

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 589 597**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.12.2008 PCT/GB2008/003988**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.06.2009 WO09071882**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.12.2008 E 08856521 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.06.2016 EP 2229530**

54 Título: **Sistema de compensación para un rotor**

30 Prioridad:

03.12.2007 GB 0723620

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

15.11.2016

73 Titular/es:

**SGURRCONTROL LIMITED (100.0%)
15 Justice Mill Lane
Aberdeen AB11 6EQ, Scotland, GB**

72 Inventor/es:

LEITHEAD, WILLIAM E

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 589 597 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

Sistema de compensación para un rotor

5 Campo de la invención

Esta invención se refiere al campo de turbinas eólicas generadoras de energía que comprenden un rotor que tiene una o más palas, cada una con un accionador para ajustar el ángulo de paso alrededor de su eje longitudinal.

10 En particular, esta invención se refiere a un sistema de compensación para modificar independientemente una salida de señal del ángulo de paso de una pala de rotor mediante un controlador centralizado de un sistema de control de palas de rotor.

15 Esta invención también encuentra aplicación para rotores en el campo de turbinas de fluidos, en particular agua, tales como turbinas marinas.

Antecedentes de la invención

20 Las turbinas eólicas son ahora un medio habitual de generación de electricidad en muchos países con decenas de gigavatios de capacidad instalados en Europa y en los EE. UU. Desde finales de 1990, la potencia nominal y el tamaño de las turbinas eólicas han aumentado rápidamente a aproximadamente 5 MW y 120 m de diámetro de rotor, de hoy en día. Tanto la energía generada por la turbina eólica como la velocidad rotacional del rotor deben regularse para alcanzar un funcionamiento viable de la turbina eólica para evitar una sobreingeniería, ya que la potencia disponible del viento aumenta con el cubo de la velocidad del aire, y para mantener la velocidad rotacional del rotor dentro de un intervalo de funcionamiento seguro. Con velocidades del viento más altas, la regulación de la turbina eólica se realiza parcial o completamente mediante el ajuste del ángulo de paso de las palas a medida que la velocidad del viento varía para mantener constante la energía generada o la velocidad rotacional del rotor, o para algún otro propósito estrechamente relacionado.

30 Las palas normalmente se ajustan de forma colectiva, es decir, se hace el mismo ajuste de paso en todas las palas. Al hacerlo, solo se tiene en cuenta la velocidad media del viento sobre todo el rotor. El ajuste del ángulo de paso de las palas está determinado por un controlador centralizado de un sistema de control de palas de rotor de una turbina eólica en respuesta a las mediciones de la energía generada o la velocidad rotacional del rotor constante o alguna otra medición estrechamente relacionada. Los accionadores ajustan el ángulo de paso de las palas según la cantidad determinada por el controlador centralizado.

40 Cuando se regula la turbina eólica de la forma anterior, además de cargas de gravedad o a la desalineación de las palas, las cargas en cada pala serían las mismas dado un campo eólico, con el que interactúa el rotor, que es uniforme; es decir, simétrico alrededor de un eje a través de un buje del rotor y perpendicular al rotor. Sin embargo, un campo eólico real no es uniforme. En su lugar, la velocidad del viento aumenta con la altura, se reduce frente a una torre que soporta el rotor y varía turbulentamente sobre un disco barrido por las palas. Por consiguiente, en particular para turbinas eólicas grandes, las cargas en cada pala y la velocidad media del viento representativa de las mismas son diferentes. Esta carga asimétrica sobre el rotor y por lo tanto sobre la estructura de soporte varía continuamente reduciendo la vida útil de la turbina eólica.

45 Para eliminar las cargas asimétricas, el ángulo de paso de cada pala puede ajustarse separadamente. Al hacerlo, se tiene en cuenta la velocidad media del viento sobre la pala.

50 El documento US 4.297.076 divulga una turbina eólica en la que solo las partes de punta de las palas son tienen un paso variable. Se miden los momentos de flexión de cada pala y los ajustes cíclicos del ángulo de paso de las puntas, que difieren solo en fase, se derivan de la asimetría de los momentos de flexión. El ajuste de paso cíclico conlleva una reducción de carga cíclica asimétrica sobre el rotor.

55 El documento US 6.361.275 divulga una turbina eólica que incluye un dispositivo de ajuste para ajustar el paso de cada pala de rotor. Las cargas sobre cada pala se miden usando galgas extensiométricas y/o las velocidades del viento para cada pala se miden usando anemómetros montados sobre las palas. Todas las mediciones se comunican a un dispositivo de control central que determina los ajustes individuales de los ángulos de paso de las palas necesarios para alcanzar cargas reducidas. Los ajustes de los ángulos de paso se ejecutan entonces mediante accionadores conectados a las respectivas palas. Este ajuste individual del paso de las palas conlleva una reducción de carga asimétrica sobre el rotor. Se conoce otro controlador de paso del documento EP 1 666 723.

65 El documento WO 2005/010358 divulga una turbina eólica que incluye un dispositivo de ajuste para justar el paso de cada pala similar al documento US 6.361.275. Desplazamientos radiales desde la posición de reposo del eje principal se miden usando sensores de proximidad. Todas las mediciones se comunican a un dispositivo de control central que determina la magnitud y/o la orientación de la carga asimétrica sobre el rotor y por lo tanto los ajustes individuales de los ángulos de paso de las palas necesarios para alcanzar cargas reducidas. Los ajustes de los

ángulos de paso se ejecutan entonces mediante accionadores conectados a las respectivas palas. Este ajuste individual de paso de las palas conlleva una reducción de la carga asimétrica sobre el rotor.

