

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 911 013**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 17/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.05.2019 PCT/DK2019/050147**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.11.2019 WO19219138**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.05.2019 E 19725273 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.04.2022 EP 3794231**

54 Título: **Método de aerogenerador para detección y control de oscilaciones de vórtice**

30 Prioridad:

**16.05.2018 DK PA201870298**

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

**17.05.2022**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**DALSGAARD, SØREN y**

**NETO, JULIO XAVIER VIANNA**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 911 013 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**

Método de aerogenerador para detección y control de oscilaciones de vórtice

**Campo de la invención**

5 La invención se refiere a la detección de oscilaciones en aerogeneradores, en particular a la detección de oscilaciones de vórtice en las palas de aerogeneradores y el control de aerogeneradores en base a tales oscilaciones.

**Antecedentes de la invención**

10 Se puede provocar que las palas de aerogeneradores oscilen en modos de vórtice. Los métodos existentes para detectar modos de vórtice pueden no ser suficientes, por ejemplo, lo suficiente rápidos para detectar una oscilación e invocar posteriormente una acción de control para reducir la oscilación. Se conoce detectar oscilaciones por métodos de FFT. No obstante, tales métodos son tal vez demasiado lentos con el fin de ser capaces de iniciar una acción de control antes de que aumente la oscilación hasta amplitudes inaceptables. Por consiguiente, hay una necesidad de mejorar los métodos para detectar oscilaciones de pala.

15 Para diferentes propósitos como la reducción de las cargas de canto, los costes de producción de las palas de aerogenerador y otros componentes de aerogenerador, sería beneficioso reducir la cantidad de material usado para la fabricación de palas de aerogenerador. No obstante, la reducción de la cantidad de material puede causar una reducción de la rigidez de la pala. La menor rigidez de pala puede fomentar la generación de oscilaciones de vórtice de las palas. De este modo, también se necesitan métodos mejorados para detectar oscilaciones de la pala con el fin de realizar reducciones en la cantidad de material usado para la fabricación de palas. Los documentos  
20 WO2017/092773A1 y WO2017/174094A1 describen ejemplos de la técnica anterior.

**Compendio de la invención**

25 Es un objeto de la invención mejorar la detección de oscilaciones de palas en aerogeneradores. También es un objeto de la invención mejorar los métodos de control de aerogeneradores, en particular, métodos de control que mejoran la vida útil y/o las capacidades de producción de aerogeneradores. También es un objeto de la invención permitir la fabricación de palas de palas de aerogeneradores con un consumo reducido de material.

En un primer aspecto de la invención se proporciona un método para controlar un aerogenerador que comprende un rotor con dos o más palas, el método comprende,

- obtener una señal de medición indicativa de una oscilación de pala de al menos una de las palas, donde la señal de medición se obtiene en un marco de medición del aerogenerador.
- 30 - transformar por rotación la señal de medición, o una derivada de la misma, del marco de medición en al menos un marco objetivo en base a una frecuencia de interés de la al menos una pala para obtener una señal transformada por rotación, donde el al menos un marco objetivo gira con la frecuencia de interés con relación a una frecuencia de rotación del rotor, y donde la transformación por rotación comprende una dirección de transformación por rotación hacia atrás o hacia delante con relación a una dirección de rotación de rotor,
- 35 - en base a la señal transformada por rotación, obtener al menos un componente de oscilación de pala de la oscilación de pala que actúa en la dirección de rotación hacia atrás o hacia delante con relación a la dirección de rotación de rotor, y
- controlar el aerogenerador en base al componente de oscilación de pala.

40 La transformación por rotación del marco de medición al marco objetivo se basa en la frecuencia de interés, por ejemplo, una frecuencia de oscilación esperada de la pala. Por consiguiente, la frecuencia de interés se usa para determinar el ángulo en diferentes momentos de modo que las mediciones, por ejemplo, las fuerzas de pala, se puedan convertir en el marco objetivo que gira con la misma frecuencia que las oscilaciones de pala. En el marco objetivo, la señal transformada se puede procesar en un componente de señal que se puede usar para controlar el aerogenerador.

45 Ventajosamente, el método no se basa en métodos de FFT exigentes computacionalmente, sino en transformaciones por rotación y filtrado de modo que las posibles oscilaciones de pala se puedan detectar muy rápido.

Además, el método permite la detección de una dirección de rotación particular de la oscilación de pala, en la dirección hacia delante o hacia atrás de la rotación, o posiblemente en ambas direcciones.

50 El control del aerogenerador en base al componente de oscilación de pala puede ser una función opcional dado que el al menos un componente de oscilación de pala puede ser útil por sí misma para otros propósitos distintos al de controlar el aerogenerador, por ejemplo, para la estimación de fatiga acumulada de pala.

El método puede ser útil para diferentes frecuencias de interés de modo que se puedan obtener los componentes de oscilación de pala para diferentes frecuencias.

Según una realización, el al menos un componente de oscilación de pala comprende un componente de oscilación de pala hacia delante de la oscilación de pala que actúa en una dirección hacia delante de la rotación de rotor. Según otra realización, el al menos un componente de oscilación de pala comprende un componente de oscilación hacia atrás de la oscilación de pala que actúa en una dirección hacia atrás de la rotación de rotor. Ventajosamente, el método se puede usar para determinar componentes de oscilación de pala para una dirección o bien hacia atrás o bien hacia delante. Claramente, el método se puede usar también para determinar componentes de oscilación de pala para direcciones tanto hacia atrás como hacia delante. Dependiendo de las condiciones operacionales actuales del aerogenerador, el método se puede usar para detectar el componente de oscilación para una dirección de oscilación que puede ser más relevante en vistas de la condición de operación del aerogenerador. Por ejemplo, si la velocidad de rotación del aerogenerador tiene un cierto valor, puede haber un riesgo de que se pueda provocar una resonancia de oscilación de vórtice hacia atrás por una frecuencia 3P de la rotación de rotor. Por consiguiente, el método se puede centrar en detectar la oscilación de pala en la dirección hacia atrás y a una frecuencia de interés que se podría provocar por la frecuencia 3P.

Según una realización, el método comprende filtrar la señal transformada por rotación para obtener el al menos un componente de oscilación de pala. Dado que la oscilación de pala en la frecuencia de interés se transforma en un espectro de frecuencia bajo, el componente de oscilación de pala se puede obtener ventajosamente por simple filtrado, por ejemplo, filtrado paso bajo.

Según una realización, el método comprende filtrar paso banda la señal de medición en base a la frecuencia de interés antes de la transformación por rotación de la señal de medición. La señal de medición se puede filtrar inicialmente en base a la frecuencia de interés de modo que se puedan eliminar frecuencias no relevantes o molestas. El filtrado inicial puede permitir ventajosamente un filtrado más simple de la señal transformada por rotación.

Según una realización, el marco de medición es un marco de rotor que gira con el rotor o el marco de medición es un marco no giratorio. Ventajosamente, la señal de medición se puede obtener a partir de sensores situados en un componente giratorio del aerogenerador o a partir de sensores situados en un componente no giratorio tal como sensores de aceleración, de carga o de tensión situados en la góndola.

Según una realización, la frecuencia de interés es una frecuencia de resonancia de la al menos una pala. Dado que las oscilaciones a las frecuencias de resonancia de pala pueden ser las más críticas dado que se pueden provocar hasta grandes amplitudes, el método se puede usar ventajosamente para monitorizar amplitudes de oscilaciones en tales frecuencias de resonancia.

