

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 743 942**

51 Int. Cl.:

F03D 17/00 (2006.01)

F03D 13/20 (2006.01)

F03D 9/25 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.06.2015 PCT/DK2015/050146**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.01.2016 WO16004950**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.06.2015 E 15728398 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2019 EP 3167185**

54 Título: **Promoción activa de oscilaciones de la torre de turbinas eólicas**

30 Prioridad:

09.07.2014 DK 201470429

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

21.02.2020

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**CAPONETTI, FABIO;
COUCHMAN, IAN;
GRUNNET, JACOB DELEURAN;
ARISTON, ILIAS KONSTANTINOS y
CHRISTENSEN, POUL BRANDT**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 743 942 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

Promoción activa de oscilaciones de la torre de turbinas eólicas

5 Campo de la invención

La invención se refiere a la determinación de parámetros estructurales de una turbina eólica, particularmente a la determinación de parámetros asociados con las propiedades de amortiguación de una turbina eólica.

10 Antecedentes de la invención

Las propiedades dinámicas de las turbinas eólicas tales como las frecuencias de resonancia y coeficientes de amortiguación dependen de las condiciones de operación de las turbinas eólicas tales como velocidad del viento, propiedades de la fundación, propiedades del terreno y otras condiciones.

15 La fatiga de las partes de una turbina eólica y, por lo tanto, la vida útil de una turbina eólica puede depender de dichas propiedades dinámicas.

20 Puede ser importante que el propietario de una turbina eólica sea capaz de determinar cambios en la vida útil esperada de la turbina eólica debido a cambios en las propiedades dinámicas, por ejemplo para calcular el beneficio esperado de la inversión de la turbina eólica.

25 En consecuencia, existe una necesidad para la determinación de las propiedades dinámicas y cambios en las propiedades dinámicas de las turbinas eólicas.

30 El documento EP2103915A1 divulga un aparato para determinar una frecuencia de resonancia de una torre de turbina eólica, que comprende una unidad de procesamiento configurada para recibir un valor de la medida de aceleración, siendo representativo dicho valor de la medida de aceleración de la aceleración de la torre de la turbina eólica en la dirección paralela al eje de rotación del rotor de la turbina eólica y/o en la dirección perpendicular tanto al eje de rotación del rotor como al eje de la torre de la turbina eólica. La unidad de procesamiento comprende un módulo de transformada de Fourier configurado para calcular un vector espectral y un módulo de cálculo de la frecuencia de resonancia configurado para calcular la frecuencia de resonancia de la torre basándose en el vector espectral calculado.

35 El documento US 2012/139740 A1 divulga un método para supervisión de una estabilidad estática y/o dinámica de una turbina eólica. El método incluye la etapa de excitar la turbina eólica para que oscile en al menos una dirección y detectar una frecuencia de la oscilación excitada. La torre se excita para oscilar mediante el ajuste de un ángulo de paso de palas de al menos una pala del rotor con una tasa de ajuste del paso de palas suficientemente alta para que la torre oscile.

40 Los inventores de la presente invención han apreciado que sería de beneficio un método mejorado para determinar las propiedades dinámicas de las turbinas eólicas y han concebido en consecuencia la presente invención.

Sumario de la invención

45 Es un objeto de la invención proporcionar un método para la determinación de parámetros estructurales de una turbina eólica, particularmente para la determinación de parámetros asociados con las propiedades de amortiguación de una turbina eólica.

50 En un primer aspecto de la invención se proporciona un método para la operación de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica una torre y un rotor con al menos una pala de rotor, estando conectado el rotor a la torre y estando adaptado para accionar un generador, en el que es ajustable un ángulo de paso de cada pala del rotor, el método comprende

55 promover activamente oscilaciones de torre de la torre hasta un umbral de oscilación predefinido y cuando se alcanza el umbral de oscilación predefinido se detiene la promoción activa de las oscilaciones de la torre; determinar al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la torre.

60 Ventajosamente, al promover activamente oscilaciones puede ser posible determinar los parámetros físicos bajo demanda. Adicionalmente, al promover activamente oscilaciones puede ser posible determinar las propiedades físicas en respuesta a un decaimiento de las oscilaciones.

65 En una realización la turbina eólica se opera para amortiguar activamente las oscilaciones de la torre, en el que el al menos un parámetro físico se determina sobre la base de un decaimiento de las oscilaciones provocado por la amortiguación activa de las oscilaciones.

Puede ser una ventaja determinar los parámetros físicos sobre la base de la amortiguación activa para caracterizar los parámetros físicos de la turbina eólica en situaciones de amortiguación activa.

5 En una realización el al menos un parámetro físico se determina sobre la base de un decaimiento de las oscilaciones producida por la amortiguación pasiva a las oscilaciones.

La amortiguación pasiva puede ser producida por la amortiguación natural de la estructura de la turbina eólica en sí, pero puede incluir también amortiguadores pasivos tales como un péndulo de amortiguación o una masa amortiguadora ajustada, también conocido como absorbente armónico.

10 Puede ser una ventaja determinar los parámetros físicos sobre la base de la amortiguación activa como una alternativa, o adicionalmente para determinar los parámetros sobre la base de la amortiguación activa para caracterizar los parámetros físicos de la turbina eólica en diferentes situaciones de amortiguación. Por ejemplo, en una situación en la que la turbina eólica se desconecta de la red, por ejemplo debido a un daño, puede ser importante tener la capacidad de determinar los parámetros físicos, por ejemplo parámetros de amortiguación pasiva, para estimar cambios en la vida útil de la turbina eólica. Esto puede ser particularmente importante para las turbinas eólicas marinas dado que puede necesitarse un largo tiempo antes de que se lleve a cabo la reparación, por ejemplo debido a condiciones desfavorables del mar y el viento. Dado que solo puede estar disponible la amortiguación pasiva para una turbina eólica marina desconectada de la red debido a un fallo, puede ser importante conocer los parámetros de amortiguación pasiva para determinar cómo es afectada la vida útil de la turbina eólica hasta que pueda llevarse a cabo la reparación.