El documento WO 2007/104306 divulga un método para determinar los ajustes individuales de los ángulos de paso de las palas en el dispositivo de ajuste divulgado en el documento US 6.361.275. En el documento US 6.361.275 se miden las cargas sobre cada pala, se determinan los ajustes necesarios para alcanzar cargas reducidas y entonces se ejecutan. Las cargas se recogen, se almacenan y se determina una función de distribución de carga. Una pluralidad de funciones periódicas se determina a partir de la distribución y entonces se usan para determinar el ajuste de los ángulos de paso de las palas.

Las soluciones al problema de carga asimétrica sobre palas de turbina eólica del estado de la técnica anteriormente mencionado están limitadas o son difíciles de afinar y se trata de turbinas eólicas de diseño específico. En el documento US 4.297.076 solo se reducen las cargas sobre el rotor cíclicas asimétricas. En el documento US 6.361.275 se reducen las cargas sobre el rotor cíclicas y no cíclicas asimétricas, pero se necesita un análisis dinámico al completo de la turbina eólica que depende de muchos atributos y parámetros físicos de la turbina eólica y de dispositivos de control complejos.

El documento WO 2005/010358 se diferencia del documento US 6.361.275 solo en las mediciones realizadas. En el documento WO 2007/104306 solo se reduce esa parte de las cargas sobre el rotor no cíclicas asimétricas de un conjunto finito de sinusoides. Las frecuencias de las sinusoides son múltiplos enteros de la frecuencia nominal cíclica del rotor y los ajustes hechos en cada pala son los mismos excepto por el desplazamiento de fase. Cuando el rotor tiene tres palas, los desplazamientos de fase son de 120 grados y 240 grados.

Una característica común del estado de la técnica anterior es la comunicación de todas las mediciones de carga a un dispositivo de control central. Los momentos de carga sobre las palas del rotor son coordenadas transformadas en un sistema de coordenadas definido por la inclinación y guiñada, el ajuste necesario para reducir las cargas asimétricas sobre el rotor se determina en este sistema de coordenadas transformado y entonces las coordenadas inversas transformadas para determinar los ajustes de paso de cada pala. Para una turbina eólica de tres palas, el procedimiento es muy similar a la transformada de Park usada para derivar la representación d-q de un modelo dinámico de máquina eléctrica a partir de su representación trifásica. En el documento WO 2007/10436, la transformada de coordenadas, T, y la transformada inversa de coordenadas, T⁻¹, se muestran claramente en la Figura 7. En el documento WO 2005/010358, la medición de los desplazamientos radiales desde la posición de reposo del eje principal elimina la necesidad de la transformada de coordenadas de carga en un sistema de coordenadas definido por la inclinación y guiñada. Sin embargo, todavía es necesario determinar los ajustes del paso de cada pala usando la transformada inversa de coordenadas o mediante algún otro medio. Aunque su ausencia no indica otra cosa, el uso de o bien la transformada de coordenadas o la transformada inversa de coordenadas o el uso de medios equivalentes es una indicación definitiva de que un dispositivo de ajuste para ajustar el paso de cada pala de rotor es un dispositivo de control central.

Esta invención tiene como objetivo proporcionar una solución alternativa al problema de reducir cargas asimétricas sobre el rotor, que sea más simple que las soluciones del estado de la técnica anterior y más sencilla de readaptar a instalaciones existentes.

Sumario de la invención

Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema de compensación según la reivindicación 1.

Según un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona una turbina eólica según la reivindicación 11.

Según un tercer aspecto de la presente invención, se proporciona un método según la reivindicación 15.

Una instalación de turbinas eólicas típica, o similar, incluye un rotor que tiene un número de palas, cada una con un accionador para ajustar el ángulo de paso alrededor de su eje longitudinal. La instalación incluye un sistema de control de la pala de rotor que tiene un controlador central para controlar colectivamente el paso de cada una de las palas mediante la emisión de una señal colectiva del ángulo de paso de pala de rotor hacia cada accionador.

El sistema de compensación de la presente invención está adaptado para modificar la señal del ángulo de paso de pala de rotor recibida desde el controlador central y emitir una señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado al accionador para cada pala de forma independiente con el fin de contrarrestar las cargas de las palas causadas por la no uniformidad del campo eólico, con la ventaja de reducir las cargas asimétricas del rotor.

El primer medio de detección está adaptado para medir la carga en una pala de rotor respectiva. Basado en la carga de la pala debido a la no uniformidad del campo eólico, el sistema de compensación está adaptado para emitir una señal de paso de pala de rotor compensado de manera que el accionador conectado al mismo no ajusta el paso de la pala según la señal recibida del controlador central, como en los sistemas del estado de la técnica anterior, sino

que en su lugar ajusta el paso de la pala según la señal compensada recibida del sistema de compensación. De este modo, el paso de la pala respectiva se ajusta conforme al control de paso solicitado por el controlador central pero también para contrarrestar la carga en esa pala debida a la no uniformidad del campo eólico.

5 El sistema de compensación de la presente invención es por tanto un sistema reactivo y puede reducir las cargas asimétricas del rotor debidas a la no uniformidad del campo eólico, lo que aumenta considerablemente la vida útil de la instalación.

10 El sistema de compensación individual para cada ángulo de paso de pala de rotor no depende ni de las mediciones de carga para cualquier otra pala ni del ángulo compensado de paso de pala de rotor de cualquier otra pala que no sea a través de la señal común colectiva del ángulo de paso de pala de rotor proporcionada por el controlador central.

15 Las cargas de las palas podrán medirse mediante una o más galgas extensiométricas o sensores de fibra óptica, u otro equivalente. Los medios de control de las palas podrán implementarse en hardware, software integrado en una plataforma digital dedicada a esa tarea o software integrado en una plataforma digital compartida con el accionador, medios de detección o controlador centralizado o cualquier equivalente. El accionador podrá ser electromecánico o hidráulico, o cualquier equivalente.