Según una realización, el método comprende además transformar por rotación la señal de medición del marco de medición en una señal de medición en el marco no giratorio en base a una posición angular  $\Phi$  del rotor. Como primer paso, la señal de medición obtenida a partir de los sensores situados en un componente giratorio se puede transformar por rotación en un marco no giratorio. Debido a la transformación, los componentes de oscilación hacia delante y hacia atrás se transforman en diferentes frecuencias en el marco no giratorio.

Según una realización, el método comprende además el filtrado paso banda de la señal de medición obtenida en el marco no giratorio, o la señal de medición transformada en el marco no giratorio, en base a una frecuencia de la frecuencia de oscilación de pala en el marco no giratorio determinada en base a la frecuencia de interés y la frecuencia de rotación del rotor. Dado que los componentes de oscilación hacia delante y hacia atrás se transforman en diferentes frecuencias en el marco giratorio, las diferentes oscilaciones hacia delante y detrás se pueden extraer por consiguiente en sus frecuencias en el marco no giratorio.

Según una realización, el método comprende además transformar por rotación la señal de medición filtrada paso banda en el marco no giratorio del marco no giratorio al marco de rotor para obtener una señal de la oscilación de pala a la frecuencia de interés. Transformando por rotación la señal de medición filtrada paso banda de vuelta al marco de rotor, se puede obtener una señal para la oscilación hacia atrás y para la oscilación hacia delante. Una o ambas de estas señales se transforman además al marco objetivo que gira con la frecuencia de interés.

Según una realización, el control del aerogenerador comprende ajustar la frecuencia de rotación del rotor dependiente del componente de oscilación de pala. Ventajosamente, dado que las oscilaciones de pala se pueden provocar debido a la rotación de rotor, las oscilaciones de pala detectadas se pueden reducir reduciendo la velocidad de rotor o posiblemente aumentando la velocidad de rotor.

Según una realización, el control del aerogenerador se basa en una amplitud y/o fase del al menos un componente de oscilación de pala.

Ventajosamente, mediante el uso de la fase, se puede controlar el paso de las palas del aerogenerador para contrarrestar las oscilaciones de pala.

Un segundo aspecto de la invención se refiere a un sistema de control para controlar un aerogenerador que comprende un rotor con dos o más palas, donde el sistema de control se dispone para realizar los pasos según el método del primer aspecto.

5 Un tercer aspecto de la invención se refiere a un producto de programa informático que comprende código software adaptado para controlar un aerogenerador cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos, el producto de programa informático que está adaptado para realizar el método de cualquiera del primer aspecto.

Un cuarto aspecto de la invención se refiere a un aerogenerador que comprende un rotor con dos o más palas, donde el aerogenerador comprende además un sistema de control según el segundo aspecto.

#### Breve descripción de los dibujos

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

la Fig. 1A ilustra un aerogenerador,

la Fig. 1B ilustra un marco de rotor y un sistema de coordenadas del rotor, y un marco objetivo y sistema de coordenadas de la oscilación de pala,

15 la Fig. 2A ilustra un método para detectar oscilaciones de vórtice hacia delante y hacia atrás y un sistema de control para la detección de oscilaciones y controlar el aerogenerador,

la Fig. 2B ilustra los espectros de frecuencia de la señal de oscilación de vórtice hacia atrás y hacia delante en sus frecuencias respectivas en el marco no giratorio,

la Fig. 3A ilustra una realización alternativa del sistema de control,

20 la Fig. 3B ilustra espectros de la señal transformada por rotación en el marco objetivo, y

la Fig. 4 muestra aerogeneradores configurados como aerogeneradores de múltiples rotores.

#### Descripción de las realizaciones

25 La Fig. 1A muestra un aerogenerador 100 (WTG) que comprende una torre 101 y un rotor 102 con al menos una pala de rotor 103, tal como tres palas. Las palas 103 están conectadas con el buje 105 que se dispone para girar con las palas. El rotor está conectado a una góndola 104 que está montada encima de torre 101 y que está adaptada para accionar un generador situado dentro de la góndola a través de un tren motriz. El rotor 102 se puede hacer girar por acción del viento. La energía rotacional inducida por el viento de las palas de rotor 103 se transfiere a través de un eje al generador. De este modo, el aerogenerador 100 es capaz de convertir energía cinética del viento en energía mecánica por medio de las palas de rotor y, posteriormente, en energía eléctrica por medio del generador. El generador está conectado con un convertidor de potencia, que comprende un convertidor de lado de generador y un convertidor de lado de red. El convertidor de lado de generador convierte la potencia de AC del generador en potencia de DC y el convertidor de lado de red convierte la potencia de DC en una potencia de AC para la inyección en la red de la empresa de servicios públicos a través de los inductores de salida del aerogenerador 100.

35 La Fig. 4 muestra aerogeneradores 100 alternativos configurados como aerogenerador de múltiples rotores. Los aerogeneradores de múltiples rotores comprenden una pluralidad de góndolas 104. Las góndolas 104 se pueden soportar, como se ilustra en el dibujo superior, a través de una torre 101 y brazos de soporte que se extienden hacia fuera de la torre 101 de modo que las góndolas se coloquen lejos de la torre y en lados opuestos de la torre. Alternativamente, como se ilustra en el dibujo inferior, las góndolas 104 se pueden soportar por torres 101 en ángulo que se extienden desde unos cimientos 130, por ejemplo, unos cimientos en tierra o flotantes, de modo que dos o más góndolas 104 estén suficientemente separadas unas de otras a una altura dada. Las realizaciones de la presente invención se pueden usar con aerogeneradores de múltiples rotores o aerogeneradores de rotor único.

45 Se puede provocar que las palas oscilen como se indica por la oscilación 110. La oscilación puede causar un movimiento lineal, un movimiento elíptico de la punta de la pala u otras trayectorias de movimiento de la punta de pala. Tales oscilaciones de las palas, cuando se observan colectivamente desde una perspectiva del rotor, se conocen como oscilaciones de vórtice. Las oscilaciones de vórtice pueden ser oscilaciones resonantes o no resonantes.

El rotor 102 y el buje 105 giran en la dirección de buje 120. La posición angular del rotor 102 y el buje 102 se da por el azimut  $\Phi$ . De este modo, la frecuencia de rotación del rotor y el buje es  $f_{\text{bujes}} = d\Phi/dt$ .

50 La oscilación de vórtice de una pala puede ser una oscilación de vórtice hacia delante (FW), una oscilación de vórtice hacia atrás (BW) o la oscilación de vórtice puede comprender tanto una oscilación de vórtice hacia delante (FW) como una oscilación de vórtice hacia atrás (BW). La oscilación de vórtice hacia delante FW actúa en la

dirección hacia delante de la dirección de rotación de rotor 120, mientras que la oscilación de vórtice hacia atrás BW actúa en la dirección hacia atrás de la dirección de rotación de rotor 120.

5 La oscilación de vórtice puede tener más de una frecuencia de vórtice incluyendo una o más de frecuencias de resonancia y frecuencias de no resonancia de primer, segundo orden y superior. Las oscilaciones resonantes incluyen oscilaciones de aleta y de canto de las palas. Las realizaciones de la invención se refieren a detectar al menos una frecuencia de interés  $f_i$  de las oscilaciones de vórtice que puede ser cualquiera de la una o más frecuencias de vórtice referidas.

