

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 863 671**

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: **14.08.2017 PCT/DK2017/050262**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.02.2018 WO18033190**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.08.2017 E 17754254 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.03.2021 EP 3500751**

54 Título: **Parada de aerogenerador controlada dinámica**

30 Prioridad:

**17.08.2016 DK 201670629**

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

**11.10.2021**

73 Titular/es:

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

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**CAPONETTI, FABIO;**

**HAMMERUM, KELD y**

**NEUBAUER, JESPER LYKKEGAARD**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 863 671 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**

Parada de aerogenerador controlada dinámica

Las realizaciones de la presente invención se refieren a métodos y sistemas de control para controlar la parada de un aerogenerador, en particular a controlar la parada de aerogenerador de una manera dinámica y adaptativa.

5 La Figura 1 ilustra un aerogenerador 1 grande, que comprende una torre 10, una góndola de aerogenerador 20 colocada en la parte superior de la torre 10 y un rotor. El rotor de aerogenerador ilustrado comprende tres palas de aerogenerador 32 y un buje 34. El buje 34 se sitúa a una altura H por encima de la base de la torre y cada una de las tres palas de aerogenerador 32 se montan en el buje. Aunque se muestra el rotor de aerogenerador como que tiene tres palas de aerogenerador, el rotor de aerogenerador podría comprender un número diferente de palas 32.  
10 Las palas 32 tienen, cada una, una longitud L.

El buje 34 se conecta típicamente a la góndola 20 a través de un eje de baja velocidad (no se muestra) que se extiende desde el frente de la góndola 20. El eje de baja velocidad impulsa una caja de engranajes (tampoco se muestra) que aumenta la velocidad rotacional y, a su vez, acciona un generador eléctrico dentro de la góndola 20 para convertir la energía extraída del viento por las palas giratorias 32 en la salida de potencia eléctrica. En algunas realizaciones, el rotor de aerogenerador se puede acoplar directamente al generador eléctrico, es decir, turbinas de accionamiento directo.  
15

Las palas de aerogenerador 32 definen un área de barrido A, que es el área de un círculo delineada por las palas giratorias 32. El área de barrido dicta cuánto de una masa de aire dada se intercepta por el aerogenerador 1 y, de este modo, influye en la salida de potencia del aerogenerador 1 y las fuerzas y momentos flectores experimentados por los componentes del aerogenerador 1 durante la operación. El aerogenerador puede estar en tierra, como se ilustra, o mar adentro. En este último caso, la torre se conectará a un monopilar, trípode, enrejado u otra estructura de cimentación, y los cimientos podrían ser bien o bien fijos o bien flotantes.  
20

Cada aerogenerador tiene un controlador de aerogenerador que procesa las entradas de sensores y otros sistemas de control y genera señales de salida para actuadores tales como actuadores de inclinación de pala, controlador de par de generador, contactores de generador y motores de guiñada, etc. Las señales de salida generadas por el controlador de aerogenerador regulan la operación del aerogenerador 1.  
25

Si el controlador de aerogenerador recibe una instrucción o una solicitud para que el aerogenerador se pare, entonces el controlador de aerogenerador puede generar señales de salida que hagan que la velocidad del rotor del aerogenerador disminuya a cero. Por ejemplo, el controlador de aerogenerador puede hacer que el ángulo de inclinación de pala se aumente (hacia 90 grados) usando los actuadores de inclinación de pala. Esto se conoce comúnmente como inclinar la pala, lo que hace que se reduzca la salida de potencia dado que la pala inclinada actúa como un freno aerodinámico.  
30

Un procedimiento de parada se puede iniciar para cambiar el aerogenerador 1 de un estado operacional a un estado estático, donde el rotor de aerogenerador es estacionario. El procedimiento de parada se puede iniciar con el fin de evitar cargas excesivas en los componentes del aerogenerador 1, por ejemplo, durante condiciones de viento extremas y/o si el generador eléctrico del aerogenerador 1 se ha desconectado de la red de energía. La combinación de estos dos eventos es típicamente el escenario del peor de los casos para la carga de un aerogenerador durante un procedimiento de parada.  
35

Las técnicas de control existentes tienden a implementar la parada de aerogenerador en un proceso por el que las palas de aerogenerador se inclinan hacia una posición de puesta horizontal a una velocidad de cambio de inclinación de pala predeterminada hasta que la pala de aerogenerador se gira completamente fuera del viento para reducir la salida de potencia, esto también puede tener en cuenta ángulos de inclinación específicos de las palas individuales. Se ha apreciado que sería deseable proporcionar un método y sistema mejorados para controlar la parada de un aerogenerador que reduzca las tensiones inducidas por cargas excesivas en los componentes de aerogenerador.  
40  
45

El documento US2015/377215 describe un método y un sistema para gestionar cargas en un aerogenerador. El método incluye recibir una señal relativa a una desalineación de guiñada del aerogenerador, generar una señal de error de guiñada en base a la desalineación de guiñada y comparar la señal de error de guiñada con un primer valor umbral de error de guiñada predeterminado. El método incluye además parar el aerogenerador si la señal de error de guiñada permanece mayor que el segundo valor umbral de error de guiñada predeterminado más allá del periodo de tiempo predeterminado.  
50

**Compendio de la invención**

La invención se define en las reivindicaciones independientes a las que se dirige ahora la referencia. Diferentes realizaciones se definen en las reivindicaciones dependientes.

Las realizaciones de la invención se refieren generalmente a métodos para controlar los parámetros de operación de un aerogenerador durante la parada, controladores para implementar tales métodos y aerogeneradores que incluyen uno o más de estos controladores. En particular, se ha apreciado que ciertas cargas experimentadas durante la parada de un aerogenerador se pueden reducir proporcionando un control mejorado de la inclinación de las palas de un aerogenerador. Esto puede reducir la fuerza requerida de los elementos o componentes de la turbina o alternativamente puede aumentar la vida útil esperada de los componentes relevantes.