20 El medio de control de las palas, que usa las mediciones de carga, determina el ajuste correcto del ángulo de paso para contrarrestar las cargas causadas por la no uniformidad del campo eólico. Este ajuste se hace continuamente o en intervalos de tiempo suficientemente cortos para no perjudicar la funcionalidad del sistema de compensación.

25 No es necesaria ninguna modificación del controlador centralizado del sistema de control de palas del rotor ya que la emisión de la señal del ángulo de paso de pala de rotor se sigue utilizando por el sistema de compensación, y el rendimiento del controlador centralizado no se ve afectado. En otras palabras, el controlador centralizado no necesita volver a afinarse cuando se instala el sistema de compensación. El sistema de compensación según la presente invención es por lo tanto particularmente ventajoso en que es sencillo de readaptar a instalaciones existentes. En algunas circunstancias es posible instalar el sistema de compensación conectado entre el controlador centralizado y un accionador estándar. En otras circunstancias, el sistema de compensación se puede suministrar íntegramente con un accionador mejorado y se puede conectar directamente al controlador centralizado. Por razones de interfaz, el accionador mejorado necesitaría tener el mismo ancho de banda que el accionador estándar al que sustituye.

35 Como el medio de control de las palas no es una instalación específica, en una realización preferente se diseña para un rotor con velocidad rotacional constante y estructura de soporte infinitamente rígida; es decir, no hay aceleración hacia delante o hacia atrás, o lateral, del buje del rotor al que la pala está unida. El diseño del medio de control de las palas depende de un análisis dinámico del sistema de compensación en un marco de referencia con un origen fijo y que rota con el rotor a velocidad rotacional constante. No depende del resto de la instalación. El diseño está así mucho más simplificado dependiendo solo de los atributos de la pala, del accionador y de los medios de detección. Como es prácticamente siempre el caso, cuando la velocidad rotacional del rotor no es constante y la estructura de soporte no es infinitamente rígida, el marco de referencia tiene un origen no fijo y rota con el rotor a una velocidad rotacional no constante; es decir, el marco de referencia es no inercial.

45 Para compensar la diferencia entre el marco de referencia con origen fijo y el marco de referencia no inercial, el sistema de compensación según la realización preferente incluye segundos medios de detección para medir la aceleración de la pala de rotor. El medio de control de pala determina una carga modificada en la pala de rotor, basándose en la carga y aceleración medidas, usando métodos estándares para la conversión entre los marcos de referencia, de manera que la señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado se basa en la carga de la pala modificada. Estas modificaciones de la carga tienen forma de fuerzas ficticias: por ejemplo, la fuerza ficticia correspondiente a la pala en el momento de flexión fuera de plano es $m_b \ddot{z}_R + J \dot{\Omega}_{yR}$, donde m_b es la masa de la pala, l es la distancia al centro de masa de la pala desde el eje de rotación del rotor, \ddot{z}_R es la aceleración lineal del centro de rotación del rotor perpendicular al rotor, J es la inercia de la pala alrededor del eje de rotación del rotor y $\dot{\Omega}_{yR}$ es la aceleración angular fuera de plano de la pala alrededor de su centro de rotación.

55 Las cargas en la pala causadas por la no uniformidad del campo eólico y, por lo tanto, el ajuste en el ángulo de paso de la pala son en parte casi periódicas, es decir, fuertemente dependientes del azimut del rotor y casi repetitivas con cada rotación de la pala. Durante una rotación instantánea, este ajuste casi periódico del ángulo de paso es similar a los ajustes realizados durante las rotaciones anteriores. En una realización preferente, el medio de control de la pala determina la parte casi periódica del ajuste del ángulo de paso desde los ajustes durante las rotaciones anteriores para hacer un mejor uso de las capacidades del accionador. Los métodos estándares para el control de procesos repetitivos se pueden adaptar a este contexto. La parte no periódica del ajuste está todavía determinada por el medio de control de la pala a partir de las mediciones de las cargas de la pala y, preferentemente, de las aceleraciones.

65

En una realización preferente de la invención, se miden el momento de flexión fuera de plano del rotor en la base de la pala y la aceleración hacia delante y hacia atrás del buje. El sistema de compensación ajusta preferentemente el ángulo de paso de la pala de manera que el momento de flexión en la base de la pala tiene un valor específico derivado del ángulo de paso determinado por el control centralizado. No se hace ningún ajuste al ángulo de paso cuando el momento de flexión en la base de la pala se encuentra en su valor de referencia. El mismo valor específico para el momento de flexión en la base de la pala se usa para todas las palas en el rotor. Todas las palas, por lo tanto, tienen el mismo momento de flexión en la base y, salvo en el plano del rotor, las cargas del rotor se equilibran.

A medida que la pala barre el campo eólico, tanto la magnitud como el ángulo de ataque de la velocidad del viento relativa a la pala varían. Las cargas causadas por la no uniformidad del campo eólico son más dependientes de los cambios en el ángulo de ataque de la velocidad del viento media de la pala que surgen de la no uniformidad del campo eólico que de los cambios en la magnitud. Los ajustes del ángulo de paso de la pala realizados mediante el sistema de compensación reducen mucho estos cambios en el ángulo de ataque. Consecuentemente, todas las cargas en la pala causadas por la no uniformidad del campo eólico se pueden reducir. También se reducen las cargas asimétricas sobre el rotor, causadas por la desalineación de la pala, es decir, no estando las palas unidas al buje con el paso previsto exactamente sino con pequeños errores.