10 La Fig. 1B muestra el sistema de coordenadas  $X_h, Z_h$  del buje 105 y el rotor 102 que gira con la frecuencia de rotación  $f_{\text{buj}}$  en la dirección en el sentido contrario a las agujas del reloj. Alternativamente, y comúnmente, el rotor gira en la dirección en el sentido de las agujas del reloj cuando el rotor se ve desde delante.

El sistema de coordenadas  $X_w, Z_w$ , en la ilustración izquierda, representa una oscilación de vórtice hacia delante FW con la frecuencia de oscilación  $f_i$ . Dado que la oscilación de vórtice hacia delante FW gira con la dirección de rotación del buje, la frecuencia de vórtice hacia delante con relación a la tierra o un marco no giratorio se da por  $f_i + f_{\text{buj}}$ .

15 El sistema de coordenadas  $X_w, Z_w$ , en la ilustración derecha, representa una oscilación de vórtice hacia atrás BW con la frecuencia de oscilación  $f_i$ . Dado que la oscilación de vórtice hacia atrás BW gira en una dirección de rotación opuesta a la rotación del buje, la frecuencia de vórtice hacia atrás con relación a la tierra o un marco no giratorio se da por  $f_i - f_{\text{buj}}$ .

20 Los ejemplos de la frecuencia de rotación  $f_{\text{buj}}$  del buje 105 incluyen frecuencias en el rango de 0,2-1 Hz. Los ejemplos de la frecuencia de interés  $f_i$  de las oscilaciones de vórtice de pala incluyen frecuencias en el rango de 0,5 a 3 Hz. No obstante, son posibles otras frecuencias, por ejemplo, dependientes de las dimensiones, los materiales y el diseño de las palas 103.

25 La Fig. 2A ilustra un método para detectar oscilaciones de vórtice hacia delante y hacia atrás 110 de las palas y para controlar el aerogenerador en base a los componentes de oscilación hacia delante y/o hacia atrás 204 obtenidas de las oscilaciones 110 detectadas, así como un sistema de control 250 para realizar la detección y control.

La detección de oscilaciones de vórtice se basa en una señal de medición 201 que puede contener información de una oscilación de pala 103, donde la información está relacionada directa o indirectamente con las oscilaciones de pala 110.

30 Las mediciones de señal 201 se pueden obtener de diversos sensores situados en componentes giratorios o no giratorios del aerogenerador. La señal de medición 201 se origina a partir de un marco de medición que representa el componente giratorio o no giratorio real del aerogenerador.

35 La señal de medición 201 se puede obtener a partir de sensores de pala dispuestos para medir desviaciones de pala, tensiones de pala, aceleraciones de pala u otras características de pala de una o más palas individuales. Tales sensores, por ejemplo, sensores de tensión ópticos, se pueden fijar a las palas. La señal de medición puede contener directamente información acerca de las amplitudes de oscilación, por ejemplo, en forma de desviaciones de pala medidas, o indirectamente en forma de aceleraciones de pala medidas.

40 Se hace referencia al marco de medición de la señal de medición 201 que se origina a partir de tales sensores de pala como marco de rotor. El marco de rotor gira con el sistema de coordenadas  $X_h, Z_h$ . El marco de rotor gira con el rotor 102 y el buje 105. Los sensores de pala proporcionan una o más señales  $Mr_1 - Mr_3$ . Para un rotor de 3 palas 102, la señal de medición puede estar constituida por las señales  $Mr_1, Mr_2, Mr_3$ . Las señales  $Mr_1 - Mr_3$  puede ser en forma de señales de desviación de pala, señales de tensión de pala, señales de momento de pala u otras señales de pala  $Mr_1 - Mr_3$ .

45 Alternativamente o además, la señal de medición 201 se puede obtener también a partir de sensores de buje dispuestos en el buje giratorio 105. Por ejemplo, los sensores de buje pueden ser sensores de aceleración que proporcionan información acerca de las aceleraciones de pala y por ello oscilaciones de pala. Por ejemplo, los sensores de buje se pueden disponer para proporcionar componentes de señal, por ejemplo, componentes de fuerza u otras señales de buje  $F_{hx}, F_{hz}$ , a lo largo de los ejes de coordenadas  $X_h, Z_h$  mostrados en la Fig. 1B. Se hace referencia al marco de medición de la señal de medición 201 que se origina a partir de tales sensores de buje como el marco de rotor.

50 Como se muestra en la Fig. 2A, la señal de medición 201 es o bien en forma de señales de pala  $Mr_1 - Mr_3$  o bien en forma de señales de buje  $F_{hx}, F_{hz}$ . Alternativamente, la señal de medición 201 puede constituir una combinación de señales de pala y señales de buje.

55 La señal de medición 201 se transforma por rotación mediante la transformación por rotación 210, R2F del marco de rotor en un marco no giratorio, es decir, un marco fijo. La señal de medición 201 en el marco no giratorio se denota  $F_x, F_z$ .

La transformación por rotación 210 se basa en el ángulo de azimut  $\Phi$  del rotor según los métodos de transformación por rotación conocidos tales como la transformación de Colemann, la transformación de DQ0 o matrices de rotación generales.

- 5 Las señales de pala Mr1-Mr3 no están definidas en el sistema de coordenadas de buje Xh, Zh dado que las direcciones de las palas 103 no son coincidentes con los ejes Xh, Zh. De este modo, las señales de pala Mr1-Mr3 se necesitan ser proyectadas, por ejemplo, mediante el uso de una matriz de proyección P, sobre el sistema de coordenadas de buje Xh, Zh, antes de ser transformadas por rotación mediante la transformación por rotación 210. Una señal de medición en forma de señales de buje de pala Fhx, Fhz puede ser ya coincidente con los ejes Xh, Zh.

De este modo, la señal de medición 201 en el marco no giratorio, denotada Fx, Fz, se puede hallar como

10  $[F_x, F_z] = R(\Phi) P [Mr_1, Mr_2, Mr_3]$  o

$[F_x, F_z] = R(\Phi) [F_{hx}, F_{hz}]$ ,

donde P es la matriz de proyección y  $R(\Phi)$  es la transformación por rotación 210. La matriz de proyección no se ilustra explícitamente en la Fig. 2A, pero se podría ilustrar como un elemento de rotación situado entre la entrada 201 y la transformada por rotación 210.

- 15 Las oscilaciones de vórtice hacia atrás y hacia delante en la frecuencia de interés  $f_i$  se transformarán mediante la transformada de rotación 210 en las respectivas frecuencias hacia atrás y hacia delante  $f_{BW}$  y  $f_{FW}$  en el marco no giratorio con  $f_{BW}=f_i-f_{buj}$  y  $f_{FW}=f_i+f_{buj}$ .

- 20 Como alternativa a obtener la señal de medición 201 del marco de rotor, una señal de medición 202 se puede obtener a partir de los sensores dispuestos en un marco no giratorio para proporcionar información acerca de las aceleraciones de pala y por ello de oscilaciones de vórtice de pala. Por ejemplo, los sensores de góndola situados en la góndola 104 proporcionan señales de góndola Fnx, Fnz. Se hace referencia al marco de medición de la señal de medición 202 que se origina a partir de tales sensores de góndola como el marco de góndola o marco no giratorio.

- 25 La señal de medición 202 obtenida del marco no giratorio es equivalente a la señal de medición 201 transformada al marco no giratorio. De este modo, la señal de medición 202 en forma de las señales de góndola Fnx, Fnz es equivalente a la señal Fx, Fz obtenida de la señal de medición 201.

