

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 592 225**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.12.2011 PCT/DK2011/050501**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.06.2012 WO12083962**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.12.2011 E 11804633 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.08.2016 EP 2655876**

54 Título: **Supervisión de inestabilidad de controlador en una turbina eólica**

30 Prioridad:

**23.12.2010 DK 201070578 P**  
**23.12.2010 US 201061426539 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**28.11.2016**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**MIRANDA, ERIK CARL LEHNSKOV**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 592 225 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**

Supervisión de inestabilidad de controlador en una turbina eólica

**Campo de la invención**

5 Realizaciones de la invención se refieren de manera general a turbinas eólicas, y más específicamente a evitar el daño a la turbina eólica provocado debido a inestabilidad.

**Antecedentes**

10 En los últimos años, ha habido un aumento de atención a la reducción de emisiones de gases invernadero generados por la combustión de combustibles fósiles. Una solución para reducir las emisiones de gases invernadero es desarrollar fuentes de energía renovables. Particularmente, la energía derivada del viento ha demostrado ser una fuente de energía fiable y respetuosa con el medio ambiente, lo que puede reducir la dependencia de combustibles fósiles.

15 La energía en el viento puede capturarse mediante una turbina eólica, que es una máquina rotativa que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, y la energía mecánica posteriormente en energía eléctrica. Las turbinas eólicas de eje horizontal comunes incluyen una torre, una góndola ubicada en el vértice de la torre, y un rotor que está soportado en la góndola por medio de un árbol. El árbol acopla el rotor o bien directamente o bien indirectamente con un conjunto de rotor de un generador alojado en el interior de la góndola.

20 Las turbinas eólicas pueden incluir un sistema o sistemas de control que comprenden sensores, actuadores, junto con hardware y software para procesar señales de sensor recibidas desde los sensores y generar señales de salida para los actuadores. Los sensores a modo de ejemplo pueden incluir anemómetros, veletas, sensores de velocidad de rotor, sensores de energía eléctrica, sensores de ángulo de paso, sensores de vibración y similares. Pueden implementarse algoritmos de control avanzados en los sistemas de control para satisfacer múltiples objetivos tales como maximizar la captura de energía, aliviar cargas en estructuras tales como palas, regular la velocidad del generador y similares. Los sistemas de control en una turbina eólica tienden a ser sistemas de control de lazo cerrado, en los que un controlador de lazo cerrado monitoriza un valor de salida del sistema, y regular uno o más valores de entrada basándose en el valor de salida monitorizado para conseguir un valor de salida deseado.

30 El documento US20041 08729 da a conocer un método de control de una instalación de energía eléctrica eólica que comprende un mástil y un aparato de control para la gestión de funcionamiento de la instalación de energía eléctrica eólica o partes de la misma, en el que se proporcionan medios con los que se detecta la oscilación del mástil de la instalación de energía eléctrica eólica, en el que los medios para detectar la oscilación de mástil detectan el desplazamiento de oscilación y/o la desviación absoluta del mástil en la parte superior del mástil con respecto a su posición de reposo y los valores determinados por los medios para detectar la oscilación de mástil se procesan en el aparato de control, más específicamente de tal manera que la gestión de funcionamiento de la instalación de energía eléctrica eólica o partes de la misma se altera si la oscilación y/o la desviación absoluta del mástil supera un primer valor límite que puede determinarse.

**Sumario de la invención**

35 Realizaciones de la invención se refieren de manera general a turbinas eólicas, y más específicamente a evitar el daño a la turbina eólica provocado debido a inestabilidad.

40 Una realización de la invención proporciona un método para hacer funcionar un controlador en una turbina eólica. El método comprende generalmente determinar una frecuencia propia de lazo cerrado del controlador, monitorizar una amplitud de un parámetro controlado por el controlador a o cerca de la frecuencia propia de lazo cerrado, y al detectar que la amplitud del parámetro está por encima de un umbral predefinido, iniciar al menos una acción para mitigar el daño a componentes de una turbina eólica.

45 Otra realización de la invención proporciona un medio de almacenamiento legible por ordenador que comprende un producto de programa que, cuando lo ejecuta un procesador, está configurado para hacer funcionar un controlador de una turbina eólica. El funcionamiento comprende generalmente determinar una frecuencia propia de lazo cerrado del controlador, monitorizar una amplitud de un parámetro controlado por el controlador a o cerca de la frecuencia propia de lazo cerrado, y al detectar que la amplitud del parámetro está por encima de un umbral predefinido, iniciar al menos una acción para mitigar el daño a componentes de una turbina eólica.

50 Aún otra realización de la invención proporciona una turbina eólica que comprende un controlador configurado para controlar al menos un parámetro de funcionamiento de la turbina eólica. El controlador está configurado generalmente para determinar una frecuencia propia de lazo cerrado del controlador, monitorizar una amplitud de un parámetro controlado por el controlador a o cerca de la frecuencia propia de lazo cerrado, y al detectar que la amplitud del parámetro está por encima de un umbral predefinido, iniciar al menos una acción para mitigar el daño a componentes de una turbina eólica.

**Breve descripción de los dibujos**

- 5 Para que la manera en que se consiguen las características, ventajas y objetos de la presente invención mencionados anteriormente pueda entenderse en detalle, puede obtenerse una descripción más particular de la invención, resumida brevemente anteriormente, mediante referencia a las realizaciones de la misma que se ilustran en los dibujos adjuntos.
- Debe indicarse, sin embargo, que los dibujos adjuntos ilustran solo realizaciones típicas de esta invención y por tanto no deben de considerarse limitantes en cuanto a su alcance, ya que la invención puede admitir otras realizaciones igualmente efectivas.
- La figura 1 ilustra una turbina eólica a modo de ejemplo según una realización de la invención.
- 10 La figura 2 ilustra una góndola a modo de ejemplo según una realización de la invención.
- La figura 3 ilustra un sistema de control a modo de ejemplo de una turbina eólica según una realización de la invención.
- La figura 4 ilustra un controlador a modo de ejemplo según una realización de la invención.
- Las figuras 5A-B ilustran gráficos a modo de ejemplo de datos de controlador según una realización de la invención.
- 15 La figura 6 es un diagrama de flujo de operaciones a modo de ejemplo realizadas por el controlador de turbina eólica según una realización de la invención.
- La figura 7 es otro diagrama de flujo de operaciones a modo de ejemplo realizadas por un controlador de una turbina eólica, según una realización de la invención.