25 De acuerdo con la invención las oscilaciones de la torre se promueven mediante el ajuste del ángulo de paso de una pala del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre. En otra realización, también de acuerdo con la invención, se promueven las oscilaciones de la torre mediante el ajuste de un par del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre. También, la promoción de las oscilaciones se realiza durante la operación normal de la turbina eólica mediante la introducción de ajustes en el paso y/o el par del rotor. Los ajustes se introducen mediante la superposición de una señal de paso y/o señal de par del rotor sobre las señales de operación normales.

30 El ajuste del ángulo de paso de una pala del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre puede implicar el ajuste de una de entre una pluralidad de palas del rotor, ajustar dos o más de la pluralidad de palas del rotor o ajustar todas las palas del rotor.

35 En una realización las oscilaciones de la torre se promueven mediante el ajuste del ángulo de paso cuando un parámetro relativo a la velocidad del viento está por encima de un punto de operación y en el que las oscilaciones de la torre se promueven mediante el ajuste del par del rotor cuando el parámetro relativo a la velocidad del viento está por debajo del punto de operación.

40 Ventajosamente, las oscilaciones pueden promoverse más eficientemente mediante ajustes del paso a velocidades del viento relativamente altas y más eficientemente mediante ajustes del par del rotor a velocidades del viento relativamente bajas. El punto de operación puede definirse como la velocidad del viento nominal.

45 En una realización la amortiguación activa de las oscilaciones de la torre se obtiene mediante el ajuste del ángulo de paso de una pala del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre que se opone a la oscilación. En otra realización la amortiguación activa de las oscilaciones de la torre se obtiene mediante el ajuste de un par del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre que se opone a la oscilación.

50 En una realización las etapas de promover activamente oscilaciones de la torre y determinar el al menos un parámetro físico relacionado con las oscilaciones de la torre se realiza en momentos predeterminados. Ventajosamente, mediante la determinación de los parámetros físicos en momentos predeterminados puede conseguirse que los parámetros se actualicen regularmente.

55 En una realización las etapas de promover activamente las oscilaciones de la torre y determinar el al menos un parámetro físico relativo a las oscilaciones de la torre se realiza en respuesta a una aparición de un evento. La determinación del parámetro físico basada en el evento puede ser una ventaja para obtener los parámetros físicos dependientes de diferentes eventos.

60 En una realización se define que ocurre el evento cuando uno o más parámetros asociados con la operación de la turbina eólica cumplen una condición de operación predefinida y en el que la aparición del evento depende del número de veces que el al menos un parámetro físico se ha determinado previamente para la condición de operación y/o depende de cuando el al menos un parámetro físico se determinó más recientemente para la condición de operación.

65 Ventajosamente, mediante la determinación de los parámetros físicos dependientes de condiciones de operación predefinidas, puede ser posible determinar un mapa de parámetros físicos que dependen de dichas condiciones de operación.

Adicionalmente, como una condición opcional para la aparición del evento, puede utilizarse el número de veces que se ha determinado un parámetro físico y/o el tiempo desde que se determinó más recientemente el parámetro físico para la condición de operación, para evitar que se determine un parámetro físico demasiado frecuentemente y para asegurar que los parámetros físicos pueden determinarse para eventos que ocurren raramente.

En una realización no parte de la invención el al menos un parámetro físico relativo a la oscilación de la torre se determina mediante un método que no implica promover activamente oscilaciones de la torre, en el que el evento se define que ocurre cuando el al menos un parámetro físico determinado, determinado mediante un método que no implica promover activamente oscilaciones de la torre, cumple una condición predefinida.

Ventajosamente, este método permite la supervisión continua de estimaciones de uno o más parámetros físicos y en caso de que uno o más parámetros físicos estén fuera de un intervalo predeterminado, entonces puede realizarse una determinación más precisa de los parámetros físicos mediante la promoción activa de oscilaciones.

En general la aparición de un evento (definido de acuerdo con los parámetros estimados, condiciones de operación u otras condiciones) puede condicionarse aún más por el número de veces que el al menos un parámetro físico se ha determinado previamente para el elemento (por ejemplo un parámetro estimado que cae fuera de un intervalo predeterminado) y/o dependiendo de cuándo el al menos un parámetro físico se determinó más recientemente para el evento.

En una realización un parámetro de un circuito de control o filtro de la turbina eólica se actualiza de acuerdo con el al menos un parámetro físico.

La invención se refiere también a un 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 para llevar a cabo las etapas de acuerdo con cualquiera de los diversos aspectos de la presente invención.

Un segundo aspecto de la invención se refiere a un sistema de control de turbina eólica para la operación de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica una torre y un rotor con al menos una pala de rotor, estando conectado el rotor a la torre y estando adaptado para accionar un generador, en el que es ajustable un ángulo de paso de cada pala del rotor, el sistema de control comprende

un controlador configurado para promover activamente oscilaciones en la torre hasta un umbral de oscilación predefinido, y configurado para detener la promoción activa de las oscilaciones de la torre cuando se alcanza el umbral de oscilación predefinido;
 en el que el controlador se configura adicionalmente para promover las oscilaciones durante la operación normal de la turbina eólica mediante ajustes en las señales del paso y/o del par del rotor mediante la superposición de una señal de paso y/o señal de par del rotor sobre la señal de paso y/o señales de par del rotor de operación normal;
 una unidad de procesamiento configurada para determinar al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la torre.