Según un primer aspecto de la invención, se proporciona un método de control de la parada de un aerogenerador que tiene un rotor, el rotor que comprende una o más palas de aerogenerador, el método que comprende: determinar dinámicamente una referencia de velocidad de rotor; obtener una medida de la velocidad de rotor del rotor; obtener una medida de un movimiento de proa a popa de la torre de aerogenerador; determinar un error entre la referencia de velocidad de rotor y la velocidad de rotor del rotor; y controlar una inclinación de una o más de las palas de aerogenerador en base al error determinado y el movimiento de proa a popa medido de la torre de aerogenerador.

Controlando la inclinación de pala usando una velocidad de rotor de referencia que se determina dinámicamente, la carga de rotor se puede reducir rápida y eficientemente en vista de las condiciones actuales a las que está sujeto el aerogenerador; en una realización esto se puede obtener por un control de bucle de realimentación cerrado. Esto, a su vez, reduce la carga extrema que se esperaría que el aerogenerador experimente durante la parada controlada, que se puede tener en cuenta cuando se consideran las cargas de diseño en la etapa de diseño de la producción del aerogenerador, y mejora la seguridad del aerogenerador, en particular con referencia a las tensiones en los componentes del tren motriz y de la caja de engranajes.

Además, el método comprende obtener una medida de un movimiento de proa a popa de la torre de aerogenerador y controlar la inclinación de una o más de las palas de aerogenerador en dependencia además del movimiento de proa a popa medido de la torre de aerogenerador. Durante la parada del aerogenerador es propensa a un movimiento de proa a popa y teniendo en cuenta este movimiento durante la parada, la carga que experimenta la torre de aerogenerador debido al movimiento de proa a popa se tiene en cuenta directamente y que asegura por ello la parada rápida y eficientemente y al mismo tiempo mantener bajas las cargas de la estructura de torre y/o los cimientos de la torre.

El método comprende además determinar si la velocidad de rotor del rotor está aumentando, en donde la determinación dinámica de la referencia de velocidad de rotor comprende mantener un valor de referencia de velocidad de rotor constante cuando se determina que la velocidad de rotor del rotor está aumentando. Esto mejora el control de la actuación de inclinación cuando el error entre la referencia de velocidad de rotor y la velocidad de rotor medida del rotor es grande controlando la referencia de velocidad de rotor para reducir el tiempo que le lleva al método retomar el control de la velocidad del rotor. De esta manera, la referencia de velocidad de rotor se puede determinar dinámicamente debido a que se determina al menos en parte en base a una evaluación de la velocidad de rotor del rotor.

Opcionalmente, la determinación dinámica de la referencia de velocidad de rotor puede comprender establecer que el valor de referencia de velocidad de rotor sea igual a la velocidad de rotor del rotor cuando se determina que la velocidad de rotor del rotor es menor que la referencia de velocidad de rotor. Esto actúa para evitar que el método intente aumentar la velocidad de rotor del rotor cuando las palas de aerogenerador están desacelerando de manera natural más rápidamente que la reducción determinada dinámicamente del valor de referencia de velocidad de rotor.

Opcionalmente, la determinación dinámica de la referencia de velocidad de rotor puede comprender bajar progresivamente la referencia de velocidad de rotor a cero cuando se determina que la velocidad de rotor del rotor tanto sea mayor que la referencia de velocidad de rotor como no esté aumentando. Esto reduce ventajosamente la velocidad del rotor a cero cuando el error entre la referencia de velocidad de rotor y la velocidad de rotor medida no es demasiado grande y de este modo cuando el método tiene el control de la velocidad del rotor.

Opcionalmente, una tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador se puede reducir mientras que se determina que la torre de aerogenerador se está moviendo hacia el viento debido al movimiento de proa a popa y/o en donde la tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador se aumenta mientras que se determina que la torre de aerogenerador se está moviendo en la dirección del viento debido al movimiento de proa a popa.

De esta manera, la carga de viento en las palas de aerogenerador se puede mantener mientras que la torre se está moviendo hacia delante o bien por no inclinar más la pala de aerogenerador o bien reduciendo la velocidad a la que se inclina la pala de aerogenerador. Este cambio en la inclinación de la pala de aerogenerador proporcionará una carga de viento y resistencia de viento comparativamente grandes en las palas de aerogenerador que actuarán para contrarrestar el movimiento del aerogenerador hacia el viento. Por el contrario, la carga de viento en las palas de aerogenerador se puede reducir mientras que la torre se está moviendo hacia atrás, es decir, en la dirección del viento, aumentando la velocidad a la que se inclinan las palas de aerogenerador y se mueven hacia la posición de puesta horizontal. Esto reducirá la carga de viento que de otro modo contribuiría a la velocidad del movimiento de popa de la torre de aerogenerador y de este modo aumentaría o mantendría las oscilaciones de la torre en el plano paralelo a la dirección del viento.

Opcionalmente, la determinación dinámica de la referencia de velocidad de rotor puede comprender además modificar la referencia de velocidad de rotor en base al movimiento de proa a popa medido de la torre de aerogenerador. En tal método, la contribución al control de la inclinación de pala de aerogenerador en vista del movimiento de proa a popa de la torre de aerogenerador se puede incluir en el método de control simplemente modificando la referencia de velocidad de rotor determinada dinámicamente.

Opcionalmente, el método puede comprender además determinar una aceleración del rotor en base a la velocidad de rotor del rotor, en donde una tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador se aumenta proporcional a la aceleración cuando la aceleración está por encima de un umbral dado. Por consiguiente, se puede limitar el nivel de desgaste y fatiga experimentado por los componentes del tren motriz y la caja de engranajes durante la parada del aerogenerador.

Opcionalmente, una reducción de ganancia se puede aplicar a una tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador como una función de la inclinación de la una o más palas de aerogenerador. Esto permite el uso de un único ajuste nominal que entonces se puede escalar automáticamente para adaptarse a los diversos puntos de operación posibles de la turbina. En este contexto, un punto de operación se puede definir por una o más cantidades medidas, por ejemplo, la velocidad del viento, velocidad de rotor, ángulo de inclinación o potencia eléctrica medias del aerogenerador.

Opcionalmente, la reducción de ganancia puede ser una reducción de ganancia progresiva y una tasa de la reducción de ganancia progresiva se puede basar en uno o más ángulos de umbral de la inclinación de una o más de las palas de aerogenerador de modo que la tasa de cambio de inclinación se pueda alterar a medida que la pala se mueve hacia la posición de puesta horizontal.

