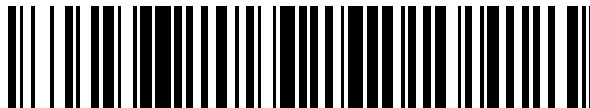


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 694 009**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.12.2014 PCT/DK2014/050416**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.06.2015 WO15086024**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.12.2014 E 14816123 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.10.2018 EP 3080446**

54 Título: **Método de operación de una turbina eólica**

30 Prioridad:

09.12.2013 DK 201370751

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

17.12.2018

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

CAPONETTI, FABIO;

KRÜGER, THOMAS;

COUCHMAN, IAN;

ARISTON, ILIAS KONSTANTINOS;

BRØDSGAARD, MARTIN;

GRUNNET, JACOB DELEURAN;

THOMSEN, JESPER SANDBERG y

MORTENSEN SIGFRED, PETER

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 694 009 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 operación de una turbina eólica

5 Antecedentes de la invención

La presente invención se refiere a un método para operar una turbina eólica con el fin de amortiguar las oscilaciones de una torre de la turbina eólica y un dispositivo de control que realiza el método.

10 Descripción de la técnica relacionada

Una turbina eólica como se conoce en la técnica comprende una torre de turbina eólica y un rotor. El rotor se coloca en la parte superior de la torre y comprende un buje que sostiene un número de palas del rotor. Cada pala del rotor tiene un eje de pala que se extiende a lo largo de la dimensión más grande de la pala, la longitud de la pala. El eje de pala se extiende perpendicularmente o torcido con respecto al eje de rotor. El rotor se adapta para accionar un generador. Una turbina eólica ejemplar con una configuración de rotor de eje horizontal se ilustra en la Figura 1. Tales turbinas eólicas se refieren comúnmente a turbinas eólicas de eje horizontal. En la mayoría de los casos, el eje se orienta hacia el lado de la torre cuyo lado se expone al viento, el lado a barlovento, en todo momento.

20 Ambos, la torre y las palas del rotor son propensas a oscilaciones. Tales oscilaciones pueden ser debidas a las fuerzas de rotor cíclicas y a faltas de homogeneidad en un campo de viento. Particularmente, los desequilibrios en un rotor conducen a una excitación y fuerzas perpendiculares al eje de rotor. El campo de viento puede no ser homogéneo, puesto que los obstáculos en frente de la turbina eólica ralentizan parcialmente el viento. Cuando las palas del rotor barren el área detrás de un obstáculo, el rotor queda expuesto a fuerzas más bajas que las otras palas del rotor. Además, debido a las fuerzas de fricción sobre el terreno, el viento en áreas más altas tiene por lo general velocidades de viento más altas que el viento más próximo al terreno. Una mayor velocidad del viento conduce a fuerzas adicionales sobre la pala del rotor.

30 En esencia, la pala del rotor experimenta dos fuerzas de viento. Una primera fuerza es debido a la resistencia del aire de la pala del rotor y se dirige en paralelo al viento. Esta fuerza de arrastre conduce a momentos de inclinación y guiñada en el rotor y, por tanto, si no es equilibrada por las otras palas del rotor, a una fuerza lateral sobre la torre. Una segunda fuerza es perpendicular a un eje de pala y al eje de rotor y se debe a las propiedades aerodinámicas de la pala del rotor. Esta fuerza aerodinámica proporciona un momento alrededor del eje de rotor y convencionalmente hace que el rotor gire. Si la fuerza aerodinámica se acopla de forma simétrica al eje de rotor por las fuerzas aerodinámicas de las otras palas del rotor, sus direcciones y magnitudes se compensan entre sí de tal manera que no hay fuerza lateral resultante sobre el eje de rotor. Sin embargo, si las fuerzas aerodinámicas no están equilibradas, una fuerza resultante sobre el eje de rotor actúa perpendicularmente sobre el eje de rotor. Tal fuerza resultante puede conducir a una oscilación lateral de la torre, particularmente si es variable en el tiempo.

40 Por ejemplo, cada vez que una pala de turbina eólica barre el área más alta del área del rotor, donde prevalecen las velocidades de viento más altas, una fuerza aerodinámica resultante sobre el eje de rotor se producirá con una frecuencia de la frecuencia de giro del rotor multiplicada por el número de las palas del rotor, por ejemplo, tres veces la frecuencia de giro del rotor. Las fuerzas laterales debido a desequilibrios mecánicos del rotor tendrán particularmente una frecuencia igual a la frecuencia de giro del rotor. Además, la fuerza de arrastre sobre la pala del rotor provoca una fuerza de precesión en el rotor giratorio, fuerza de precesión que en el ejemplo dado se dirige perpendicularmente al eje de rotor y paralela al terreno.

50 Por supuesto, puesto que la torre se cubre del viento cada vez que una pala realiza un barrido, el cambio frecuente resultante de la resistencia aerodinámica general de la torre puede conducir también a una oscilación longitudinal paralela al viento. Diversos otros efectos tales como un cambio en el campo de viento o acción de amortiguación negativa de un control de paso colectivo son conocidos por el experto en la materia y pueden del mismo modo dar lugar a oscilaciones longitudinales.

55 La fuerza aerodinámica que una pala del rotor produce se debe esencialmente a su forma de ala y a su ángulo actual con respecto al viento. Si bien la forma de la pala del rotor apenas varía, el buje se adapta para pasar el ángulo de pala del rotor con respecto al viento de tal manera que el ángulo se pueda optimizar por medio de un dispositivo de control de paso de pala. El ajuste del paso de palas influye, a continuación, en las fuerzas aerodinámicas y de arrastre en las palas del rotor. El ajuste del paso de palas se realiza, por lo general, alrededor de un eje que está en paralelo al eje de la pala. El ajuste se realiza por una unidad de control de paso de palas basándose en un paso de referencia colectivo, también conocido como ángulo de paso de referencia colectivo, para todas las palas.

60 Por lo general, un ajuste de paso de palas se optimiza para maximizar la obtención de energía, sobre todo en tiempos de escasez de energía o cuando la fuerza del viento no es suficiente para producir la potencia nominal, o el ajuste de paso de palas se adapta para proporcionar un nivel de potencia constante o par motor del generador lo más estable posible. Para este fin, una velocidad de giro del rotor se ajusta de acuerdo con un criterio de optimización actual mediante el ajuste de los ángulos de pala.

El ajuste del paso de palas para ajustar las fuerzas de arrastre y aerodinámicas se puede utilizar también para contrarrestar las oscilaciones de la torre. En particular, un ajuste colectivo del paso de palas se puede utilizar para contrarrestar las oscilaciones paralelas del viento, es decir, oscilaciones longitudinales. Para el ajuste de paso de palas colectivo cada pala del rotor se ajusta mediante un ángulo de paso igual.

Un ajuste de paso de palas individuales se puede utilizar para contrarrestar la oscilación lateral de la torre. El ajuste de paso de palas individuales proporciona diferentes ángulos para cada pala del rotor. Esto ajusta una fuerza lateral resultante mediante un ajuste correspondiente de las fuerzas aerodinámicas. El paso de palas para el ajuste de paso de palas individuales se varía dependiendo de, entre otras cosas, una fase de una oscilación o una posición angular de la pala del rotor durante un giro.

En realizaciones adicionales de un sistema de amortiguación de oscilaciones, la velocidad de giro del rotor se ajusta de modo que las fuerzas de giro inducidas en la estructura de turbina eólica o un giro del rotor tienen frecuencias diferentes a una frecuencia natural de la torre o en otras partes de la estructura de turbina eólica. En algunas realizaciones, la velocidad de giro se ajusta mediante el ajuste del ángulo de paso de las palas.

Sin embargo, recientemente se ha encontrado que estos ajustes anteriormente presentados imparten una obtención de energía de la turbina eólica y causa el desgaste de los cojinetes de pala de cada pala del rotor.

El documento EP 2 225 461 B1 divulga un método para operar un sistema generador de turbina eólica, en el que el sistema de generador de turbina eólica incluye una torre y un rotor con al menos dos palas del rotor conectadas a la torre, en el que cada pala del rotor se puede ajustar alrededor de un eje de pala del rotor respectivo para un ángulo de ajuste de pala del rotor predeterminado, en el que el ángulo de ajuste de pala del rotor se altera de forma individual para cada pala del rotor para amortiguar las oscilaciones laterales de la torre.

El documento WO 2007/053 031 A1 se refiere a un método para la amortiguación de vibraciones de la torre en una turbina eólica, en particular, en una instalación de turbina eólica flotante. Las vibraciones de la torre se amortiguan por, además de controlar con el controlador en el intervalo de potencia o RPM constante de la turbina eólica, un incremento que se añade al ángulo de pala de las palas de turbina eólica basándose en las velocidades de torre para contrarrestar las vibraciones propias.

Los ejemplos adicionales de un método para amortiguar vibraciones en una turbina eólica se proporcionan en los documentos WO 2007/089136 A2 y EP 2 463 517 A1.

Un objeto de la presente invención es superar los inconvenientes de los métodos y sistemas establecidos anteriormente.

Sumario de la invención

Aunque la invención se define en las reivindicaciones independientes, otros aspectos adicionales de la invención se exponen en las reivindicaciones dependientes, la siguiente descripción y los dibujos.

De acuerdo con un primer aspecto, la invención proporciona un método para operar una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica una torre y un rotor con al menos una pala del rotor, estando el rotor conectado a la torre y adaptándose para accionar un generador, en el que un ángulo de paso de cada pala del rotor se puede ajustar. El método comprende la detección de una oscilación de la torre, y habilitar la amortiguación de la oscilación de la torre. Habilitar la amortiguación de oscilaciones comprende determinar un requisito para amortiguar la oscilación, determinar un efecto resultante de amortiguación bajo la condición de que la amortiguación de oscilaciones de la torre estará habilitada, y permitir amortiguar la oscilación basándose en el requisito determinado para la amortiguación y en el efecto de amortiguación resultante determinado.

De acuerdo con un segundo aspecto, la invención proporciona además una turbina eólica que comprende una torre y un rotor con al menos una pala del rotor, estando el rotor conectado a la torre y adaptándose para accionar un generador, en el que un ángulo de paso de cada pala del rotor se puede ajustar. La turbina eólica comprende además un miembro de detección adaptado para detectar una oscilación de la torre, y un miembro de amortiguación adaptado para amortiguar la oscilación de la torre.

La turbina eólica comprende también un miembro de habilitación que se adapta para permitir la amortiguación de oscilaciones, un miembro de requisito adaptado para determinar un requisito para amortiguar la oscilación, y un miembro de efecto de amortiguación adaptado para determinar un efecto de amortiguación resultante. El miembro de activación se adapta para permitir la amortiguación de oscilaciones basándose en una combinación de la salida del miembro de requisito y el miembro de efecto de amortiguación.

Las realizaciones de la invención se definen también en las reivindicaciones dependientes.

Breve descripción de los dibujos

Las realizaciones de la presente invención se explican por ejemplo con respecto a los dibujos adjuntos, en los que:

- 5 la Figura 1 ilustra una turbina eólica de acuerdo con el estado de la técnica, como se ve desde la parte delantera, la Figura 2 ilustra un diagrama de flujo de un sistema de control para un ajuste de la pala del rotor de acuerdo con la invención,
- la Figura 3A muestra un sub-bloque del sistema de control de acuerdo con la Figura 2,
- la Figura 3B ilustra un diagrama de flujo alternativo de un sub-bloque del sistema de control de acuerdo con la Figura 2,
- 10 la Figura 4 ilustra un sub-bloque de la lógica de control de acuerdo con las Figuras 3A y 3B,
- la Figura 5 ilustra un diagrama de flujo adicional de sub-bloques del sistema de control de acuerdo con la Figura 2.

Descripción detallada de las realizaciones

15 La Figura 1 muestra una turbina eólica 102 con una góndola 104, y un buje 106 del rotor montado de forma pivotante en la góndola 104 mediante un eje de rotor. El eje de rotor se extiende desde el buje 106 del rotor que está alejado del espectador y, por lo tanto, no se muestra. La góndola 104 se monta en una torre de turbina eólica 108 a través de una junta giratoria. La torre de turbina eólica 108 se conecta a tierra en su base en el extremo opuesto a la góndola 104. El buje 106 del rotor de la turbina eólica incluye tres palas de turbina eólica 110 unidas al buje 106 del rotor. El buje 106 del rotor se adapta para girar alrededor de su eje de giro, que está alineado con un eje de giro del eje de rotor, de manera que las palas 110 del rotor barren un plano de giro sustancialmente perpendicular a los ejes de giro. Los ejes de giro son esencialmente paralelos con respecto al terreno, es decir, paralelos o inclinados por un ángulo de inclinación de algunos grados con respecto al terreno. El ángulo de inclinación es el ángulo del eje de giro del eje de rotor de la turbina eólica con respecto al terreno.