Las oscilaciones de vórtice a la frecuencia de interés  $f_i$  contenidas en la señal de medición 202 del marco no giratorio, alternativamente la señal transformada por rotación Fx, Fz - tendrán las frecuencias  $f_{BW} = f_i - f_{buj}$  y  $f_{FW} = f_i + f_{buj}$  para la oscilación de vórtice de rotación hacia atrás y hacia delante respectiva.

- 30 Dado que la señal de medición 201, 202 se puede obtener en el marco de rotor o en el marco no giratorio, el elemento de transformación por rotación 210 dispuesto para transformar la señal de medición 210 del marco de medición al marco no giratorio es opcional, dependiendo del origen de la señal de medición.

Se aplica una transformación por rotación 211, F2R, a la señal Fx, Fz obtenida de la señal de medición 201 o a la señal de medición 202 en forma de señales de góndola Fnx, Fnz.

- 35 De este modo, la señal de medición 202, o una derivada de la señal de medición 201, se transforma por rotación mediante la transformación por rotación 211. La derivada de la señal de medición 201 es una señal derivada de la señal de medición 201, por ejemplo, por medio de la transformación por rotación-proyección,  $R(\Phi) P$ , la transformación por rotación,  $R(\Phi)$ , u otra transformación o derivación.

- 40 Además o alternativamente, cualquiera de las señales de medición 201, 202, se pueden someter a otras transformaciones o derivaciones tales como un filtrado antes de que se aplique la transformación por rotación 211.

El propósito de la transformación por rotación 211 es llevar la señal de medición 201, 202 desde el marco de medición, es decir, desde cualquiera del marco de rotor o el marco no giratorio, a un marco objetivo que gira con la frecuencia de interés  $f_i$  con relación a una frecuencia de rotación  $f_{buj}$  del rotor y con la dirección de rotación de la respectiva al menos un componente de oscilación de pala.

- 45 Dado que las señales de góndola Fnx, Fnz y las señales Fx, Fz obtenidas de la señal de medición 201 pueden contener tanto un componente de frecuencia  $f_i - f_{buj}$  para la oscilación de vórtice hacia atrás BW y un componente de frecuencia  $f_i + f_{buj}$  para la oscilación de vórtice hacia delante FW, la transformación por rotación puede comprender dos transformaciones por rotación, una para la oscilación de vórtice hacia atrás BW y una para la oscilación de vórtice hacia delante FW. De este modo, la transformación por rotación 211 comprende una dirección de rotación hacia atrás y hacia delante del marco objetivo con relación a una dirección de rotación de rotor.
- 50

La transformación por rotación 211 para la oscilación de vórtice hacia atrás BW se basa en la frecuencia de interés  $f_i$  y el ángulo de rotor  $\Phi$  y se puede describir de la siguiente manera:

$$[BW_x, BW_z] = R(\Phi - \theta_{fi}) [F_x, F_z]$$

De manera similar, la transformación por rotación 211 para la oscilación de vórtice hacia delante BW se puede describir de la siguiente manera:

$$[FW_x, FW_z] = R(\Phi + \theta_{fi}) [F_x, F_z]$$

5 Donde  $R(\Phi - \theta_{fi})$  y  $R(\Phi + \theta_{fi})$  son las respectivas transformaciones de rotación 211 y donde  $\theta_{fi}$  es la posición angular de la oscilación de vórtice.  $\theta_{fi}$  se puede obtener integrando la frecuencia de interés  $f_i$  en el tiempo o simplemente como  $\theta_{fi} = f_i \times t$ .

10 Cada una de las transformaciones por rotación  $R(\Phi - \theta_{fi})$  y  $R(\Phi + \theta_{fi})$  se puede formular equivalentemente como producto de dos transformaciones por rotación, es decir, como  $R(\Phi - \theta_{fi}) = R_1(\Phi) R(-\theta_{fi})$  y  $R(\Phi + \theta_{fi}) = R_1(\Phi) R(\theta_{fi})$ , respectivamente.

De este modo, como se ilustra, la transformación por rotación 211 se puede configurar como dos transformaciones por rotación 211a, 211b consecutivas para transformar por rotación del marco no giratorio al marco de rotor en base al azimut  $\Phi$  y posteriormente para transformar por rotación del marco de rotor al marco objetivo en base a la frecuencia de interés  $f_i$ . Las transformaciones por rotación 211a, 211b se pueden aplicar también en orden opuesto.

15 Por consiguiente, la transformación por rotación 211 se puede dividir en dos transformaciones por rotación, de modo que la transformación por rotación 211 incluya una transformación por rotación 211a de la señal de medición 201, 202, o la derivada de la misma, del marco no giratorio al marco de rotor.

20 La Fig. 2A, a la izquierda en el sistema de coordenadas, ilustra los espectros de frecuencia de la señal de oscilación de vórtice hacia atrás y hacia delante  $F_x, F_z$  obtenida a partir de una de las señales de medición 201, 202, en sus respectivas frecuencias  $f_i - f_{buje}$  y  $f_i + f_{buje}$ . La Fig. 2B, a la derecha en el sistema de coordenadas, muestra la señal transformada por rotación 203 generada por la transformación 211 de la señal de medición 202 o la derivada de cualquiera de las señales de medición 201, 202. La transformación por rotación 211 puede incluir una transformación por rotación en la dirección hacia delante para transformar la oscilación de vórtice hacia delante en el marco no giratorio a un rango de frecuencia cero o baja en el marco objetivo y/o una transformación por rotación en la dirección hacia atrás para transformar la oscilación de vórtice hacia atrás en el marco no giratorio a un rango de frecuencia cero o baja en el marco objetivo. Como se ilustra, la señal de medición 201, 202 se transforma por una transformación por rotación hacia delante en la señal 203. Esta señal 203 comprende la señal de vórtice hacia delante  $FW_x, FW_z$  en una región de baja frecuencia y la oscilación de vórtice hacia atrás transformada en la señal  $BW_x, BW_z$  a la frecuencia  $2 \cdot f_i$ , es decir, a una frecuencia que es dos veces la frecuencia de interés. De esta forma, un componente de oscilación de pala 204 para la oscilación hacia atrás y/o hacia delante se puede obtener filtrando la señal transformada por rotación 203, por ejemplo, por medio de, por ejemplo, filtrado paso bajo o de ranura. Por conveniencia, la señal transformada por rotación 203 solamente se ilustra para la transformación por rotación hacia delante  $F2R\_FW$  de la transformación por rotación 211.

35 Por consiguiente, la transformación por rotación 211 transforma un espectro de frecuencia de la señal de medición 201, 202, o una derivada de la misma, a un espectro de frecuencia en el marco objetivo que comprende una frecuencia cero.

40 La señal transformada por rotación 203 se puede procesar en el elemento de procesamiento 212, por ejemplo, como se ha mencionado mediante filtrado paso bajo. De este modo, el elemento de procesamiento 212 puede ser un filtro paso bajo configurado con una frecuencia de corte adecuada para extraer el componente de DC relevante de la señal transformada por rotación 203.

45 El elemento de procesamiento 212 se puede configurar para determinar la amplitud y/o la fase de la señal transformada por rotación 203. De este modo, como se ilustra, el elemento de procesamiento 212 puede determinar el componente de oscilación de pala 204 de modo que incluya una o más de las cantidades: la amplitud  $FW\_amp$  de la señal  $FW_x, FW_z$ , la amplitud  $BW\_amp$  de la señal  $FB_x, FB_z$ , la fase  $FW\_fase$  de la señal  $FW_x, FW_z$  y la fase  $BW\_fase$  de la señal  $FB_x, FB_z$ .