Opcionalmente, el método puede no aplicar reducción de ganancia si la inclinación está por debajo de un primer ángulo de umbral, una primera tasa de reducción de ganancia progresiva se puede aplicar si la inclinación está entre el primer ángulo de umbral y un segundo ángulo de umbral y una segunda tasa de reducción de ganancia progresiva se puede aplicar si la inclinación está por encima del segundo ángulo de umbral; en donde la primera tasa de reducción de ganancia progresiva es más alta que la segunda tasa de reducción de ganancia progresiva. De esta manera, la tasa del cambio de inclinación de pala se puede reducir a medida que la pala se mueve hacia la posición de puesta horizontal, con las cargas sobre el sistema que se minimizan a lo largo del proceso de parada.

Opcionalmente, la inclinación de cada una de las una o más palas de aerogenerador se puede controlar individualmente. Esto permite que las cargas de pala de rotor se compensen donde puede haber una carga desigual en el rotor, por ejemplo, los momentos de inclinación y de guiñada en el rodamiento principal de la góndola de aerogenerador. Este control activo durante la parada de aerogenerador actúa para prevenir fallos estructurales de los componentes principales debido a cargas extremas y permitiría también la parada del aerogenerador cuando las palas se inclinan en diferentes posiciones.

Según un segundo aspecto de la invención, se puede proporcionar también un controlador para un aerogenerador que tiene un rotor, el rotor que comprende una o más palas de aerogenerador, en donde el controlador se configura para implementar cualquiera de los métodos anteriores para controlar la parada del aerogenerador. Tal controlador permitirá que se controle la inclinación de pala en base a un control de bucle de realimentación cerrado con una velocidad de rotor de referencia que se determina dinámicamente de modo que la carga de rotor se pueda reducir rápida y eficientemente en vista de las condiciones actuales a las que está sujeto el aerogenerador. Este controlador actuará para reducir la carga extrema que se puede esperar que experimente el aerogenerador durante la parada controlada. Esto se puede tener en cuenta entonces cuando se consideran las cargas de diseño en la etapa de diseño de la producción del aerogenerador y puede mejorar la seguridad del aerogenerador.

Opcionalmente, el controlador se puede configurar para hacer que cualquiera de los métodos anteriores se implemente en respuesta al controlador que recibe una solicitud de parada de emergencia. La solicitud de parada de emergencia puede indicar, por ejemplo, que se ha detectado un fallo en el controlador y por consiguiente los métodos de parada se pueden ajustar para las cargas que se esperaría que se experimenten durante tal operación de parada de emergencia.

Según un tercer aspecto de la invención, se puede proporcionar un aerogenerador que comprende un rotor y uno o más controladores según el segundo aspecto de la invención, en donde el rotor comprende una o más palas de aerogenerador. El controlador se puede incluir en un aerogenerador. Donde un único aerogenerador comprende una pluralidad de controladores, los controladores pueden proporcionar redundancia en la operación y control del aerogenerador durante la parada, por ejemplo, en el caso de que uno de los controladores falle.

Opcionalmente, un aerogenerador según el tercer aspecto de la invención puede comprender uno o más controladores configurados cada uno para controlar la inclinación de una pala de aerogenerador respectiva de la una o más palas de aerogenerador. De esta manera, cada controlador puede proporcionar un control de inclinación para una pala diferente de modo que la inclinación de las palas de aerogenerador se puede controlar individual e independientemente. Esto permite que se compensen las cargas de fatiga de las palas del rotor donde puede haber

una carga desigual en el rotor, por ejemplo, los momentos de inclinación y guiñada en el rodamiento principal de la góndola del aerogenerador.

5 Según un cuarto aspecto de la invención, también se puede proporcionar un programa de ordenador correspondiente que cuando se ejecuta en un controlador de aerogenerador hace que el controlador de aerogenerador lleve a cabo cualquiera de los métodos descritos en la presente memoria.

**Breve descripción de los dibujos**

La invención se describirá ahora además solamente a modo de ejemplo y con referencia a las figuras que se acompañan en las que:

La Figura 1 es una vista esquemática de un aerogenerador;

10 La Figura 2 es un ejemplo de un controlador según un primer ejemplo de la invención;

La Figura 3 es un ejemplo de un controlador según un segundo ejemplo de la invención; y

La Figura 4 es un gráfico que ilustra un régimen de control de ganancia según el segundo ejemplo de la invención.

**Descripción detallada de las realizaciones preferidas**

15 El proceso de parada de un aerogenerador 1 no tendrá lugar siempre en condiciones de viento estable y por consiguiente el método del sistema de control es capaz preferiblemente de parar el aerogenerador de manera segura en condiciones menos favorables e incluso condiciones extremas. Por ejemplo, es deseable que el método de control de la parada del aerogenerador 1 sea capaz de detener de manera rápida y segura la rotación del rotor de aerogenerador, incluso en condiciones racheadas.

20 Un ejemplo de tales condiciones racheadas se conoce comúnmente como una ráfaga de viento de sombrero mexicano por su similitud a la sección de un sombrero. En este tipo de ráfaga de viento, la velocidad del viento estable cae brevemente a un mínimo, luego acelera rápidamente hasta un nivel máximo antes de volver a caer a un mínimo y luego recuperar la velocidad de viento estable. El generador eléctrico del aerogenerador 1 se puede desconectar de la red de energía si hay un fallo eléctrico o simplemente una falta de demanda; no obstante, esta desconexión elimina el contrapar del generador eléctrico del rotor de aerogenerador. Esto reduce la resistencia a la rotación del rotor y de este modo permite que la velocidad del rotor aumente aún más.

25 Si un procedimiento de parada de aerogenerador existente, del tipo descrito en los antecedentes anteriores, se hubiera de iniciar mientras que la velocidad del rotor estaba aumentando de esta manera, entonces la inclinación de las palas de aerogenerador 32 no tendrían el control de la velocidad de rotor del aerogenerador. Esto significaría que la parada del aerogenerador no se podría adaptar para minimizar las cargas experimentadas por el aerogenerador 1. Además, mientras que simplemente inclinar las palas de aerogenerador tan rápido como sea posible puede reducir rápidamente la rotación del rotor de aerogenerador, el cambio repentino en la inclinación también desequilibrará el aerogenerador con respecto a la carga de viento en el aerogenerador, lo que puede hacer que el aerogenerador se mueva hacia adelante (es decir, hacia y en contra de la dirección del viento) y hacia atrás (es decir, fuera de y con la dirección del viento). Esta oscilación de proa a popa del aerogenerador causará tensiones no deseables en la torre de aerogenerador 10.