Un tercer aspecto de la invención se refiere a una turbina eólica que comprende

una torre y un rotor con al menos una pala de rotor, estando conectado el rotor a la torre y estando adaptado para accionar un generador, en el que es ajustable un ángulo de paso de cada pala del rotor y un sistema de control de turbina eólica de acuerdo con el segundo aspecto.

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

Breve descripción de los dibujos

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

la Fig. 1 muestra una turbina eólica,
 la Fig. 2 muestra un sistema de control de turbina eólica configurado para controlar una turbina eólica, y
 la Fig. 3 muestra oscilaciones de la torre en una señal de aceleración medida en función del tiempo.

Descripción de realizaciones

La Fig. 1 muestra una turbina eólica 100 que comprende una torre 101 y un rotor con al menos una pala de rotor 103, estando conectado el rotor a una góndola 102 que se monta en la parte superior de la torre 101 y que está adaptado para accionar un generador situado dentro de la góndola. El conjunto de rotor de las palas del rotor 103 es

giratorio mediante la acción del viento. La energía rotacional de las palas del rotor 103 inducida por el viento se transfiere a través de un árbol al generador. De ese modo, la turbina eólica 100 es capaz de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica por medio de las palas del rotor y, posteriormente, en energía eléctrica por medio del generador. En este documento puede hacerse referencia también a la turbina eólica 100 con la abreviatura común WTG (del inglés "Wind Turbine Generator" o generador de turbina eólica).

El paso o posición angular de cada una de las palas del rotor es ajustable alrededor de la dirección longitudinal de las palas.

El paso puede ajustarse, por medio de actuadores del paso, para modificar las propiedades aerodinámicas de las palas y, de ese modo, en cómo de eficientemente se convierte la energía cinética del viento en energía mecánica.

La velocidad de rotación del rotor puede controlarse mediante el control de la carga del par del generador sobre el árbol.

La torre puede estar influida por el viento y otros efectos para oscilar en direcciones laterales, es decir en direcciones transversales y/o de adelante atrás. Generalmente, la oscilación puede tener un componente 111 perpendicular al eje de la torre y que se dispone en el plano del rotor (oscilaciones transversales) y un componente 112 perpendicular al plano del rotor (oscilaciones de adelante atrás).

Las oscilaciones de la torre, es decir las oscilaciones laterales de la torre, pueden describirse (en una forma simplificada) por la ecuación

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F$$

en la que x es el desplazamiento variable que describe el desplazamiento lateral, \dot{x} es la velocidad de desplazamiento, \ddot{x} es la aceleración del desplazamiento, M es una masa, C es un coeficiente de amortiguación, K es un coeficiente de rigidez y F es una fuerza que actúa sobre la torre en una dirección lateral. F puede tener componentes que promueven las oscilaciones y componentes que amortiguan las oscilaciones. El vector de desplazamiento x puede ser un vector que contiene desplazamientos en dos o más direcciones, por ejemplo correspondientes a los componentes de desplazamiento 111 y 112.

La Fig. 2 muestra un sistema de control 200 de una turbina eólica (WTG) configurado para controlar una turbina eólica 100. El sistema de control 200 de la WTG puede comprender una o más de las siguientes unidades: un controlador 201, una unidad de procesamiento 202 y una unidad de planificación 203. El controlador 201 tiene una entrada para recibir una señal de aceleración AC de la torre, una entrada para recibir una señal de referencia REF y una salida para suministrar una señal de control U a la turbina eólica. El sistema de control 200 de la turbina eólica puede situarse en la turbina eólica 100.

La señal de aceleración AC representa una medición de la aceleración del desplazamiento \ddot{x} de las oscilaciones de la torre. Por ejemplo, la señal de aceleración AC puede estar en la forma de una aceleración \ddot{x} , una velocidad \dot{x} , un desplazamiento x u otra señal que representa las oscilaciones de la torre. La aceleración del desplazamiento puede medirse mediante un acelerómetro localizado, por ejemplo, en la góndola 102 o en la parte superior de la torre 101. El acelerómetro puede configurarse para medir la aceleración en una o más direcciones, por ejemplo las direcciones 111, 112 en la Fig. 1.

El controlador 201 se configura para generar una señal de control U para el control de un dispositivo controlable 211 de la turbina eólica con la finalidad de controlar las oscilaciones de la torre, es decir las oscilaciones laterales de la torre. El controlador 201 puede configurarse como un controlador de realimentación que genera la señal de control U para controlar las oscilaciones de la torre, mediante el uso del dispositivo controlable, de modo que minimice la diferencia entre la señal de referencia REF y la señal de aceleración AC, por ejemplo la diferencia entre la señal de referencia REF y una amplitud de la señal de aceleración AC.

Las oscilaciones de la torre pueden controlarse mediante el ajuste del ángulo de paso de una o más de las palas del rotor 103 para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre. En consecuencia, el dispositivo controlable 211 puede ser un sistema de control del paso de una turbina eólica que sea capaz de ajustar el paso de una o más palas del rotor 103. El ajuste del paso para las palas comúnmente implica un cambio en el empuje, es decir un cambio en la fuerza que actúa de adelante atrás sobre las palas en la dirección de adelante atrás 112. Es posible el ajuste individualmente del paso de las palas en función de la posición angular de las palas para generar fuerzas que actúen sobre las palas que se sumen para generar una fuerza que actúe en la dirección transversal 111.