**Descripción detallada**

- 20 Realizaciones de la invención proporcionan una turbina eólica que comprende un controlador configurado para entrar periódicamente en un modo de detección de frecuencia propia en el que la ganancia de controlador se aumenta de manera controlada para detectar las frecuencias propias. Durante el funcionamiento normal, la salida de controlador puede monitorizarse para detectar la frecuencia propia que, si se detecta, puede permitir llevar a cabo operaciones de control de daño.
- 25 En lo sucesivo, se hace referencia a realizaciones de la invención. Sin embargo, debe entenderse que la invención no se limita a realizaciones descritas específicas. Además, en diversas realizaciones la invención proporciona numerosas ventajas sobre la técnica anterior. Sin embargo, aunque realizaciones de la invención pueden conseguir ventajas sobre otras posibles soluciones y/o sobre la técnica anterior, que una ventaja particular se consiga o no mediante una realización dada no es limitante en cuanto a la invención. Por tanto, los siguientes aspectos, características, realizaciones y ventajas son meramente ilustrativos y no se consideran elementos o limitaciones de las reivindicaciones adjuntas excepto cuando se expresa explícitamente en una(s) reivindicación/reivindicaciones.
- 30 Del mismo modo, no deberá considerarse la referencia a “la invención” como una generalización de ningún contenido inventivo dado a conocer en el presente documento y no deberá considerarse un elemento o limitación de las reivindicaciones adjuntas excepto cuando se exprese explícitamente en una(s) reivindicación/reivindicaciones.
- 35 Lo siguiente es una descripción detallada de realizaciones de la invención representadas en los dibujos adjuntos. Las realizaciones son ejemplos y son tan detallados como para comunicar claramente la invención. Sin embargo, la cantidad de detalle ofrecido no pretende limitar las variaciones anticipadas de realizaciones; sino por el contrario, la intención es cubrir todas las modificaciones, equivalentes, y alternativas que entran dentro del alcance de la presente invención tal como se define mediante las reivindicaciones adjuntas.
- 40 La figura 1 ilustra una turbina eólica 100 a modo de ejemplo según una realización de la invención. Tal como se ilustra en la figura 1, la turbina eólica 100 puede incluir una torre 110, una góndola 120, y un rotor 130. En una realización de la invención la turbina eólica 100 puede ser una turbina eólica en tierra.
- 45 Sin embargo, realizaciones de la invención no se limitan solo a turbinas eólicas en tierra. En realizaciones alternativas, la turbina eólica 100 puede ser una turbina eólica de alta mar, ubicada sobre una masa de agua tal como, por ejemplo, un lago, un océano o similar.
- 50 La torre 110 de turbina eólica 100 puede estar configurada para elevar la góndola 120 y el rotor 130 a una altura en la que el rotor 130 puede recibir un flujo de aire intenso, menos turbulento y generalmente sin obstrucción. La altura de la torre 110 puede ser cualquier altura razonable. La torre 110 puede estar hecha a partir de cualquier material razonable, por ejemplo, acero, hormigón o similar. En algunas realizaciones la torre 110 puede estar hecha a partir de material monolítico. Sin embargo, en realizaciones alternativas, la torre 110 puede incluir una pluralidad de secciones, por ejemplo, dos o más secciones de acero tubulares 111 y 112, tal como se ilustra en la figura 1. En algunas realizaciones de la invención, la torre 110 puede ser una torre de celosía. Por consiguiente, la torre 110 puede incluir perfiles de acero soldados.

El rotor 130 puede incluir un buje de rotor (denominado a continuación en el presente documento simplemente como "buje") 131 y al menos una pala 132 (tres palas 132 de este tipo se muestran en la figura 1). El buje de rotor 131 puede estar configurado para acoplar la al menos una pala 132 a un árbol (no mostrado). En una realización, las palas 132 pueden tener un perfil aerodinámico tal que, a velocidades de viento predefinidas, las palas 132 experimentan sustentación, provocando de ese modo que las palas roten radialmente alrededor del buje. El movimiento de las palas también puede provocar que el árbol de la turbina eólica 100 rote. La góndola 120 puede incluir uno o más componentes configurados para convertir energía aeromecánica de las palas en energía rotacional del árbol, y la energía rotacional del árbol en energía eléctrica.

La turbina eólica 100 puede incluir una pluralidad de sensores para monitorizar una pluralidad de parámetros asociados con, por ejemplo, condiciones ambientales, cargas de turbina eólica, métricas de rendimiento y similares. Por ejemplo, una galga extensiométrica 133 se muestra en la pala 132. En una realización, la galga extensiométrica 133 puede estar configurada para detectar flexión y/o torsión de las palas 132. La información en relación con la flexión y torsión de las palas puede ser necesaria para realizar una o más operaciones que reducen las cargas sobre las palas 132 que pueden producirse, por ejemplo, durante rachas de viento elevadas. En tales situaciones, puede regularse el ángulo de paso de las palas para reducir las cargas, evitando de ese modo el daño a las palas.

La figura 1 también ilustra un acelerómetro 113 que puede situarse sobre la torre 110. El acelerómetro 113 puede estar configurado para detectar movimientos horizontales y flexión de la torre 110 que puede provocarse debido a las cargas sobre la turbina eólica 100. Los datos capturados por el acelerómetro 113 pueden usarse para realizar una o más operaciones para reducir cargas sobre la turbina eólica 100. En algunas realizaciones de la invención, el acelerómetro 113 puede estar situado sobre la góndola 120.

La figura 1 también representa un sensor de viento 123. El sensor de viento 123 puede estar configurado para detectar la dirección del viento junto a o cerca de la turbina eólica 100. Detectando la dirección del viento, el sensor de viento 123 puede proporcionar datos útiles que pueden determinar operaciones para orientar la turbina eólica 100 perpendicular a la dirección del viento. El sensor de viento 123 también puede detectar una velocidad del viento. Los datos de velocidad del viento pueden usarse para determinar un ángulo de paso apropiado que permite a las palas 132 capturar una cantidad deseada de energía del viento. En algunas realizaciones, el sensor de viento 123 puede estar dotado de un sensor de temperatura, sensor de presión y similares, que pueden proporcionar datos adicionales en relación con el entorno que rodea la turbina eólica. Tales datos pueden usarse para determinar uno o más parámetros de funcionamiento de la turbina eólica para facilitar la captura de una cantidad deseada de energía mediante la turbina eólica 100.

Aunque en el presente documento se describen una galga extensiométrica 133, acelerómetro 113 y sensor de viento 123, realizaciones de la invención no se limitan a los tipos de sensores mencionados anteriormente. En general, cualquier tipo y número de sensores puede colocarse en diversas ubicaciones de la turbina eólica 100 para facilitar la captura de datos en relación con estado estructural, rendimiento, prevención de daño, acústica y similares. Por ejemplo, un sensor de ángulo de paso puede estar situado junto a o cerca de una pala de turbina eólica para determinar un ángulo de paso actual de la pala.

La figura 2 ilustra una vista más detallada de una góndola 120 según una realización de la invención. Tal como se ilustra en la figura 2, la góndola 120 puede incluir al menos un árbol de baja velocidad 210, un árbol de alta velocidad 211, una caja de engranajes 220, y un generador 230. En una realización, el árbol de baja velocidad 210 puede acoplar la caja de engranajes 230 al buje 130, tal como se ilustra en la figura 2. La caja de engranajes 230 puede basarse en relaciones de engranajes en un tren de potencia para proporcionar conversiones de velocidad y par de torsión de la rotación del árbol de baja velocidad 210 al conjunto de rotor del generador 230 a través del árbol de alta velocidad 211.

En una realización alternativa, el árbol de baja velocidad 210 puede conectar directamente el buje 130 con un conjunto de rotor del generador 230 de modo que la rotación del buje 130 acciona directamente el conjunto de rotor para dar vueltas con respecto a un conjunto de estator del generador 230. En realizaciones en las que el árbol de baja velocidad 210 está acoplado directamente al buje 130, la caja de engranajes 220 puede no estar incluida, permitiendo de ese modo que la góndola 120 sea más pequeña y/o más ligera.