Breve descripción de los dibujos

Las realizaciones preferentes de la presente invención se describen con detalle a continuación con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la Figura 1 muestra una turbina eólica;

la Figura 2 muestra una pala de rotor que incluye el sistema de compensación según la presente invención y un accionador;

la Figura 3 muestra una primera realización preferente del sistema de compensación;

la figura 4 muestra una segunda realización preferente del sistema de compensación; y

la Figura 5 muestra un elemento cuasi-periódico para el medio de control de la pala del sistema de compensación.

Descripción detallada

La Figura 1 representa una turbina eólica 1. Esta consiste en una torre 2, una góndola 3 soportada por la torre 2, y un rotor 6 con tres palas 5 unidas a un buje 4. Cada pala 5 está unida radialmente al buje 4 mediante un cojinete 10 y es capaz de inclinarse sobre su eje 7 longitudinal. El rotor 6 rota en un plano casi vertical. Un generador (no mostrado) y un sistema de transmisión (no mostrado) que lo conectan al buje 4 se encuentran alojados en la góndola 3. Un controlador centralizado 19 de un sistema de control de pala de rotor también se encuentra alojado en la góndola 3.

La Figura 2 representa una pala 5, un accionador 11 y el sistema de compensación 12 para la turbina eólica 1. La pala 5 está soportada por el cojinete 10 y se inclina sobre su eje 7 longitudinal mediante el accionador 11. El sistema de compensación 12 incluye fibra óptica, u otros sensores 8 adecuados para medir los momentos de flexión en la base de la pala; sensores 9 para medir la aceleración del centro de rotación del rotor 6; y un medio de control de la pala 13. El sistema de compensación 12 se conecta al accionador 11 y al controlador centralizado 19.

El momento de flexión fuera de plano del rotor en la base de la pala 5, μ_m , y la aceleración de la rotación del centro del rotor perpendicular al plano de rotación del rotor, α_m , se determinan a partir de las mediciones realizadas por los sensores 8 y 9 se comunican al medio de control de la pala 13.

La figura 3 representa una primera realización preferente del medio de control de pala 13. Comprende un primer elemento de medio de control de pala 14, un segundo elemento de medio de control de pala 15, un tercer elemento de medio de control de pala 17, un cuarto elemento de medio de control de pala 18 y un elemento aditivo 16. En la primera realización preferente las fluctuaciones en el momento de flexión de lavase, causadas por la no uniformidad del campo eólico, se tratan como alteraciones que hay que contrarrestar mediante el medio de control de pala 13. Las fluctuaciones incluyen un número de componentes y el medio de control de pala 13 concentra su esfuerzo en contrarrestar los más significativos a frecuencias más bajas; por ejemplo, los centrados en una o dos veces la frecuencia rotacional del rotor 6 con la variación estocástica de la amplitud y la fase.

El valor medido del momento de flexión fuera de plano del rotor en la base de la pala, μ_m , obtenido mediante los sensores de fibra óptica 8, y el valor medido de la aceleración hacia delante y hacia atrás del buje, α_m , obtenido mediante el sensor 9, se comunican al primer elemento de medio de control de pala 14. El primer elemento de medio de control de pala 14 modifica μ_m para compensar la aceleración hacia delante y hacia atrás del buje 4; es decir, compensa que el centro de rotación de las palas no sea fijo y la velocidad rotacional no sea constante.

El momento de flexión fuera de plano del rotor en la base de la pala corregido, μ_{mod} , se comunica al segundo elemento de medio de control de pala 15 que determina el ajuste del ángulo de paso, β_b , necesario para contrarrestar las fluctuaciones en el momento de flexión en la base, causado por la uniformidad del campo eólico. El segundo elemento de medio de control de pala 15 incluye filtros (no mostrados) para elegir, para el contrarresto, los componentes más importantes en las fluctuaciones en el μ_{mod} . Los expertos en la materia apreciarán que los filtros disponibles son bien conocidos. El segundo elemento de medio de control de pala 15 también incluye un filtro paso banda (no mostrado) con un filtro Wash-out de baja frecuencia para evitar anular el ajuste colectivo, β_{col} , que realiza el controlador centralizado 19 en el ángulo de paso de la pala 5, y con una atenuación de alta frecuencia para mitigar los efectos del ruido de alta frecuencia y dinámicas parásitas.

El medio de control de pala 13 asegura la estabilidad del sistema de compensación 12 a través del diseño del segundo elemento de medio de control de pala 15, es decir, a través del diseño de los filtros (no mostrados). Las dinámicas, de las que depende el diseño del segundo elemento de medio de control de pala 15, son las dinámicas de la pala 5, el accionador 11 y los sensores 8 y 9. Debido a la modificación realizada en μ_m por el primero elemento de medio de control de pala 14, el diseño del segundo elemento de medio de control de pala 15 no depende de ningún otro aspecto de las dinámicas de la turbina eólica.

Un elemento aditivo 16 suma β_b y un ajuste colectivo modificado, β_{colmod} , (descrito detalladamente a continuación) para determinar el ajuste total del ángulo de paso, β_t , que se comunica al tercer elemento de medio de control de pala 17. El tercer elemento de medio de control de pala 17 compensa β_t para el aspecto no lineal de la aerodinámica de la pala y proporciona una conexión y desconexión suaves del sistema de compensación. La señal del ángulo de paso de la pala de rotor compensado, β_{dem} , se comunica al accionador 11.

El ajuste colectivo del ángulo de paso, β_{col} , obtenido del controlador centralizado 19 se comunica al cuarto elemento de medio de control de pala 18. El sistema de compensación 12 introduce dinámicas adicionales entre el controlador centralizado 19 y el accionador 11. El cuarto elemento de medio de control 18 modifica las dinámicas de baja frecuencia entre el controlador centralizado 19 y el ángulo de paso para que sean las mismas que las dinámicas de un accionador de paso estándar con algún ancho de banda específico. No se necesita entonces la modificación del controlador centralizado 19 y su rendimiento no se ve afectado. La solicitud de paso colectiva modificada por el cuarto elemento de medio de control de pala 18, β_{colmed} , se comunica al elemento aditivo 16. Se puede hacer un mejor uso de las capacidades del accionador al incluir un elemento en el medio de control de pala para que sirva durante la parte casi periódica de β_{dem} . Este elemento 15 periódico de medio de control de pala (Descrito detalladamente a continuación) se situaría entre el segundo elemento de medio de control de pala 15 y el elemento aditivo 16, actuando sobre β_b .

