentes necesarios para hacer funcionar, controlar y optimizar el rendimiento de la turbina eólica 1. El rotor 4 de la turbina eólica incluye un buje central 5 y una pluralidad de palas 6 que sobresalen hacia fuera desde el buje central 5. En la realización ilustrada, el rotor 4 incluye tres palas 6, pero el número puede variar. Además, la turbina eólica comprende un sistema de control. El sistema de control puede colocarse dentro de la góndola, en la torre o distribuirse en un número de ubicaciones dentro de (o externamente a) la turbina y conectadas de manera comunicativa. Las palas de rotor son de paso ajustable. Las palas de rotor se pueden ajustar según una configuración de paso colectivo, donde cada una de las palas se configura en el mismo valor de paso. Además de eso, las palas de rotor son ajustables según configuraciones de paso individuales, donde cada pala puede estar dotada de un punto de ajuste de paso individual.

Cada pala de rotor de la turbina puede vibrar en la dirección en el sentido lateral 8, es decir, vibraciones u oscilaciones a lo largo de la cuerda entre el borde de salida y el borde de ataque de la pala. En general, cuando se hace referencia a "una vibración de pala de rotor en el sentido lateral", se hace referencia al primer modo de flexión en el sentido lateral, sin embargo, la divulgación realizada en el presente documento también es relevante para el modo de flexión

en el sentido lateral de orden superior con las adaptaciones apropiadas. Una vibración en el sentido lateral puede medirse y/o detectarse de diferentes maneras. En una realización, la vibración en el sentido lateral se mide en la raíz de pala 9 por medio de sensores de carga de pala colocados en cada raíz de pala de manera que el sensor detecta la carga en la dirección en el sentido lateral. Tal sensor puede ser en realizaciones un sensor de galga extensiométrica o un sensor de Bragg óptico. A medida que los sensores se colocan en la pala de rotación, tales señales de carga en el sentido lateral para cada una de las palas de rotor ajustables se miden en el marco de referencia de rotación del rotor.

La figura 2 es un diagrama que ilustra esquemáticamente una realización de un controlador de velocidad de retroalimentación implementado para determinar señales de accionamiento de paso individual capaces de reducir vibraciones en el sentido lateral según realizaciones de la presente invención. En la implementación ilustrada, el controlador de velocidad minimiza un error de velocidad ($\omega - \omega_{ref}$) entre la velocidad de rotor real, ω , y una velocidad de rotor de referencia, ω_{ref} , para emitir una potencia solicitada P (en forma de un punto de ajuste de potencia) y una referencia de paso colectivo, θ_{col} . La referencia de paso colectivo según lo determinado por el controlador de velocidad, en vista de la velocidad de rotor, también puede tener en cuenta otros valores de sensor, esto se menciona en la figura 2 como un conjunto de mediciones, ms, que se introduce en el controlador de velocidad. El controlador de velocidad de retroalimentación puede implementarse mediante un PI, PID o esquemas de control similares. En una realización, el controlador de velocidad puede ser alternativamente un controlador predictivo de modelo que se basa en minimizar una función de coste está dispuesto para determinar la referencia de paso colectivo y/o la referencia de potencia.

La figura 2 ilustra además un bloque de control de reducción de vibraciones denominado como unidades de accionamiento de paso (PAU). En la unidad de accionamiento de paso, se están determinando las señales de modificación de paso ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) basándose en la(s) señal(es) de entrada, siendo la señal de entrada una señal de carga en el sentido lateral. Una realización de la implementación de la unidad de accionamiento de paso (PAU) se ilustra en la figura 3.

La unidad de control PAU determina señales de modificación de paso para cada pala de rotor que se superponen a la referencia de paso colectivo para proporcionar las señales de modificación de paso resultantes ($\theta_A, \theta_B, \theta_C$) que se pueden aplicar a los accionadores de paso de las palas de rotor individualmente, y de ese modo reducir las vibraciones de pala en el sentido lateral.