El generador 230 puede estar configurado para generar una corriente alterna trifásica basándose en uno o más requisitos de la red de distribución. En una realización, el generador 230 puede ser un generador síncrono. Los generadores síncronos pueden estar configurados para funcionar a una velocidad constante, y pueden estar conectados directamente a la red de distribución. En algunas realizaciones, el generador 230 puede ser un generador de imanes permanentes. En realizaciones alternativas, el generador 230 puede ser un generador asíncrono, también conocido a veces como generador de inducción. Los generadores de inducción pueden estar o pueden no estar conectados directamente a la red de distribución. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el generador 230 puede estar acoplado a la red de distribución a través de uno o más dispositivos eléctricos configurados para, por ejemplo, ajustar la corriente, tensión y otros parámetros eléctricos para adecuarse a uno o más requisitos de la red de distribución. Los dispositivos eléctricos a modo de ejemplo incluyen, por ejemplo, inversores, convertidores, resistencias, conmutadores y similares.

Realizaciones de la invención no se limitan a ningún tipo particular de generador o disposición del generador y uno o más dispositivos eléctricos asociados con el generador en relación con la red de distribución eléctrica.

5 Cualquier tipo adecuado de generador incluyendo (pero sin limitarse a) generadores de inducción, generadores de imanes permanentes, generadores síncronos o similares, configurados para generar electricidad según requisitos de la red de distribución entra dentro del ámbito de la invención.

10 En algunas realizaciones, una pluralidad de sensores puede estar incluida en la góndola 120 para monitorizar el estado estructural y el rendimiento de los componentes en el interior de la misma, la calidad de la potencia generada y similares. Por ejemplo, un sensor 221 puede estar situado en la caja de engranajes 220 para detectar deformación mecánica y desgaste/rotura de la caja de engranajes 220. Un sensor 231 puede estar situado en el generador 230 para detectar velocidad del generador, generación de potencia o similar.

15 La figura 3 ilustra un sistema de control 300 a modo de ejemplo para una turbina eólica, según una realización de la invención. Tal como se ilustra en la figura 3, el sistema de control 300 puede incluir un controlador principal 310, un controlador de potencia 320, y un regulador de ángulo de paso 330. El controlador principal 310 puede comprender los lazos de control globales y la mayor parte de los algoritmos de supervisión para hacer funcionar la turbina eólica. Específicamente, en algunas realizaciones, el controlador principal puede garantizar que la turbina eólica maximiza la cantidad de energía producida, limita las cargas mecánicas sobre la turbina dentro de límites de diseño, limita el ruido acústico, mantiene una alta calidad de potencia, desconecta durante emergencias o similar. En una realización, el controlador principal 310 puede estar configurado para generar la señal de referencia de potencia 321 y la señal de referencia de ángulo de paso 331, como se comentará en mayor detalle a continuación.

20 El controlador principal puede incluir un controlador de carga parcial 311, un controlador de plena carga 312, y lógica de conmutación 313, tal como se ilustra en la figura 3. El controlador de carga parcial 311 puede controlar el funcionamiento de la turbina eólica cuando la velocidad del viento está por debajo de una velocidad del viento de régimen. En tales situaciones, la lógica de conmutación 313 puede activar el controlador de carga parcial 311, que puede garantizar que la turbina produce energía eléctrica con una eficiencia óptima. Por otro lado, si la velocidad del viento está a o por encima de la velocidad del viento de régimen, la lógica de conmutación puede activar el controlador de plena carga 312, que puede estar configurado para limitar la generación de potencia a la potencia de régimen.

30 El controlador de potencia 320 puede estar configurado para controlar un convertidor de frecuencia 340 de la turbina eólica, tal como se ilustra en la figura 3. El convertidor de frecuencia 340 puede estar configurado para convertir una salida de frecuencia variable generada por el generador 230 a una frecuencia fija apropiada para la red de distribución o una carga. Por tanto, controlando el convertidor de frecuencia 340, el controlador de potencia 320 puede controlar la potencia de salida procedente de la turbina eólica.

35 Tal como se ilustra en la figura 3, el controlador de potencia 320 puede recibir una señal de referencia de potencia 321 desde el controlador principal 310. La señal de referencia de potencia 321 puede indicar un nivel de potencia que va a emitirse mediante la turbina eólica. El nivel de potencia específico que va a emitirse puede determinarse mediante, por ejemplo, reglamentos de red de distribución, demanda de electricidad en un momento dado, velocidad de generador, demandas fuera de régimen para proteger componentes de turbina eólica y similares.

40 El regulador de ángulo de paso 330 puede estar configurado para ajustar un ángulo de paso de al menos una pala 132 de la turbina eólica. Tal como se ilustra en la figura 3, el regulador de ángulo de paso puede recibir un valor de referencia de ángulo de paso 331 desde el controlador principal 310. El regulador de ángulo de paso 330 puede ajustar el ángulo de paso de la al menos una pala basándose en el valor de referencia de ángulo de paso 331 recibido desde el controlador principal 310. Aunque anteriormente se describen un controlador principal 310, controlador de potencia 320, y regulador de ángulo de paso 330, realizaciones de la invención no se limitan solo a los controladores descritos en el presente documento. En cambio, cualquier tipo de controlador usado dentro de una turbina eólica entra dentro del ámbito de realizaciones de la invención.

45 La figura 4 representa un diagrama de bloques de un controlador 400 a modo de ejemplo según una realización de la invención. El controlador 400 puede representar uno cualquiera del controlador principal 310, controlador de carga parcial 311, controlador de plena carga 312, controlador de potencia 320, regulador de ángulo de paso 330 o similar. El controlador 400 puede incluir una unidad de procesamiento central (CPU) 411 conectada a través de un bus 420 a una memoria 412, tal como se ilustra en la figura 4.

La memoria 412 es preferiblemente una memoria de acceso aleatorio suficientemente grande para conservar la programación necesaria y estructuras de datos de la invención.

55 Aunque la memoria 412 se muestra como una entidad individual, debe entenderse que la memoria 412 puede comprender, de hecho, una pluralidad de módulos, y que la memoria 412 puede existir a múltiples niveles, desde registradores de alta velocidad y memorias intermedias hasta chips DRAM de menor velocidad pero mayores.

La memoria 412 también se muestra comprendiendo lógica de control 414 que, cuando la ejecuta la CPU 411, realiza una operación para controlar uno o más parámetros de funcionamiento de una turbina eólica. En una

realización, la lógica de control 414 puede realizar operaciones para detectar inestabilidad en la turbina eólica y llevar a cabo medidas correctoras para evitar el daño a la turbina eólica. Aunque la lógica de control 414 se muestra como software almacenado en la memoria 412 en la figura 4, en realizaciones alternativas, la lógica de control puede implementarse como hardware del controlador 400.

5 La memoria 412 también puede incluir datos de controlador 415. Los datos de controlador 415 pueden incluir información en relación con características de rendimiento de una turbina eólica, umbrales e intervalos de valores de parámetros de funcionamiento a los que se produce inestabilidad en la turbina eólica y similares. Se proporcionan ejemplos de datos de controlador 415 en mayor detalle a continuación.

10 En una realización de la invención, los controladores en una turbina eólica pueden formar parte de un sistema de controlador de lazo cerrado. En general, los sistemas de controlador de lazo cerrado incluyen controladores que monitorizan un parámetro de salida del sistema, y regulan uno o más valores de control o entrada basándose en el valor de salida monitorizado para conseguir un valor de salida deseado. Por ejemplo, el sistema de regulación de ángulo de paso de una turbina eólica puede incluir un regulador de ángulo de paso (por ejemplo, regulador de ángulo de paso 330), y un actuador hidráulico de regulación de ángulo de paso de pala para girar las palas. El regulador de ángulo de paso 330 puede recibir una señal de referencia de ángulo de paso 331 desde el controlador principal 310, que puede indicar un ángulo de paso de pala deseado. El regulador de ángulo de paso 330 también puede recibir un ángulo de paso medido desde un sensor de ángulo de paso (no mostrado). Basándose en el ángulo de paso medido y un ángulo de paso deseado, el regulador de ángulo de paso puede generar una o más señales de entrada/control al actuador de ángulo de paso para mover las palas de modo que se consiga el ángulo de paso deseado.