La Figura 4 representa una segunda realización preferente del medio de control de pala 13'. Consiste en el primer elemento de medio de control de pala 14, un quinto elemento de medio de control de pala 23, el tercer elemento de medio de control de pala 17, un sexto elemento de medio de control de pala 24 y un elemento comparador 22.

El accionador 11 es un accionador de paso; es decir, provoca que el ángulo de paso actual de la pala siga un ángulo de paso solicitado. En la segunda realización preferente, el accionador 11 se convierte, en efecto, a un accionador de momento; es decir, provoca que el momento de flexión actual en la base de la pala 5 siga un momento de flexión solicitado en la base. El ángulo de paso de la pala 5 se ajusta para contrarrestar, dentro del ancho de banda del accionador de momento, las fluctuaciones del momento de flexión en la base causadas por la no uniformidad del campo eólico.

El valor medido del momento de flexión fuera de plano del rotor en la base de la pala, μ_m , obtenido mediante los sensores de fibra óptica 8, y los valores medidos de las aceleraciones y la aceleración hacia delante y hacia atrás del buje 4, α_m , obtenidos mediante el sensor 9, se comunican al primer elemento de medio de control de pala 14. El primer elemento de medio de control de pala 14 modifica a μ_m para compensar la aceleración hacia adelante y hacia atrás del buje 4; es decir, compensa que el centro de rotación de la pala 5 no sea fijo y que la velocidad rotacional no sea constante. El momento de flexión fuera de plano del rotor en la base de la pala, corregido, μ_{mod} , se comunica al elemento comparador 22. El elemento comparador 22 sustrae μ_{mod} , del momento de flexión en la base solicitado, μ_{dem} , para determinar el error del momento de flexión en la base, μ_e , que se comunica a quinto elemento de medio de control de pala 23. El quinto elemento de medio de control de pala 23 es el controlador accionador de momento que actúa para llevar μ_e a cero. Esto lo hace requiriendo que la pala 5 se incline en el ángulo apropiado, β_m . El quinto elemento de medio de control de pala 23 consiste en un controlador PI (no mostrado) junto con filtros (no mostrados) con una atenuación de alta frecuencia para mitigar los efectos de los ruidos de alta frecuencia y las dinámicas parásitas.

El medio de control de pala 13' asegura la estabilidad del sistema de actuación de pala 12 mejorado a través del diseño del quinto elemento de medio de control de pala 23, es decir, a través del diseño del controlador PI y los filtros. El diseño del quinto elemento de control de pala 23 también determina el ancho de banda del accionador de momento. Las dinámicas, de las que depende el diseño del quinto elemento de medio de control de pala 23, son las dinámicas de la pala 5, el accionador 11 y los sensores 8 y 9. Debido a la modificación realizada en μ_m por el primer elemento de medio de control de pala 14, el diseño del quinto elemento de medio de control de pala 23 no depende

de ningún otro aspecto de las dinámicas de la turbina eólica.

5 El ángulo de paso requerido, β_m , se comunica al tercer elemento de medio de control 17. El tercer elemento de medio de control 17 compensa β_m para el aspecto no lineal de la aerodinámica de la pala y proporciona una conexión y una desconexión suaves del sistema de accionador mejorado. El ajuste compensado del ángulo de paso, β_{dem} , se comunica al accionador 11.

10 El ajuste colectivo del ángulo de paso, β_{col} , obtenido del controlador centralizado 19 se comunica al sexto elemento de medio de control de pala 24. El sexto elemento de medio de control de pala 24 convierte β_{col} en el momento de flexión en la base de pala equivalente, μ_{dem} . El sistema de compensación introduce dinámicas adicionales entre el controlador centralizado 19 y el accionador 11. El sexto elemento de medio de control 24 también modifica las dinámicas entre el controlador centralizado 19 y el ángulo de paso para que sean las mismas que las dinámicas de un accionador de paso estándar con algún ancho de banda específico. No se necesita entonces ninguna modificación del controlador centralizado 19 y su rendimiento no se ve afectado. La solicitud de paso colectica modificada por el sexto elemento de medio de control 24, μ_m , se comunica al elemento comparador 22. Se puede hacer un mejor uso de las capacidades del accionador al incluir un elemento en el medio de control de pala 13' para que sirva durante la parte casi periódica de β_{dem} . Este elemento periódico del medio de control de pala 25 (descrito detalladamente a continuación) se situaría entre el quinto elemento de medio de control de pala 23 y el tercer elemento de medio de control de pala 17, actuando sobre β_m .

20 La Figura 5 representa un elemento periódico de medio de control de pala 25. Consiste en un séptimo elemento de medio de control de pala 26 y un elemento 27 aditivo. Una medición del ángulo azimut, θ_a , y β_i se comunican al séptimo elemento de medio de control de pala 26. En la primera realización preferente, β_i es β_b , y en la segunda realización preferente β_i es β_m . Usando el β_i de los ciclos precedentes, el séptimo elemento de medio de control 26 determina β_c , el ajuste casi periódico del ángulo de paso de la pala. El elemento 27 aditivo suma β_i y β_c para obtener β_o . En la primera realización preferente β_o se comunica al elemento aditivo 16, y en la segunda realización preferente β_o se comunica al elemento de medio de control de pala 17.