En la realización mostrada en la figura 2, se determina una referencia de paso colectivo para las palas de rotor de paso ajustable basándose en una velocidad de rotor y se está aplicando una señal de modificación de paso resultante a las palas de rotor de paso ajustable. La señal de modificación de paso resultante se aplica a las palas de rotor de paso ajustable individualmente, y basándose para cada pala individual en una señal combinada de la referencia de paso colectivo y las señales de modificación de paso individuales. En una realización, la señal de modificación de paso individual se aplica de manera cíclica.

Por lo tanto, las señales de accionamiento de paso se determinan para cada pala de rotor de paso ajustable basándose en la señal de modificación de paso para cada pala de rotor.

La figura 3 ilustra esquemáticamente una realización de una unidad de accionamiento de paso (PAU) que, basándose en una transformación de coordenadas de m-palas (T) en forma de una transformación de Coleman, determina señales de modificación de paso que, cuando se aplican por el accionador de paso, generan señales de accionamiento de paso que reducirán las vibraciones de pala en el sentido lateral.

La unidad de accionamiento de paso PAU está dispuesta para recibir una señal de carga en el sentido lateral para cada una de las palas de rotor ajustables (L_1 a L_3). La señal de carga en el sentido lateral se mide en un marco de referencia de rotación. Las señales de carga en el sentido lateral se transforman con respecto a coordenadas mediante una transformación de coordenadas de m-palas en forma de una transformación de Coleman T. La transformación de Coleman toma las tres señales de rotación en un marco de referencia a lo largo de una primera, s_1 , y una segunda, s_2 , dirección de referencia. Este marco de referencia puede denominarse un marco de referencia de giro. La salida de la transformada de Coleman son dos señales: s_1, s_2 . En realizaciones de la presente invención, se selecciona o bien la primera o bien la segunda dirección de referencia estacionaria, S_1 , para obtener una componente de señal seleccionada s. La componente de señal seleccionada s se filtra a o bien una frecuencia de giro hacia atrás o bien una frecuencia de giro hacia delante para obtener una componente de señal filtrada f_s . El filtrado se realiza con el bloque de señal C.

La componente de señal seleccionada se filtra para acoplar la salida de la transformada de Coleman a una componente de giro hacia atrás seleccionada de la vibración en el sentido lateral o una componente de giro hacia delante seleccionada de modo que la componente de señal filtrada refleje la magnitud (tal como la amplitud o la potencia) de la componente seleccionada del giro hacia atrás o hacia delante.

Habiendo extraído una medida de la resistencia de la componente de giro seleccionada en el marco de referencia de giro estacionario, un momento de paso correspondiente que va a aplicarse en el marco de rotación está determinado

por la transformación de coordenadas de m-palas inversa mediante el uso de la transformación de Coleman inversa a la componente de señal filtrada. Las señales de modificación de paso ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) se obtienen de este modo y se pueden imponer al accionador de paso.

5 En una realización, el filtrado de la señal seleccionada comprende aplicar un filtro de paso de banda que incluye la frecuencia de giro hacia atrás o la frecuencia de giro hacia delante. Es decir, un filtro de paso de banda colocado alrededor de la frecuencia de vibración en el sentido lateral f desplazada o bien hacia atrás o bien hacia delante por la frecuencia de rotor, que es un filtro de paso de banda colocado en $(f-1P)$ o $(f+1P)$.

10 En general, una frecuencia en el sentido lateral de giro hacia atrás debe entenderse como una frecuencia en el sentido lateral de un orden dado, f , restada de la frecuencia de rotor. Típicamente, la frecuencia en el sentido lateral es la frecuencia en el sentido lateral de primer orden y la frecuencia de rotor es $1P$. Sin embargo, otros órdenes pueden ser relevantes en ciertas situaciones. Una frecuencia de giro hacia delante es una frecuencia correspondiente pero donde la frecuencia en el sentido lateral de un orden dado, f , se suma a la frecuencia de rotor $1P$.