Alternativa o adicionalmente, las oscilaciones de la torre pueden controlarse mediante el ajuste de un par del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre. El par del rotor puede ajustarse mediante el control de la carga del par del generador sobre el árbol, por ejemplo mediante el control de un convertidor de potencia conectado a la salida de potencia del generador para extraer más o menos potencia del generador. El control del generador para producir más potencia ralentiza el rotor y el control del generador para producir menos potencia acelera el rotor. Es

decir el par del rotor puede ajustarse mediante el ajuste de la referencia de potencia del generador o convertidor de potencia. En consecuencia, el dispositivo controlable 211 puede realizarse por el sistema del generador del controlador de la turbina eólica que es capaz de ajustar el par del rotor. El ajuste del par del rotor genera cambios en la velocidad del rotor lo que genera cambios en la fuerza transversal que actúa en la dirección transversal 111, es decir perpendicular al eje de la torre y que se dispone en el plano del rotor.

Las oscilaciones de la torre pueden controlarse mediante otros dispositivos controlables 211 instalados en la turbina eólica y configurados para generar fuerzas de oscilación de la torre. Por ejemplo, las oscilaciones pueden controlarse mediante un dispositivo configurado con dos masas desequilibradas en contra-rotación tal como se describe en el documento EP2167748B1.

El control de las oscilaciones de la torre puede incluir la promoción y/o amortiguación de las oscilaciones de la torre. Las oscilaciones de la torre pueden promoverse y/o amortiguarse de una forma controlada por medio del controlador 201.

El controlador 201 puede configurarse para promover activamente oscilaciones de torre en la torre hasta un umbral de oscilación de la torre predefinido, y configurarse para detener la promoción activa de las oscilaciones de la torre cuando se alcanza el umbral de oscilación predefinido.

En consecuencia, el controlador 201 puede configurarse para generar una señal de control U para el dispositivo controlable 211 para la promoción de oscilaciones de la torre. Por ejemplo, para promover oscilaciones el dispositivo controlable puede generar una fuerza F proporcional a $-x$ y tener una amplitud igual a o mayor que c. El controlador 201 puede configurarse como controlador P en el que la señal de control U se hace proporcional a la integral en el tiempo de la señal de aceleración AC, es decir de modo que $U = K \int \ddot{x} dt$, en donde K es la ganancia del controlador P.

Las oscilaciones de la torre pueden promoverse mediante el ajuste del ángulo de paso de una pala del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre. Alternativa o adicionalmente, las oscilaciones de la torre pueden promoverse mediante el ajuste de un par del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre. El ajuste del ángulo de paso o del par puede realizarse mediante el uso del controlador 201 o de otro controlador.

En lugar del uso de o bien el control del paso o bien el control del par del rotor, la promoción de las oscilaciones de la torre puede obtenerse también mediante una combinación del ajuste del ángulo de paso de una pala del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre y el ajuste de un par del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre. Adicionalmente, otros dispositivos controlables 211, tales como el dispositivo configurado con dos masas desequilibradas en contra-rotación, pueden combinarse con el control del paso, el control del par o tanto con el control del paso como con el control del par para promover oscilaciones.

La promoción de las oscilaciones de la torre mediante el uso del control del paso es más eficiente para velocidades del viento relativamente altas, mientras que la promoción de las oscilaciones de la torre mediante el uso del control del par del rotor es más eficiente para velocidades del viento relativamente bajas. Por lo tanto, el sistema de control 200 de la WTG puede configurarse para promover oscilaciones de la torre mediante el ajuste del ángulo de paso cuando un parámetro relativo a la velocidad del viento está por encima de un punto de operación y para promover oscilaciones de la torre mediante el ajuste del par del rotor cuando el parámetro relativo a la velocidad del viento está por debajo del punto de operación. Durante la operación a carga parcial, cuando la velocidad del viento es relativamente baja, el paso se ajusta finamente para adaptarse a la posición de paso de "potencia óptima", de modo que se extraiga tanta potencia como sea posible del viento. En operación a plena carga, la potencia transportada por el viento es más alta que la que puede generar la turbina. Por ello, para mantener la velocidad de rotación y la salida de potencia reguladas, la efectividad aerodinámica de las palas ha de reducirse mediante la regulación del paso de la palas a resguardo del viento.

Cuando se regula el paso de las palas a resguardo del viento, el uso de los ajustes de paso para controlar las oscilaciones de la torre se hace más efectivo.

En consecuencia, el punto de operación puede corresponder aproximadamente al nivel de velocidad del viento que separa la operación parcial y la de plena carga de la turbina eólica, es decir la velocidad del viento nominal.

En general, el punto de operación puede definirse por al menos uno de entre una velocidad del viento, un paso de referencia colectivo, una potencia producida por el generador, potencia nominal, un par generado y una velocidad del generador.

La unidad de procesamiento 202 se configura para determinar al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la torre.

Los parámetros físicos con relación a la oscilación de la torre se refieren en general a propiedades estructurales de la turbina eólica, incluyendo propiedades de la fundación, que influyen en la dinámica de la oscilación, por ejemplo

propiedades de amortiguación y frecuencias de resonancia. Por ejemplo, una propiedad física podría ser un coeficiente de amortiguación o una frecuencia de resonancia.