50 El procesamiento opcional de la señal filtrada del elemento de procesamiento 212 para determinar la amplitud y/o la fase de la señal transformada por rotación 203 se puede realizar mediante un elemento de fase y amplitud situado después del elemento de procesamiento 212 (no ilustrado). La señal  $FW_x, FW_z$ , es decir, el componente de vórtice hacia delante estimada, se puede describir como un vector con coordenadas  $x$  y  $z$ . De este modo, el elemento de fase y amplitud se puede configurar para procesar esta señal de vector para determinar la longitud y el ángulo de este vector, o equivalentemente las señales de amplitud y fase,  $FW\_amp, FW\_phase$ . Lo mismo se aplica al componente de vórtice hacia atrás estimado.

55 Claramente, el elemento de procesamiento 212 se puede configurar de otras formas y el componente de oscilación 204 se puede determinar de la señal transformada por rotación 203 incluyendo otras características distintas a la amplitud y fase.

5 Por ejemplo, en lugar de realizar el filtrado paso bajo, el elemento de procesamiento 212 se puede configurar como un filtro de ranura o de parada de banda para eliminar espectros de frecuencia específicos de la señal transformada por rotación 203. De este modo, el elemento de procesamiento 212 se puede configurar en general como un filtro de modo que la señal de componente de oscilación 204 contenga principalmente los espectros de frecuencia de los componentes de oscilaciones de BW y/o FW.

El controlador 220 se usa para controlar el aerogenerador 100 en base al componente de oscilación de pala 204. La señal de control  $y_{ctrl}$  se puede determinar según métodos conocidos para controlar, por ejemplo, los ángulos de paso o la producción de potencia como se explica a continuación.

10 Por ejemplo, el componente de oscilación 204 se puede usar para determinar una situación de oscilación de vórtice que requiere una acción de control con el fin de reducir las oscilaciones. En particular, se puede provocar el modo de oscilación de vórtice hacia atrás BW por las oscilaciones de frecuencia 3P causadas por la interacción de un rotor de 3 palas 102 y la torre 101. Por consiguiente, se puede provocar una oscilación de vórtice hacia atrás resonante cuando, por ejemplo,  $f_{BW} = f_i - f_{buje}$  se acerca a la frecuencia 3P. Incluso sin una determinación de la frecuencia de una oscilación de vórtice, por ejemplo,  $f_{BW}$ , la mera presencia de una amplitud de la oscilación de vórtice tal como  $BW_{amp}$ , se puede usar para ajustar una situación de oscilación de vórtice que necesite ser controlada. Por 15 ejemplo, una acción de control que reduce la velocidad de rotor  $f_{buje} = d\Phi/dt$  puede reducir la amplitud de oscilación cuando la oscilación de vórtice se provoca debido a una convergencia de una frecuencia de rotor y resonancia de vórtice resonante tal como la frecuencia 3P.

20 El componente de oscilación 204, por ejemplo, en forma de la amplitud  $FW_{amp}$  o  $BW_{amp}$ , se puede comparar con un umbral predeterminado para determinar la presencia de una oscilación de vórtice que requiere una acción de control usando el componente de oscilación 204 determinada como entrada.

25 Otras oscilaciones de vórtice resonantes o no resonantes se pueden provocar por otras oscilaciones estructurales del aerogenerador tales como las oscilaciones inducidas por viento y otras excitaciones asociadas con la rotación del rotor 102. Tales otras oscilaciones se pueden reducir del mismo modo controlando la velocidad de rotor, por ejemplo, reduciendo la velocidad de rotor.

De este modo, en general el control del aerogenerador puede implicar ajustar la velocidad de rotor dependiente del componente de oscilación de pala 204 con el fin de reducir la amplitud de oscilación de vórtice.

30 El ajuste de la velocidad de rotor puede comprender ajustar el ángulo de paso y/o ajustar la referencia de par o potencia para el generador del aerogenerador, por ejemplo, con el fin de reducir la velocidad de rotor. Por ejemplo, la señal de control  $y_{ctrl}$  puede contener una referencia de potencia o ajuste de potencia para el convertidor de potencia o la señal de control  $y_{ctrl}$  puede contener una referencia de paso o ajuste de paso para el controlador de paso del aerogenerador.

35 Alternativamente o además, las oscilaciones de vórtice se pueden reducir controlando el paso de las palas 103 unas independientemente de otras, es decir, en base a las referencias de paso individual para palas individuales, donde las referencias de paso se determinan en base a la señal de fase  $FW_{fase}$ ,  $BW_{fase}$  del componente de oscilación 204 que contiene información de la fase de la señal de oscilación transformada por rotación 203. La señal de fase del componente de oscilación 204 puede incluir una o ambas de las señales hacia delante y hacia atrás. Además, la determinación de referencias de paso puede incluir la señal de amplitud  $FW_{amp}$ ,  $BW_{amp}$  de una o ambas de las 40 señales hacia delante y hacia atrás. De este modo, por el uso de las señales de fase y opcionalmente las de amplitud, se puede controlar el paso de las palas para contrarrestar las oscilaciones de vórtice de pala.

Realizando el paso individual de las palas 103, puede ser posible amortiguar las oscilaciones de vórtice sin reducir la velocidad de rotación del rotor 102.

45 La señal de control  $y_{ctrl}$  para controlar el ángulo de inclinación o la referencia de par o potencia para controlar la velocidad de rotor, para controlar los ángulos de paso individuales o para otros propósitos de control tales como apagar el aerogenerador se puede determinar por el controlador 220 u otros componentes de controlador del aerogenerador 100.

50 Opcionalmente, el sistema de control 250 se puede configurar con elementos de filtrado 213 adicionales tales como filtros paso banda dispuestos para filtrar la señal de medición 201, 202 en base a la frecuencia de interés  $f_i$  antes de realizar la transformación por rotación con la transformación 211. Por ejemplo, el filtro paso banda 213 se puede disponer para filtrar la señal de medición 201 antes de que se transforme la señal de medición 201 mediante la transformación por rotación 210. En este caso, el filtro paso banda 213 se configura para pasar frecuencias situadas cerca de la frecuencia de interés  $f_i$ . Alternativamente, el filtro paso banda 213 se puede disponer para filtrar la señal de medición 202 o la señal  $F_x$ ,  $F_z$  transformada por rotación anteriormente por la transformación 210. En este caso, 55 la frecuencia de interés  $f_i$  se sitúa a las frecuencias  $f_i \pm f_{buje}$  en el marco no giratorio y, por lo tanto, el filtro paso banda 213 se puede configurar para filtrar paso banda una o ambas de las frecuencias  $f_i \pm f_{buje}$ . Posiblemente, la señal de medición 201, 202 se puede filtrar tanto antes de la transformación por rotación 210 con el filtro paso banda 213 a  $f_i$  como después de la transformación por rotación 210 con un filtro paso banda adicional a las frecuencias

$f_{\pm f\_buje}$ . Dado que se eliminan otras frecuencias no relevantes o molestas, la función de filtro del elemento de procesamiento 212 se puede hacer más simple o se puede omitir el elemento de procesamiento 212.