15 El filtrado incluye, o bien como una función integrada o bien como una función separada, la aplicación de una ganancia para contrarrestar las cargas en el sentido lateral en un grado predefinido, según se determina por la ganancia. En particular, el filtrado de la señal seleccionada aplica una ganancia inversa a la señal seleccionada. Es decir, la señal se multiplica por un valor negativo. Al aplicar una ganancia inversa, se puede garantizar que la señal filtrada esté en fase opuesta con la señal seleccionada. De este modo, se puede garantizar que el momento aplicado por la regulación de paso se aplique para reducir la vibración.

20 La transformación de coordenadas de m-palas inversa puede tomar como entrada una primera señal i_1 y una segunda señal i_2 . La segunda señal puede establecerse en una realización general para que sea cero. En esta realización, el selector S_2 establece la primera señal s_1 como la componente de señal filtrada f_s y la segunda señal s_2 para que sea cero. Sin embargo, en las realizaciones, la segunda señal puede determinarse filtrando adicionalmente la señal filtrada con un filtro de señal adicional con una respuesta de fase de filtro de desplazamiento de fase en cuadratura (QPS). Esto se ilustra en la figura 4.

25 Un filtro de desplazamiento de fase en cuadratura desplaza la fase en 90° , y la segunda señal se determina de ese modo como la primera señal con un desplazamiento de fase de 90 grados.

30 En una realización, el desplazamiento de fase de 90 grados se obtiene aplicando un filtro en forma de integrador con fuga a la primera señal. Los integradores con fuga pueden implementarse como filtros de paso bajo de 1^{er} orden ajustados con una frecuencia de ruptura por debajo de la frecuencia de rotor.

35 Al determinar la segunda señal como la primera señal con un desplazamiento de fase de 90 grados, la señal de modificación de paso se obtiene como:

$$40 \quad \theta_k = A \sin \left((\omega t \mp \Omega t) + \phi \pm \frac{2\pi}{3} (k - 1) \right)$$

donde el signo (\pm) depende de si la segunda señal se desplaza o no $+90^\circ$ o -90° .

45 Por lo tanto, el filtro de señal (QPS) puede implementarse para seleccionar o bien una respuesta de fase de filtro positiva o bien una respuesta de fase de filtro negativa.

50 Una ventaja de aplicar el filtro con una respuesta de fase de filtro de desplazamiento de fase en cuadratura (QPS) para obtener la segunda señal es que se puede evitar (o al menos reducir) el aspecto de dividir el contenido de frecuencia por la transformada de Coleman en la señal de accionamiento de paso. El contenido de frecuencia se divide en una componente de baja frecuencia y una componente de alta frecuencia centradas alrededor de la frecuencia de entrada. De este modo, si no se aplica el filtro de desplazamiento de fase en cuadratura, las señales de modificación de paso resultantes incluirán contenido de frecuencia tanto a la alta frecuencia como a la baja frecuencia. Es decir, las señales de modificación de paso incluirán contenido de frecuencia a la frecuencia en el sentido lateral $f+1P$ y $f-1P$. En una realización, donde el filtro de desplazamiento de fase en cuadratura no se aplica, el contenido de frecuencia reducida en las señales de accionamiento aún puede obtenerse mediante el uso de filtros de muesca aplicados a cada una de las señales de modificación de paso ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$). El filtro de muesca se aplica para eliminar mediante muesca el contenido de frecuencia en $f+1P$ o en $f-1P$ dependiendo del contenido de frecuencia que se debe eliminar. Normalmente, el contenido de $f+1P$ debe eliminarse para evitar la regulación de paso de alta frecuencia con el fin de reducir la exposición a la fatiga de los accionadores de regulación de paso. El filtro de muesca que tiene un ancho de banda predefinido para garantizar que se elimina mediante muesca un intervalo de frecuencia apropiado.

60 La figura 4 ilustra además ganancias opcionales que van a aplicarse o bien como ganancia común g , o bien como ganancia individual g_2 .