Para contrarrestar las oscilaciones laterales, las palas del rotor pueden pasar individualmente para generar fuerzas laterales apropiadas. Las fuerzas laterales se generan utilizando un accionador de paso cíclico. Los pasos de referencia ϑ_1 , para tres palas del rotor tienen la forma:

$$\begin{aligned}
 \vartheta_1 &= \vartheta_0 + \vartheta_c \cos(\varphi) \\
 \vartheta_2 &= \vartheta_0 + \vartheta_c \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 \vartheta_3 &= \vartheta_0 + \vartheta_c \cos\left(\varphi - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

35 donde ϑ_0 es un paso de referencia colectivo, ϑ_0 es la amplitud cíclica que tiene que ajustarse con el fin de crear una fuerza lateral requerida, y φ es un ángulo de giro del rotor. En una realización, φ tiene su origen en el ángulo de vértice inferior del giro, de tal manera que

ϑ_1 tiene su máximo con la pala del rotor en el ángulo de vértice inferior y su mínimo en el ángulo de vértice superior. Si el máximo se ha girado a un ángulo de giro diferente, φ puede reemplazarse por $\varphi_{desplazamiento} = \varphi - \varphi_p$ donde φ_p indica un ángulo de desplazamiento de fase, de manera que ϑ_1 tiene su máximo en el desplazamiento de fase del ángulo φ_p . Bajo condiciones constantes, con el fin de generar una fuerza lateral constante, la amplitud cíclica ϑ_c debe elegirse para ser constante. Cuando se utiliza la fuerza lateral para la amortiguación activa de la torre, tiene que ser periódica con la frecuencia propia f_e de la torre:

$$\vartheta_c = \vartheta_{cmáx} \cos(2\pi f_e t)
 \tag{2}$$

Cada pala de un rotor induce una fuerza de pala individual F_x en una dirección perpendicular a la pala respectiva y lateral al viento que se puede derivar de la potencia P_{rot} del rotor:

$$F_x = \frac{P_{Rot}}{3\omega R_A}$$

donde R_A es el radio en el que las fuerzas aerodinámicas atacan, y ω es una velocidad de giro del rotor. Con la aproximación $R_A = R/2$, donde R es el radio del rotor, esto se convierte en

$$F_x = \frac{2P_{Rot}}{3\omega R}
 \tag{3}$$

La Fuerza lateral total $F_{lateral}$ es una adición geométrica de las fuerzas de pala individuales F_x

$$F_{lateral} = F_{x,1} \cos(\varphi) + F_{x,2} \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) + F_{x,3} \cos(\varphi - \frac{4\pi}{3}) \quad (4)$$

5 Como se ha indicado anteriormente, φ puede ser reemplazado por $\varphi_{desplazamiento} = \varphi - \varphi_p$ donde φ_p indica un ángulo de desplazamiento de fase, y se puede ajustar para dirigir la fuerza lateral total $F_{lateral}$. En condiciones ideales, las fuerzas individuales tienen la misma magnitud, y la fuerza lateral resultante es cero. Al variar el ángulo de paso, las fuerzas laterales cambian en consecuencia:

$$F_x = F_{x,0} + \frac{dF_x}{d\vartheta} (\vartheta - \vartheta_0)$$

10 Al aplicar la función de paso cíclico a partir de (1), los términos constantes desaparecen y solo la parte cíclica de la fuerza lateral contribuye. Esto da como resultado

$$F_{lateral} = \frac{3dF_x}{2d\vartheta} \vartheta_c \quad (5)$$

15 Junto con la sensibilidad lateral

$$\frac{dF_x}{d\vartheta} = \frac{2}{3\omega R} \frac{dP}{d\vartheta}$$

20 esto da como resultado la función de sensibilidad

$$\frac{F_{lateral}}{\vartheta_c} = \frac{1}{\omega R} \frac{dP}{d\vartheta} \quad (6)$$

25 que indica una dependencia de una fuerza lateral $F_{lateral}$ con respecto a una amplitud cíclica ϑ_c , una variación de la potencia P del rotor con respecto al ángulo de paso ϑ y la velocidad de giro ω .

30 Para contrarrestar las oscilaciones longitudinales, el paso de referencia colectivo se ajusta para proporcionar más o menos fuerza de resistencia aerodinámica estática o dinámica y evitar así las condiciones que causan oscilaciones longitudinales o que proporcionan una contrafuerza de amortiguación.

Sin embargo, las oscilaciones laterales pueden también contrarrestarse mediante el ajuste de la salida del generador. Para ello se controla la corriente eléctrica en el generador.

35 Cuando se reduce la corriente eléctrica un par contrario del rotor disminuye y se habilita que el rotor gire más rápido. Como una reacción a partir del par contrario disminuido, se reduce una fuerza inducida por el par motor del generador lateral en la torre alrededor de su base. Asimismo, cuando aumenta la corriente eléctrica, el par contrario del rotor aumenta y la fuerza inducida por el par motor del generador lateral en la torre alrededor de su base aumenta. Al variar el par contrario con el tiempo en función del patrón cíclico de la oscilación lateral, la fuerza inducida por el par motor del generador resultante se puede controlar para debilitar la oscilación lateral. En otras palabras, el par contrario se puede variar con el fin de oponerse a la oscilación lateral, por ejemplo, medirse con un acelerómetro.

45 Mediante la variación de la corriente eléctrica, la velocidad de giro del rotor se varía en consecuencia como se ha mencionado anteriormente. Esto también conduce a una variación de una resistencia aerodinámica del rotor. La variación se puede ajustar para contrarrestar una oscilación longitudinal.

50 En condiciones de viento debajo de la velocidad nominal del viento, se ha encontrado que una capacidad de amortiguación de las oscilaciones laterales por el ajuste fuerza inducida por el par motor del generador es generalmente mayor que una capacidad de amortiguación mediante el ajuste de la fuerza de paso. Sin embargo, en condiciones de viento por encima de la velocidad nominal del viento, la capacidad de amortiguación de las oscilaciones laterales mediante el ajuste de la fuerza de paso es generalmente mayor que la capacidad de amortiguación por el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador.

55 Antes de proceder más con la descripción detallada de las realizaciones de la invención, se describen algunos aspectos generales del método. Un método para operar una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica una torre y un rotor con al menos una pala del rotor, estando el rotor conectado a la torre y adaptado para accionar un generador, en el que un ángulo de paso de cada pala del rotor se puede ajustar, comprende detectar una oscilación de la torre, y permitir selectivamente amortiguar la oscilación de la torre. Permitir la amortiguación de oscilaciones comprende determinar un requisito para amortiguar la oscilación, determinar un efecto resultante de amortiguación si se habilita

la selección de amortiguación de oscilaciones de la torre, y seleccionar permitir la amortiguación de oscilaciones basándose en el requisito determinado de amortiguación y en el efecto de amortiguación determinado resultante.

La determinación del efecto de amortiguación resultante se puede expresar como una viabilidad para amortiguar las oscilaciones si se selecciona habilitar la amortiguación de oscilaciones de la torre, de manera que la selección que habilita la amortiguación de oscilaciones se basa en el requisito determinado de la amortiguación y en la viabilidad determinada de amortiguación. La viabilidad de amortiguación puede expresar la posibilidad de que el efecto de amortiguación de la acción de amortiguación seleccionada de lugar a una amortiguación determinada, requerida o deseada de la torre.

En algunas realizaciones determinar un requisito de amortiguación de la oscilación se basa en que al menos una de una oscilación detectada de la torre alcanza un umbral de oscilación, una indicación de si un algoritmo de control de amortiguación de oscilaciones diferente está operando, tal como un algoritmo de control de amortiguación de la oscilación lateral diferente, una indicación de si un amortiguador de torre pasivo está operando, una carga en la turbina eólica si se selecciona habilitar la amortiguación de la oscilación de la torre, una relación entre una velocidad del viento actual y una velocidad nominal del viento, y una predicción de la oscilación lateral de la torre.

Si un amortiguador de torre pasivo está operando, tal como un péndulo en aceite instalado dentro de la torre, tanto amortiguación activa como amortiguación pasiva se pueden utilizar al mismo tiempo, o la amortiguación activa puede seleccionarse para no activarse, por ejemplo, si el requisito de amortiguación se cumple por el amortiguador pasivo, y/o si el efecto de amortiguación resultante del amortiguador activo no se tiene que habilitar. Un amortiguador pasivo puede proporcionar seguridad para cuando la turbina no puede producir (o no está conectada a la red) mientras que el amortiguador activo puede añadir niveles adicionales de amortiguación para extender la vida útil de la estructura y mitigar los riesgos pertinentes (como que el péndulo golpee las paredes de la torre). El amortiguador pasivo es normalmente más eficaz en la región de baja velocidad del viento, mientras que la eficacia de la amortiguación lateral aumenta a velocidades de viento cada vez mayores. Los efectos de los dos medios de amortiguación son aditivos y dan como resultado un mayor nivel de amortiguación.

En algunas realizaciones determinar el efecto de amortiguación resultante se basa en al menos una de una fuerza lateral resultante que se puede generar mediante el ajuste individual del ángulo de paso, una diferencia entre los ángulos de paso de palas del rotor y los ángulos de paso óptimos, sensibilidad de la fuerza de paso ($dF/d\theta$), una relación entre una potencia actual y una potencia nominal, una relación entre una velocidad del viento actual y una velocidad nominal del viento, una fuerza lateral resultante que se puede generar por el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador, y un punto de operación de la turbina eólica.

En realizaciones, las palas de la turbina pueden comprender aletas. En tales realizaciones, la selección que habilita amortiguar las oscilaciones puede incluir la activación de las aletas.

En algunas realizaciones el requisito de amortiguación determinado y el efecto de amortiguación determinado resultante se combinan para generar un valor de clasificación de la habilitación, y la amortiguación de oscilaciones se habilita de acuerdo con el valor de la clasificación de la habilitación, el valor de la clasificación de la habilitación proporcionándose como uno de dos valores distintos, un primer valor que no habilita la amortiguación de oscilaciones y un segundo valor que habilita una amortiguación de oscilaciones completa.

En algunas realizaciones el requisito de amortiguación determinado y el efecto de amortiguación determinado resultante se combinan para generar un valor de clasificación de la habilitación, y la amortiguación de oscilaciones se habilita de acuerdo con el valor de la clasificación de la habilitación, el valor de la clasificación de la habilitación proporcionándose como uno de al menos tres valores distintos, un primer valor que no habilita la amortiguación de oscilaciones, un segundo valor que habilita una amortiguación de oscilaciones completa y un valor adicional que proporciona una clasificación distinta de la habilitación de amortiguación de oscilaciones entre ninguna amortiguación de oscilaciones y amortiguación de oscilaciones completa. En realizaciones adicionales el valor de clasificación de la habilitación se proporciona como uno de un número infinitesimal de distintos valores, o es una función continua entre el primer valor que no habilita la amortiguación de oscilaciones y el segundo valor que habilita la amortiguación de oscilaciones completa.

En algunas realizaciones, el requisito de amortiguación puede basarse también en una entrada que limita la amortiguación de oscilaciones, o inhabilita incluso la amortiguación de oscilaciones. Esto puede implementarse mediante la limitación del valor de la clasificación de la habilitación a un nivel específico, incluyendo el cero. En una situación en la que una pluralidad de acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre puede habilitarse selectivamente, el requisito de amortiguación puede basarse en una entrada que limita o desactiva la amortiguación de oscilaciones de una acción de amortiguación de oscilaciones específica o dada de la torre. En particular, puede ser deseable limitar o desactivar la amortiguación de oscilaciones mediante el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador, puesto que las variaciones forzadas del par motor del generador pueden propagarse en la red eléctrica de manera indeseada, o incluso prohibida con el fin de cumplir con los códigos de red dados.

- En algunas realizaciones la oscilación de la torre es una oscilación lateral. En otras realizaciones, la oscilación de la torre es una oscilación de proa-popa.
- 5 En realizaciones adicionales, la amortiguación de la oscilación lateral comprende el ajuste del ángulo de paso individual.
- En realizaciones adicionales, la amortiguación de la oscilación lateral comprende ajustar el par motor del generador.
- 10 En realizaciones adicionales, la amortiguación por ajuste del ángulo de paso individual se realiza con el fin de reducir una acción de control de un algoritmo de control de amortiguación de la oscilación lateral diferente.
- En algunas realizaciones, la oscilación de la torre es una oscilación longitudinal.
- 15 En algunas realizaciones, la carga en la turbina eólica si se selecciona habilitar la amortiguación de la oscilación de la torre incluye un momento de inclinación del cojinete principal y/o una tasa de acumulación de fatiga del cojinete de la pala.
- 20 En algunas realizaciones, la oscilación de la torre se predice mediante la medición de un momento hacia los bordes y derivando el momento hacia los bordes a través del tiempo con el fin de recibir una indicación de su desarrollo y/o mediante la medición de un campo de viento en un área alrededor de la turbina eólica. El término “hacia los bordes” indica una dirección tangencial a una curva de giro de un punto sobre una pala del rotor alrededor del eje de rotor. Por lo tanto, el momento hacia los bordes es un momento sobre el eje de rotor y se puede medir a partir de una deformación de la pala o una torsión del eje de rotor. En algunas realizaciones los datos relativos al campo de viento se recogen a partir de mediciones y representaciones de las turbinas eólicas adyacentes y de las previsiones meteorológicas para el área de la turbina eólica particular.
- 25 En algunas realizaciones, el algoritmo de control de amortiguación de la oscilación lateral diferente ajusta una velocidad de giro del rotor de tal manera que las oscilaciones inducidas del rotor tienen una frecuencia diferente de una frecuencia natural de la torre.
- 30 En algunas realizaciones, el punto de operación se define por al menos una de una velocidad del viento, un paso de referencia colectivo, una potencia producida por el generador, la potencia nominal, un par generado y una velocidad del generador.
- 35 En algunas realizaciones, el punto de operación se define por un par del grupo que consiste en una velocidad del viento, un paso de referencia colectivo, una potencia producida por el generador, la potencia nominal, un par generado y una velocidad del generador.
- 40 En realizaciones adicionales el efecto de amortiguación, que puede generarse a partir de un ajuste de paso de palas individuales particular y en un punto de operación particular, se calcula antes de operar la turbina eólica y se almacena en una tabla de búsqueda. En algunas realizaciones, el efecto de amortiguación se basa particularmente en una fuerza lateral.
- 45 En algunas realizaciones habilitar el ajuste individual del ángulo de paso comprende una habilitación suavizada del ajuste individual del ángulo de paso.
- 50 En algunas realizaciones, el método comprende además determinar la capacidad de amortiguar la oscilación lateral por medio del ajuste del paso mediante la evaluación de una diferencia entre el ángulo de paso óptimo para cada pala del rotor y el ángulo de paso actual de cada pala del rotor, determinar si una capacidad de amortiguación adicional por medio de ajuste de ángulo de paso se requiere, y si se requiere la capacidad de amortiguación adicional, aumentar la diferencia entre el ángulo de paso óptimo y el ángulo de paso actual.
- 55 En algunas realizaciones, la selección de habilitar la amortiguación de la oscilación se basa en el requisito de amortiguación determinado y en el efecto de amortiguación resultante determinado, comprende determinar una aceleración de la torre y un límite de alarma de aceleración, y determinar, basándose en la aceleración de la torre y en el límite de alarma de aceleración, una señal de distancia de alarma de aceleración de la distancia de la aceleración de la torre a un límite de alarma.
- 60 En algunas realizaciones, la oscilación de la torre es una oscilación lateral, y la amortiguación de la oscilación lateral comprende un ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador. El ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador comprende variar un par contrario del generador a lo largo del tiempo en función de un patrón cíclico de la oscilación lateral para proporcionar una fuerza inducida por el par motor del generador que reduce la oscilación lateral.
- 65 En realizaciones el método puede comprender además el almacenamiento accesible para un controlador de los datos de control de turbina eólica para una pluralidad de acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, seleccionar

al menos una de las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre para las que se almacenan los datos de control, y amortiguar la oscilación de la torre con la al menos una acción de amortiguación de oscilaciones de la torre seleccionada.