De este modo, el elemento de filtro 213 opcional se puede disponer para filtrar la señal de medición 201, 202, o una derivada de la misma (es decir, la señal transformada por rotación  $F_x$ ,  $F_z$ ), en un componente de señal filtrada paso banda de la oscilación de pala donde se realiza el filtrado a una frecuencia de la oscilación de pala definida con relación al marco de medición de la señal de medición, o la derivada de la misma, es decir, a la frecuencia  $f_i$  o a las frecuencias  $f_{\pm f\_buje}$ .

La Fig. 3A ilustra una realización alternativa del método de la Fig. 2A y el sistema de control 250. El método de la Fig. 3A se basa de manera similar en transformar por rotación la señal de medición 201, 202, o una derivada de la misma, del marco de medición en al menos un marco objetivo en base a la frecuencia de interés  $f_i$  para obtener una señal transformada por rotación 301. La transformación por rotación se realiza por el elemento de transformación por rotación 311 donde la transformación por rotación comprende una dirección de rotación hacia atrás o hacia delante del marco objetivo con relación a una dirección de rotación de rotor. El al menos un componente de oscilación de pala 204 se genera de la señal transformada por rotación 301 en base al filtrado con un filtro de paso bajo 312.

En un primer ejemplo, la señal de medición 201 se obtiene en el marco de rotor en forma de las señales de pala  $Mr1$ - $Mr3$  o las señales de buje  $F_{hx}$ ,  $F_{hz}$ . En el marco de rotor, la oscilación de interés tiene la frecuencia de interés  $f_i$ . La oscilación de interés gira en una dirección o bien hacia delante o bien hacia atrás con relación a la rotación de rotor 120. El elemento de transformación por rotación 311 se basa en la frecuencia de interés  $f_i$  y se dispone para girar el marco de medición o el marco de rotor al marco no giratorio.

El elemento de transformación por rotación 311 puede realizar una transformación por rotación  $R_{bujes2RW}$  que actúa en una dirección de rotación hacia atrás  $BW$  con relación a la dirección de rotación de rotor para transformar una oscilación de vórtice hacia atrás en el marco de medición en una frecuencia cero en el marco objetivo. La transformación  $R_{bujes2RW}$  es una función del ángulo  $\theta_{fi}$  de la oscilación de vórtice obtenida como se ha descrito anteriormente.

Alternativamente o además, el elemento de transformación por rotación 311 puede realizar una transformación por rotación  $R_{bujes2FW}$  que actúa en una dirección de rotación hacia delante  $FW$  con relación a la dirección de rotación de rotor para transformar una oscilación de vórtice hacia delante en el marco de medición a una frecuencia cero en el marco objetivo. La transformación  $R_{bujes2FW}$  también es función del ángulo  $\theta_{fi}$  de la oscilación de vórtice.

En caso de que la señal de medición 201 comprenda las señales de pala  $Mr1$ - $Mr3$ , las señales de pala tienen que ser proyectadas sobre el sistema de coordenadas de buje  $X_h$ ,  $Z_h$  como se ha descrito anteriormente.

En caso de que la señal de medición 202 comprenda las señales de góndola  $F_{nx}$ ,  $F_{nz}$ , la señal de góndola necesita ser transformada por rotación inicialmente del marco no giratorio al marco de rotor, por ejemplo, mediante el elemento de transformación por rotación 211a, antes de que se transforme por rotación mediante el elemento de rotación 311.

La Fig. 3B muestra los espectros de la señal transformada por rotación 301 del elemento de transformación por rotación 311. El gráfico superior muestra el efecto de la transformación por rotación  $R_{bujes2FW}$  que transforma la oscilación de vórtice hacia delante en el marco de rotor a un rango de frecuencia cero o de baja frecuencia. Con la transformación por rotación  $R_{bujes2FW}$ , una oscilación de vórtice hacia atrás en el marco de rotor se transformará a la frecuencia  $2 \cdot f_i$ , es decir, a una frecuencia que es dos veces la frecuencia de interés. El componente de alta frecuencia de la oscilación de vórtice hacia atrás se elimina fácilmente mediante el uso de un filtro paso bajo, alternativamente por un filtro de ranura, configurado para mantener inafectada el componente de baja frecuencia de la oscilación de vórtice hacia delante. El filtro paso bajo o de ranura se implementa en el componente de filtro 312. Por consiguiente, mediante el uso de la transformación por rotación  $R_{bujes2FW}$  y el filtro 312, se puede determinar el componente de oscilación de pala 204, en forma de amplitud y/o fase, para la oscilación de vórtice hacia delante.

De manera similar, el gráfico inferior muestra el efecto de la transformación por rotación  $R_{bujes2BW}$  que transforma la oscilación de vórtice hacia atrás en el marco de rotor a un rango de frecuencia cero o de baja frecuencia. Con la transformación de rotación  $R_{bujes2BW}$ , una oscilación de vórtice hacia delante en el marco de rotor se transformará a la frecuencia  $2 \cdot f_i$ . El componente de alta frecuencia de la oscilación de vórtice hacia delante se elimina mediante el uso del mismo filtro 312. Por consiguiente, mediante el uso de la transformación por rotación  $R_{bujes2BW}$  y el filtro 312, se puede determinar el componente de oscilación de pala 204, en forma de amplitud y/o fase, para la oscilación de vórtice hacia atrás.

Aunque la presente invención se ha descrito en conexión con las realizaciones específicas, no se debería interpretar como que esté limitada de ninguna manera a los ejemplos presentados. El alcance de la presente invención se ha de interpretar a la luz del conjunto de reivindicaciones que se acompañan. En el contexto de las reivindicaciones, los términos "que comprende" o "comprende" no excluyen otros posibles elementos o pasos. También, la mención de referencias tales como "un" o "una" etc., no se deberían interpretar como que excluyan una pluralidad. El uso de signos de referencia en las reivindicaciones con respecto a elementos indicados en las figuras tampoco no se debería interpretar como que limita el alcance de la invención.