5 El parámetro físico podría determinarse basándose en la señal de aceleración AC, por ejemplo la señal de
 6 aceleración medida \ddot{x} o una señal derivada de la misma tal como el desplazamiento de la torre x en la oscilación de
 7 la torre. Por ejemplo, el coeficiente de amortiguación podría determinarse analizando un decaimiento de las
 8 aceleraciones de la torre, es decir un decaimiento de la amplitud de la aceleración en la aceleración de
 9 desplazamiento lateral de la torre \dot{x} , que tiene lugar posteriormente a detener la promoción activa de las oscilaciones
 10 de la torre. La frecuencia de resonancia puede determinarse mediante el análisis del contenido espectral de las
 11 oscilaciones de la torre.

12 La unidad de procesamiento 202 puede ser una unidad de procesamiento interna compuesta por la turbina eólica
 13 100 de modo que la determinación de al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la torre se realiza
 14 mediante la instrucción a una unidad de procesamiento 202 de la turbina eólica 100 para el cálculo del al menos un
 15 parámetro físico.

16 Alternativamente, la unidad de procesamiento 202 puede ser una unidad de procesamiento externa, por ejemplo una
 17 unidad de procesamiento de una planta de turbina eólica configurada para recibir datos desde una pluralidad de
 18 turbinas eólicas. En este caso la determinación del al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la
 19 torre se realiza mediante la instrucción a la unidad de procesamiento externa desde la turbina eólica 100 para
 20 calcular el al menos un parámetro físico.

21 Para generar un decaimiento de las aceleraciones de la torre \ddot{x} , puede operarse la turbina eólica para amortiguar
 22 activamente las oscilaciones de la torre, de modo que puede determinarse el al menos un parámetro físico
 23 basándose en un decaimiento de las oscilaciones provocadas por la amortiguación activa de las oscilaciones.
 24

25 La turbina eólica puede operarse para amortiguar activamente las oscilaciones de la torre mediante el uso del
 26 controlador 201 para generar una señal de control U para el dispositivo controlable 211 para amortiguar oscilaciones
 27 de la torre. Por ejemplo, para amortiguar oscilaciones de la torre el dispositivo controlable debería generar una
 28 fuerza F proporcional a \dot{x} de modo que se incremente el coeficiente de amortiguación c.
 29

30 En consecuencia, puede usarse la misma configuración del controlador 201, por ejemplo la configuración como un
 31 controlador P en el que $U = K \int \dot{x} dt$, tanto para promover aceleraciones de la torre como para amortiguar
 32 aceleraciones de la torre, en el que el signo de K es positivo en el caso de promover oscilaciones de la torre y
 33 negativo en el caso de amortiguación activa de las oscilaciones de la torre.
 34

35 En consecuencia, mediante el uso del controlador 201 u otro controlador adecuado puede obtenerse la
 36 amortiguación activa de las oscilaciones de la torre mediante el ajuste del ángulo de paso de una pala del rotor para
 37 imponer una fuerza de oscilación sobre la torre que se oponga a la oscilación, alternativa o adicionalmente mediante
 38 el ajuste de un par del rotor (mediante el control del generador de potencia) para imponer una fuerza de oscilación
 39 sobre la torre que se ponga a la oscilación.
 40

41 En lugar de usar o bien el control de paso o bien el control del par del rotor, la amortiguación activa de las
 42 oscilaciones de la torre puede obtenerse también mediante una combinación del ajuste del ángulo de paso de una
 43 pala del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre que se opone a las oscilaciones y mediante el
 44 ajuste del par del rotor para imponer una fuerza de oscilación sobre la torre que se opone a la oscilación.
 45 Adicionalmente, pueden combinarse otros dispositivos controlables 211 con el control del paso, control del par o
 46 tanto con el control del paso como con el control del par para amortiguar oscilaciones.
 47

48 La operación de la turbina eólica para amortiguar activamente oscilaciones de la torre puede facilitarse por otros
 49 medios distintos al controlador 201 y por otros dispositivos controlables 211 distintos a los sistemas de paso y
 50 generador, por ejemplo el dispositivo configurado con dos masas desequilibradas en contra-rotación.

51 Alternativamente, el al menos un parámetro físico puede determinarse basándose en un decaimiento de las
 52 oscilaciones provocadas por una amortiguación pasiva de las oscilaciones. En consecuencia, después de que se
 53 detenga la promoción activa de las oscilaciones de la torre, puede usarse la amortiguación pasiva provocada por la
 54 amortiguación natural de la turbina eólica o la amortiguación pasiva provocada por ejemplo por un péndulo de
 55 amortiguación para generar el decaimiento.

56 En consecuencia, las etapas para la operación de la turbina eólica 100 puede comprender una o más etapas de:

- 57 - promover activamente oscilaciones de torre de la torre, por ejemplo hasta un umbral de oscilación predefinido,
- 58 - detener la promoción activa de las oscilaciones de la torre, por ejemplo cuando se alcanza un umbral de
 59 oscilación predefinido,
- 60 - amortiguar las oscilaciones de la torre mediante amortiguación activa o pasiva y
- 61 - determinar al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la torre basándose en un decaimiento de

las oscilaciones provocada por la amortiguación activa o pasiva.

La Fig. 3 muestra oscilaciones de la torre en una señal de aceleración medida \ddot{x} 301 en función del tiempo. Inicialmente, hasta el momento $t=0$, la oscilación de la torre es promovida hasta una amplitud de 1 m/s^2 . Después de $t=0$, las oscilaciones decaen debido tanto a la amortiguación activa, tal como se muestra a lo largo de la curva de decaimiento activo 311, como de la amortiguación pasiva, tal como se muestra a lo largo de la curva de decaimiento pasivo 312. Los parámetros de decaimiento que caracterizan las capacidades de amortiguación activa pueden determinarse a partir de la curva de decaimiento activo 311 y los parámetros de decaimiento que caracterizan las capacidades de amortiguación pasiva pueden determinarse a partir de la curva de decaimiento pasivo 312. Otros parámetros físicos tales como las frecuencias de oscilación, pueden determinarse a partir de la señal de aceleración, por ejemplo mediante la realización de un análisis FFT.