5 Las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, para las que se almacenan datos de control, pueden comprender la amortiguación gracias al ajuste del ángulo de las palas. En el caso de que la oscilación de la torre sea una oscilación lateral, el ajuste del ángulo de paso de palas genera fuerzas laterales que actúan en contra de la oscilación lateral.

10 Las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, para las que se almacenan datos de control, pueden comprender el ajuste de una velocidad de giro del rotor de tal manera que las oscilaciones inducidas por el rotor tienen una frecuencia diferente de una frecuencia natural de la torre.

15 Las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, para las que se almacenan datos de control, pueden comprender un ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador. En el caso de que la oscilación de la torre sea una oscilación lateral, el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador puede variar un par contrario del generador con el tiempo en función de un patrón cíclico de la oscilación lateral para proporcionar una fuerza inducida por el par motor del generador que reduce la oscilación lateral.

20 La al menos una de las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, para la que se almacenan datos de control, puede seleccionarse basándose en el requisito de amortiguación determinado y en el efecto de amortiguación resultante determinado.

25 En algunas realizaciones del método, el ángulo de paso óptimo, la condición de viento y/o el requisito de salida del generador determinan un paso de referencia colectivo y el ángulo de paso actual se ajusta de acuerdo con el paso de referencia colectivo. En realizaciones adicionales el ángulo de paso actual de cada pala del rotor se varía adicionalmente como una función de un ángulo de giro del rotor. En realizaciones adicionales, el ángulo de paso actual de cada pala del rotor se varía adicionalmente para proporcionar una fuerza lateral resultante.

30 En algunas realizaciones el ángulo de paso óptimo para cada pala del rotor es una función de la condición del viento, un par motor del generador y/o un ángulo de giro de la pala del rotor particular.

35 En algunas realizaciones, el efecto de amortiguación resultante determinado se basa en la determinación de la capacidad de amortiguación.

A continuación se describirá particularmente una activación de la amortiguación de la oscilación lateral controlada por el paso de palas individuales. Sin embargo, los principios se aplican igualmente para la amortiguación de oscilaciones mediante el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador.

40 La Figura 2 muestra una lógica de control 200 que comprende un módulo de controlador de amortiguación lateral 201 y un módulo de decisión de activación 202. El módulo de controlador de amortiguación lateral 201 genera ángulos de paso de desplazamiento 201o individualmente para cada pala. Una unidad de control de paso de palas 205 combina los ángulos de paso de desplazamiento con pasos de referencia ϑ_0 procedentes de una unidad de curva de paso 206. En algunas realizaciones la unidad de control de paso de palas 205 combina los ángulos de paso de desplazamiento

45 con pasos de referencia ϑ_0 sumando los pasos de referencia ϑ_0 y los ángulos de paso de desplazamiento. La unidad de control de paso de palas 205 envía los ángulos de paso combinados a los controladores de paso de nivel bajo 207 que controlan las unidades de paso de palas 208 respectivas. Los ángulos de paso de desplazamiento 201o se proporcionan para desplazar una referencia de paso dada de cada pala 110 del rotor para contrarrestar una oscilación de la turbina eólica en una dirección lateral al viento. En algunas realizaciones, el paso de referencia dado se proporciona basándose en una curva de paso óptima. Sin embargo, en condiciones de viento por encima de la velocidad nominal del viento el paso de referencia se ajusta para suministrar una salida de potencia próxima a una salida de potencia nominal.

55 El módulo de decisión de activación 202 comprende una unidad de decisión de activación 210. La unidad de decisión de activación 210 recibe varios parámetros como sus entradas 210i y emite una indicación 210o de si la amortiguación de oscilaciones controlada por el paso de palas individuales se realizará y/o de en qué medida se realizará la amortiguación de oscilaciones medida. Por ejemplo, un valor de salida de la unidad de decisión de activación 210 es entre el valor lógico de "cero" y el valor lógico de "uno" que indica que ninguna amortiguación de oscilaciones controlada por el paso de palas se debe realizar y que se realizará la amortiguación de oscilaciones controlada por el paso de palas al completo, respectivamente. En una realización, el módulo de decisión de activación 202 comprende también una unidad de suavizado 203. La unidad de suavizado 203 proporciona una transición continua de la salida de la unidad de decisión de activación 210 y, particularmente, evita pasos entre valores de salida consecutivos, es decir, una salida suavizada de la unidad de decisión de activación 210. En una realización, la unidad de suavizado 203 proporciona una función de pendiente proporcional a la salida de la unidad de decisión de activación 210 como una salida. En otras realizaciones la unidad de suavizado 203 proporciona también una histéresis de la decisión de

activación, de manera que una decisión de activación se mantiene durante un período de tiempo prolongado, incluso si los parámetros que conducen a la decisión de activación cambian en una forma en que una decisión de activación se revisa poco después de que se ha liberado la decisión de activación. En realizaciones adicionales, tal histéresis se realiza en la unidad de decisión de activación 210.

5 La salida 202o del módulo de decisión de activación 202 se combina con las salidas 201o del controlador de amortiguación lateral 201. En la realización representada, la salida 201o del controlador de amortiguación lateral 201 se multiplica con una salida de valor de la ganancia por el módulo de decisión de activación 202 en los multiplicadores 204, en el que cada uno de los multiplicadores procesa un ángulo de paso de desplazamiento de una pala 110 del rotor respectiva. En esta realización se supone que una modificación del ángulo de paso de desplazamiento es proporcional a una modificación de la fuerza lateral resultante. Sin embargo, en otras realizaciones la salida 202o del módulo de decisión de activación 202 se combina con las salidas 201o del controlador de amortiguación lateral 201 de una manera que la modificación de la fuerza lateral también es realmente proporcional a la salida 202o del módulo de decisión de activación 202.

15 En consecuencia, si el controlador de amortiguación lateral 201 proporciona ángulos de paso de desplazamiento 201o y el módulo de decisión de activación 202 proporciona un valor de ganancia que indica que se debe realizar una activación, por ejemplo, mediante la salida de lógica “uno”, los ángulos de paso de desplazamiento se multiplican por “uno” y, por tanto, permanecen sin modificaciones. Los ángulos de paso de desplazamiento no modificados se proporcionan como las salidas 204o de los multiplicadores 204 a la unidad de control de paso de palas 205. En la unidad de control de paso de palas 205 los ángulos de paso de desplazamiento no modificados 204o se añaden a las referencias de paso colectivas ϑ_0 procedentes de la unidad de curva de paso 206 antes de enviarse como referencias de ángulo de paso de cada pala del rotor a los controladores de paso de nivel bajo 207. Los controladores de paso de nivel bajo ajustan las unidades de control de paso de palas 208 para cada pala del rotor en consecuencia.

25 Sin embargo, si el módulo de decisión de activación 202 proporciona un valor de ganancia que indica que ninguna activación de la amortiguación se debe realizar, por ejemplo, mediante la emisión de una lógica “cero”, los ángulos de paso de desplazamiento se multiplican por “cero” y no se proporcionan ángulos de paso de desplazamiento a la unidad de ajuste de paso de palas 205. Los controladores de paso de nivel bajo 207 reciben las referencias de paso procedentes de la unidad de curva de paso 206.

35 En algunas realizaciones, la curva de paso óptima se determina mediante la evaluación de una curva de paso que proporciona una potencia máxima de salida. En las realizaciones, la curva de paso óptima es un mapeo que proporciona un ángulo de paso fijo para una velocidad del viento dada por debajo de una potencia nominal del generador y/o las velocidades de viento nominales inferiores. En realizaciones adicionales, la curva de paso óptima es un mapeo que proporciona un ángulo de paso establecido para cada pareja de velocidad del viento y par motor del generador. El conjunto de ángulo de paso determina un ángulo de paso respectivo para cada pala del rotor en un ángulo de giro respectivo. En algunas realizaciones, la curva de paso óptima se calcula fuera de línea. En realizaciones adicionales la curva de paso óptima se determina o verifica por ensayos en las turbinas eólicas en operación. Particularmente, la curva de paso óptima se evalúa para producir una potencia máxima de un viento determinado por las condiciones del viento a partir de condiciones de calma a la velocidad nominal del viento. En realizaciones adicionales, la curva de paso óptima se evalúa para proporcionar un par rotor máximo o un ruido mínimo. En condiciones de viento por encima de la velocidad nominal del viento, el conjunto de ángulo de paso se ajusta para proporcionar una potencia cerca de una salida de potencia nominal.

45 En realizaciones donde los módulos de decisión de activación proporcionan un valor de ganancia que indica que solo algo de amortiguación se realiza, por ejemplo, emitiendo un valor mayor que “cero” y menor que “uno”, el ángulo de paso de desplazamiento 201o se multiplica por el valor de ganancia y se modifica en consecuencia. A continuación, se proporciona el ángulo de paso de desplazamiento reducido en las salidas 204o de los multiplicadores 204 para que la unidad de control de paso de palas 205 ajuste las palas 110 del rotor de tal manera que solo se realiza algo de amortiguación. En realizaciones adicionales, el ángulo de paso de desplazamiento 201o se modifica de tal manera que la fuerza lateral resultante es proporcional al valor de ganancia.

55 La Figura 3A ilustra una realización de la unidad de decisión de activación 210a que comprende una unidad de requisito 211 y unidad de estimación de fuerza 213. La unidad de requisito 211 recibe diversos parámetros como su entrada 211i relativa a al menos una de las oscilaciones actuales y su amplitud, una estimación de las cargas incurridas en la estructura de la turbina, una estimación de si la amortiguación podría ser necesaria en un futuro próximo, una indicación de si un algoritmo de amortiguación de oscilaciones diferente al del control de paso de palas individuales se está realizando actualmente, y una indicación de si una velocidad del viento está por encima de una cierta porción de una velocidad nominal del viento en diversas realizaciones. La unidad de requisito 211 emitirá una indicación de si se deben amortiguar las oscilaciones.

65 En una realización, cada uno de estos parámetros recibirá un valor lógico “uno” o “cero”, dependiendo de si su valor hace la amortiguación deseable o no, respectivamente. En una realización particular todos los valores se combinan en una Función OR de tal manera que si un valor indica que la amortiguación de oscilaciones será deseable, la unidad

de requisito 211 emitirá tal deseo. En una realización diferente, todos estos valores se suman y se dividen entre el número de parámetros de tal manera que un número entre “cero” y “uno” se proporciona como una salida de la unidad de requisito 211. En esta realización, un requisito para amortiguar se emitirá si el número está por encima de un cierto umbral. En realizaciones adicionales, cada valor se considera de acuerdo con un factor de ponderación para dar prioridad a ciertos parámetros. La unidad de requisito 211 indicará el requisito de amortiguar mediante la salida de una lógica “uno”. Si no se requiere amortiguación, la unidad de requisito 211 emitirá una lógica “cero”.

En algunas realizaciones, un miembro de umbral de oscilación 2111 indica parámetros que caracterizan una oscilación de la torre 108. En realizaciones adicionales, para determinar las oscilaciones, un valor de la raíz cuadrada medio de una aceleración de torre lateral se utiliza por el miembro de umbral de oscilación. En realizaciones particulares el miembro de umbral de oscilación compara la raíz cuadrada media de la aceleración con un umbral de oscilación predeterminado. Si se alcanza el umbral de oscilación, el miembro de umbral de oscilación emite una lógica “uno”. Mientras la oscilación no alcanza el umbral de oscilación, el miembro de umbral de oscilación emite una lógica “cero”.