## REIVINDICACIONES

1. Un método para controlar un aerogenerador (100) que comprende un rotor (102) con dos o más palas (103), el método comprende,
- 5 - obtener una señal de medición (201, 202) indicativa de una oscilación de pala de al menos una de las palas, donde la señal de medición se obtiene en un marco de medición del aerogenerador,
- transformar por rotación (211) la señal de medición (201, 202), o una derivada de la misma, del marco de medición en al menos un marco objetivo en base a una frecuencia de interés (fi) de la al menos una pala para obtener una señal transformada por rotación (203), donde el al menos un marco objetivo gira con la frecuencia de interés (fi) con relación a una frecuencia de rotación (f\_buje) del rotor, y donde la transformación por rotación comprende una
- 10 dirección de transformación por rotación hacia atrás o hacia delante con relación a una dirección de rotación de rotor,
- en base a la señal transformada por rotación (203), obtener al menos un componente de oscilación de pala (204) de la oscilación de pala que actúa en la dirección de rotación hacia atrás o hacia delante con relación a la dirección de rotación del rotor, y
- 15 - controlar el aerogenerador en base al componente de oscilación de pala.
2. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el al menos un componente de oscilación de pala (204) comprende un componente de oscilación hacia delante (FW\_amp, FW\_fase) de la oscilación de pala que actúa en una dirección hacia delante de la rotación de rotor.
3. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el al menos un componente de oscilación de pala (204) comprende un componente de oscilación hacia atrás (BW\_amp, BW\_fase) de la oscilación de pala que actúa en una dirección hacia atrás de la rotación de rotor.
- 20 4. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende filtrar la señal transformada por rotación (203) para obtener el al menos un componente de oscilación de pala (204).
5. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende filtrar paso banda la señal de medición (201, 202) en base a la frecuencia de interés (fi) antes de la transformación por rotación de la señal de medición.
- 25 6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el marco de medición es un marco de rotor que gira con el rotor o donde el marco de medición es un marco no giratorio.
7. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la frecuencia de interés (fi) es una frecuencia de resonancia de la al menos una pala.
- 30 8. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además transformar por rotación la señal de medición (201) del marco de medición en una señal de medición (Fx, Fz) en el marco no giratorio en base a una posición angular ( $\Phi$ ) del rotor (102).
9. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además filtrar paso banda la señal de medición (202) obtenida en el marco no giratorio, o la señal de medición (Fx, Fz) transformada en el marco no giratorio, en base a una frecuencia de la frecuencia de oscilación de pala en el marco no giratorio determinada en base a la frecuencia de interés (fi) y la frecuencia de rotación (f\_buje) del rotor.
- 35 10. Un método según la reivindicación 9, que comprende además transformar por rotación la señal de medición filtrada paso banda (202, Fx, Fz) en el marco no giratorio del marco no giratorio al marco de rotor para obtener una señal de oscilación de pala en la frecuencia de interés (fi).
- 40 11. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el control del aerogenerador comprende ajustar la frecuencia de rotación (f\_buje) del rotor dependiendo del componente de oscilación de pala (204).
12. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el control del aerogenerador se basa en una amplitud y/o fase del al menos un componente de oscilación de pala (204).
- 45 13. Un sistema de control (250) para controlar un aerogenerador que comprende un rotor con dos o más palas, donde el sistema de control se dispone para realizar los pasos según el método de cualquiera de las reivindicaciones 1-12.
14. Un producto de programa informático que comprende código de software adaptado para controlar un aerogenerador cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos, el producto de programa informático que está adaptado para realizar el método de cualquiera de las reivindicaciones 1-12.
- 50

15. Un aerogenerador (100) que comprende un rotor con dos o más palas, el aerogenerador comprende además un sistema de control según la reivindicación 13.