30 En la presente invención, el procedimiento de parada de aerogenerador se completa ventajosamente bajo un sistema de control de realimentación de bucle cerrado. La Figura 2 ilustra un sistema de control que se puede implementar en un controlador de aerogenerador para controlar la parada de un aerogenerador según una realización general de la invención. El controlador de aerogenerador 40 comprende una unidad de referencia de velocidad de rotor 42, un controlador de valor de error 44 y un controlador de velocidad 46. El controlador de aerogenerador 40 es preferiblemente local al aerogenerador 1, por ejemplo, en la torre 10 o en la góndola 20, esto reduce la posibilidad de problemas de comunicación evitando que el controlador sea capaz de hacer que el aerogenerador 1 realice una parada controlada. No obstante, se apreciará que el controlador de aerogenerador 40 se puede situar en otro sitio.

45 Cuando el controlador 40 recibe una señal que instruye al controlador a iniciar un procedimiento de parada, la unidad de referencia de velocidad de rotor 42 generará un valor de referencia de velocidad de rotor inicial. La unidad de referencia de velocidad de rotor 42 recibe una medida de la velocidad de rotor del rotor del aerogenerador y usa esta medida como entrada para determinar dinámicamente el valor de referencia de velocidad de rotor. Se apreciará que la medida de la velocidad de rotor se puede obtener por integración de la salida de un sensor que mide la aceleración del rotor.

50 El valor de referencia de velocidad inicial se puede establecer para que sea igual que la velocidad de rotor medida del rotor del aerogenerador, que una versión filtrada de la velocidad de rotor medida del rotor del aerogenerador o, alternativamente, se puede establecer en el valor de una velocidad de rotor objetivo que estaba en operación inmediatamente antes de que el controlador 40 recibiese una instrucción de parada. Este valor de referencia de

velocidad de rotor se comunica entonces al controlador de valor de error 44, que también recibe la medida de la velocidad de rotor del rotor del aerogenerador. El controlador de valor de error 44 compara estas dos entradas para calcular un error entre la referencia de velocidad de rotor y la velocidad de rotor del rotor del aerogenerador.

5 El controlador de valor de error 44 es preferiblemente un controlador de derivada integral proporcional (PID), por lo que el término proporcional representa el valor de error actual, el término integral representa los valores de error previos y el término derivado espera posibles valores futuros. No obstante, los parámetros del controlador de PID se pueden establecer opcionalmente de manera que el uno o dos de los términos proporcional, integral o derivativo se establezcan en cero.

10 El error determinado se comunica entonces al controlador de velocidad 46, que produce una señal de control de inclinación para controlar la inclinación de las palas de aerogenerador 32 en base al error determinado. Si el valor de referencia de velocidad de rotor inicial se establece para que sea igual a la velocidad de rotor medida del rotor del aerogenerador en el primer instante entonces no habrá inicialmente ningún error determinado y por consiguiente el controlador de velocidad 46 no hará inicialmente que la inclinación de las palas de aerogenerador 32 cambie. La unidad de referencia de velocidad de rotor 42 entonces generará continuamente nuevos valores de referencia de velocidad de rotor para su uso en el controlador 40 para producir señales de control de inclinación que hacen que el aerogenerador 1 pase de forma rápida y segura de un estado operativo a un estado parada donde el rotor de aerogenerador está estático y el ángulo de inclinación de las palas de aerogenerador 32 se ha aumentado a un ángulo de aproximadamente 90 grados, es decir, la posición de puesta horizontal.

20 El valor de referencia de velocidad de rotor se determina dinámicamente en el sentido en que se determina en base a parámetros medidos del aerogenerador (por ejemplo, velocidad de rotor) y/o parámetros medidos de las condiciones externas (por ejemplo, velocidad del viento). Esto permite que el controlador 40 modifique el procedimiento de parada del aerogenerador con el fin de mantener el control de la velocidad de rotor y minimizar las cargas experimentadas por el aerogenerador 1.

25 En conexión con determinar dinámicamente el valor de referencia de velocidad de rotor, la unidad de referencia de velocidad de rotor 42 monitoriza la entrada de velocidad de rotor para determinar si la velocidad del rotor está aumentando o no. Si se determina que la velocidad de rotor está aumentando, entonces la unidad de referencia de velocidad de rotor 42 adapta la generación continua existente de los nuevos valores de referencia de velocidad de rotor para mantener constante la referencia de velocidad de rotor.

30 Aunque pueda parecer contraintuitivo evitar que el valor de referencia de velocidad de rotor descienda mientras que el controlador está intentando reducir la velocidad del rotor a cero, continuar reduciendo la referencia de velocidad de rotor en este escenario haría que el error determinado llegase a ser comparativamente grande. Esto, a su vez, haría que el controlador de velocidad 46 intente cambiar la inclinación de las palas de aerogenerador 32 en una gran cantidad y/o rápidamente, lo cual es indeseable dado que puede causar tensiones indebidas en el sistema de actuación de inclinación y/o hacer que la torre de aerogenerador 10 oscile debido al cambio rápido en la carga de viento de las palas de aerogenerador 32. Por tanto, hay un compromiso entre las tensiones inducidas en el rotor y las tensiones inducidas en la torre durante el procedimiento de parada.

40 Además, un valor de error grande tal como este indicaría que el sistema de control no está realizando realmente la parada de una manera controlada. Por consiguiente, manteniendo constante el valor de referencia de velocidad de rotor, se evita que el error llegue a ser demasiado grande y se mantiene el control del proceso de parada. El controlador 40 mantiene esta referencia de velocidad de rotor constante hasta que se determina que la velocidad de rotor del rotor ya no está aumentando. No obstante, es importante observar que el controlador de velocidad 46 continuará inclinando las palas de aerogenerador 32 mientras que el valor de referencia de velocidad de rotor se mantenga constante dado que la velocidad de rotor medida seguirá siendo mayor y aumentando.