5 En una realización, una ganancia común g se aplica como una ganancia de ajuste con un término de programación de ganancia, dependiendo el término de programación de ganancia de un punto operativo de la turbina eólica. El punto operativo es un punto en un espacio de parámetros multidimensional abarcado por dos o más de los parámetros de velocidad de generador, ángulo de paso, potencia eléctrica, par de fuerzas eléctrico, velocidad del viento, así como otros parámetros utilizados para controlar la turbina eólica. Al aplicar una programación de ganancia dependiente del punto operativo, la actividad de la característica de control se puede adaptar para proporcionar condiciones operativas, tanto para garantizar que el sistema de control está suficientemente activo en puntos operativos relevantes, como para garantizar que el sistema de control solo se aplique en un espacio operativo específico y, por lo tanto, solo se reduzca el nivel de actividad del sistema de paso para no incurrir en fatiga innecesaria.

15 El sistema de control de rotor puede comprender además un elemento de activación, siendo el elemento de activación dependiente de un punto operativo de la turbina eólica. El elemento de activación puede implementarse en la programación de ganancia como una ganancia cero cuando el sistema de control está desactivado. También son posibles otras implementaciones de un elemento de activación. El elemento de activación también puede depender de un punto operativo de la turbina eólica. De esta manera, se puede garantizar que el controlador esté activo en condiciones operativas tales como turbulencia u otras condiciones en las que existe un riesgo elevado de que se acumulen vibraciones en el sentido lateral. El elemento de activación puede incluir una histéresis para garantizar que el controlador no se encienda y se apague en ciertas condiciones. El elemento de activación también puede incluir un temporizador para garantizar que el controlador esté activo durante un cierto tiempo, aumentando de ese modo la probabilidad de que se rompa la vibración.

20 Aplicando una ganancia individual (g_2) en la segunda entrada i_2 el espectro de frecuencias resultante del accionamiento de paso puede ajustarse a una mezcla específica de frecuencias de accionamiento y el efecto de reducción vibratoria resultante puede ajustarse en vista de una estructura de turbina específica.

25 En una realización, la transformación de coordenadas de m-palas inversa T^{-1} puede incluir un desplazamiento de fase $\Delta\phi$ para ajustar la fase de la componente de señal filtrada. Al incluir un desplazamiento de fase en la transformación inversa, se puede ajustar el tiempo real de cuándo se aplica el accionamiento de paso. Esto puede ser necesario para compensar los retardos de tiempo computacionales o retardos de sistema, tales como retardos incurridos por el accionador de paso.

La figura 5 ilustra el efecto de aplicar el sistema de control según una realización de la presente invención.

35 La figura 5 ilustra señales simuladas aplicando la realización ilustrada en las figuras 3 y 4 para una turbina eólica con una torre flexible torsional en una situación de viento alto. Ambas gráficas muestran gráficas de FFT de señales de paso en la figura 5A y de señales de cargas de raíz de pala en la dirección en el sentido lateral en la figura 5B, de una pala seleccionada. Las gráficas marcadas con 50A y 50B muestran la actividad de paso (50A) y la señal de carga en el sentido lateral resultante (50B) en una situación en la que el sistema de control está activo, y las gráficas marcadas con 51A y 51B muestran la actividad de paso (51A) y la señal de carga en el sentido lateral resultante (51B) en una situación en la que el sistema de control está inactivo. Como se puede ver, una mayor actividad de paso según las realizaciones de la presente invención da como resultado que las vibraciones en el sentido lateral (expresadas por las cargas en el sentido lateral) se reduzcan significativamente.

45 Realizaciones de ejemplo de la invención se han descrito solo con fines ilustrativos, y no limitan el alcance de la invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de control de rotor para accionar el paso de palas de rotor de paso ajustable de una turbina eólica, el sistema de control de rotor comprende una unidad de accionamiento de paso para determinar una señal de modificación de paso que va a aplicarse a un accionador de paso para accionar el paso de las palas de rotor de paso ajustable;

5 estando dispuesta la unidad de accionamiento de paso para:

10 recibir una señal de carga sentido lateral para cada una de las palas de rotor ajustables, midiéndose la señal de carga sentido lateral en un marco de referencia de rotación;

15 aplicar una transformación de coordenadas de m-palas a la señal de carga sentido lateral para transformar la señal a un marco de referencia de giro a lo largo de una primera y una segunda dirección de referencia;