En algunas realizaciones, un miembro de estimación de carga 2112 proporciona una estimación de las cargas sobre los componentes de la turbina eólica de amortiguar las oscilaciones laterales ajustando individualmente los ángulos de paso. Particularmente, se consideran los componentes de la turbina eólica, que son particularmente propensos a grandes cargas. Tales componentes propensos a grandes cargas son cojinetes de las palas en el buje 106 del rotor y un cojinete principal que proporciona una conexión entre la torre 108 y la góndola 104. Tal estimación podría basarse por ejemplo en una indicación de descomposición de un componente particular hasta un punto actual en el tiempo y podría correlacionarse con acciones de amortiguación hasta ese punto en el tiempo para deducir una predicción de la carga debido a un efecto de amortiguación. Por ejemplo, una tasa de acumulación de la fatiga del cojinete de pala en un punto actual en el tiempo podría estar correlacionada con movimiento de paso. Si la tasa de acumulación indica una sensibilidad particular a un movimiento de paso particular, el miembro de estimación de carga 2112 emite un nivel “cero” para indicar que ninguna amortiguación de ajuste de paso individual es deseable si se exige el movimiento de paso particular. Si la tasa de acumulación indica que una sensibilidad a un movimiento de paso particular es inferior a un umbral determinado, el miembro de estimación de carga 2112 emite una lógica “uno”. Para este ejemplo, la tasa de acumulación de la fatiga del cojinete de pala en un punto dado en el tiempo se calcula como el buje del momento en la base de la pala resultante multiplicado por una velocidad de paso. Una cierta aceleración de la torre será tolerada antes de habilitar la amortiguación por ajuste de paso individual, si la sensibilidad del cojinete de pala al movimiento de paso particular es tan alta que una tasa de caída estimada del cojinete de pala debida a dicho movimiento de paso particular excede una tasa de caída predeterminada del cojinete de pala en más de un valor de tolerancia de la tasa de caída.

En algunas realizaciones, un miembro de predicción de oscilación 2113 se adapta para deducir una estimación relativa a una oscilación de la torre en el futuro próximo y para determinar si la amortiguación en un futuro próximo es deseable. El miembro de predicción de oscilación recupera los datos de una aceleración actual o fuerza en la torre, en particular en una dirección lateral. Si tal aceleración actúa lateralmente sobre la torre, el miembro de predicción de oscilación detectará la aceleración y sobre esta base podrá predecir si una oscilación se acumulará basándose en un modelo de la torre. Si una fuerza actúa lateralmente en la torre, el miembro de predicción de oscilación proporcionará igualmente una estimación de oscilación basada en el modelo de la torre y tendrá, particularmente, en cuenta si la fuerza varía con el tiempo. En una realización, el modelo de la torre comprende en particular la primera torre de frecuencia natural. Si la fuerza o aceleración varía a una frecuencia lo suficientemente cerca de la frecuencia natural, de tal manera que las oscilaciones laterales pueden acumularse, el miembro de predicción de oscilación emite una lógica “uno” para evitar que las oscilaciones se acumulen. Si la fuerza o aceleración varía en una distancia de frecuencia de la frecuencia natural y los efectos de amortiguación pasivos evitan que las oscilaciones se acumulen, el miembro de predicción de oscilación emite una lógica “cero”.

En algunas realizaciones, un miembro de medición 2114 del viento indica si y en qué medida una velocidad del viento está por encima de una cierta porción de una velocidad nominal del viento. El miembro de medición 2114 del viento emite una lógica “uno” a la unidad de requisito 211 si la velocidad del viento está por encima de la porción determinada de la velocidad nominal del viento, de otro modo una lógica “cero”. En ciertas realizaciones, la porción determinada corresponde a la mitad de una velocidad nominal del viento.

En algunas realizaciones, un módulo de amortiguación de oscilaciones alternativo 2115 se adapta para realizar un método de amortiguación de oscilaciones alternativo que no se basa en una disposición de la fuerza basada en el control de paso de palas individuales. En algunas realizaciones, un método de amortiguación de oscilaciones alternativo de este tipo ajusta una velocidad de giro del rotor. En estas realizaciones el módulo de amortiguación de oscilaciones alternativo 2115 ajusta la velocidad de giro de tal manera que una frecuencia de giro es diferente de una frecuencia natural de la torre. Si la frecuencia de giro es diferente de la frecuencia natural, la amortiguación natural de la torre, por ejemplo, debido a la fricción en la estructura, proporciona suficiente amortiguación de tal manera que las oscilaciones se evitan. A veces esto obstaculizará la operación óptima de la turbina eólica. En algunas realizaciones, el método de amortiguación de oscilaciones alternativo incluye una reducción del punto de ajuste de la velocidad de giro, y puede operar a todas las velocidades de viento.

El control de la fuerza inducida por el par motor del generador como se ha descrito anteriormente constituye un método

de amortiguación de oscilaciones alternativo adicional. Como se ha indicado, al variar el par contrario a lo largo del tiempo en función de la configuración cíclica de la oscilación lateral, la fuerza inducida por el par motor del generador resultante se puede controlar para debilitar la oscilación lateral. La fuerza inducida por el par motor del generador proporcionada por las variaciones de par puede estimarse como

$$\Delta F_S = \frac{\Delta P}{\omega h_{eff}}$$

donde ΔP es la amplitud de los cambios de potencia resultantes de las variaciones del par, ω es la velocidad del rotor, y h_{eff} es la altura de la torre eficaz, que es aproximadamente el 60 % de la altura de la torre actual.

En algunas realizaciones, si el método de amortiguación alternativo está operando actualmente, el módulo de amortiguación de oscilaciones alternativo 2115 comunicará una lógica “uno” a la unidad de requisito 211, y de otra manera una lógica “cero”. La amortiguación mediante el ajuste individual de las palas de paso se realiza con el fin de reducir una acción de control del método de amortiguación de oscilaciones alternativo.

Sin embargo, la aplicación del ajuste de palas individuales no excluye los métodos de amortiguación de oscilaciones alternativos. Más bien, en algunas realizaciones, el método de amortiguación de oscilaciones alternativo puede operar al mismo tiempo como una amortiguación controlada del paso de palas individuales.

La unidad de estimación de fuerza 213 recibe un punto de operación de la turbina eólica como una entrada 213i y proporciona una indicación de si se puede generar suficiente fuerza como una salida 213o. Su función se describirá más adelante con referencia a la Figura 4. En algunas realizaciones la unidad de estimación de fuerza 213 indicará que la fuerza suficiente se puede generar por la salida de una lógica “uno”. De lo contrario, la unidad de estimación de fuerza emitirá una lógica “cero”.

Las salidas 211o, 213o de la unidad de requisito 211 y de la unidad de estimación de fuerza 213 se combinan entre sí. En la realización representada en la Figura 3A, un multiplicador 215 combina las salidas 211o, 213o de la unidad de requisito 211 y la unidad de estimación de fuerza 213 por una multiplicación, de modo que si ambas, la unidad de requisito 211 y la fuerza de estimación unidad 213 emiten una lógica “uno”, la salida 210o de la unidad de decisión de activación 210a es una lógica “uno”. Sin embargo, si una o ambas de las salidas de la unidad de requisito 211 y la unidad de estimación de fuerza 213 corresponde a una lógica “cero”, la salida 210o de la unidad 210a de decisión de activación sería una lógica “cero”. En realizaciones adicionales un resultado similar se consigue con una compuerta “Y” lógica. En todavía otras realizaciones un resultado similar se consigue con una compuerta “O” lógica, de tal manera que la amortiguación se habilita si al menos una salida es una lógica “uno”. Todavía otras realizaciones proporcionan que si una predeterminada de la unidad de requisito 211 o la unidad de estimación de fuerza 213 emiten una indicación de que la amortiguación se debe realizar mientras la otra unidad respectiva tiene o no que solicitar la amortiguación, la salida de la unidad decisión de activación 210a indicará que la amortiguación se debe realizar. Por ejemplo, si la unidad de requisito 211 está predeterminada e indica que la amortiguación es deseable, la unidad de decisión de activación 210a emite que la amortiguación de oscilación controlada por el paso de palas individuales se deberá habilitar, a pesar de que la unidad de estimación de fuerza 213 indique que solo se puede generar fuerza insuficiente y que una oscilación o su acumulación no se pueden evitar por completo. Sin embargo, en este ejemplo la unidad de requisito 211 se dispone, de tal manera que solo las condiciones seleccionadas conducen a la amortiguación sin tener en cuenta la unidad de estimación de fuerza 213. De esta manera, se pueden reducir los daños inducidos por la oscilación de la torre 108 y se puede mantener la operación de la turbina eólica mientras se producen algunas oscilaciones, pero solo hasta un cierto límite.

La Figura 3B ilustra una realización alternativa de la unidad de decisión de activación 210b. La unidad de decisión de activación comprende una unidad de evaluación de requisito 212 y una unidad de evaluación de estimación de fuerza 214. La unidad de evaluación de requisito 212 recibe una entrada correspondiente a las entradas de la unidad de requisito 211 y emite un valor que indica una evaluación de la necesidad de amortiguar las oscilaciones. En algunas realizaciones la unidad de evaluación de requisito 212 se adapta para proporcionar al menos tres valores distintos que indican una clasificación de cuán deseable sería una amortiguación de oscilaciones. Por ejemplo, los al menos tres valores distintos se refieren a un primer valor que indica que no se desea la amortiguación de oscilaciones, un segundo valor que indica que se desea alguna amortiguación de oscilaciones y un tercer valor que indica que se desea toda la amortiguación de oscilaciones posible. En algunas realizaciones, la unidad de evaluación de requisito 212 se adapta para proporcionar una función continua entre un primer valor que no habilita la amortiguación de la oscilación y un segundo valor que habilita la amortiguación de oscilaciones competente.

Las entradas de la unidad de evaluación de requisito 212 comprenden al menos una de oscilaciones reales y su amplitud de un miembro de oscilación 2121, una estimación de las cargas incurridas en la estructura de la turbina de un miembro de estimación de carga 2122, una estimación de cuánta amortiguación en un futuro próximo podría llegar a ser necesaria a partir de un miembro de predicción de oscilación 2123, una evaluación relativa a una relación de la velocidad del viento actual y una velocidad nominal del viento de un miembro de medición 2124 del viento, y una indicación de si y/o qué tan fuerte un algoritmo de amortiguación de oscilaciones que es diferente de un control de

paso de palas individuales se está realizando actualmente en un módulo de amortiguación de oscilación alternativo 2125.

El miembro de oscilación 2121, el miembro de estimación de carga 2122, el miembro de predicción de oscilación 2123, el miembro de medición 2124 del viento y el módulo de amortiguación de oscilación alternativo 2125 procesan información de manera similar a los miembros correspondientes descritos anteriormente. En algunas realizaciones la unidad de evaluación de requisito 212 y al menos uno de los miembros se adaptan para comunicar tres o más valores distintos del al menos uno de los miembros, indicando los tres o más valores distintos tres o más intensidades diferentes del parámetro correspondiente.

Puesto que al menos uno de los parámetros se indica con al menos tres valores distintos, algunas realizaciones permiten declaraciones relativas a una combinación de los parámetros que indican hasta qué medida se debe realizar la amortiguación de oscilaciones controlada por el paso de palas individuales. Por ejemplo, si el miembro de oscilación 2121 indica un cierto requisito para amortiguar y el miembro de estimación de carga 2122 indica que la amortiguación de oscilaciones no incurrirá en grandes cargas en este momento, pero el miembro de predicción de oscilación 2123 indica que las oscilaciones disminuirán de todos modos dentro de poco debido a un campo de viento alrededor de la turbina eólica, la unidad de evaluación de requisito 212 emite un requisito reducido o incluso ningún requisito para amortiguar las oscilaciones en el momento y de este modo ahorra tiempo de vida de la estructura de los cojinetes de paso.

La unidad de evaluación de requisito 212 procesa los valores. En algunas realizaciones la unidad de evaluación de requisito 212 combina los valores respectivos con factores de peso para unificar los valores y permitir poner los valores en una relación mutua. Esto es porque los parámetros indican condiciones desiguales tales como velocidad del viento, oscilación y carga estructural, que de otro modo no pueden combinarse o compararse fácilmente, si se requiere una declaración significativa. En tales realizaciones, una vez que los valores respectivos se unifican, los mismos, en realizaciones adicionales, se resumen o introducen simplemente en una función o una lógica de control para su procesamiento. En las realizaciones, la salida de la unidad de evaluación de requisito 212 indica un requisito graduado para proporcionar amortiguación de oscilaciones controlada por el paso de palas individuales. En realizaciones adicionales, la unidad de evaluación de requisitos 212 solo indica si se requiere o no una amortiguación de oscilaciones controlada por el paso de palas individuales.

La unidad de evaluación de estimación de fuerza 214 recibe el punto de operación como una entrada 214i y proporciona una indicación de una evaluación de estimación de una magnitud de fuerza estimada que contrarresta las oscilaciones como una salida. El funcionamiento de la unidad de evaluación de estimación de fuerza 214 se explicará con referencia a la Figura 4 más adelante. En algunas realizaciones, la salida de la unidad de evaluación de estimación de fuerza 214 se adapta para proporcionar al menos tres valores distintos que indican una magnitud de fuerza que puede ser generada por paso de pala individual. Por ejemplo, los al menos tres valores distintos que indican una magnitud de fuerza se refieren a un primer valor que indica que ninguna fuerza puede ser generada, un segundo valor que indica que parte de la fuerza requerida puede ser generada y un tercer valor que indica que toda la fuerza requerida puede ser generada.