45 Cuando se determina que la velocidad de rotor del rotor ya no está aumentando, el valor de referencia de velocidad de rotor se puede reducir por la generación continua de nuevos valores de referencia de velocidad de rotor, por ejemplo, la referencia de velocidad de rotor se puede disminuir progresivamente desde el valor previo hasta cero de una manera lineal o no lineal.

50 Además, un ejemplo adicional de la determinación de manera dinámica del valor de referencia de velocidad de rotor comprende hacer que la unidad de referencia de velocidad de rotor 42 establezca el valor de referencia de velocidad de rotor para que sea igual a la velocidad de rotor medida del rotor del aerogenerador 32 cuando se determina que la velocidad de rotor medida del rotor se determina que es menor que el valor de referencia de velocidad de rotor. De esta forma, el controlador 40 actúa para evitar que el error determinado haga que el controlador de velocidad 46 incline las palas de vuelta hacia el viento e intente acelerar el rotor 32. El controlador 40 entonces continuará generando continuamente nuevos valores de referencia de velocidad de rotor de la manera anterior.

55 Cada una de las estrategias de control anteriores contribuye a reducir la velocidad de rotor máxima durante la parada, lo que a su vez reduce la tensión en componentes del tren motriz y la caja de engranajes. Esto aumenta la seguridad del diseño del aerogenerador y reduce las cargas de diseño requeridas para diseñar la torre 10 y los cimientos del aerogenerador 1.

En los ejemplos anteriores, la invención se ha descrito usando un único controlador de aerogenerador 40 para controlar la inclinación colectiva de cada una de las palas de aerogenerador 32 del aerogenerador 1. En una realización, el aerogenerador 1 está dotado con un controlador 40 respectivo para cada una de las palas de aerogenerador. De esta forma, la inclinación de las tres palas de aerogenerador 32 de un aerogenerador se pueden controlar individualmente permitiendo de este modo que se compensen las cargas de fatiga de palas de rotor donde pueda haber una carga desigual en el rotor, por ejemplo, la carga debida a los momentos de inclinación y guiñada en el rodamiento principal de la góndola de aerogenerador. Alternativa o adicionalmente, los múltiples controladores 40 se pueden usar para proporcionar redundancia en el sistema de control, por ejemplo, de modo que los controladores 40 restantes puedan hacerse cargo en el caso en que uno de los controladores se dañe por un rayo u otro fallo.

La Figura 3 ilustra elementos adicionales de un sistema de control que se pueden implementar en un controlador de aerogenerador para controlar la parada de un aerogenerador según una realización de la invención. El controlador de aerogenerador 50 ilustra explícitamente un amortiguador de torre de proa a popa 54, y también comprende una unidad de referencia de velocidad de rotor 42, un controlador de valor de error 44 y un controlador de velocidad 46, con números de referencia iguales que se usan para componentes iguales con respecto al controlador de aerogenerador 40. Por consiguiente, mientras que la descripción anterior del controlador de aerogenerador 40 no se repetirá en la presente memoria, se aplica igualmente a los componentes correspondientes del controlador de aerogenerador 50.

El controlador de aerogenerador 50 comprende además una unidad de filtro paso bajo 52, un amortiguador de torre de proa a popa 54, una unidad de derivada de tiempo 56, un limitador de aceleración 58 y un programador de ganancia 60. Se apreciará a partir de lo siguiente que cada una de estas unidades se puede usar individualmente y, por consiguiente, el controlador de aerogenerador 40 se puede modificar para incluir uno o más de estos componentes adicionales sin incluir los componentes restantes. Por ejemplo, el controlador de aerogenerador 40 se puede modificar para incluir un amortiguador de torre de proa a popa 56 sin el limitador de aceleración 58 o el programador de ganancia 60. Otras combinaciones de estas unidades por supuesto son posibles como se apreciará por los expertos en la técnica.

En el ejemplo de la Figura 3, la medida de la velocidad de rotor se recibe en un filtro paso bajo 52 antes de ser comunicada al controlador de valor de error 44. Éste actúa para reducir las fluctuaciones de alta frecuencia en la señal que comunica la velocidad de rotor medida y, de este modo, suaviza el valor de la señal de velocidad de rotor. A su vez, éste modera ventajosamente la volatilidad de la señal de error determinada generada por el controlador de valor de error 44 y la señal de control de inclinación generada por el controlador de velocidad 46 y de este modo reduce la tensión y fatiga inducidas en los actuadores de control de inclinación durante el procedimiento de parada. La medida de la velocidad de rotor que se recibe por la unidad de referencia de velocidad de rotor 42 se muestra como que se recibe antes del filtro paso bajo 52; no obstante, se apreciará que esta entrada se podría proporcionar en su lugar desde la salida del filtro paso bajo 52.

El amortiguador de torre de proa a popa 54 recibe una medida del movimiento de la torre de aerogenerador 10 y hace que el controlador de aerogenerador 50 adapte la señal de control de inclinación, por consiguiente.

La medida del movimiento de la torre se puede derivar de un sensor de posición, un sensor de velocidad o un sensor de aceleración como se apreciará por los expertos en la técnica.

Mientras que el amortiguador de proa a popa se ilustra en conexión con la realización de la Figura 3, se debería entender que la descripción del amortiguador de proa a popa es igualmente relevante para la realización general de la Figura 2.

La adaptación al control de inclinación por el amortiguador de torre de proa a popa 54 es preferiblemente proporcional a la velocidad lateral (a favor del viento) en la parte superior de la torre de aerogenerador 10; no obstante, esto se puede determinar por supuesto a partir de medidas de posición o aceleración, usando diferenciación o integración respectivamente, o una combinación de mediciones de posición, velocidad y aceleración. En un ejemplo, el ángulo de inclinación se puede alterar en términos más generales en línea con la siguiente ecuación, donde  $K_a$ ,  $K_v$  y  $K_p$  son típicamente números reales distintos de cero correspondientes a las ganancias de aceleración, velocidad y posición respectivas usadas para ajustar el alcance de control de la amortiguación del movimiento de la torre:

$$\text{Cambio en ángulo de inclinación} = (\text{aceleración} \times K_a) + (\text{velocidad} \times K_v) + (\text{posición} \times K_p)$$

En una implementación, un acelerómetro se puede colocar en la torre de aerogenerador, por ejemplo, en la parte superior de la torre de aerogenerador, y configurar para obtener una medida de la aceleración en el plano de proa a popa (hacia adelante y hacia atrás). Esta aceleración se puede convertir entonces en una velocidad usando un estimador de velocidad, tal como un filtro paso bajo que se ajusta adecuadamente de modo que la frecuencia resonante de la torre sea la región alrededor de la cual actúa el filtro paso bajo como un integrador con fugas. No obstante, otros integradores u otros tipos de sensor se pueden usar como se ha descrito anteriormente.