30 Si bien la descripción y los dibujos anteriores representan las realizaciones preferentes de la presente invención, será evidente para los expertos en la materia que varios cambios y modificaciones se pueden realizar en la misma sin desviarse del alcance de la presente invención, que se define en las reivindicaciones anexas. Por ejemplo, se apreciará que la medición de aceleración puede derivarse de una medición de velocidad diferente.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de compensación (12) para modificar independientemente una señal de ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) emitida por un controlador centralizado (19) de un sistema de control de pala de rotor para un rotor que
 5 tiene una pluralidad de palas de rotor, comprendiendo el sistema de compensación (12):
- unos primeros medios de detección (8) configurados para medir una carga (μ_m) sobre una pala de rotor (5) individual; y un medio de control de pala (13) configurado para:
- 10 recibir una señal de ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}), común a todas las palas de rotor, desde el controlador centralizado (19) del sistema de control de pala de rotor; y
 emitir una señal de ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}), basándose en la carga (μ_m) medida sobre dicha pala de rotor (5) individual y en la señal de ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) recibida, para
 15 contrarrestar la carga de pala, tanto cíclica como no cíclica, debido a la no uniformidad en un campo eólico, incluyendo turbulencias, incidente sobre dicha pala de rotor (5) individual.
- en el que el medio de control de pala (13) comprende un primer elemento de medio de control (14), determinando el primer elemento de medio de control (14) la señal de ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{col}) mediante la determinación de una carga de pala modificada (μ_{mod}) sobre la pala de rotor (5)
 20 individual, sirviendo las modificaciones de la carga (μ_m) medida para determinar la carga modificada (μ_{mod}) sobre la pala de rotor (5) individual que tiene forma de fuerzas ficticias, compensando la carga modificada (μ_{mod}) la diferencia entre un marco de referencia de origen fijo de la pala de rotor (5) que rota con el rotor (6) a velocidad rotacional constante y un marco de referencia no inercial de la pala de rotor (5) individual.
- 25 2. Un sistema de compensación (12) según la reivindicación 1, que comprende además un segundo medio de detección (9) para medir la aceleración (α_m) de dicha pala de rotor, y en el que el medio de control de pala (13) está además adaptado para determinar la carga modificada (μ_{mod}) sobre dicha pala de rotor (5), basándose en la carga (μ_m) medida y en la aceleración, de manera que la señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}) se basa en la carga de pala modificada para compensar la diferencia entre el marco de referencia de origen fijo y el
 30 marco de referencia no inercial de dicha pala de rotor.
3. Un sistema de compensación (12) según las reivindicaciones 1 o 2, en el que el medio de control de pala (13) está adaptado para determinar la señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}) basándose en un ajuste en el ángulo de paso de pala (β_b) necesario para compensar las fluctuaciones, debidas a la no uniformidad del
 35 campo eólico, en la carga de pala modificada (μ_{mod}) y en la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) recibida desde el controlador centralizado (19).
4. Un sistema de compensación (12) según las reivindicaciones 1, 2 o 3, en el que el medio de control de pala (13) está adaptado para determinar la señal (β_{dem}) del ángulo de paso de pala de rotor compensado basándose en el
 40 error (μ_e) de carga de la pala, que es la diferencia entre la carga (μ_{dem}) de pala solicitado por el controlador centralizado (19) determinada a partir de la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) recibida y la carga de pala modificada (μ_{mod}) determinada.
5. Un sistema de compensación (12) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la señal del
 45 ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}) se basa además en la compensación de aspectos no lineales de la aerodinámica de dicha la pala de rotor (5).
6. Un sistema de compensación (12) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la señal del
 50 ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}) se basa además en ajustes del ángulo de paso casi periódicos derivados de una o más rotaciones anteriores de dicha pala de rotor (5).
7. Un sistema de compensación (12) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la carga medida por el primer medio de detección (8) es el momento de flexión fuera de plano del rotor en la base (μ_m) de dicha pala de rotor.
 55
8. Un sistema de compensación (12) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el primer medio de detección es un sensor de fibra óptica (8) o una galga extensiométrica.
9. Un sistema de compensación (12) según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 8, en el que la aceleración
 60 medida por el segundo medio de detección (9) es una aceleración axial (α_m) a lo largo de un eje (7) de rotación perpendicular a un plano o una rotación de dicha pala de rotor (5).
10. Un sistema de compensación (12) según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 9, en el que el segundo
 65 medio de detección (9) es un acelerómetro.
11. Una turbina eólica (1) que comprende una pluralidad de sistemas de compensación (12, 12,...) según una

cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 y un rotor (6) que tiene una pluralidad de palas (5), estando cada sistema de compensación:

5 asociado a una pala (5) respectiva del rotor;
 adaptado para recibir la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) prevista para un control de paso colectivo de la pluralidad de palas del rotor, desde el controlador centralizado (19); y
 adaptado para emitir una señal respectiva del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}) para el control de paso independiente de su pala de rotor (5) respectiva.

10 12. Una turbina eólica (1) según la reivindicación 11, cuando depende de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 10, en la que el primer medio de detección (8) está situado en la base de cada pala de rotor (5) y el segundo medio de detección (9) está situado en el centro de rotación de las palas del rotor.

15 13. Una turbina eólica (1) según las reivindicaciones 11 o 12, que comprende además un sistema de control de pala de rotor que tiene un controlador centralizado (19) para emitir la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}).

20 14. Una turbina eólica (1) según una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, en la que cada pala (5) está conectada a un accionador (11) respectivo conectado al sistema de compensación (12) respectivo asociado para controlar el paso de la pala basándose en la señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}).