20 seleccionar la componente de señal de o bien la primera o bien la segunda dirección de referencia para obtener una componente de señal seleccionada;

25 filtrar la componente de señal seleccionada a o bien una frecuencia de giro hacia atrás o bien una frecuencia de giro hacia delante para obtener una componente de señal filtrada;

30 aplicar una transformación de coordenadas de m-palas inversa a la componente de señal filtrada para obtener la señal de modificación de paso;

35 aplicar la señal de modificación de paso al accionador de paso.
2. Sistema de control de rotor según la reivindicación 1, en el que la componente de señal seleccionada se filtra para acoplar la salida de la transformada de m-palas a una componente de giro hacia atrás seleccionada de la vibración en el sentido lateral o una componente de giro hacia delante seleccionada de modo que la componente de señal filtrada refleja la magnitud de la componente seleccionada del giro hacia atrás o hacia delante en el marco de referencia de giro de la vibración en el sentido lateral.
3. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el filtrado de la señal seleccionada comprende aplicar un filtro de paso de banda que incluye la frecuencia de giro hacia atrás o la frecuencia de giro hacia delante.
4. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el filtrado de la señal seleccionada incluye una ganancia inversa a la señal seleccionada.
5. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la transformación de coordenadas de m-palas inversa toma como entrada una primera señal y una segunda señal, y en el que la segunda señal se determina filtrando adicionalmente la señal filtrada con un filtro de señal adicional con una respuesta de fase de filtro de desplazamiento de fase en cuadratura.
6. Sistema de control de rotor según la reivindicación 5, en el que el filtro de señal adicional es un integrador con fuga.
7. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones 5 o 6, en el que el filtro de señal adicional puede seleccionarse para o bien una respuesta de fase de filtro positiva o bien una respuesta de fase de filtro negativa.
8. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la transformación de coordenadas de m-palas se basa en una transformación de Coleman.
9. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:

determinar una referencia de paso colectivo para las palas de rotor de paso ajustable, determinándose la referencia de paso colectivo basándose en una velocidad de rotor,

aplicar una señal de modificación de paso resultante a las palas de rotor de paso ajustable, aplicándose la señal de modificación de paso resultante a las palas de rotor de paso ajustable individualmente, y basándose para cada pala individual en una señal combinada de la referencia de paso colectivo y las señales de modificación de paso individuales.
10. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una ganancia de ajuste con un término de programación de ganancia, dependiendo el término de programación

de ganancia de un punto operativo de la turbina eólica.

- 5 11. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la transformación de coordenadas de m-palas inversa incluye además un desplazamiento de fase $\Delta\varphi$ para ajustar la fase de la componente de señal filtrada.
- 10 12. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la señal de modificación de paso se filtra con un filtro de muesca o bien alrededor de la frecuencia de giro hacia delante de frecuencia de vibración en el sentido lateral o bien alrededor de la frecuencia de giro hacia atrás de frecuencia de vibración en el sentido lateral.
- 15 13. Sistema de control de rotor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un elemento de activación, dependiendo el elemento de activación de un punto operativo de la turbina eólica.
- 15 14. Turbina eólica que comprende el sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.
- 20 15. Método para accionar el paso de palas de rotor de paso ajustable de una turbina eólica, la turbina eólica comprende un accionador de paso para accionar el paso de las palas de rotor de paso ajustable, el método comprende:
- 25 recibir una señal de carga en el sentido lateral para cada una de las palas de rotor ajustables, midiéndose la señal de carga en el sentido lateral en un marco de referencia de rotación;
- 25 aplicar una transformación de coordenadas de m-palas a la señal de carga en el sentido lateral para transformar la señal a un marco de referencia de giro a lo largo de una primera y una segunda dirección de referencia;
- 30 seleccionar la componente de señal de o bien la primera o bien la segunda dirección de referencia para obtener una componente de señal seleccionada;
- 35 filtrar la componente de señal seleccionada a o bien una frecuencia de giro hacia atrás o bien una frecuencia de giro hacia delante para obtener una componente de señal filtrada;
- 35 aplicar una transformación de coordenadas de m-palas inversa a la componente de señal filtrada para obtener la señal de modificación de paso;
- 40 aplicar la señal de modificación de paso al accionador de paso.
- 40 16. Producto de programa informático que comprende código de software adaptado para controlar una turbina eólica cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos, estando adaptado el producto de programa informático para realizar el método de la reivindicación 15.