El sistema de control de la WTG 200 u otra unidad puede configurarse para realizar las etapas de promover activamente oscilaciones de la torre y determinar el al menos un parámetro físico con relación a las oscilaciones de la torre en momentos predeterminados, por ejemplo una vez a la semana o así y/o en respuesta a una aparición de un evento.

Los parámetros físicos pueden cambiar a lo largo del tiempo. Por ejemplo, una fundación o propiedades del terreno de turbinas eólicas marinos pueden cambiar a lo largo del tiempo y, por lo tanto, las propiedades de amortiguación pueden cambiar también a lo largo del tiempo. En consecuencia, puede ser importante comprobar por ejemplo los parámetros de amortiguación en tiempos o intervalos predeterminados.

Adicionalmente, los parámetros físicos, tal como los parámetros de amortiguación, pueden depender de parámetros de operación de la turbina eólica y, por lo tanto, puede ser importante comprobar los parámetros físicos dependientes de parámetros de operación, por ejemplo dependientes de un evento definido en términos de parámetros de operación.

Un evento puede relacionarse con un parámetro de operación asociado con la operación de la turbina eólica. Ejemplos de parámetros de operación comprenden la velocidad del viento, intensidad de turbulencia del viento, estela/no estela, altura de la ola en caso de turbinas eólicas marinas, puntos de consigna de velocidad del rotor, puntos de consigna de potencia del convertidor de potencia y condiciones de hielo en el rotor. Por ejemplo, puede definirse que ocurre un evento cuando la velocidad del viento corresponde a uno o más valores de velocidad del viento predefinidos. En general, puede definirse que ocurre un evento cuando uno o más parámetros de operación asociados con la operación de la turbina eólica cumplen una condición de operación predefinida como por ejemplo valores predefinidos de los diferentes parámetros de operación.

En consecuencia, el sistema de control de la WTG 200 u otra unidad puede configurarse para determinar los parámetros físicos con relación a las oscilaciones de la torre en respuesta a que ocurre un evento definido cuando uno o más parámetros de operación asociados con la operación de la turbina eólica cumplen una condición de operación predefinida.

Adicionalmente, la aparición del evento puede depender del número de veces que se ha determinado previamente el al menos un parámetro físico para la condición de operación y/o dependiendo de cuándo se determinó el al menos un parámetro físico más recientemente para la condición de operación. Esta condición puede ser opcional.

Por ejemplo, si se determinó un parámetro físico más de dos veces dentro de un período dado para un valor dado de un parámetro de operación, ese parámetro físico puede considerarse que es válido de modo que no se realiza un ensayo del parámetro físico para ese valor del parámetro de operación.

Los parámetros físicos determinados pueden almacenarse en una tabla o como una función de diferentes condiciones o eventos de operación.

De acuerdo con una realización que no es parte de la invención, el al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la torre puede determinarse por otros métodos que no implican promover activamente oscilaciones de la torre de acuerdo con realizaciones de la invención. Por ejemplo, el coeficiente de amortiguación puede determinarse mediante el análisis de un espectro de amplitudes obtenido, por ejemplo, mediante la determinación de amplitudes de oscilación de la torre que tienen lugar naturalmente a partir de FFT de un espectro de amplitud. El análisis puede incluir la determinación de la frecuencia de resonancia como la frecuencia del pico del espectro de amplitud más bajo y la amortiguación puede determinarse a partir del pico más bajo mediante el uso del bien conocido método de la mitad de potencia.

Los parámetros físicos determinados por el método alternativo pueden considerarse como estimaciones de los parámetros físicos. Si dicho parámetro físico estimado cae fuera de un intervalo predeterminado, puede activarse el sistema de control 200 de la WTG para determinar un parámetro físico más preciso.

En consecuencia, puede definirse también que ocurre un evento cuando el al menos un parámetro físico

determinado, determinado mediante un método que no implica promover activamente oscilaciones de la torre, cumple una condición predefinida.

5 El al menos un parámetro físico determinado de acuerdo con una realización de la invención puede usarse para actualizar un parámetro de un circuito de control o filtro de la turbina eólica 100, por ejemplo un filtro en ranura usado para filtrar oscilaciones de la torre. Por ejemplo, pueden devolverse filtros selectivos sobre la base del parámetro físico para extraer la frecuencia natural de la torre para amortiguación activa de la torre.

10 Mientras que la invención se ha ilustrado y descrito en detalle en los dibujos y descripción precedente, dicha ilustración y descripción ha de considerarse ilustrativa o ejemplar y no restrictiva; la invención no está limitada a las realizaciones divulgadas. Pueden entenderse y efectuarse por los expertos en la materia otras variaciones de las realizaciones divulgadas en la puesta en práctica de la invención reivindicada, a partir del estudio de los dibujos, la divulgación y las reivindicaciones adjuntas. En las reivindicaciones, la palabra "comprendiendo" no excluye otros elementos o etapas, y el artículo indefinido "un" o "una" no excluyen una pluralidad. El mero hecho de que ciertas características se enumeren en reivindicaciones dependientes mutuamente diferentes no indica que no pueda usarse ventajosamente una combinación de estas características. Cualesquiera signos de referencia en las reivindicaciones no deberían interpretarse como limitativos del alcance.