Las salidas de la unidad de evaluación de requisito 212 y la unidad de evaluación de estimación de fuerza 214 se introducen en una tabla de búsqueda 216. La tabla de búsqueda 216 proporciona una salida 210o de la unidad de decisión de activación 210b como una función de cada pareja del requisito evaluado para proporcionar amortiguación de oscilaciones controlada por el paso de palas individuales y la indicación de una evaluación de la magnitud de la fuerza estimada. En diversas realizaciones, la salida de la unidad de decisión de activación 210b se adapta para proporcionar al menos dos valores distintos, un primer valor que no habilita la amortiguación de oscilaciones y un segundo valor que habilita la amortiguación de oscilaciones completa. En realizaciones adicionales, la salida de la unidad de decisión de activación 210b se adapta para proporcionar al menos tres valores distintos, en el que un primer valor no habilita la amortiguación de oscilaciones, un segundo valor habilita algo pero no toda la amortiguación de oscilaciones, y un tercer valor habilita la amortiguación de oscilaciones completa. Además valores distintos proporcionan clasificaciones adicionales de amortiguación de oscilaciones. La tabla de búsqueda 216 puede ser o bien estática en el tiempo o puede adaptarse por un operario o por un algoritmo de aprendizaje o cualquier otra función teniendo en cuenta un cambio de la turbina eólica en el tiempo o un hallazgo de mejores parámetros de control.

La Figura 4 muestra una realización de la unidad de estimación de fuerza 213 y de la unidad de evaluación de estimación de fuerza 214. En una primera realización correspondiente a la unidad de evaluación de estimación de fuerza 214 de la Figura 3B, una tabla de búsqueda 218 se proporciona con un primer miembro de entrada 2181 y un segundo miembro de entrada 2182. El primer y segundo miembros de entrada 2181, 2182 proporcionan un par de valores, par que define un punto de operación de la turbina eólica. En realizaciones adicionales, uno, tres o más miembros de entrada se proporcionan para definir el punto de operación. En realizaciones adicionales se consideran señales adicionales que definen la operación de la turbina eólica.

En algunas realizaciones, el punto de operación se define por un par de señales del grupo que comprende la velocidad del viento, la referencia de paso colectiva ϑ_0 , la energía producida, la potencia nominal, el par generado y la velocidad

del generador. A partir de este par de señales, una fuerza generada a partir de un ajuste de paso individual se puede calcular fuera de línea y se puede escribir en la tabla de búsqueda 218. La tabla de búsqueda 218 emite una indicación de la cantidad de fuerza lateral que se puede generar a partir de un ajuste de paso individual. En una realización correspondiente a la unidad de estimación de fuerza 213, la tabla de búsqueda 218 emite simplemente una lógica “uno” que indica que una fuerza suficiente puede ser generada, o lógica “cero” que indica que una fuerza suficiente no se puede generar. En otras realizaciones correspondientes a la unidad de evaluación de estimación de fuerza 214, la tabla de búsqueda 218 se adapta para emitir tres o más valores diferentes dependiendo de cuánta fuerza se pueda generar.

En una realización, en condiciones por encima de una potencia nominal, es decir, una potencia nominal para la que se diseña la turbina eólica, la unidad de estimación de fuerza 213 recibe la referencia de paso colectiva ϑ_0 como se proporciona a la unidad de control de paso de palas 205. La unidad de estimación de fuerza 213 compara además la referencia de paso colectiva ϑ_0 con la curva de paso óptima. Si una diferencia entre la referencia de paso colectiva ϑ_0 y la curva de paso óptima es mayor que un parámetro predeterminado, la unidad de estimación de fuerza aproxima que el ajuste individual del ángulo de paso de cada pala del rotor puede generar fuerza suficiente. Esto es porque en esta realización se genera la curva de paso óptima para proporcionar una potencia máxima para las condiciones por debajo y por encima de la potencia nominal a una velocidad nominal del viento, es decir, las velocidades nominales del viento para las que la turbina eólica está diseñada, mientras que la referencia de paso colectiva se adapta a una velocidad del viento actual, en particular, por encima de la velocidad nominal del viento. Por encima de la velocidad nominal del viento, la referencia de paso colectiva se ajusta para proporcionar una potencia constante que corresponde a la potencia nominal, incluso si la velocidad del viento permite una potencia mucho mayor. En tales condiciones, la referencia de paso colectiva ϑ_0 proporciona una mejor sensibilidad de paso de palas individuales adicionales sin afectar a la potencia de salida. Por lo tanto, la referencia de paso colectiva es diferente de la curva de paso óptima particularmente por encima de las velocidades del viento nominales. En esta realización, la tabla de búsqueda tiene una estructura particularmente simple, puesto que solo se comparan los ángulos de paso y no se requiere otra adaptación de parámetros para una evaluación significativa.

En la realización representada, un conmutador 219 se dispone en la salida de la tabla de búsqueda 218. La realización corresponde, en particular, a la unidad de estimación de fuerza 213 y proporciona una lógica “uno” o una lógica “cero” como una salida 213o de la unidad de estimación de fuerza 213, si la fuerza suficiente se puede generar o no, respectivamente. En realizaciones adicionales, el conmutador 219 se adapta para emitir tres valores distintos para indicar una clasificación de la estimación de la fuerza. En una realización, el conmutador 219 proporciona también una histéresis para evitar que la salida 213o conmute entre el valor lógico de “cero” y el valor lógico de “uno” con una frecuencia desfavorable.

En una realización, el par de señales comprende una potencia producida y la referencia de paso colectiva ϑ_0 . La referencia de potencia se proporciona en la salida de un controlador de carga parcial. El controlador de carga parcial controla, por lo general, la velocidad de giro de la turbina mediante la selección del par contrario apropiado de modo que la eficacia de la turbina se maximiza, en particular, en condiciones de viento por debajo de la velocidad nominal del viento, que está en condiciones de carga parcial. En algunas realizaciones, las salidas se filtran con un filtro de paso bajo. En particular, un filtrado de paso bajo de las salidas se puede utilizar para evitar una alta frecuencia de los cambios de salida de la tabla de búsqueda o el conmutador 219.

La Figura 5 muestra una realización adicional del módulo de decisión de activación 202 en más detalle. En la realización la unidad de decisión de activación 210 comprende un miembro de acondicionamiento 311 del valor de requisito y un miembro de acondicionamiento 313 del valor de viabilidad. Con fines ilustrativos, los miembros y las estructuras adicionales en la Figura 5 están delimitados entre sí por líneas de puntos.

El miembro de acondicionamiento 311 del valor de requisito comprende al menos una unidad de procesamiento de aceleración y un miembro de evaluación de pérdida de potencia 3115. El miembro de acondicionamiento 311 del valor de requisito recibe como su entrada un valor de aceleración de la torre de un miembro de medición de aceleración 3111 de la torre, un valor que indica un daño estimado de la turbina eólica 102 de un indicador de daños 3112, una referencia de potencia nominal de un miembro de referencia de potencia nominal 3113, y una referencia de potencia activa de un miembro de referencia de potencia activa 3114.

La aceleración de la torre se introduce en la unidad de procesamiento de aceleración que comprende un filtro de aceleración 311a, un miembro de raíz cuadrada media de aceleración 311b y/o un estimador de daños 311c. En algunas realizaciones, la aceleración de la torre se procesa por un solo filtro de aceleración 311a, el miembro de raíz cuadrada media de aceleración 311b y el estimador de daños 311c. En otras realizaciones, dos o más de las unidades de procesamiento de aceleración 311a, 311b, 311c se combinan para el procesamiento de la aceleración de la torre.

El filtro de aceleración 311a aplica el filtrado de la aceleración de la torre para emitir una porción preferida de la señal de aceleración de la torre. En algunas realizaciones el filtro de aceleración 311a es un filtro de paso bajo que emite porciones de señales de aceleración de la torre próximas a y por debajo de una primera señal de frecuencia propia de

la torre. En realizaciones adicionales, el filtro de aceleración 311a es un filtro de paso bajo que emite porciones de señales de aceleración de la torre próximas a y por debajo de una frecuencia de giro nominal del rotor. En realizaciones adicionales, el filtro de aceleración 311a es un filtro de paso de banda que emite porciones de señales de aceleración de la torre próximas a la primera frecuencia propia de la torre o la frecuencia de giro nominal del rotor. En realizaciones adicionales, las porciones armónicas más altas de la señal de aceleración de la torre se emiten.

El miembro de raíz cuadrada media de aceleración 311b calcula y emite una señal de raíz cuadrada media de la señal de aceleración de la torre para amplificar las amplitudes de señal más grandes, suprimir el ruido de la señal de aceleración de la torre y emitir una señal de baja varianza a lo largo del tiempo para cambiar periódicamente la señal de aceleración de la torre.

El estimador de daños 311c recibe la aceleración de la torre así como el valor que indica un daño estimado a partir del indicador de daños 3112. El indicador de daños 3112 recibe varios parámetros de carga de los componentes de la turbina eólica 102 y, en algunas realizaciones, tiene en cuenta las propiedades mecánicas de los componentes. En particular, los parámetros de carga incluyen ciclos y/o magnitudes de carga anteriores. El estimador de daños 311c utiliza la información para evaluar el desgaste de los componentes bajo las aceleraciones actuales. En algunas realizaciones, la evaluación del desgaste se basa en el historial de los componentes, incluyendo el uso de vida tal como se describe en el documento WO 2013/044925, que se incorpora por referencia en la presente memoria, para indicar una fatiga de los componentes.

La referencia de potencia nominal y la referencia de potencia activa se introducen en el miembro de evaluación de pérdida de potencia 3115. La referencia de potencia nominal indica una potencia máxima que la turbina puede producir, es decir, potencia a la que la turbina limita la eficacia aerodinámica al pasar hacia fuera. En condiciones normales la referencia de potencia nominal es igual que una placa de identificación del generador. Sin embargo, cualquiera de la propia turbina o una fuente externa pueden reducir la capacidad de la turbina, es decir, pueden reducir la potencia de salida máxima. La referencia de potencia activa indica la potencia de salida del generador de la turbina eólica 102. La referencia de potencia activa es en carga parcial menor que la referencia de potencia nominal. A la velocidad nominal del viento y por encima de la referencia de potencia activa se limita hacia arriba por la referencia de potencia nominal. El miembro de evaluación de pérdida de potencia 3115 estima una pérdida de potencia debida al ajuste de la velocidad de giro de tal manera que una frecuencia de giro es diferente de la frecuencia propia de la torre 102.

Cada una de las salidas del filtro de aceleración 311a, el miembro de raíz cuadrada media de aceleración 311b, el estimador de daños 311c y el miembro de evaluación de pérdida de potencia 3115 se proporcionan a la primera, segunda, tercera y cuarta función de activación de deslizamiento 3118a, 3118b, 3118c, 3118d respectivas comprendidas también en el miembro de acondicionamiento 311 del valor de requisito.

El procesamiento de la entrada respectiva se ilustra en un diagrama de función de activación de deslizamiento 3008. La función de activación de deslizamiento 3008 recibe la entrada, por ejemplo, una aceleración de la torre filtrada. La entrada se compara con los valores OffBelow y OnAbove, donde OffBelow es más pequeño que OnAbove. Si la entrada es menor que OffBelow, la función de activación de deslizamiento 3118a arroja un "cero". Si la entrada es mayor que OffBelow, pero más pequeño que OnAbove, la función de activación de deslizamiento 3118a arroja un valor mayor que "cero" pero menor que "uno". En una realización, la salida se calcula en este caso de acuerdo con la salida = entrada/(OnAbove - OffBelow).

En realizaciones adicionales se aplican otras funciones de interpolación que incluyen funciones no lineales. Si la entrada es mayor que OnAbove, la función de activación de deslizamiento 3118a arroja un "uno". Los valores para OffBelow y OnAbove para cada función de activación de deslizamiento son independientes entre sí.

Las salidas de la función de activación de deslizamiento 3118a, 3118b, 3118c, 3118d respectiva se proporcionan en un primer selector de máximo 3151 de una unidad de combinación 315. El primer selector de máximo 3151 compara los valores de salida de las funciones de activación de deslizamiento 3118a, 3118b, 3118c, 3118d entre sí y proporciona el valor de salida más grande entre ellos a la salida del primer selector de máximo 3151. La salida del primer selector de máximo 3151 representa una necesidad de amortiguar las oscilaciones de la torre en un intervalo entre e incluyendo "cero" y "uno".

En diversas realizaciones el miembro de acondicionamiento 313 del valor de viabilidad comprende un estimador de amortiguación de par 3135, un estimador de amortiguación de paso 3136 y una filtro 3137 de la velocidad del viento. En realizaciones adicionales, el miembro de acondicionamiento 313 del valor de viabilidad recibe como entrada la referencia de potencia nominal del miembro de referencia de potencia nominal 3113, y la referencia de potencia activa de miembro de referencia de potencia activa 3114. En realizaciones adicionales, el miembro de acondicionamiento 313 del valor de viabilidad recibe un ángulo de paso óptimo de acuerdo con la curva de paso óptima a partir de una unidad de curva de paso óptima 3131, un ángulo de paso de referencia de un miembro de paso de referencia 3132, una velocidad del viento medida a partir de un miembro de medición 3133 del viento y una velocidad estimada del viento de un miembro de estimación de viento 3134. En otras realizaciones el miembro de acondicionamiento 313 del valor de viabilidad comprende una primera función de activación de deslizamiento invertida 3138a, y quinta y sexta funciones de activación de deslizamiento 3138b, 3138c.

En diversas realizaciones, la referencia de potencia nominal y la referencia de potencia activa se introducen en el estimador de amortiguación de par 3135. El estimador de amortiguación de par 3135 estima una capacidad de amortiguación de las vibraciones de la torre a partir de una variación del par motor del generador, por ejemplo, en la forma de una sensibilidad de la fuerza inducida por el par motor del generador (dF/dP). El par motor del generador se ajusta mediante el ajuste de una potencia de salida del generador y acelera o desacelera así el rotor. Al acelerar o desacelerar el rotor una fuerza lateral sobre la torre varía selectivamente, permitiendo la neutralización de las vibraciones laterales de la torre. El estimador de amortiguación de par 3135 compara la referencia de potencia nominal y la referencia de la potencia activa del generador y determina un intervalo en el que la potencia de salida se puede variar. A partir de este intervalo, el estimador de amortiguación de par 3135 estima la capacidad de amortiguación resultante por medio de este método y proporciona la estimación resultante de la primera función de activación de deslizamiento invertida 3138a. La primera función de activación de deslizamiento invertida 3138a arroja un “uno” para los valores de entrada por debajo de un umbral inferior, y arroja un “cero” para los valores de entrada por encima de un umbral superior. Para valores entre los mismos, la primera función de activación de deslizamiento invertida 3138a calcula una salida de acuerdo con una función de interpolación lineal o no lineal.