20 En una realización, el sistema de regulación de ángulo de paso de la turbina eólica puede ser un sistema dinámico. Por ejemplo, el valor de referencia de ángulo de paso (o ángulo de paso de pala deseado) puede cambiar de manera dinámica debido a una variedad de motivos tales como velocidades del viento que fluctúan, demanda de potencia y similares. La referencia de ángulo de paso que fluctúa puede provocar que el regulador de ángulo de paso cambie de manera dinámica el ángulo de paso de pala para capturar la potencia deseada del viento.

25 En algunas realizaciones, una inestabilidad en el regulador de ángulo de paso o controlador principal puede provocar que la pala y el ángulo de paso se ajusten a una frecuencia resonante denominada la frecuencia propia de lazo cerrado, que puede provocar daño a componentes de la turbina eólica. Las figuras 5A-B ilustran gráficos a modo de ejemplo que ilustran inestabilidad en el controlador según una realización de la invención. Un primer gráfico 510 en la figura 5A ilustra variaciones a modo de ejemplo en el ángulo de paso de una pala de turbina eólica a lo largo de un periodo de tiempo  $t_1$ . Tal como se muestra en el gráfico 510, el ángulo de paso de la turbina eólica puede variar entre 0 y 15 grados a lo largo del periodo de tiempo  $t_1$ . Tal como se describió anteriormente, las variaciones pueden producirse debido a ajustes en el valor de referencia de ángulo de paso para tener en cuenta condiciones ambientales cambiantes tales como velocidad del viento.

30 Un segundo gráfico 520 en la figura 5B ilustra un diagrama de Bode de frecuencias a las que el ángulo de paso se cambia en el primer gráfico 510. Tal como se ilustra en el segundo gráfico 520, se muestra un pico 521 en la amplitud a una frecuencia de aproximadamente 0,1 Hz. El pico 521 puede representar inestabilidad en el regulador de ángulo de paso provocada debido a una ganancia de controlador excesivamente alta. Si el regulador de ángulo de paso se ajustara al ángulo de paso de la pala de turbina eólica a o cerca de frecuencias que provocan inestabilidad en el controlador, uno o más eventos catastróficos pueden provocar daño a los componentes de la turbina eólica. Por ejemplo, en una realización, la regulación de ángulo de paso de las palas a una frecuencia propia puede introducir cargas de fatiga elevadas sobre las palas, que pueden provocar daño a componentes de sistema de regulación de ángulo de paso, cojinetes de pala, el tren de potencia, las palas, la torre y similares.

35 Realizaciones de la invención proporcionan métodos y un aparato para evitar el daño a componentes de turbina eólica provocado debido a inestabilidad en el controlador.

40 En una realización de la invención, la lógica de control (por ejemplo, lógica de control 414 de la figura 4) puede entrar periódicamente en un modo de detección de frecuencia propia para determinar una frecuencia propia de lazo cerrado del controlador. Por ejemplo, la lógica de control puede aumentar o disminuir la ganancia de controlador de manera escalonada en cantidades predefinidas. Después de cada aumento o disminución, la lógica de control puede funcionar durante un periodo de tiempo predefinido antes del siguiente aumento o disminución. Por ejemplo, en una realización, la ganancia de controlador puede aumentarse el 10% cada 10 minutos. Sin embargo, en realizaciones alternativas, puede implementarse cualquier cantidad de aumento o disminución de ganancia y cualquier periodo predefinido.

45 La lógica de control puede capturar los datos en relación con un parámetro controlado, por ejemplo, el ángulo de paso o velocidad de generador durante el intervalo entre dos ajustes de ganancia sucesivos. Los datos pueden almacenarse, por ejemplo, en los datos de controlador 415 de la memoria 412 (véase la figura 4). Un ejemplo de los datos en relación con el parámetro controlado que pueden capturarse mediante la lógica de control se presenta en el presente documento en el gráfico 510 de la figura 5A.

En una realización, después del barrido a través de un intervalo predefinido de ganancia de controlador, la lógica de control puede estar configurada para realizar un análisis por transformada rápida de Fourier (FFT) sobre los datos en relación con el parámetro controlado para obtener datos FFT, por ejemplo, el diagrama de Bode 520 de la figura 5A. Los datos FFT pueden analizarse para identificar picos en amplitud, que pueden indicar inestabilidad en el controlador. Por ejemplo, en una realización, si la amplitud a una primera frecuencia es mayor que por ejemplo un 10% mayor que una o más frecuencias colindantes, esto puede indicar inestabilidad en el controlador a la primera frecuencia. Por consiguiente, puede determinarse que la primera frecuencia es una frecuencia propia. En algunas realizaciones, las frecuencias propias pueden encontrarse en un intervalo entre 0,05 y 0,2 Hz. Después de la detección de la frecuencia propia, la lógica de control puede salir del modo de detección de frecuencia propia, y ajustar la ganancia de controlador de vuelta a su valor original. Aunque FFT se describe en el presente documento como un método a modo de ejemplo para realizar análisis de datos del parámetro controlado, realizaciones de la invención no se limitan solo a análisis por FFT. En realizaciones alternativas, puede usarse cualquier método razonable para identificar las frecuencias que indican inestabilidad en el controlador.

En una realización, la lógica de control puede estar configurada para entrar en el modo de detección de frecuencia propia a intervalos regulares, por ejemplo, cada mes, cada semana, cada trimestre y similares. El ajuste de la ganancia durante el modo de detección de frecuencia propia no dañará los componentes de la turbina eólica porque los valores de ganancia se establecen para una pequeña cantidad de tiempo y se ajustan de manera controlada. Además, las operaciones realizadas en el modo de detección de frecuencia propia pueden estar configuradas para detectar frecuencias propias específicas para turbinas específicas. Dicho de otro modo, diferentes turbinas pueden tener diferentes frecuencias propias debido a variaciones mecánicas, diferencias climáticas, diferentes parámetros de funcionamiento y similares. Al proporcionar un modo de detección de frecuencia propia, cada turbina puede determinar su misma frecuencia propia en un momento dado.

Después de determinar las frecuencias propias, durante el funcionamiento normal, la lógica de control puede monitorizar continuamente la frecuencia de oscilaciones de un respectivo parámetro de funcionamiento de turbina, por ejemplo, el ángulo de paso de una pala, para determinar si el parámetro está oscilando a la frecuencia propia determinada. Si el parámetro está oscilando a la frecuencia propia, la lógica de control puede determinar el nivel de amplitud a la frecuencia propia. Si el nivel de amplitud es mayor que un valor de umbral predefinido, la lógica de control puede iniciar una o más medidas para evitar el daño a componentes de turbina.

Por ejemplo, en una realización, si el nivel de amplitud (por ejemplo, amplitud de ángulo de paso, velocidad de generador, velocidad de rotor y similares) es mayor que el valor umbral, la lógica de control puede desconectar la turbina eólica. Alternativamente, en algunas realizaciones, la lógica de control puede continuar haciendo funcionar la turbina en un modo seguro configurado para evitar el daño a componentes de la turbina. En algunas realizaciones, si la amplitud es mayor que el valor umbral, la ganancia puede ajustarse de manera dinámica mediante la lógica de control.