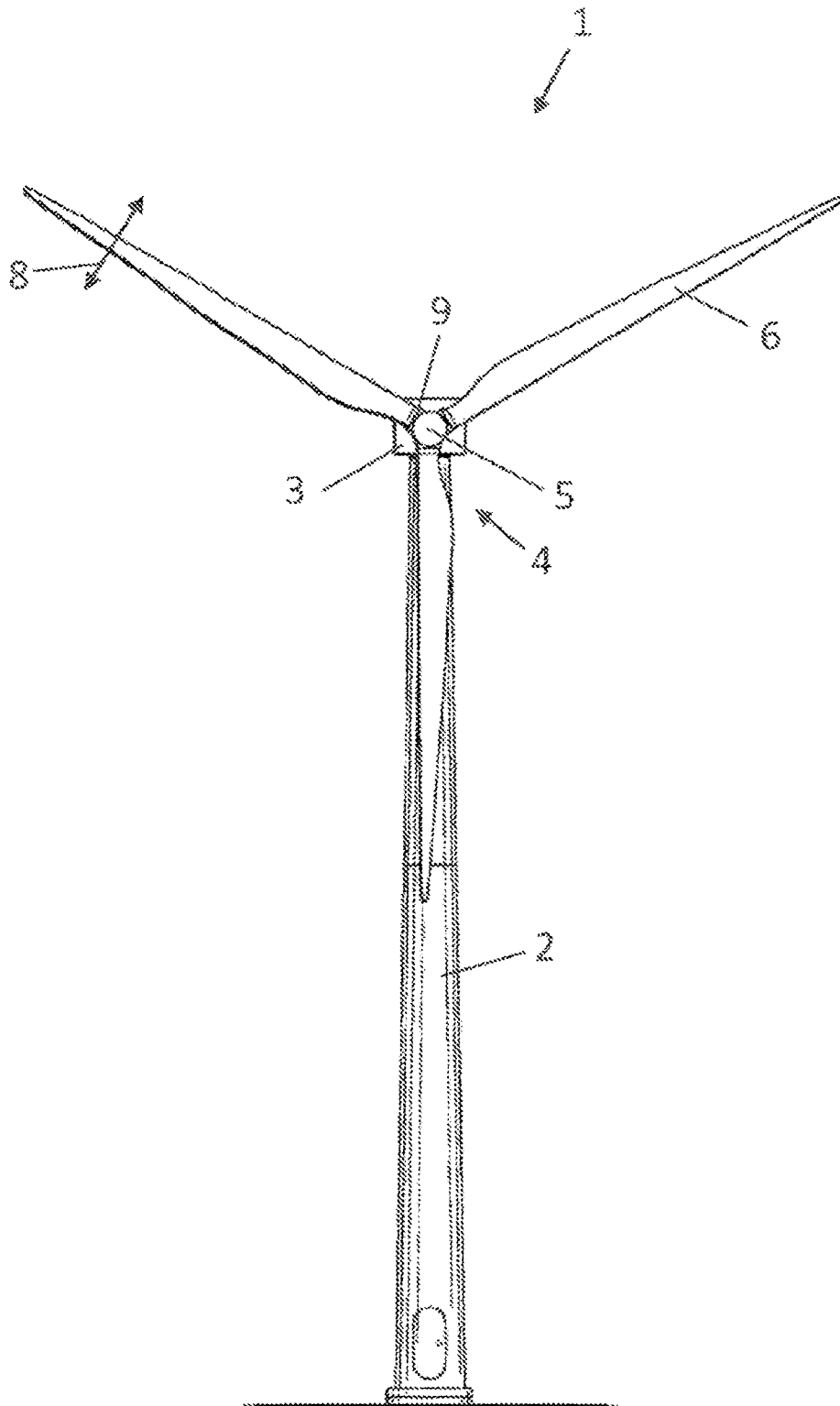


Fig. 1

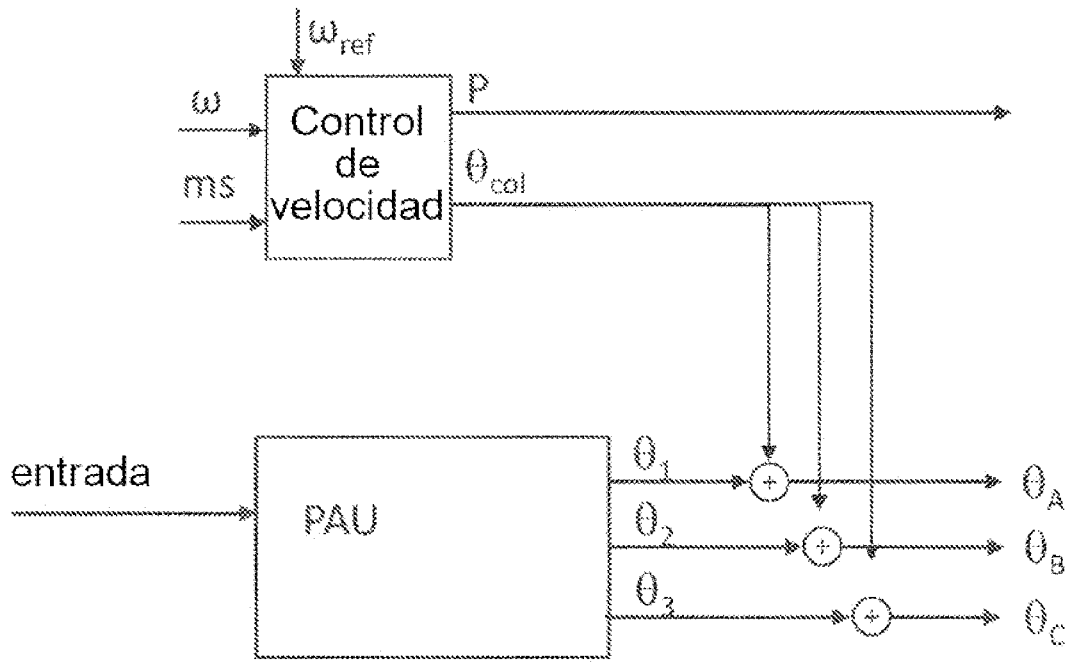