En realizaciones de acuerdo con la realización representada, el estimador de amortiguación de paso 3136 recibe el ángulo de paso óptimo y el ángulo de paso de referencia como una entrada. De la entrada, el estimador de amortiguación de paso 3136 deduce una capacidad para amortiguar las vibraciones de la torre por medio del ajuste de paso, por ejemplo, en forma de sensibilidad de la fuerza de paso ($dF/d\theta$). Se ha encontrado que una sensibilidad de la fuerza de paso es particularmente baja, cuando un ángulo de paso de referencia está cerca de un ángulo de paso óptimo.

Cuando el ángulo de paso de referencia es diferente del ángulo de paso óptimo, la sensibilidad de la fuerza de paso es mayor. A veces esto se debe a una sensibilidad de la fuerza de paso que es significativa en las condiciones del viento por encima de la velocidad nominal del viento y menos significativa en condiciones por debajo de la velocidad nominal del viento. El ángulo de paso óptimo se evalúa y aplica para las condiciones de viento por debajo de la velocidad nominal del viento para producir tanta potencia como sea posible para una determinada velocidad del viento. El ángulo de paso de referencia por encima de la velocidad nominal del viento suministra una potencia de salida constante incluso en variaciones del viento. Por lo tanto, cuando el ángulo de paso de referencia corresponde al ángulo de paso óptimo, de hecho, las condiciones de viento están por debajo de las nominales y la sensibilidad de la fuerza de paso es baja.

Por lo tanto, el estimador de amortiguación de paso 3136 calcula una capacidad de amortiguación mediante la comparación del ángulo de paso óptimo con el ángulo de paso de referencia, y proporciona la estimación resultante de la quinta función de activación de deslizamiento 3138b y a otras funciones tal como se explica a continuación.

En realizaciones adicionales, las funciones de sensibilidad en la forma de una sensibilidad de la fuerza inducida por el par motor del generador y en forma de sensibilidad de la fuerza de paso se estiman por la propia turbina mediante el uso de un punto de operación. De forma similar al punto de operación descrito anteriormente, el punto de operación se define por un valor del grupo de velocidad medida del viento, velocidad estimada del viento, referencia de potencia activa, potencia nominal, velocidad del rotor, posición del rotor, error de guiñada (medido o estimado), par motor del generador y velocidad del generador, o una combinación de dos o más de los valores de este grupo. En algunas realizaciones tal estimación se basa en los datos recogidos antes de la operación de la turbina eólica.

En realizaciones adicionales, la velocidad del viento medida y la velocidad estimada del viento se introducen en el filtro de velocidad 3137 del viento. El filtro de velocidad 3137 del viento combina la entrada, por ejemplo, mediante el cálculo de un valor medio, y filtra su combinación, por ejemplo, en un filtro de paso bajo.

El filtro de velocidad 3137 del viento proporciona la salida resultante a la sexta función de activación de deslizamiento 3138c.

Cada una de la quinta y sexta funciones de activación de deslizamiento 3138b, 3138c procesa la entrada como se ha explicado anteriormente con respecto al diagrama de la función de activación de deslizamiento 3008. La salida de cada función de activación de deslizamiento 3138b, 3138c y de la primera función de activación de deslizamiento invertida 3138a se proporciona para un primer selector de mínimo 3152 de la unidad de combinación 315. El primer selector de mínimo 3152 compara los valores de salida de las funciones de activación de deslizamiento 3138b, 3138c y de la primera función activación de deslizamiento invertida 3138a entre sí y proporciona el valor de salida más pequeño entre los mismos en la salida del selector de mínimo 3152. La salida del primer selector de mínimo 3152 representa una viabilidad para amortiguar las oscilaciones de la torre en un intervalo entre e incluyendo “cero” y “uno”.

En algunas realizaciones, la viabilidad de amortiguación puede estar basada en una detección de una condición de formación de hielo en el rotor. Tal condición podría disminuir la capacidad de la turbina para crear una fuerza lateral con paso individual para contrarrestar las oscilaciones laterales de la torre.

65

Las salidas del primer selector de máximo 3151 y del primer selector de mínimo 3152 se combinan en un segundo selector de mínimo 3153. El segundo selector de mínimo 3153 proporciona la salida más pequeña entre la necesidad de amortiguar y la viabilidad de amortiguación. La salida del segundo selector de mínimo 3153 representa un nivel de activación en un intervalo entre e incluyendo “cero” y “uno”.

5 En algunas realizaciones, el nivel de activación se introduce en un multiplicador 3154. El multiplicador 3154 recibe un programa de ganancia de un programador de ganancia 321 del controlador. El multiplicador 3154 multiplica el nivel de activación con el programa de ganancia y emite una ganancia de activación. El programador de ganancia 321 del controlador proporciona el programa de ganancia como una función de la sensibilidad de la fuerza de paso calculada
10 en el estimador de amortiguación de paso 3136 con el fin de normalizar la salida del multiplicador 3154 a través de todas las velocidades del viento. Por lo tanto, a pesar de que la sensibilidad de la fuerza de paso varía en un intervalo de velocidades del viento, la ganancia de la activación no varía con la velocidad del viento.

15 En algunas realizaciones se proporciona el valor de ganancia de activación a un limitador de capacidad 303. El limitador de capacidad 303 emite una ganancia de control correspondiente a la salida 202o de la unidad de decisión de activación 202. El limitador de capacidad 303 corresponde a la unidad de suavizado 203 y evita los cambios bruscos en una ganancia de control. En realizaciones que incluyen el programador de ganancia, una predicción de las oscilaciones de la torre es de menor importancia.

20 En algunas realizaciones, el módulo de decisión de activación 202 comprende adicionalmente un miembro de seguridad estructural 312. El miembro de seguridad estructural 312 comprende en diversas realizaciones un comparador de aceleración 3126 y/o un estimador de desgaste 3127. El miembro de seguridad estructural 312 recibe como entrada la aceleración de la torre del miembro de medición de aceleración 3111 de la torre, un límite de alarma de aceleración de un miembro de límite de alarma 3121, una carga de pala tal como una carga de pala a lo largo de
25 la aleta de un miembro de carga de pala 3122, una posición de paso, una velocidad de paso y una aceleración de paso de un miembro de estado de paso 3123 y una fuerza de empuje de un miembro de fuerza de empuje 3124. En realizaciones adicionales, el miembro de seguridad estructural 312 comprende segundas y terceras funciones de activación de deslizamiento invertidas 3128a, 3128b.

30 El comparador de aceleración 3126 recibe la aceleración de la torre y el límite de alarma de aceleración como una entrada. A partir de la entrada, el comparador de aceleración 3126 calcula una señal de distancia de alarma de aceleración desde la distancia de la aceleración de la torre hasta el límite de alarma como salida. En algunas realizaciones, la señal de distancia se filtra antes de emitirse, por ejemplo en un filtro de paso bajo o un filtro de paso de banda. La señal de distancia se proporciona a la segunda función de activación de deslizamiento invertida 3128a.
35 La segunda función de activación de deslizamiento invertida 3128a arrojará particularmente un valor lógico de “uno”, si la distancia de alarma de aceleración es demasiado pequeña, y un valor lógico de “cero” si la distancia de alarma de aceleración es lo suficientemente grande.

40 El estimador de desgaste 3127 recibe en diversas realizaciones la carga de pala, la posición de paso, la velocidad de paso, la aceleración de paso y/o la fuerza de empuje como una entrada. El estimador de desgaste 3127 estima a partir de la entrada de un accionador el desgaste experimentado por los accionadores de paso ajustando los ángulos de paso de las palas 110 del rotor debido al ajuste de paso actual y/o inminente. En diversas realizaciones el desgaste del accionador determinado toma en cuenta el desgaste del accionador anterior, actual y/o inminente. El estimador de desgaste 3127 proporciona la señal de desgaste del accionador a la tercera función de activación invertida 3128b. La
45 tercera función de activación invertida 3128b arrojará particularmente un valor lógico de “uno”, si el desgaste del accionador estimado es pequeño, y un valor lógico de “cero” si el desgaste del accionador estimado es lo suficientemente grande.

50 La segunda y tercera funciones de activación de deslizamiento invertidas 3128a, 3128b procesa la entrada como se ha explicado anteriormente con respecto a la primera función de activación de deslizamiento invertida 3138a. Los valores de salida de la segunda y tercera funciones de activación de deslizamiento invertidas 3128a, 3128b se proporcionan a un segundo selector de máximo 3129. El segundo selector de máximo 3129 compara los valores de salida de la segunda y tercera funciones de activación de deslizamiento invertidas 3128a, 3128b entre sí y proporciona el valor de salida más grande como una señal de seguridad estructural.

55 La señal de seguridad estructural se proporciona en el primer selector de mínimo 3152 de la unidad de combinación 315. El primer selector de mínimo 3152 incluye la señal de seguridad estructural en su comparación de valores de salida a partir del miembro de acondicionamiento 313 del valor de viabilidad.

60 El miembro de seguridad estructural 312 indica en realidad que se desea amortiguación y, por tanto, podría en otras realizaciones ser una parte del miembro de acondicionamiento 311 del valor de requisito. Sin embargo, mediante la combinación de la señal de seguridad estructural en el primer selector de mínimo 3152 con los valores de salida del miembro de acondicionamiento 313 del valor de viabilidad, una indicación de la viabilidad de amortiguación se aumentará, si el miembro de seguridad estructural 312 indica un requisito planteado y aumenta potencialmente una habilitación de amortiguación. De esta manera, incluso si una sensibilidad de la fuerza de paso es demasiado baja
65 para atenuar eficazmente las oscilaciones de la torre, la aceleración de la torre se aparta del límite de alarma y una operación de la turbina eólica se puede mantener.

Como se ha indicado anteriormente, la sensibilidad de la fuerza de paso es especialmente baja si el ángulo de paso de referencia está cerca del ángulo de paso óptimo. Por lo tanto, en algunas realizaciones la capacidad estimada de amortiguación por medio del ajuste del paso como se determina en el estimador de amortiguación de paso 3136 y/o la señal de distancia de alarma de aceleración se proporcionan a un expansor 322 de la capacidad de amortiguación. El expansor 322 de la capacidad de amortiguación determina si una capacidad adicional de amortiguación por medio del ajuste del paso se requiere, por ejemplo, basándose en la señal de distancia de alarma de aceleración. Para generar la capacidad adicional, el expansor 322 de la capacidad de amortiguación instruye a la unidad de control de paso de palas 205 para añadir un ángulo de paso de desplazamiento colectivo a las referencias de paso colectivas θ_0 , de tal manera que una distancia de los ángulos de paso de referencia hasta los ángulos de paso óptimos y así la sensibilidad de la fuerza de paso se incrementan. Por lo tanto, es posible mejorar la capacidad de amortiguación por medio del ajuste de la fuerza de paso.

Sin embargo, esta capacidad adicional de amortiguación se negocia para una operación más óptima de la turbina eólica y en muchos casos para una magnitud de potencia que no se genera.

El experto entiende que un valor lógico de “uno” y un valor lógico de “cero”, como se ha utilizado anteriormente pueden igualmente arrojar en los casos opuestos en función de una definición y una convención tal como se utiliza en un módulo correspondiente.

Cabe señalar que, por ejemplo, por razones estadísticas, el método puede comprender la estimación de lo que la oscilación de la torre habría sido si no se hubiera seleccionado la amortiguación.