La figura 6 es un diagrama de flujo de operaciones a modo de ejemplo realizadas por la lógica de control de un controlador de turbina eólica según una realización de la invención. Las operaciones pueden comenzar en la etapa 610 entrando en un modo de detección de frecuencia propia. Mientras se encuentra en el modo de detección de frecuencia propia, la lógica de control puede establecer la ganancia de controlador a un valor de partida predefinido, en la etapa 620. En la etapa 630, la lógica de control puede hacer funcionar la turbina eólica durante un periodo de tiempo predefinido, en el que un valor de una salida del controlador se registra durante el periodo de tiempo predefinido. En la etapa 640, la lógica de control puede ajustar la ganancia de controlador en una cantidad predefinida al final del periodo de tiempo predefinido. En la etapa 650, las etapas 630 y 640 pueden repetirse hasta que la ganancia de controlador alcanza un valor final predefinido. En la etapa 660, el controlador puede salir del modo de detección de frecuencia propia. En la etapa 670, la lógica de control puede determinar una frecuencia de la salida del controlador al valor de ganancia mayor establecido durante el modo de detección de frecuencia propia para que sea una frecuencia propia del controlador.

Un experto en la materia debe reconocer que la descripción de detección de inestabilidad en un regulador de ángulo de paso o controlador, y las operaciones para evitar el daño al sistema de regulación de ángulo de paso, se proporcionan en el presente documento con la única finalidad de mostrar ejemplos. Realizaciones de la invención pueden aplicarse de manera más general a detectar y evitar la inestabilidad en el controlador en cualquier tipo de controlador de lazo cerrado en una turbina eólica, por ejemplo, el controlador de potencia 320, controlador de carga parcial 311, controlador de plena carga 312, ilustrados en la figura 3.

Por ejemplo, en una realización, la inestabilidad en el controlador de potencia 320 puede analizarse basándose en, por ejemplo, la velocidad de generador. Dicho de otro modo, puede realizarse un barrido a través de un intervalo predefinido de la ganancia del controlador de potencia 320 en incrementos fijos para detectar la frecuencia propia, que puede producirse al valor de ganancia mayor. Tras ello, la velocidad de generador puede monitorizarse durante el funcionamiento normal para detectar si se detecta la frecuencia propia. Cuando la frecuencia está a o cerca de la frecuencia propia, pueden llevarse a cabo una o más operaciones de mitigación de daño tales como, por ejemplo, desconexión de la turbina, ajuste de ganancia, alteración de modo de funcionamiento de la turbina (por ejemplo, modo seguro).

5 La figura 7 es un diagrama de flujo de operaciones a modo de ejemplo realizadas por un controlador durante el funcionamiento normal, según una realización de la invención. Tal como se ilustra en la figura 7, las operaciones pueden comenzar en la etapa 710 determinando una frecuencia propia de lazo cerrado de un controlador. En una realización, la frecuencia propia de lazo cerrado puede determinarse a través de, por ejemplo, las etapas de método descritas en la figura 6. Alternativamente, la frecuencia propia de lazo cerrado puede calcularse teóricamente basándose en un análisis del circuito de controlador, una o más condiciones ambientales o similar. En aún otras realizaciones, la frecuencia propia puede ser un valor predefinido almacenado en la memoria de controlador, por ejemplo, la memoria 412, por ejemplo, por parte de un fabricante del controlador.

10 En la etapa 720, el controlador puede monitorizar una amplitud de un parámetro de funcionamiento controlado por el controlador a o cerca de una frecuencia dada. Por ejemplo, la amplitud del parámetro de funcionamiento puede monitorizarse a o cerca de la frecuencia propia de lazo cerrado. Haciendo referencia de nuevo a la figura 5B, por ejemplo, el controlador puede monitorizar la amplitud del ángulo de paso a o cerca de 0,1 Hz, por ejemplo, entre el intervalo de 0,05-0,2 Hz. En la etapa 730, al determinar que la amplitud del parámetro de funcionamiento a la frecuencia dada es mayor que un umbral predefinido, el controlador puede iniciar al menos una acción para mitigar el daño a componentes de una turbina eólica. Por ejemplo, haciendo referencia de nuevo a la figura 5B, si la amplitud es mayor que 0,75, puede llevarse a cabo la acción para mitigar el daño. Operaciones a modo de ejemplo para mitigar el daño a la turbina pueden ser, por ejemplo, desconexión de la turbina, hacer funcionar la turbina en un modo seguro, ajustar una ganancia del controlador y similares.

20 Mediante la proporción de métodos para detectar y evitar inestabilidad en el controlador, realizaciones de la invención proporcionan varias ventajas al funcionamiento, mantenimiento de turbinas eólicas. Por ejemplo, la frecuencia propia a la que puede producirse inestabilidad en el controlador puede cambiar a lo largo del tiempo debido a, por ejemplo, cambios ambientales, sustitución o alteración de partes de turbina eólica y similares. Al ejecutar los métodos a modo de ejemplo para detectar inestabilidad en el controlador, realizaciones de la invención pueden permitir determinar frecuencias específicas relacionadas con inestabilidad en el controlador en cualquier momento dado para cualquier turbina dada. El conocimiento específico adquirido a partir de determinar regularmente frecuencias asociadas con inestabilidad en el controlador puede usarse para concebir medidas personalizadas para evitar el daño individualmente para cada turbina.

30 Aunque la invención se ha ilustrado mediante la descripción de diversas realizaciones y aunque estas realizaciones se han descrito en considerable detalle, no es la intención del solicitante restringir o limitar en modo alguno el alcance de las reivindicaciones adjuntas a tal detalle. Ventajas y modificaciones adicionales resultarán evidentes para los expertos en la técnica. La invención en sus aspectos más amplios no se limita por tanto a los detalles específicos, métodos representativos y ejemplos ilustrativos mostrados y descritos.