Fig. 2

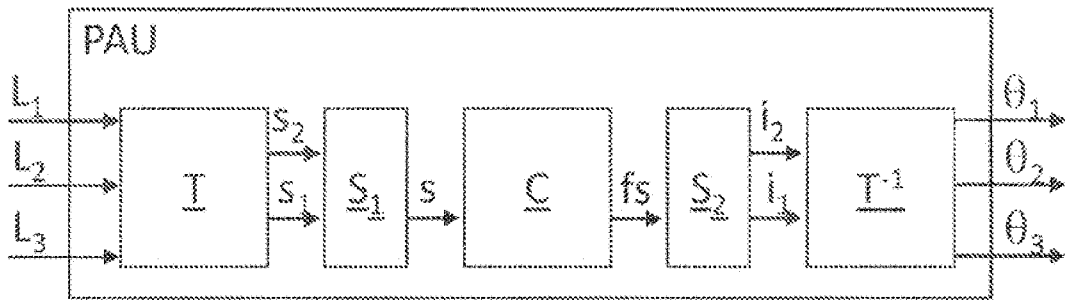


Fig. 3

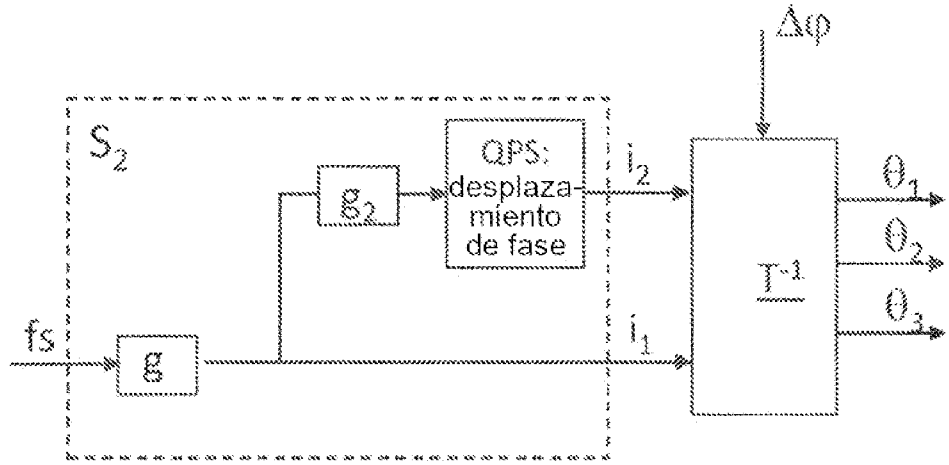


Fig. 4

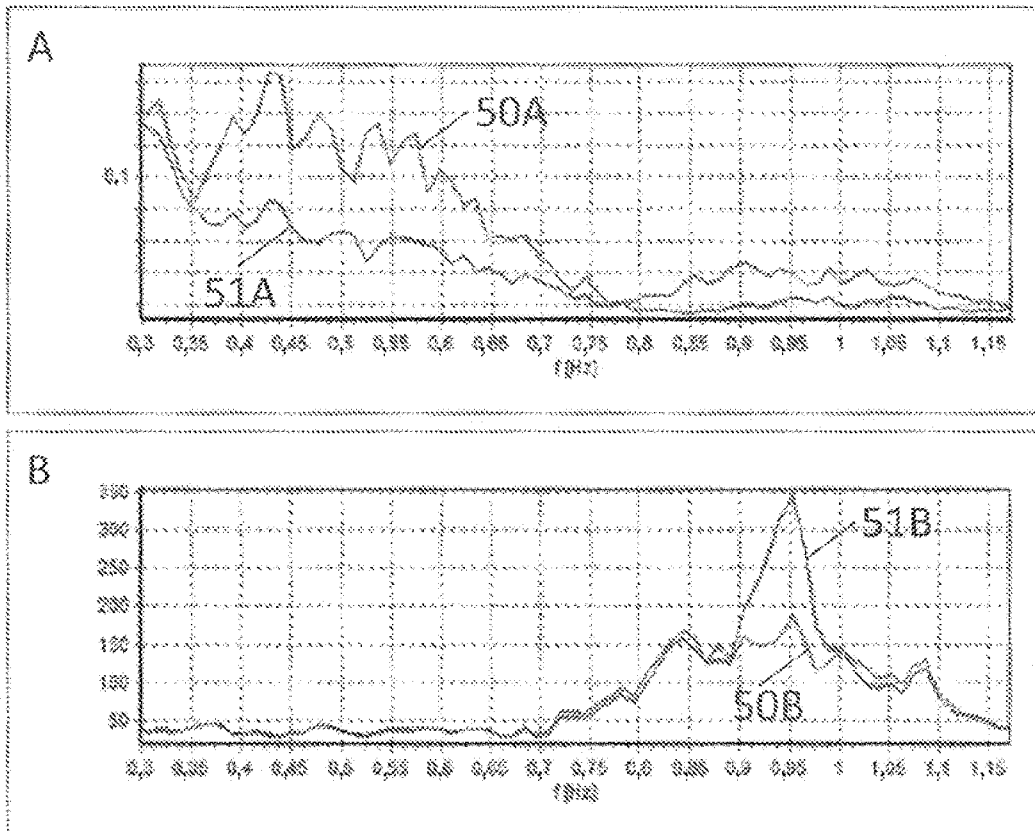


Fig. 5