Signos de referencia

102	turbina eólica
104	góndola
106	buje del rotor
108	torre de la turbina eólica
110	palas del rotor
200	lógica de control de amortiguación
201	controlador de amortiguación lateral
201o	ángulo de paso de desplazamiento
202	módulo de decisión de activación
202o	salida del módulo de decisión de activación
203	unidad de suavizado
204	multiplicadores
204o	salida de los multiplicadores
205	unidad de control de paso de palas
206	unidad de curva de paso
207	controlador del paso de nivel bajo
208	unidad de paso de palas
210, 210a, 210b	unidad de decisión de activación
210i	entrada de la unidad de decisión de activación
210o	salida de la unidad de decisión de activación
211	unidad de requisito
211o	salida de la unidad de requisito
212	unidad de evaluación de requisito
213	unidad de estimación de fuerza
213i	entrada de la unidad de estimación de fuerza
213o	salida de la unidad de estimación de fuerza
214	unidad de evaluación estimación de fuerza
214i	entrada de la unidad de evaluación de estimación de fuerza
215	multiplicador
216	tabla de búsqueda
218	tabla de búsqueda
219	conmutador
2111	miembro de umbral de oscilación
2112	miembro de estimación de carga
2113	miembro de predicción de oscilación
2114	miembro de medición del viento
2115	módulo de amortiguación de oscilación alternativo
2121	miembro de oscilación
2122	miembro de estimación de carga
2123	miembro de predicción de oscilación

	2124	miembro de medición del viento
	2125	módulo de amortiguación de oscilación alternativo
	2181	primer miembro de entrada
	2182	segundo miembro de entrada
5	303	limitador de capacidad
	3008	diagrama de función de activación de deslizamiento
	311	miembro de acondicionamiento del valor de requisito
	311a	filtro de aceleración
	311b	miembro de raíz cuadrada media de aceleración
10	311c	estimador de daños 311c
	3111	miembro de medición de aceleración de la torre
	3112	observador daños
	3113	miembro de referencia de potencia nominal
	3114	miembro de referencia de potencia activa
15	3115	miembro de evaluación de la pérdida de potencia
	3118a	función de activación de deslizamiento
	3118b	función de activación de deslizamiento
	3118c	función de activación de deslizamiento
	3118d	función de activación de deslizamiento
20	312	miembro de seguridad estructural
	3121	miembro de límite de alarma
	3122	miembro de carga de pala
	3123	miembro de estado de paso
	3124	miembro de fuerza de empuje
25	3126	comparador de aceleración
	3127	estimador de desgaste
	3128a	función de activación de deslizamiento
	3128b	función de activación de deslizamiento
	3129	segundo selector de máximo
30	313	miembro de acondicionamiento del valor de viabilidad
	3131	unidad de curva de paso óptima
	3132	miembro de paso de referencia
	3133	miembro de medición del viento
	3134	miembro de estimación del viento
35	3135	estimador de amortiguación de par
	3136	estimador de amortiguación de paso
	3137	filtro de velocidad del viento
	3138a	función de activación de deslizamiento invertida
	3138b	función de activación de deslizamiento
40	3138c	función de activación de deslizamiento
	315	unidad de combinación
	3151	primer selector de máximo
	3152	primer selector de mínimo
	3153	segundo selector de mínimo
45	3154	multiplicador
	321	programador de ganancia del controlador
	322	expansor de la capacidad de amortiguación

REIVINDICACIONES

1. Un método para operar una turbina eólica (102), comprendiendo la turbina eólica (102) una torre (108) y un rotor con al menos una pala (110) del rotor, estando el rotor conectado a la torre (108) y adaptado para accionar un generador, en el que un ángulo de paso de cada pala (110) del rotor se puede ajustar, comprendiendo el método
- 5 detectar una oscilación de la torre (108), y
 habilitar selectivamente la amortiguación de oscilaciones de la torre (108),
- 10 caracterizado por que
- habilitar selectivamente la amortiguación de la oscilación comprende
- 15 - determinar un requisito para amortiguar la oscilación,
- determinar un efecto resultante de amortiguación si se selecciona habilitar la amortiguación de la oscilación de la torre, y
- seleccionar permitir la amortiguación de la oscilación basándose en el requisito determinado de amortiguación y en el efecto de amortiguación determinado resultante.
2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que determinar un requisito de amortiguación de la oscilación se basa en al menos una de que
- 20 - una oscilación detectada de la torre (108) alcanza un umbral de oscilación,
- una indicación de si un algoritmo de control de amortiguación de oscilaciones diferente está operando,
- una indicación de si un amortiguador de torre pasivo está operando,
- 25 - una carga en la turbina eólica (102) si se selecciona habilitar la amortiguación de la oscilación de la torre,
- una relación entre una velocidad del viento actual y una velocidad nominal del viento, y
- una predicción de la oscilación lateral de la torre (108).
3. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, en el que determinar el efecto resultante de amortiguación se basa en al menos una de
- 30 - una fuerza lateral resultante que puede ser generada mediante el ajuste individual del ángulo de paso;
- una diferencia entre los ángulos de paso de palas (110) del rotor y ángulos de paso óptimos;
- sensibilidad a la fuerza de paso $(dF/d\theta)$;
- 35 - una relación entre una potencia actual y una potencia nominal;
- una relación entre una velocidad del viento actual y una velocidad nominal del viento,
- una fuerza lateral resultante que puede generarse mediante el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador, y
- un punto de operación de la turbina eólica (102).
- 40 4. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el requisito de amortiguación determinado y el efecto de amortiguación resultante determinado se combinan para generar un valor de clasificación de la habilitación, y la amortiguación de oscilaciones se habilita de acuerdo con el valor de la clasificación de la habilitación, proporcionándose el valor de la clasificación de la habilitación como uno de al menos tres valores distintos, un primer valor que habilita la no amortiguación de oscilaciones, un segundo valor que habilita una amortiguación de oscilaciones completa y un valor adicional que proporciona una clasificación distinta de habilitar la amortiguación de oscilaciones entre ninguna amortiguación de oscilaciones y una amortiguación de oscilaciones completa.
- 45 5. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la oscilación de la torre (108) es una oscilación lateral.
- 50 6. El método de acuerdo con la reivindicación 5, en el que la amortiguación de la oscilación lateral comprende el ajuste del ángulo de paso individual, y en el que habilitar el ajuste del ángulo de paso individual comprende una habilitación suavizada del ajuste individual del ángulo de paso.
- 55 7. El método de acuerdo con la reivindicación 6, en el que la amortiguación mediante el ajuste del ángulo de paso individual se realiza con el fin de reducir una acción de control de un algoritmo de control de oscilación lateral de amortiguación diferente.
- 60 8. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que la carga en la turbina eólica (102) si se selecciona habilitar la amortiguación de la oscilación de la torre incluye un momento de inclinación del cojinete principal y/o una tasa de acumulación de fatiga en el cojinete de pala.
- 65 9. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la oscilación de la torre (108) se predice mediante la medición de un momento hacia los bordes y derivando el momento hacia los bordes en el tiempo

con el fin de recibir una indicación de su desarrollo y/o midiendo un campo de viento en un área alrededor de la turbina eólica.

- 5 10. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el algoritmo de control de amortiguación de oscilación lateral diferente ajusta una velocidad de giro del rotor de tal manera que las oscilaciones inducidas por el rotor tienen una frecuencia diferente de una frecuencia natural de la torre.
- 10 11. El método de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el efecto de amortiguación, que puede generarse a partir de un ajuste del paso de palas individuales particular y en un punto de operación particular, se calcula antes de operar la turbina eólica (102) y se almacena en una tabla de búsqueda (218).
- 15 12. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende además
- proporcionar un ángulo de paso óptimo para cada pala (110) del rotor,
 - detectar una oscilación lateral de la torre (108),
 - ajustar un ángulo de paso actual de cada pala (110) del rotor como una función del ángulo de paso óptimo, una condición de viento y/o un requisito de salida del generador,
 - determinar una capacidad de amortiguar la oscilación lateral por medio del ajuste del paso mediante la evaluación de una diferencia entre el ángulo de paso óptimo para cada pala (110) del rotor y el ángulo de paso actual de cada
- 20 pala (110) del rotor,
- determinar si una capacidad adicional de amortiguación por medio del ajuste del paso se requiere, y si se requiere la capacidad adicional de amortiguación, aumentar la diferencia entre el ángulo de paso óptimo y el ángulo de paso actual.
- 25 13. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que seleccionar habilitar la amortiguación de oscilación, basándose en el requisito de amortiguación determinado y en el efecto de amortiguación resultante determinado, comprende determinar una aceleración de la torre y un límite de alarma de aceleración, y determinar, basándose en la aceleración de la torre y el límite de alarma de aceleración, una señal de distancia de
- 30 alarma de aceleración desde la distancia de la aceleración de la torre hasta un límite de alarma.
- 35 14. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones, en el que la oscilación de la torre (108) es una oscilación lateral, y la amortiguación de la oscilación lateral comprende el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador.
- 40 15. El método de acuerdo con la reivindicación 14, en el que el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador comprende variar un par contrario del generador a lo largo del tiempo en función de un patrón cíclico de la oscilación lateral para proporcionar una fuerza inducida por el par motor del generador que reduce la oscilación lateral.
- 45 16. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende
- almacenar, accesible para un controlador de la turbina eólica, datos de control para una pluralidad de acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre,
 - seleccionar al menos una de las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre para las que se almacenan datos de control, y
 - amortiguar la oscilación de la torre (108) con la seleccionada al menos una de la acción de amortiguación de oscilaciones de la torre.
- 50 17. El método de acuerdo con la reivindicación 16, en el que las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, para las que se almacenan datos de control, comprenden amortiguación por medio del ajuste del ángulo de paso de palas.
- 55 18. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el que la oscilación de la torre (108) es una oscilación lateral, y el ajuste del ángulo de paso de palas genera fuerzas laterales que contrarrestan la oscilación lateral.
- 60 19. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 16-18, en el que la oscilación de la torre (108) es una oscilación lateral, y las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, para las que se almacenan datos de control, comprenden el ajuste de una velocidad de giro del rotor de tal manera que las oscilaciones inducidas por el rotor tienen una frecuencia diferente de una frecuencia natural de la torre.
- 65 20. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 16-19, en el que la oscilación de la torre (108) es una oscilación lateral, y las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, para las que se almacenan datos de control, comprenden el ajuste de la fuerza inducida por el par motor del generador.
21. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 16-20, que comprende
- seleccionar al menos una de las acciones de amortiguación de oscilaciones de la torre, para las que se almacenan datos de control, en base al requisito de amortiguación determinado y al efecto de amortiguación resultante

determinado.

22. Una turbina eólica que comprende una torre (108) y un rotor con al menos una pala (110) del rotor, estando el rotor conectado a la torre (108) y adaptado para accionar un generador, en el que un ángulo de paso de cada pala (110) del rotor se puede ajustar, comprendiendo la turbina eólica (102):

- un miembro de detección (2111, 2121) adaptado para detectar una oscilación de la torre (108), y
- un miembro de amortiguación (201) adaptado para amortiguar la oscilación de la torre (108), caracterizado por que la turbina eólica comprende además
- 10 - un miembro de habilitación (202, 204) que está adaptado para permitir la amortiguación de oscilaciones,
- un miembro de requisito (211, 212, 311, 312) adaptado para determinar un requisito para amortiguar la oscilación, y
- un miembro de efecto de amortiguación (213, 214, 313) adaptado para determinar un efecto de amortiguación resultante,
- 15 en el que el miembro de habilitación (202, 204) está adaptado para habilitar la amortiguación de oscilaciones basándose en una combinación de la salida del miembro de requisito (211, 212, 311, 312) y el miembro de efecto de amortiguación (213, 214, 313).