25 15. Un método para modificar independientemente una señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) emitida por un controlador centralizado (19) de un sistema de control de pala de rotor para un rotor que tiene una pluralidad de palas de rotor, que comprende las etapas de:

30 medir una carga (μ_m) en una pala de rotor (5) individual;
 recibir una señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}), común a todas las palas, desde el controlador centralizado (19) del sistema de control de pala de rotor; y
 emitir una señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}), basándose en la carga medida en dicha pala de rotor (5) individual y en la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) recibida, para contrarrestar la carga de la pala, tanto cíclica como no cíclica, debida a la no uniformidad de un campo eólico, incluyendo turbulencias, incidente sobre dicha pala de rotor,

35 en el que la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β) se determina mediante la determinación de la carga modificada (μ_{mod}) sobre la pala de rotor (5) individual, teniendo las modificaciones en la carga (μ_m) medida la forma de fuerzas ficticias, compensando la carga modificada (μ_{mod}) la diferencia entre un marco de referencia de origen fijo de la pala de rotor (5) individual que rota con el rotor (6) a velocidad rotacional constante y un marco de referencia no inercial de la pala de rotor (5) individual.

40 16. Un método según la reivindicación 15, que comprende además las etapas de:

45 medir la aceleración (α_m) de dicha pala de rotor; y
 determinar la carga modificada (μ_{mod}) sobre dicha pala de rotor (5), basándose en la carga (μ_m) medida y en la aceleración, de manera que la señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}) se basa en la carga de pala modificada para compensar la diferencia entre los marcos de referencia de origen fijo y no inercial de dicha pala de rotor.

17. Un método según las reivindicaciones 15 o 16, que además comprende la etapa de:

50 determinar la señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}) basándose en el ajuste del ángulo de paso de pala (β_b) necesario para compensar fluctuaciones, debidas a la no uniformidad en el campo eólico, en la carga de pala modificada (μ_{mod}) y en la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) recibida desde el controlador centralizado (19).

55 18. Un método según las reivindicaciones 15, 16 o 17, que comprende además la etapa de:

60 determinar la señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}), basándose en el error de carga de la pala (μ_e) que es la diferencia entre la carga de la pala (μ_{dem}) solicitada por el controlador centralizado (19), determinada a partir de la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}) recibida, y la carga de pala modificada (μ_{mod}) determinada.

65 19. Un medio de control de pala (13) para usar en el sistema de compensación (12) de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, el medio de control de pala (13) configurado para:

recibir una señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{col}), común a todas las palas de rotor (5), desde el controlador centralizado (19) del sistema de control de pala de rotor; y
 emitir una señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}), basándose en una carga (μ_m) medida

en dicha pala de rotor (5) individual y en la señal del ángulo de paso de pala de rotor (β_{dem}) recibida, para contrarrestar la carga de la pala, tanto cíclica como no cíclica, debido a la no uniformidad de un campo eólico, incluyendo turbulencias, incidente sobre dicha pala de rotor (5),

- 5 en el que el medio de control de pala (13) comprende un primer elemento de medio de control (14), determinando el primer elemento de medio de control (14) la señal del ángulo de paso de pala de rotor compensado (β_{dem}) mediante la determinación de una carga de pala modificada (μ_{mod}) sobre la pala de rotor (5) individual, teniendo las modificaciones en la carga medida la forma de fuerzas ficticias, compensando la carga modificada (μ_{mod}) la diferencia entre un marco de referencia de origen fijo de la pala de rotor (5) individual que rota con el rotor (6) a
- 10 velocidad rotacional constante, y un marco de referencia no inercial de la pala de rotor (5) individual.