**REIVINDICACIONES**

1. Método para hacer funcionar un controlador (400) en una turbina eólica (100), que comprende:  
 determinar una frecuencia propia de lazo cerrado del controlador, en el que la frecuencia propia de lazo cerrado la provoca la inestabilidad del controlador;
- 5  
 monitorizar una amplitud de un parámetro controlado por el controlador a o cerca de la frecuencia propia de lazo cerrado; y  
 al detectar que la amplitud del parámetro está por encima de un umbral predefinido, iniciar al menos una acción para mitigar el daño a componentes de una turbina eólica.
2. Método según la reivindicación 1, en el que determinar la frecuencia propia de lazo cerrado comprende:  
 10 entrar en un modo de detección de frecuencia propia;  
 mientras se encuentra en el modo de detección de frecuencia propia:  
 (a) establecer una ganancia de controlador a un valor de partida predefinido;  
 (b) hacer funcionar la turbina eólica durante un periodo de tiempo predefinido, en el que un valor del parámetro se registra durante el periodo de tiempo predefinido;
- 15 (c) ajustar la ganancia de controlador en una cantidad predefinida al final del periodo de tiempo predefinido; y  
 (d) repetir continuamente las etapas (b) y (c) hasta que la ganancia de controlador alcance un valor final predefinido; y  
 basándose en los valores registrados del parámetro en el modo de detección de frecuencia propia, determinar una frecuencia del parámetro al valor de ganancia mayor establecido durante el modo de detección de frecuencia propia para que sea una frecuencia propia del controlador.
- 20
3. Método según la reivindicación 1, en el que la al menos una acción comprende desconectar la turbina.
4. Método según la reivindicación 1, en el que la al menos una acción comprende hacer funcionar la turbina en un modo seguro.
- 25 5. Método según la reivindicación 1, en el que la al menos una acción comprende ajustar la ganancia del controlador.
6. Método según la reivindicación 1, en el que el controlador controla uno de:  
 un ángulo de paso de al menos una pala (132) de una turbina eólica;  
 una velocidad de generador de la turbina eólica.
- 30 7. Método según la reivindicación 1, en el que determinar la frecuencia propia de lazo cerrado comprende recuperar una frecuencia propia predefinida almacenada en una memoria del controlador.
8. Medio de almacenamiento legible por ordenador que comprende un producto de programa que, cuando lo ejecuta un procesador, está configurado para hacer funcionar un controlador (400) de una turbina eólica (100) para realizar el método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.
- 35 9. Turbina eólica (100) que comprende un controlador (400) configurado para controlar al menos un parámetro de funcionamiento de la turbina eólica, en la que el controlador está configurado para:  
 determinar una frecuencia propia de lazo cerrado del controlador, en la que la frecuencia propia de lazo cerrado la provoca la inestabilidad del controlador;
- 40 monitorizar una amplitud de un parámetro controlado por el controlador a o cerca de la frecuencia propia de lazo cerrado; y  
 al detectar que la amplitud del parámetro está por encima de un umbral predefinido, iniciar al menos una acción para mitigar el daño a componentes de una turbina eólica.
10. Turbina eólica según la reivindicación 9, en la que para determinar la frecuencia propia de lazo cerrado, el controlador está configurado para:  
 45 entrar en un modo de detección de frecuencia propia;

mientras se encuentra en el modo de detección de frecuencia propia:

(a) establecer una ganancia de controlador a un valor de partida predefinido;

(b) hacer funcionar la turbina eólica durante un periodo de tiempo predefinido, en la que un valor del parámetro se registra durante el periodo de tiempo predefinido;

5 (c) ajustar la ganancia de controlador en una cantidad predefinida al final del periodo de tiempo predefinido; y

(d) repetir continuamente las etapas (b) y (c) hasta que la ganancia de controlador alcanza un valor final predefinido; y

10 basándose en los valores registrados del parámetro en el modo de detección de frecuencia propia, determinar una frecuencia del parámetro al valor de ganancia mayor establecido durante el modo de detección de frecuencia propia para que sea una frecuencia propia del controlador.

11. Turbina eólica según la reivindicación 9, en la que la al menos una acción comprende desconectar la turbina.

15 12. Turbina eólica según la reivindicación 9, en la que la al menos una acción comprende hacer funcionar la turbina en un modo seguro.

13. Turbina eólica según la reivindicación 9, en la que la al menos una acción comprende ajustar la ganancia del controlador.

14. Turbina eólica según la reivindicación 9, en la que el controlador controla uno de:

un ángulo de paso de al menos una pala (132) de una turbina eólica;

20 una velocidad de generador de la turbina eólica.

15. Turbina eólica según la reivindicación 9, que comprende además un actuador de ángulo de paso de pala, y un sensor para detectar un ángulo de paso de pala, en la que el ángulo de paso de pala medido por el sensor se proporciona como entrada al controlador.

25 16. Turbina eólica según la reivindicación 10, en la que el controlador está configurado para entrar en el modo de detección de frecuencia propia a una frecuencia predefinida.