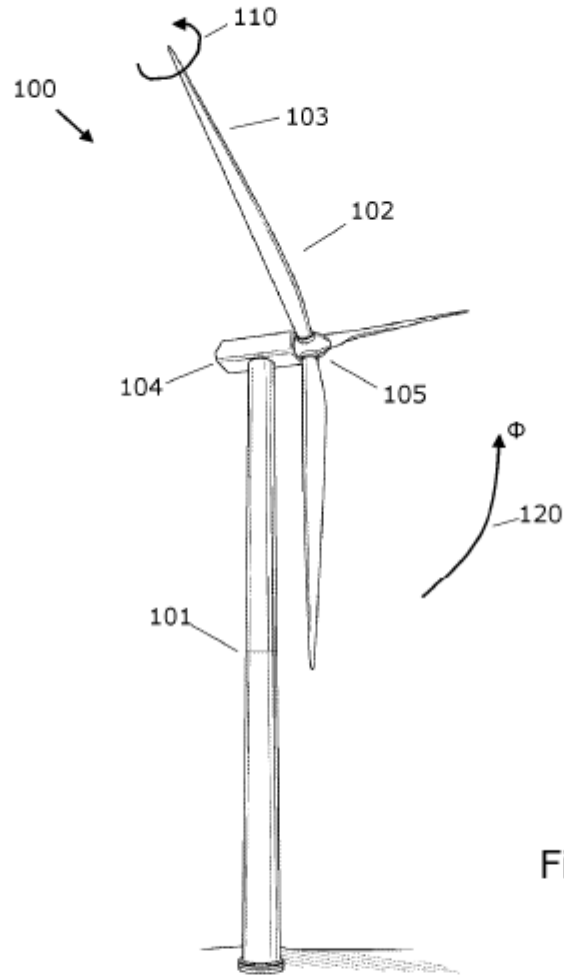


Fig. 1A

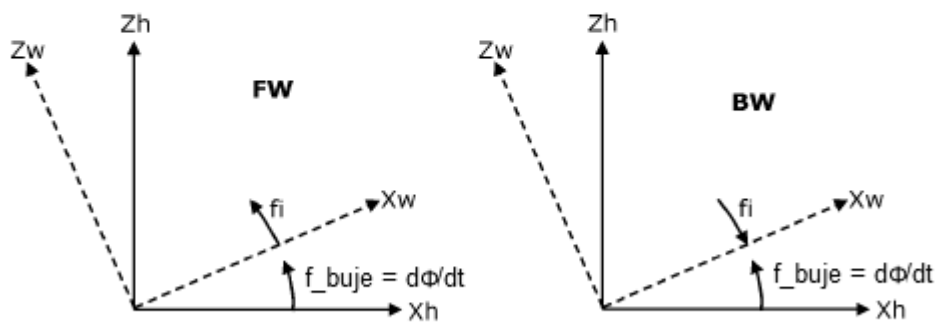


Fig. 1B

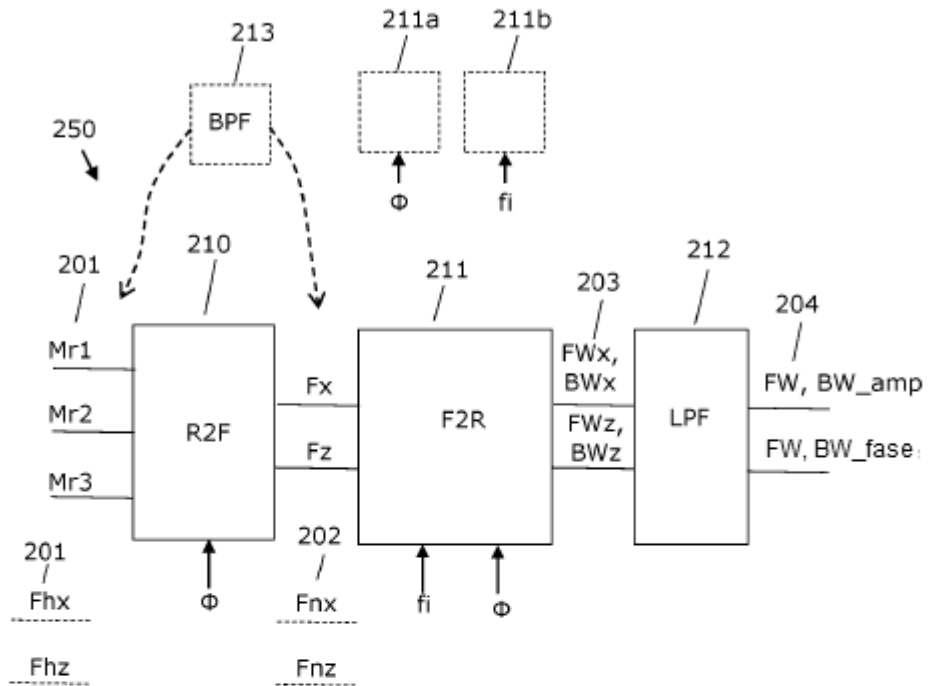


Fig. 2A

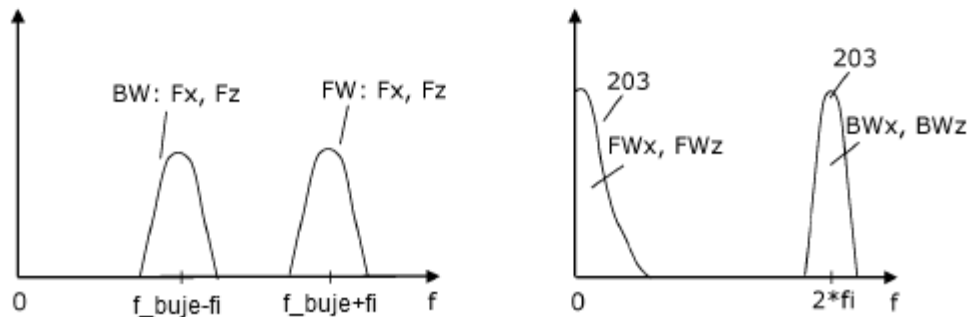
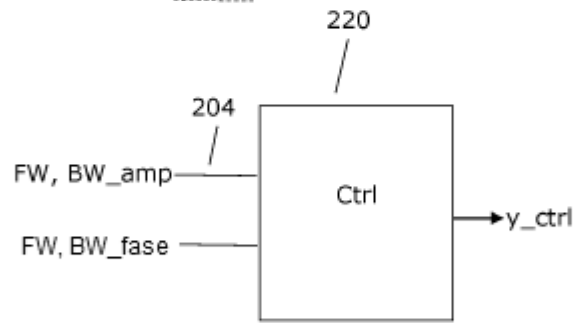


Fig. 2B

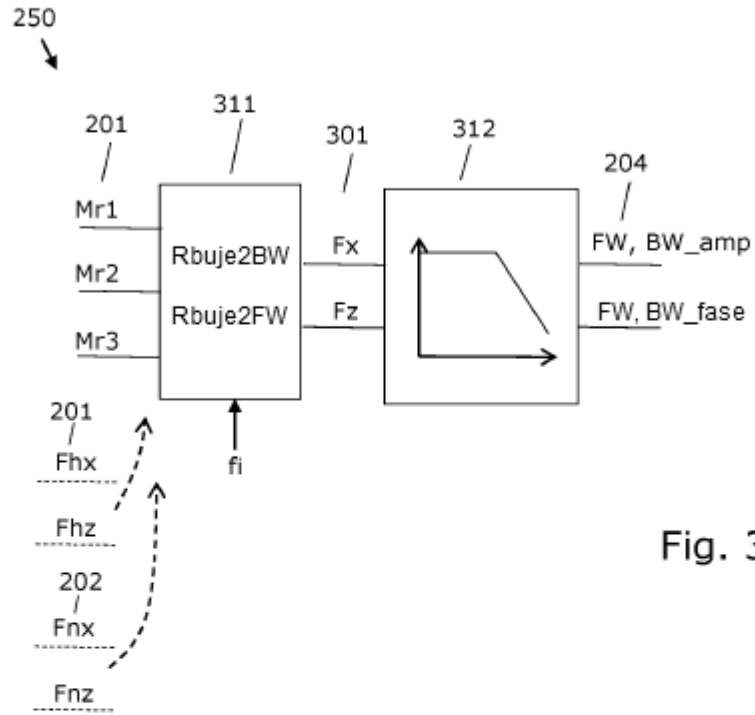
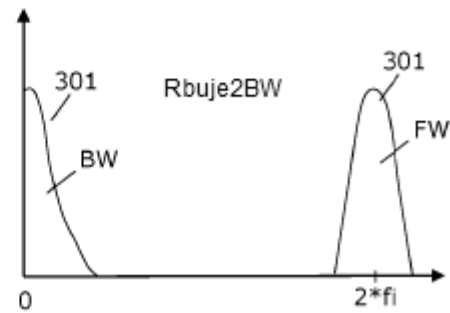
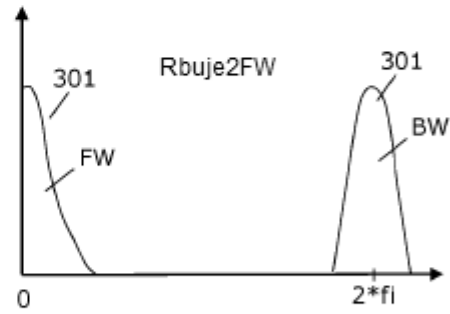


Fig. 3A

Fig. 3B



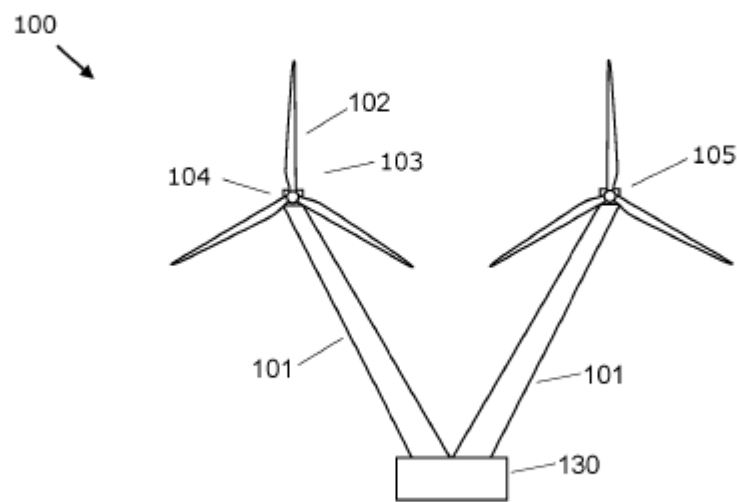
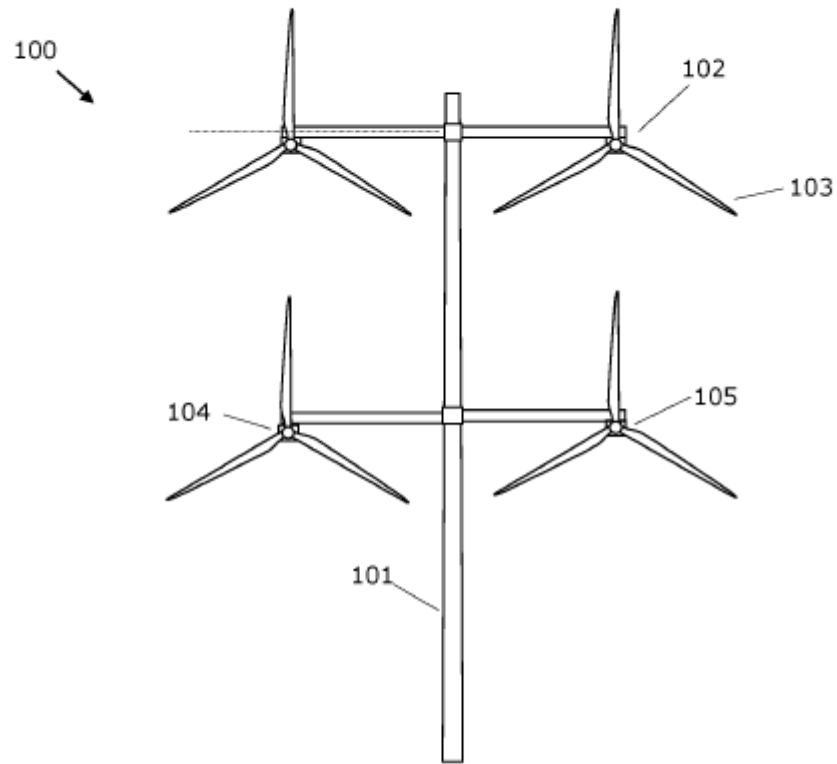


Fig. 4