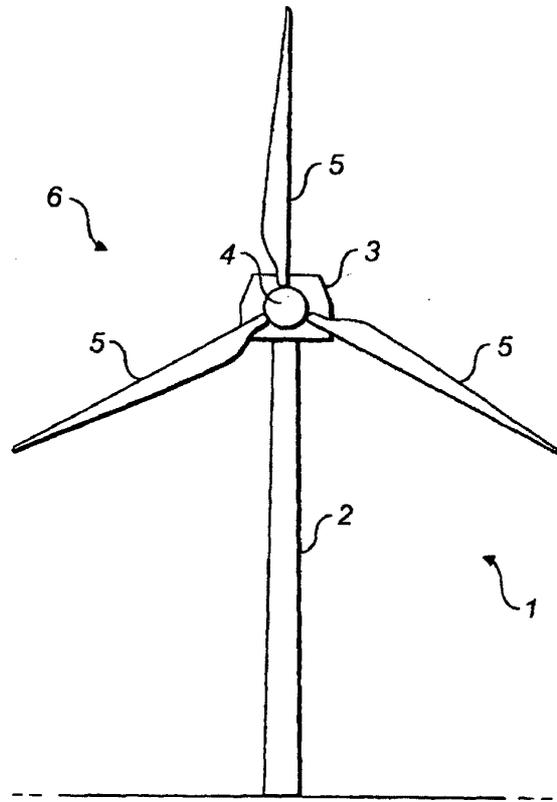


FIG. 1

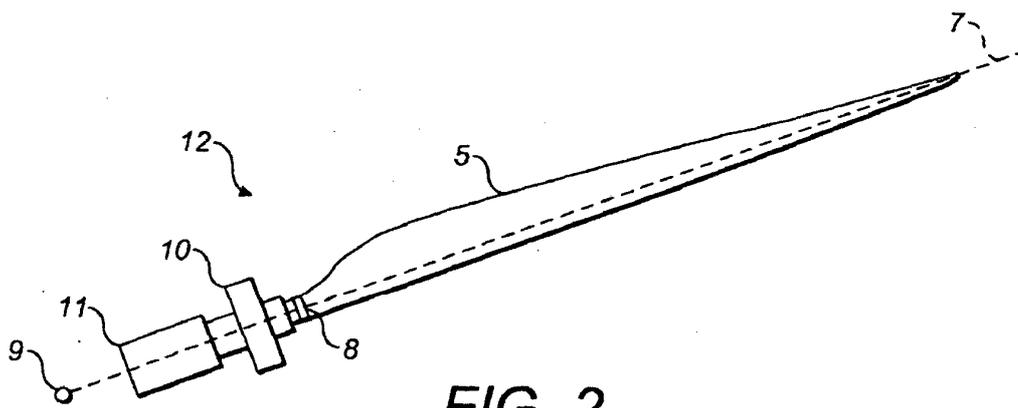


FIG. 2

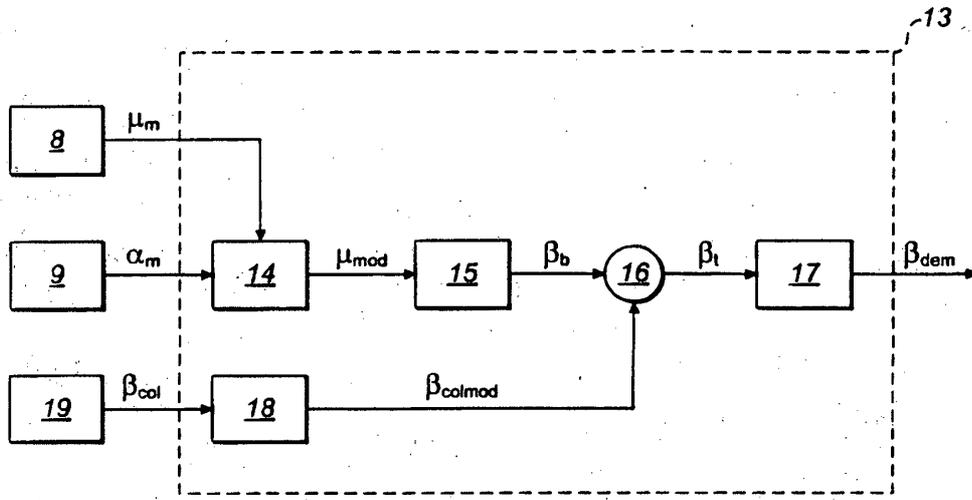


FIG. 3

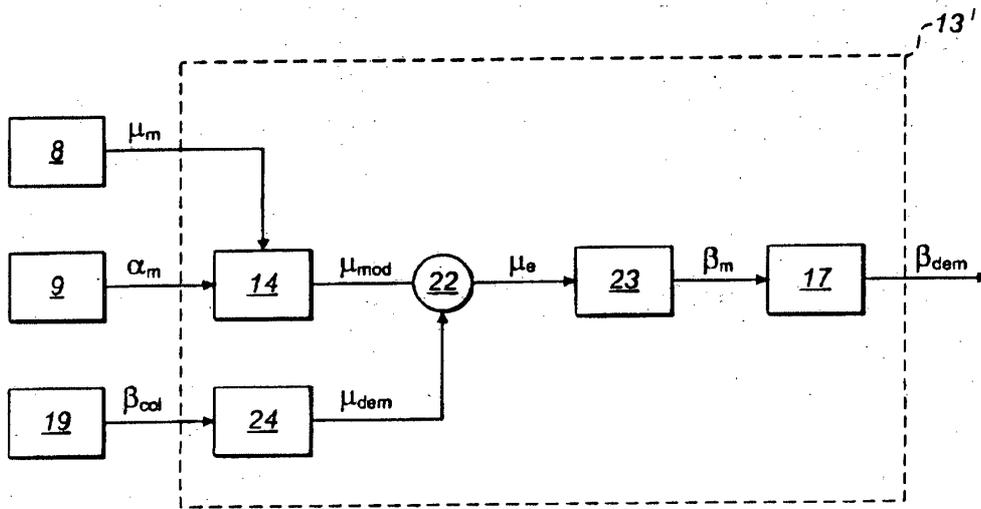


FIG. 4

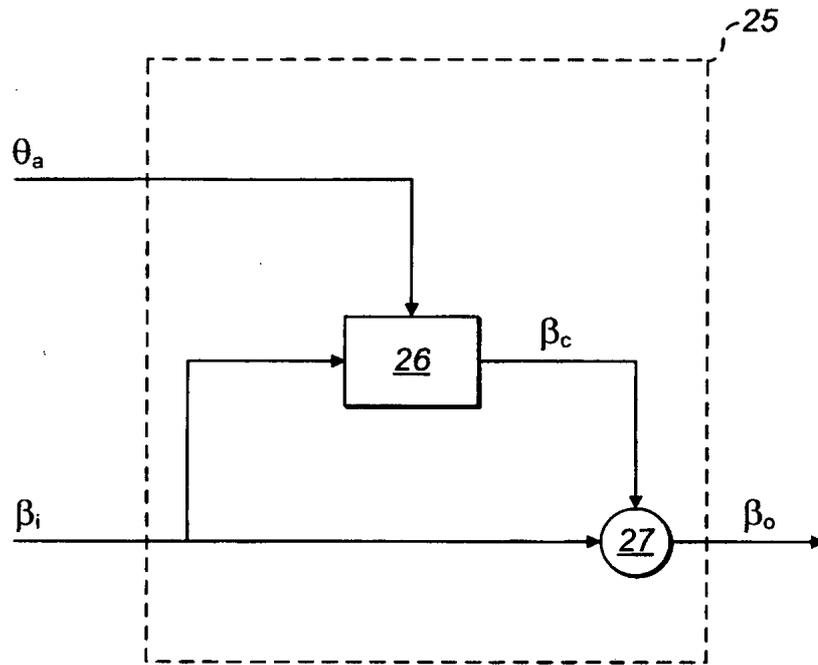


FIG. 5