5 En un ejemplo, el amortiguador de torre de proa a popa 54 puede modificar la señal de control de inclinación para reducir la tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador en el caso en que se determine que el movimiento de la torre de aerogenerador 10 es hacia el viento, es decir, en la dirección de proa en contra de la dirección de viento. Reduciendo la tasa de cambio de inclinación de esta manera, el ángulo de inclinación será comparativamente bajo con respecto a la situación de si el amortiguador de torre de proa a popa 54 no hubiera modificado la inclinación. Este ángulo de inclinación menor significa que las palas de aerogenerador 32 experimentarán un mayor grado de carga del viento, que actúa para contrarrestar el movimiento de la torre de aerogenerador 10 hacia el viento y, por lo tanto, amortigua la oscilación de la torre en el plano de proa a popa. Aunque esto puede aumentar la velocidad del rotor en comparación, las cargas de torre de aerogenerador reducidas proporcionan un compromiso que puede ser beneficioso en el diseño del aerogenerador 1 en su conjunto.

10 Adicional o alternativamente, el amortiguador de torre de proa a popa 54 puede modificar la señal de control de inclinación para aumentar la tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador en el caso en que se determine que el movimiento de la torre de aerogenerador 10 es en la misma dirección que la dirección del viento, es decir, en la dirección de popa. Aumentando la tasa de cambio de inclinación de esta manera, el ángulo de inclinación será comparativamente alto con respecto a la situación si el amortiguador de torre de proa a popa 54 no hubiera modificado la inclinación. Este ángulo de inclinación más alto significa que las palas de aerogenerador 32 experimentarán un menor grado de carga del viento, lo que actúa para minimizar cualquier aceleración de la torre de aerogenerador 10 en la dirección del viento debido a la carga del viento. Por lo tanto, esto actúa además para amortiguar la oscilación de la torre de aerogenerador 10 en el plano de proa a popa.

15 En la Figura 3, el amortiguador de torre de proa a popa 54 se muestra como que alimenta a un sumador que modifica la señal de control de inclinación del controlador de velocidad 46. En un ejemplo alternativo, la salida del amortiguador de torre de proa a popa 54 se puede alimentar en su lugar a la unidad de referencia de velocidad de rotor 42 y usar para modificar el valor de referencia de velocidad de rotor con el fin de modificar la señal de control de inclinación resultante.

20 El ejemplo de la Figura 3 se dota además con un limitador de aceleración 58 que recibe la medida de la velocidad de rotor de aerogenerador a través de una unidad de derivada de tiempo 56. La unidad de derivada de tiempo 56 convertirá la medida de la velocidad de rotor de aerogenerador en una medida de la aceleración del rotor de aerogenerador. La unidad de derivada de tiempo 56 puede actuar como una derivada de un paso o usar cualquier otro planteamiento correspondiente, por ejemplo, redes de avance o filtros específicos.

25 El limitador de aceleración 58 se proporciona para frenar aceleraciones extremas que pueden surgir en el rotor de aerogenerador haciendo que la señal de control de inclinación se modifique. Como se muestra en la Figura 3, el limitador de aceleración 58 puede comunicar esta modificación al controlador de velocidad 46. Alternativamente la modificación puede operarse en la salida del controlador de velocidad 46, es decir, en un punto de aguas abajo entre el controlador de velocidad 46 y los actuadores de inclinación de pala de aerogenerador, en este caso la flecha de salida del limitador de aceleración 58 en la Figura 3 se dirigiría al punto de suma a la derecha del controlador de velocidad 46 más que al controlador de velocidad en sí mismo. Esto puede ser proporcionando el limitador de aceleración 58 una compensación adicional a la señal de control de inclinación o aplicando un nivel dado de ganancia a la señal de control de inclinación.

30 En un ejemplo, el limitador de aceleración 58 tiene una zona muerta entre una aceleración de cero y una aceleración de umbral dada por lo que no se aplica ninguna modificación de ganancia para aceleraciones por debajo del umbral dado. Cuando se determina que la aceleración está por encima del umbral, se puede aplicar una modificación de ganancia proporcional de manera que la señal de control de inclinación, y por lo tanto la tasa de cambio en la inclinación de las palas de aerogenerador 32, se aumenta en proporción a la cantidad en que la aceleración está por encima del umbral dado. Esta modificación de ganancia proporcional puede ser lineal o no lineal.

35 En otro ejemplo, el limitador de aceleración 56 opera en la zona muerta de manera que una compensación de señal de control de inclinación cero se emite para que se sume con la salida del controlador de velocidad 46 cuando se determina que el nivel de aceleración está por debajo de una aceleración de umbral dada y en donde la compensación de señal de control de inclinación que emitió para ser sumada con la salida del controlador de velocidad 46 es proporcional a la cantidad en que la aceleración está por encima del umbral dado cuando la aceleración está por encima del umbral dado.

40 Aumentando la tasa a la que las palas de aerogenerador 32 se inclinan usando los ejemplos descritos anteriormente, la aceleración máxima del rotor de aerogenerador se controla durante el procedimiento de parada de la invención para mantener los niveles de aceleración dentro de límites aceptables. Por consiguiente, el limitador de aceleración puede actuar preferiblemente para anular el esquema de control de inclinación de la unidad de referencia de velocidad de rotor 42 y el controlador de velocidad 46 en situaciones en las que hay una gran aceleración que requiere una gran reacción en términos de control de inclinación.