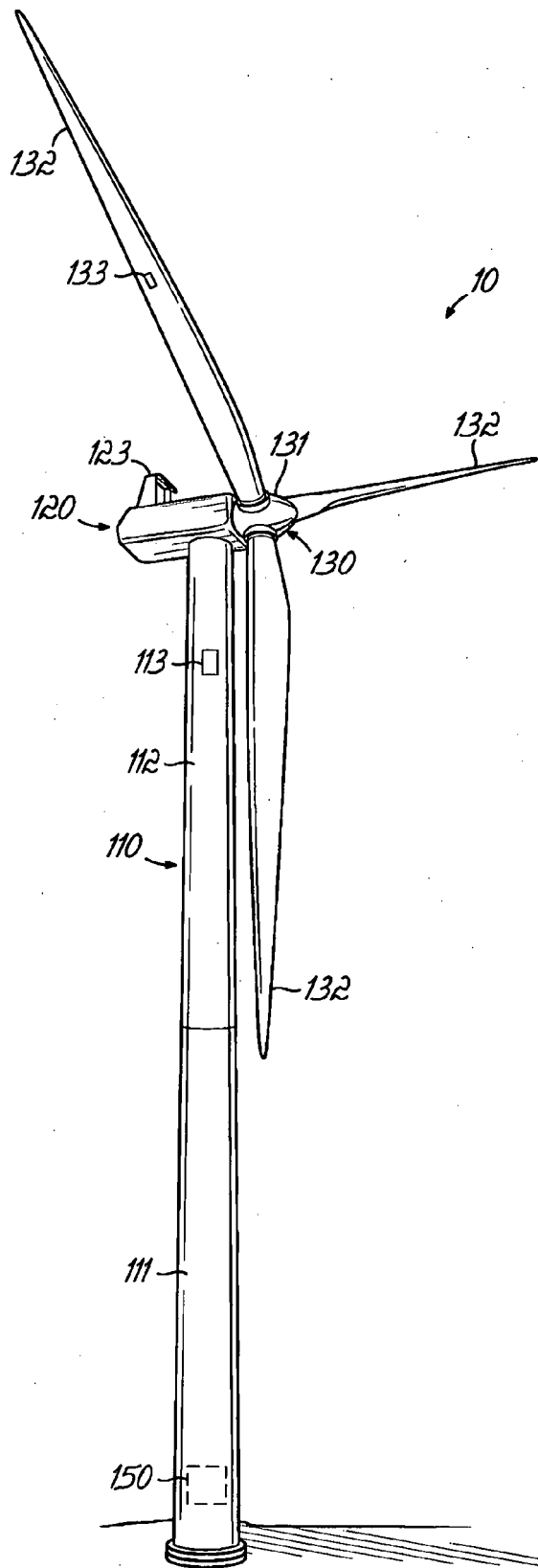


FIG. 1

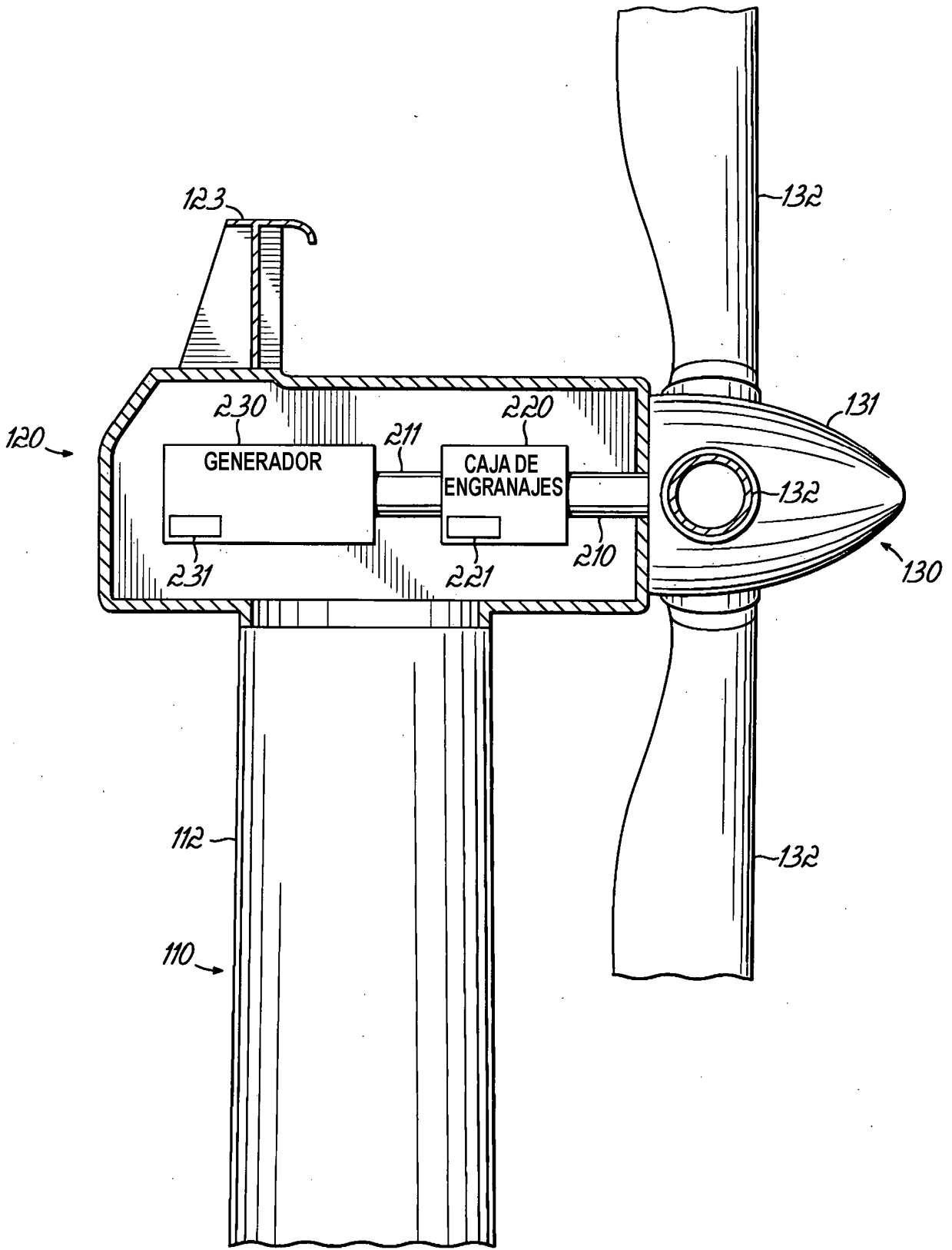


FIG. 2

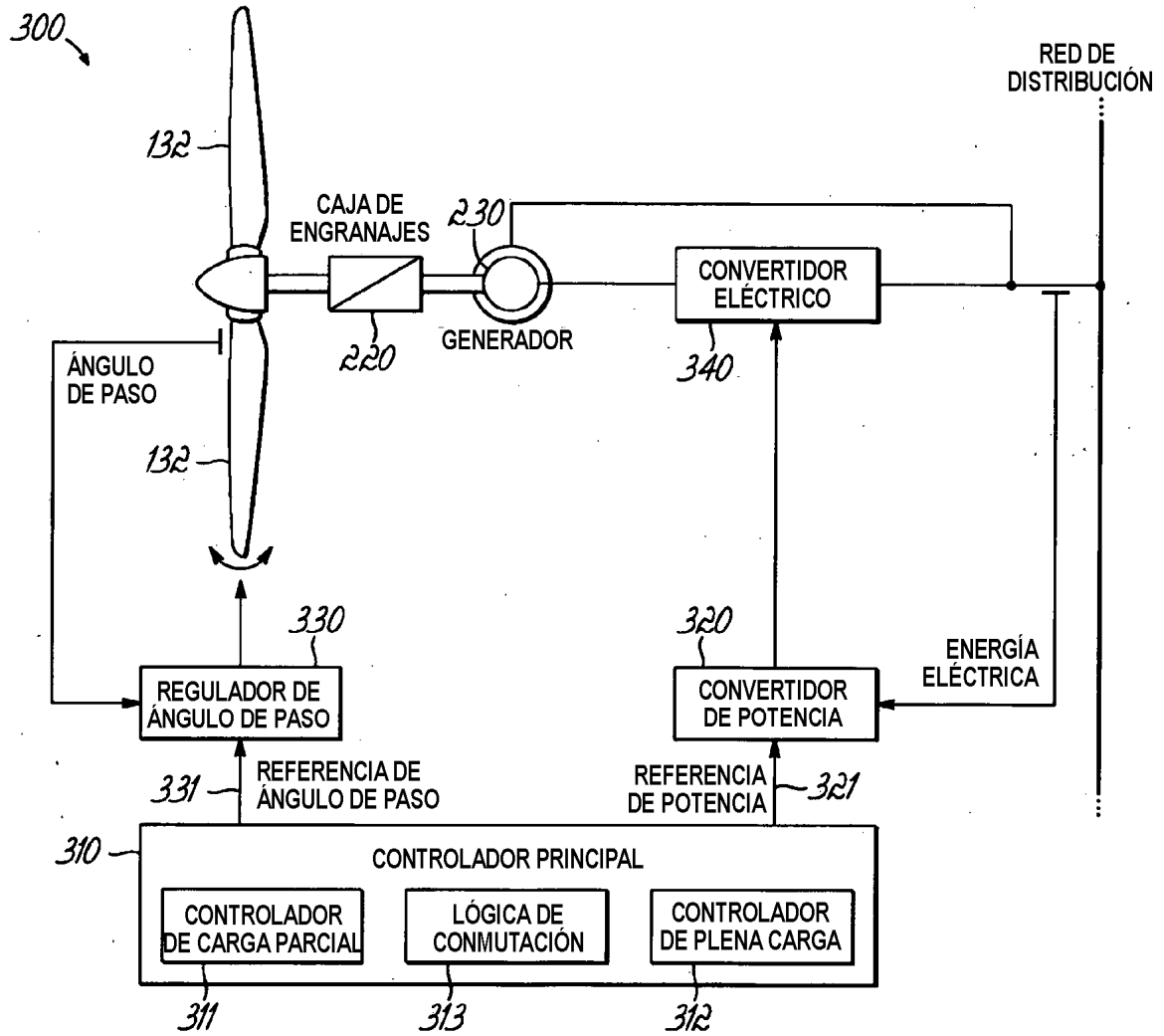


FIG. 3

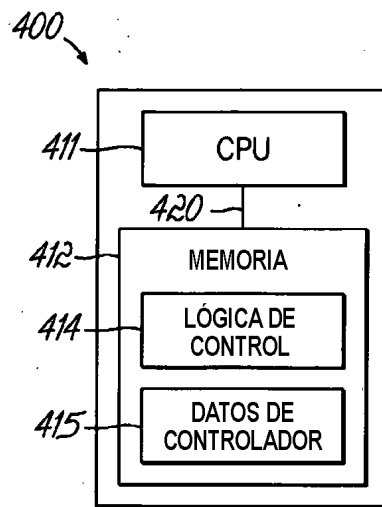