15

REIVINDICACIONES

1. Un método de operación de una turbina eólica (100), comprendiendo la turbina eólica una torre (101) y un rotor con al menos una pala de rotor (103), estando conectado el rotor a la torre (101) y estando adaptado para accionar un generador, en el que es ajustable un ángulo de paso de cada pala del rotor, comprendiendo el método
- 5
- promover activamente oscilaciones de torre en la torre hasta un umbral de oscilación predefinido y cuando se alcanza el umbral de oscilación predefinido se detiene la promoción activa de las oscilaciones de la torre; determinar al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la torre,
- 10
- en el que la promoción de oscilaciones se realiza durante la operación normal de la turbina eólica mediante ajustes en las señales del paso y/o del par del rotor mediante la superposición de una señal de paso y/o señal de par del rotor sobre la señal de paso y/o señales del par del rotor normales de operación.
2. El método de operación de una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en el que se opera la turbina eólica adicionalmente para amortiguar activamente las oscilaciones de la torre y en el que se determina el al menos un parámetro físico sobre la base de un decaimiento de las oscilaciones producido por la amortiguación activa de las oscilaciones.
- 15
3. El método de operación de una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el al menos un parámetro físico se determina sobre la base de un decaimiento de las oscilaciones producido por la amortiguación pasiva de las oscilaciones.
- 20
4. El método de operación de una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en el que se promueven las oscilaciones de la torre mediante el ajuste del ángulo de paso cuando un parámetro relativo a la velocidad del viento está por encima de un punto de operación y en el que las oscilaciones de la torre se promueven mediante el ajuste del par del rotor cuando el parámetro relativo a la velocidad del viento está por debajo del punto de operación.
- 25
5. El método de operación de una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 2 y 4, en el que la amortiguación activa de las oscilaciones de la torre se obtiene mediante el ajuste del ángulo de paso de una pala del rotor para imponer sobre la torre una fuerza de oscilación que se opone a la oscilación.
- 30
6. El método de operación de una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 2, 4-5, en el que la amortiguación activa de las oscilaciones de la torre se obtiene mediante el ajuste de un par del rotor para imponer sobre la torre una fuerza de oscilación que se opone a la oscilación.
- 35
7. El método de operación de una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las etapas de promover activamente oscilaciones de la torre y determinar el al menos un parámetro físico con relación a las oscilaciones de la torre se realiza en tiempos predeterminados.
- 40
8. El método de operación de una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las etapas de promover activamente oscilaciones de la torre y determinar el al menos un parámetro físico con relación a las oscilaciones de la torre se realiza en respuesta a una aparición de un evento, en el que se define que ocurre el evento cuando uno o más parámetros de operación asociados con la operación de la turbina eólica cumplen una condición de operación predefinida y en el que la aparición del evento depende del número de veces que se ha determinado previamente el al menos un parámetro físico para la condición de operación y/o depende de cuándo se determinó más recientemente el al menos un parámetro físico para la condición de operación.
- 45
9. El método de operación de una turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se actualiza un parámetro de un circuito de control o filtro de la turbina eólica de acuerdo con el al menos un parámetro físico.
- 50
10. Un 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 llevar a cabo el método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.
- 55
11. Un sistema de control de turbina eólica (200) para la operación de una turbina eólica (100), comprendiendo la turbina eólica una torre (101) y un rotor con al menos una pala de rotor (103), estando conectado el rotor a la torre (101) y estando adaptado para accionar un generador, en el que es ajustable un ángulo de paso de cada pala del rotor, el sistema de control comprende
- 60
- un controlador (201) configurado para promover activamente oscilaciones de torre en la torre, el controlador se caracteriza por que las oscilaciones de la torre se promueven hasta un umbral de oscilación predefinido y por que el controlador se configura para detener la promoción activa de las oscilaciones de la torre cuando se alcanza el umbral de oscilación predefinido, en el que el controlador se configura además para promover las oscilaciones durante la operación normal de la turbina eólica mediante ajustes en las señales del paso y/o del par del rotor mediante la superposición de una señal de paso y/o señal de par del rotor sobre la
- 65

señal de paso y/o señales de par del rotor de operación normal;
una unidad de procesamiento (202) configurada para determinar al menos un parámetro físico con relación a la oscilación de la torre.

5 12. Una turbina eólica (100) que comprende

una torre (101) y un rotor con al menos una pala de rotor (103), estando el rotor conectado a la torre (101) y estando adaptado para accionar un generador, en el que es ajustable un ángulo de paso de cada pala del rotor y un sistema de control de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 11.