45 El limitador de aceleración 58 puede incluir un filtro para suavizar el valor de la modificación de ganancia que se emite por el limitador de aceleración 58. El filtro actúa para evitar un cambio repentino en la modificación de

ganancia en el caso en que la aceleración caiga rápidamente de vuelta a la zona muerta donde no se aplica ninguna modificación de ganancia.

5 Como se muestra en la Figura 3, un controlador de aerogenerador según la invención se puede dotar también con un programador de ganancia 60. El programador de ganancia 60 recibe una medida del ángulo de inclinación actual de las palas de aerogenerador 32 como entrada y emite una señal de control de ganancia para escalar la acción del controlador de velocidad 46 para hacer coincidir los diversos puntos de operación posibles del aerogenerador 1. La medida del ángulo de inclinación actual se puede recibir desde un sensor de posición de inclinación situado en una o más de las palas de aerogenerador 32, con el valor de inclinación que varía entre 0 grados y 90 grados y las palas que se inclinan completamente en un ángulo de inclinación de 90 grados.

10 En una implementación, el programador de ganancia 60 puede proporcionar un grado de reducción de ganancia para reducir proporcionalmente la señal de control de inclinación y/o la tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador en base a la medida de la inclinación actual de la pala de aerogenerador 32. Esta reducción de ganancia se puede aplicar como una reducción de ganancia lineal con la tasa de reducción de ganancia que cambia a un número de umbrales del ángulo de inclinación actual.

15 Un ejemplo de tal régimen de reducción de ganancia se ilustra en la Figura 4, con la inclinación de pala de aerogenerador actual  $\theta$  que se muestra en el eje x y la ganancia aplicada  $K_p$  que se muestra en el eje y. En la primera región, donde se determina que la inclinación actual es menor que un primer umbral de  $\theta_1$ , se aplica una ganancia de 1, es decir, sin reducción de ganancia. A medida que la pala de aerogenerador se inclina durante el procedimiento de parada, el valor de  $\theta$  aumentará y eventualmente cruzará el primer valor de umbral  $\theta_1$ . En este punto, la cantidad de ganancia aplicada caerá por debajo de 1 y por consiguiente la ganancia se reduce a una primera tasa de cambio. La ganancia aplicada se reduce entonces a una segunda tasa de cambio cuando el valor de inclinación es mayor que  $\theta_2$ .

20 Como se puede ver a partir de la Figura 4, en este ejemplo la primera tasa de cambio es más alta que la segunda tasa de cambio. Esto significa que la agresividad del régimen de control de inclinación se reduce a medida que la inclinación de las palas de aerogenerador 32 se acerca a la posición de puesta horizontal. En un ejemplo,  $\theta_1$  se puede establecer en aproximadamente 10 grados y  $\theta_2$  se puede establecer en aproximadamente 30 grados.

30 Como se ha descrito anteriormente, los procedimientos de parada se pueden iniciar por el controlador en respuesta al controlador que recibe una solicitud de parada. En particular, el controlador puede recibir una solicitud para una parada de emergencia. Los procedimientos de parada descritos son particularmente apropiados para escenarios de parada de emergencia en la medida que el aerogenerador 1 es probable que esté experimentando condiciones ambientales adversas, tales como ráfagas de viento extremas, y el aerogenerador también se puede haber desconectado recientemente de la red de energía conduciendo a una eliminación del par de frenado de generador como se ha expuesto anteriormente.

35 En estas situaciones, es especialmente importante que el aerogenerador 1 se pare de manera segura mientras que también se intentan minimizar las cargas instantáneas que experimentan los componentes del aerogenerador 1 durante la parada. Como se apreciará, el controlador de aerogenerador 40, 50 puede iniciar un procedimiento de parada de emergencia sin recibir una solicitud externa de parada de emergencia en el caso en que el controlador detecte un fallo interno u otra condición que necesite una parada de emergencia.

40 Los controladores, funciones y elementos lógicos descritos en la presente memoria se pueden implementar como componentes de hardware o como software que se ejecuta en uno o más procesadores situados en el aerogenerador o remotamente. El uno o más procesadores pueden comprender uno o más dispositivos de procesamiento de propósito especial tales como un circuito integrado de aplicaciones específicas (ASIC), una agrupación de puertas programable de campo (FPGA), un procesador de señal digital (DSP), procesador de red u otros dispositivos similares. El uno o más procesadores se configuran para realizar las operaciones y métodos descritos anteriormente, que se pueden llevar a cabo por un único procesador o, alternativamente, se pueden llevar a cabo por una serie de procesadores conectados entre sí.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método de control de parada de un aerogenerador (1) que tiene un rotor, el rotor que comprende una o más palas de aerogenerador (32), el método que comprende:
- determinar dinámicamente una referencia de velocidad de rotor;
  - 5 obtener una medida de la velocidad de rotor del rotor;
  - obtener una medida de un movimiento de proa a popa de la torre de aerogenerador;
  - determinar un error entre la referencia de velocidad de rotor y la velocidad de rotor del rotor; y
  - controlar una inclinación de una o más de las palas de aerogenerador en base al error determinado y el movimiento de proa a popa medido de la torre de aerogenerador;
  - 10 caracterizado por que el método comprende además determinar si la velocidad de rotor del rotor está aumentando, en donde la determinación dinámica de la referencia de velocidad de rotor comprende mantener un valor de referencia de velocidad de rotor constante cuando se determina que la velocidad de rotor del rotor está aumentando.
2. Un método según la reivindicación 1, en donde la determinación dinámica de la referencia de velocidad de rotor comprender establecer el valor de referencia de velocidad de rotor para que sea igual que la velocidad de rotor del rotor cuando se determina que la velocidad de rotor del rotor es menor que el valor de referencia de velocidad de rotor.
3. Un método según cualquiera de las reivindicaciones de 1 a 2, en donde la determinación dinámica de la referencia de velocidad de rotor comprende bajar progresivamente la referencia de velocidad de rotor a cero cuando se determina que la velocidad de rotor del rotor es tanto más alta que el valor de referencia de velocidad de rotor como que no está aumentando.
4. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde una tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador se reduce mientras que se determina que la torre de aerogenerador está moviéndose hacia el viento debido al movimiento de proa a popa y/o en donde la tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador se aumenta mientras que se determina que la torre de aerogenerador está moviéndose en la dirección del viento debido al movimiento de proa a popa.
5. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la determinación dinámica de la referencia de velocidad de rotor comprende además modificar la referencia de velocidad de rotor en base al movimiento de proa a popa medido de la torre de aerogenerador.
6. Un método según cualquier reivindicación anterior, que comprende además determinar una aceleración del rotor en base a la velocidad de rotor del rotor; en donde una tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador se aumenta proporcional a la aceleración cuando la aceleración está por encima de un umbral dado.
7. Un método según cualquier reivindicación anterior, en donde una reducción de ganancia se aplica a una tasa de cambio de la inclinación de pala de aerogenerador como una función de la inclinación de la una o más palas de aerogenerador.
8. Un método según la reivindicación 7, en donde la reducción de ganancia es una reducción de ganancia progresiva y una tasa de la reducción de ganancia progresiva se basa en uno o más ángulos de umbral de la inclinación de una o más de las palas de aerogenerador.
9. Un método según la reivindicación 7 u 8, por el que no se aplica ninguna reducción de ganancia si la inclinación está por debajo de un primer ángulo de umbral, una primera tasa de reducción de ganancia progresiva se aplica si la inclinación está entre el primer ángulo de umbral y un segundo ángulo de umbral y una segunda tasa de reducción de ganancia progresiva se aplica si la inclinación está por encima del segundo ángulo de umbral; en donde la primera tasa de reducción de ganancia progresiva es más alta que la segunda tasa de reducción de ganancia progresiva.
10. Un método según cualquier reivindicación anterior, en donde la inclinación de cada una de la una o más palas de aerogenerador se controla individualmente.
11. Un controlador (40, 50) para un aerogenerador (1) que tiene un rotor, el rotor que comprende una o más palas de aerogenerador (32), en donde el controlador se configura para hacer que el método de cualquiera de las reivindicaciones de 1 a 10 se implemente durante la parada del aerogenerador.