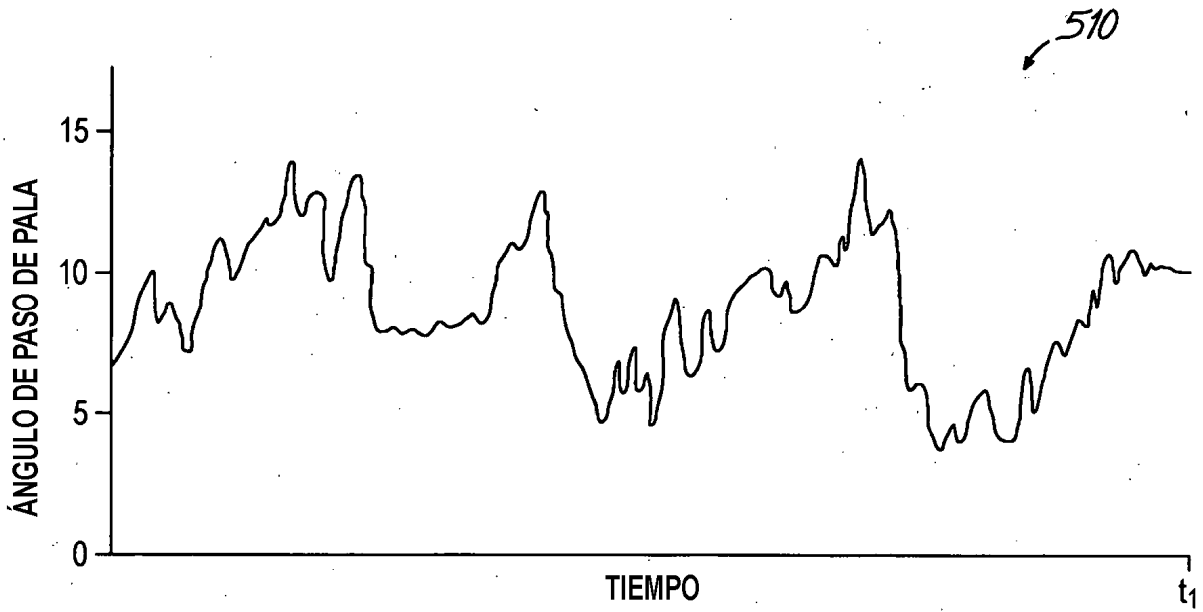
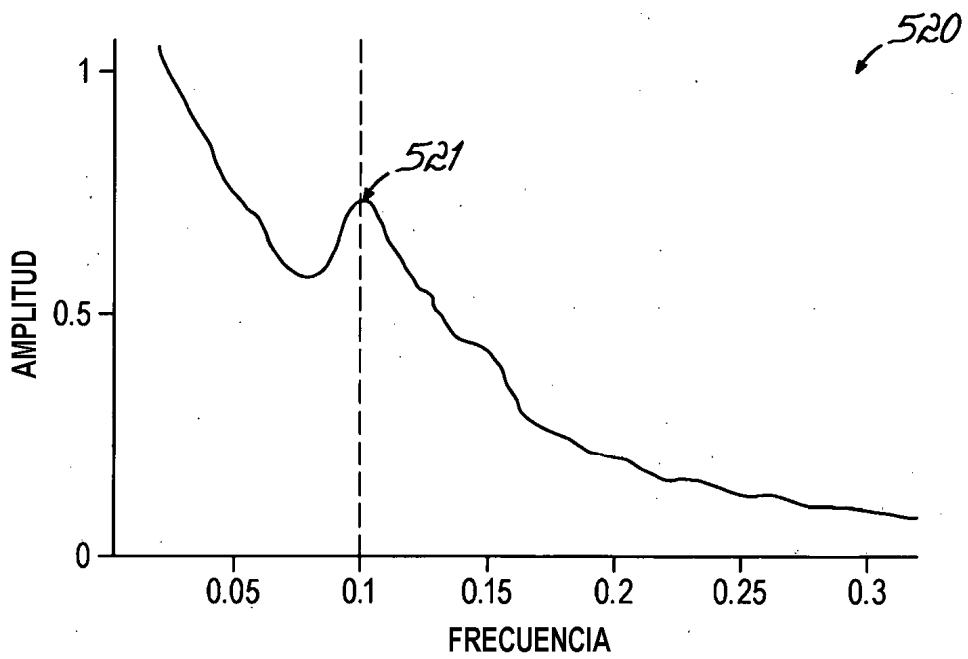


FIG. 4



**FIG. 5A**



**FIG. 5B**

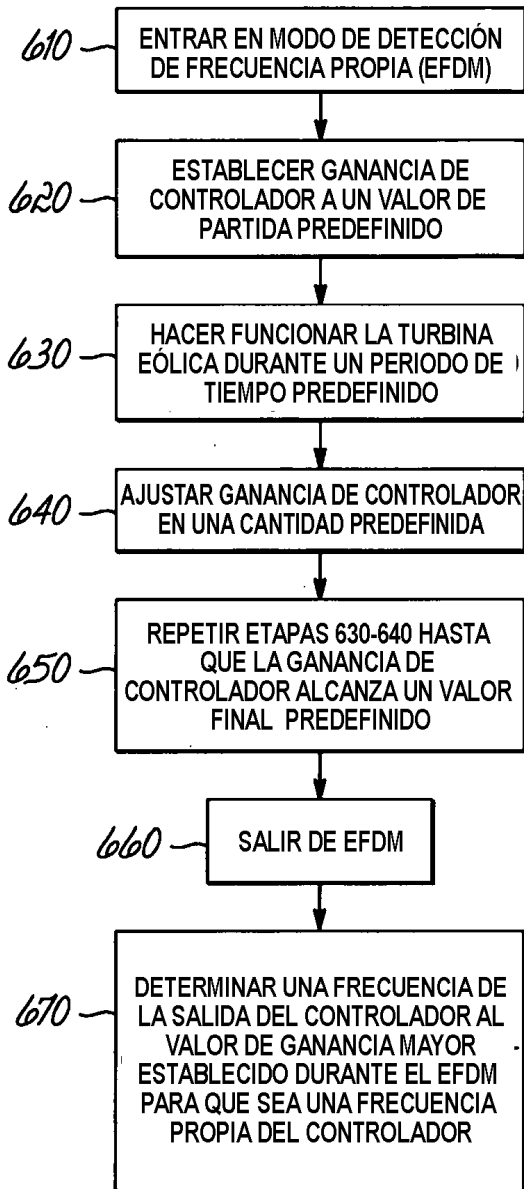


FIG. 6

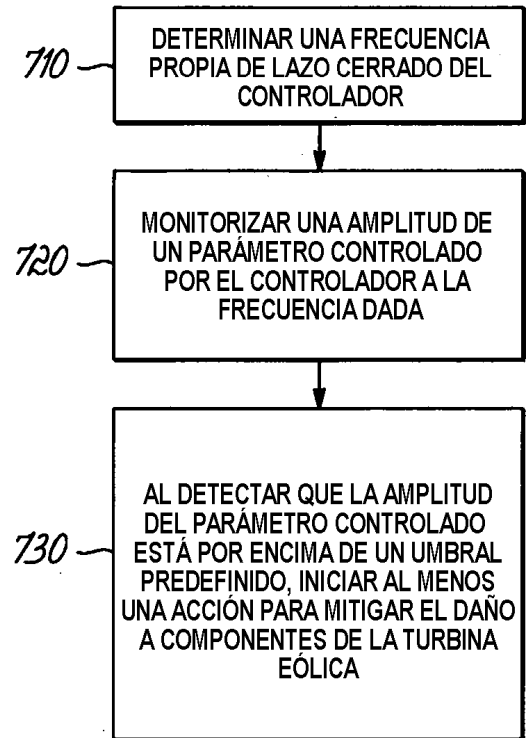


FIG. 7