10

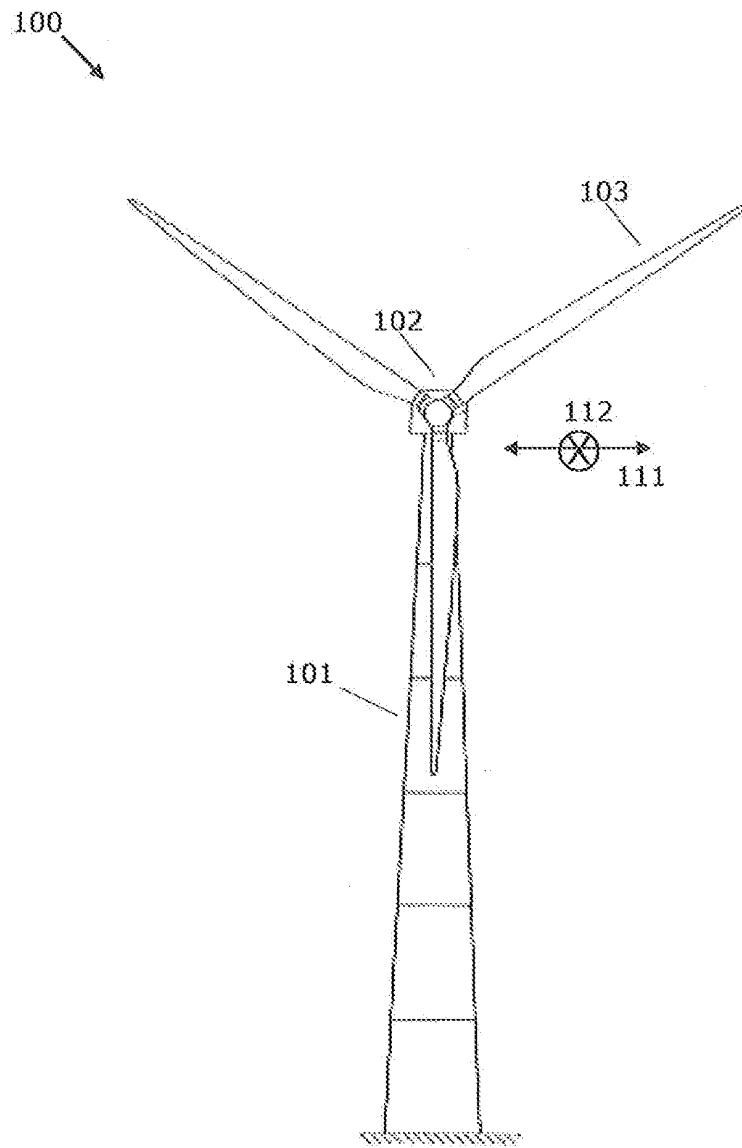


Fig. 1

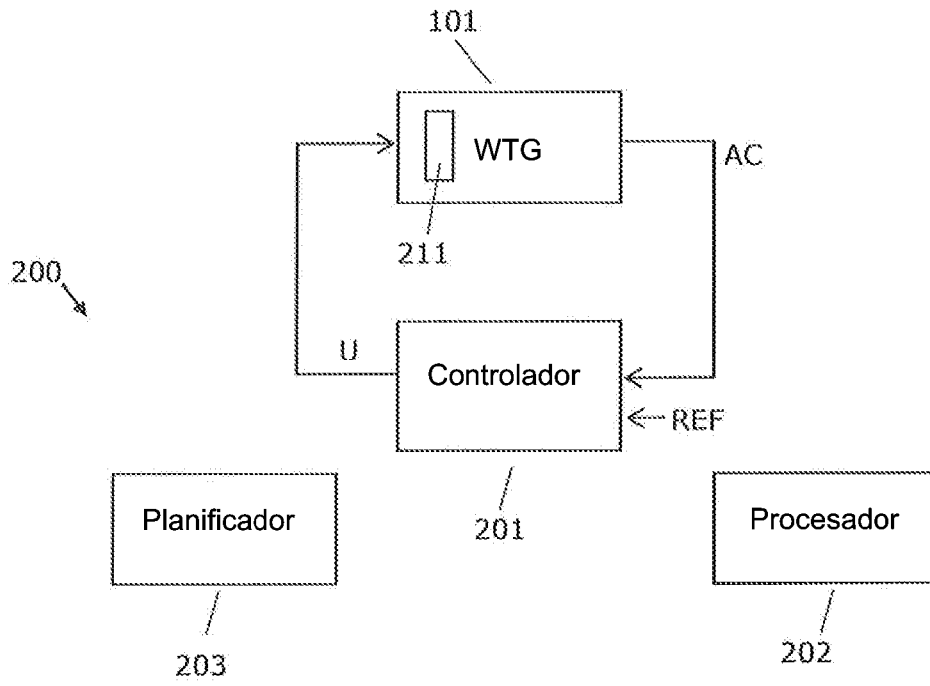


Fig. 2

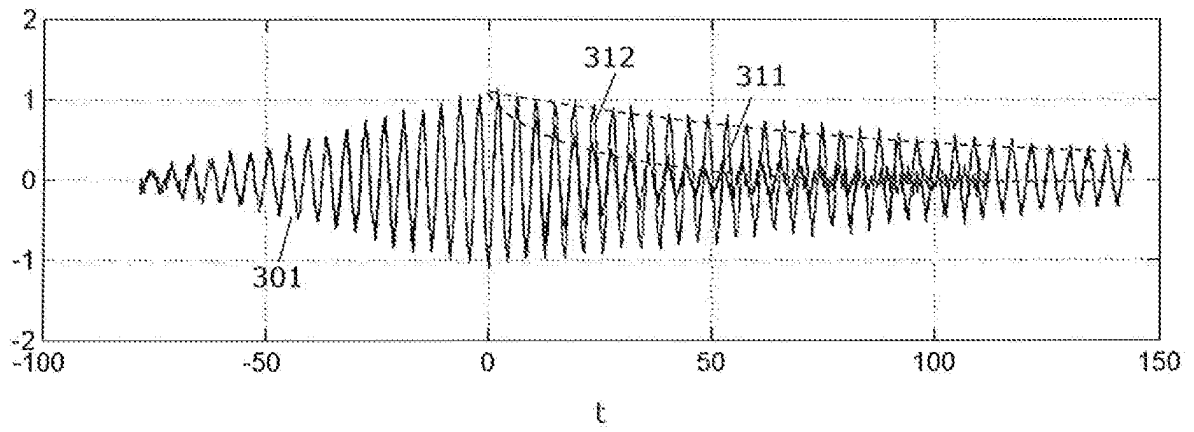


Fig. 3