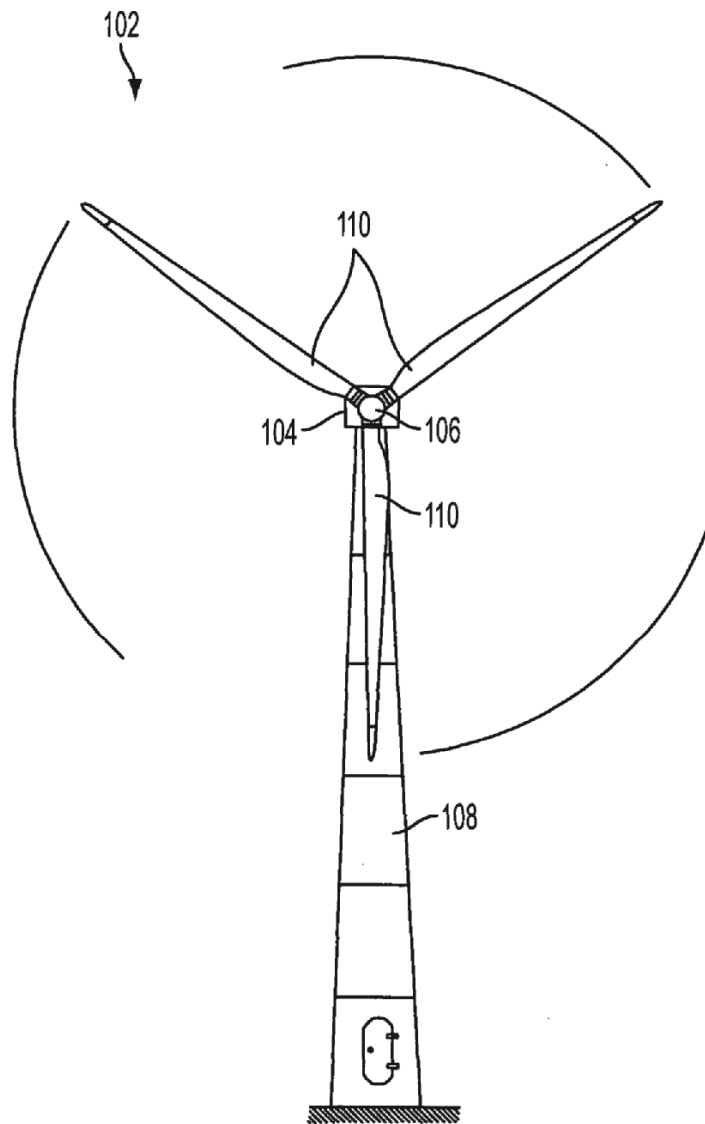


FIG. 1

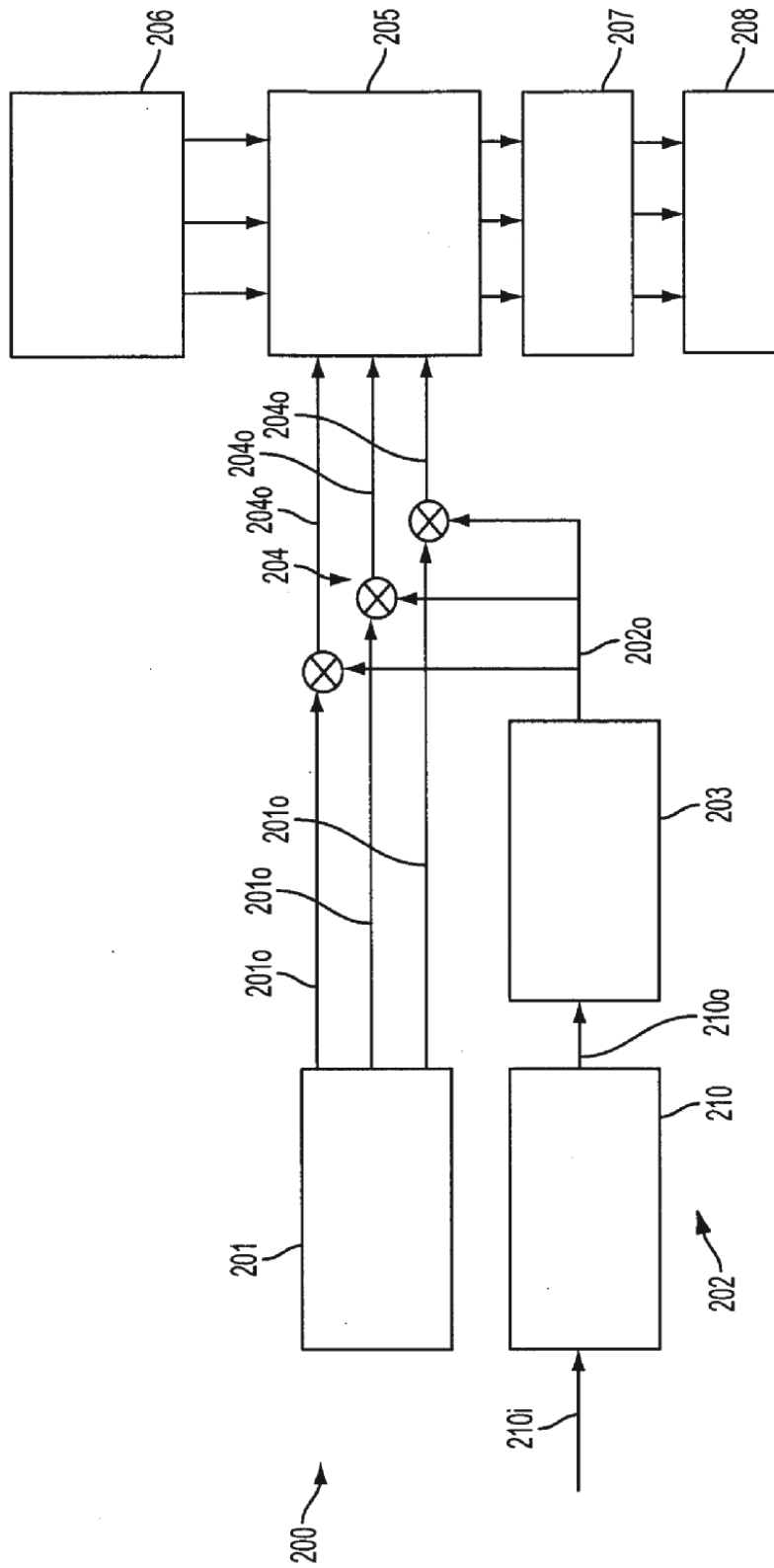


FIG. 2

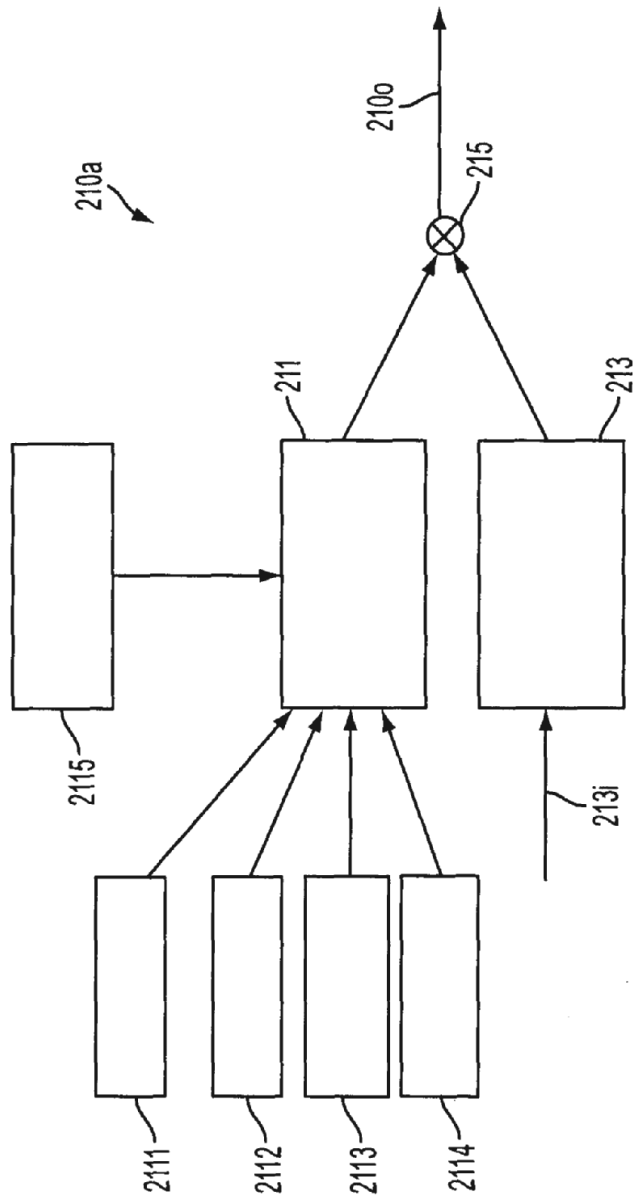


FIG. 3A

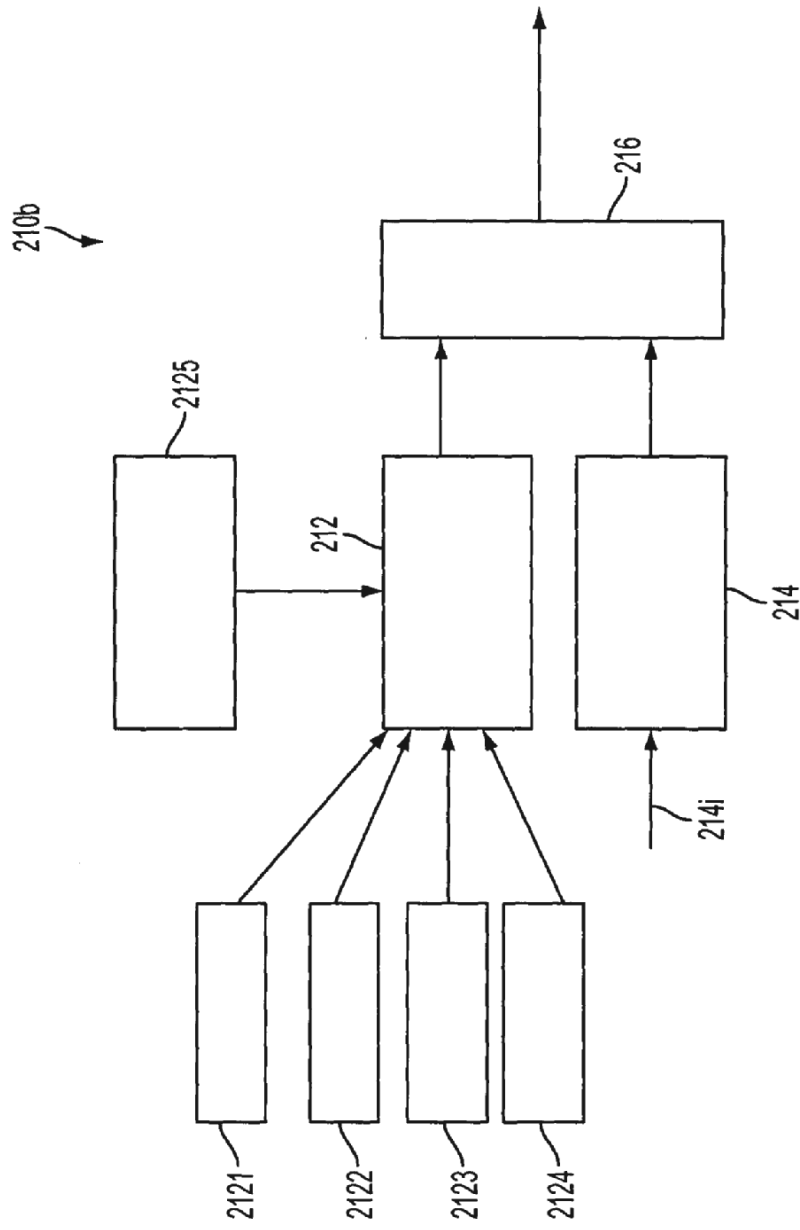


FIG. 3B

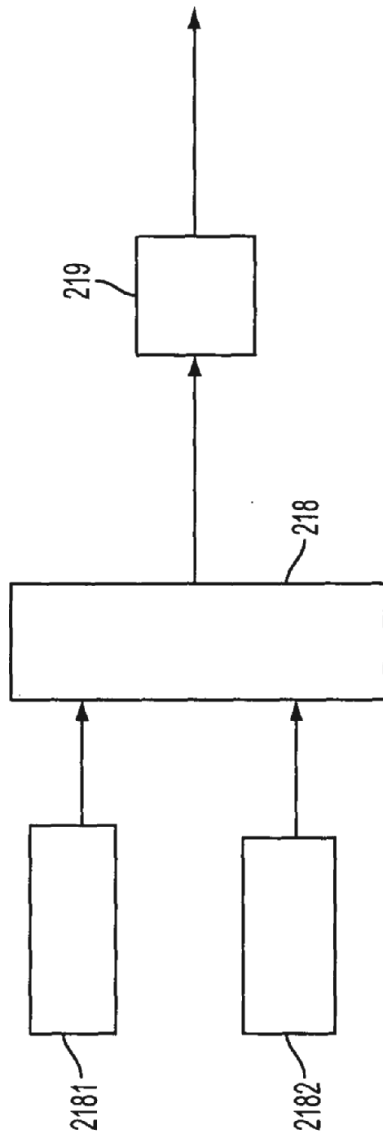


FIG. 4

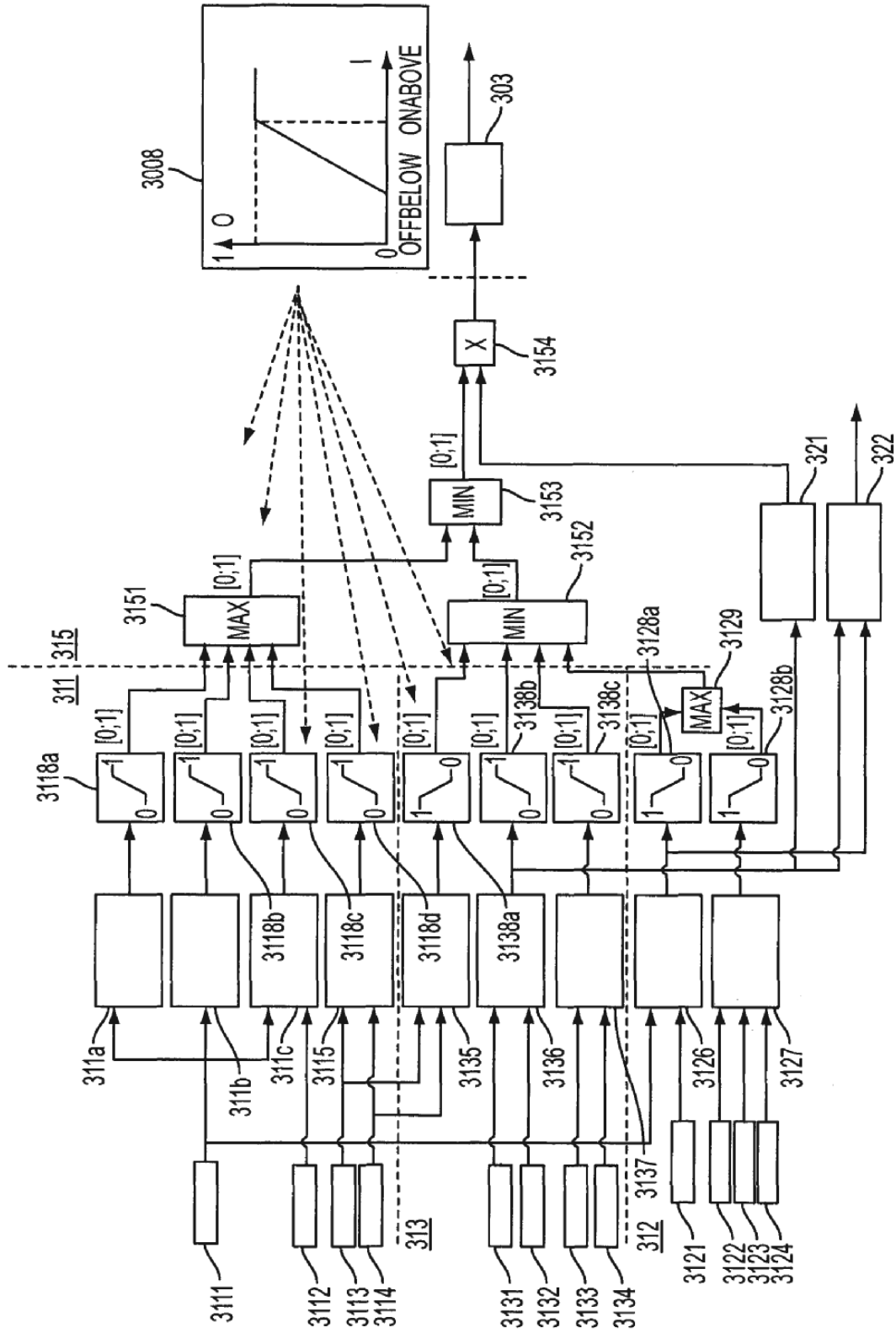


FIG. 5