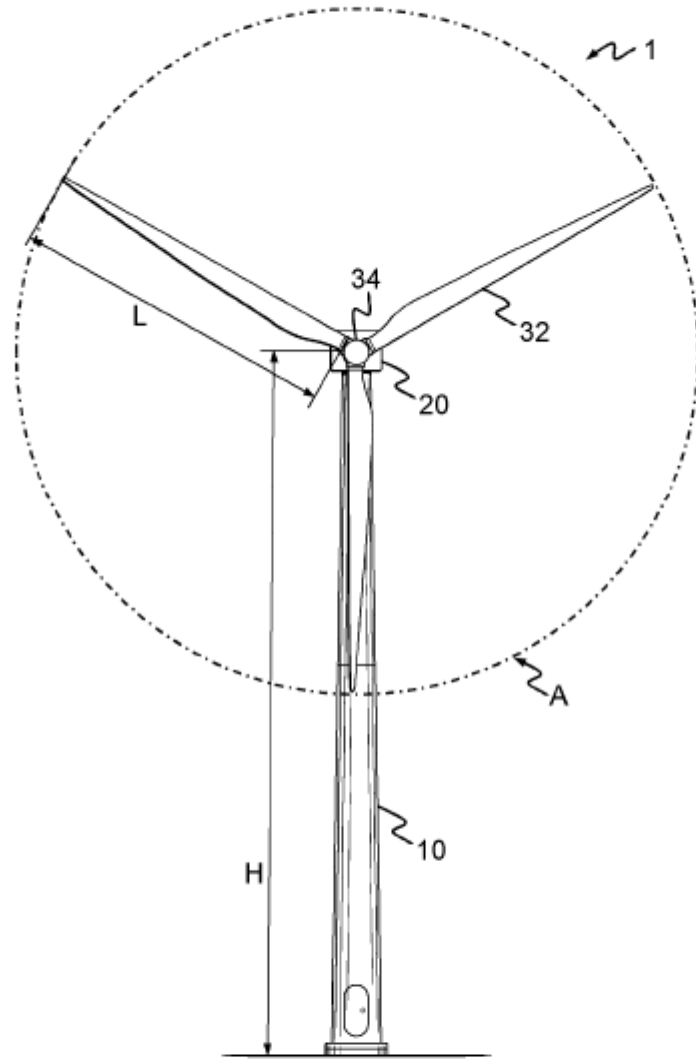
12. Un controlador según la reivindicación 11, en donde el controlador se configura para hacer que el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 se implemente en respuesta al controlador que recibe una solicitud de parada de emergencia.

5 13. Un aerogenerador (1) que comprende un rotor y uno o más controladores (40, 50) según la reivindicación 11 o 12, en donde el rotor comprende una o más palas de aerogenerador (32).

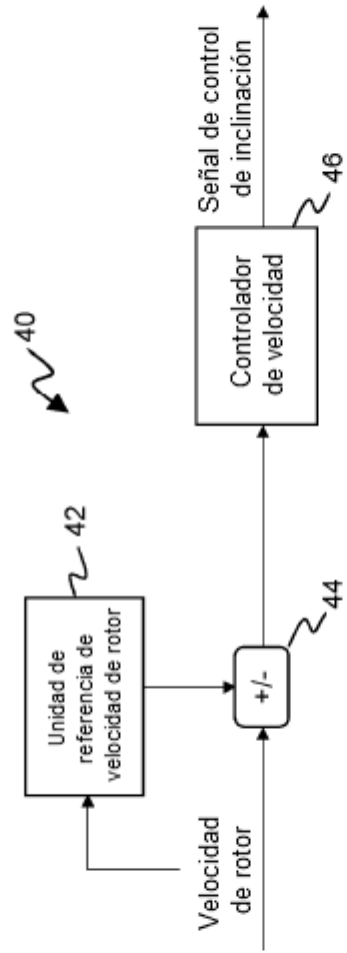
14. Un aerogenerador según la reivindicación 13, en donde el uno o más controladores se configuran cada uno para controlar la inclinación de una pala de aerogenerador respectiva de la una o más de las palas de aerogenerador.

15. Un programa de ordenador que, cuando se ejecuta en un controlador de aerogenerador, hace que el controlador de aerogenerador lleve a cabo el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10.

10



**FIG. 1**



**FIG. 2**

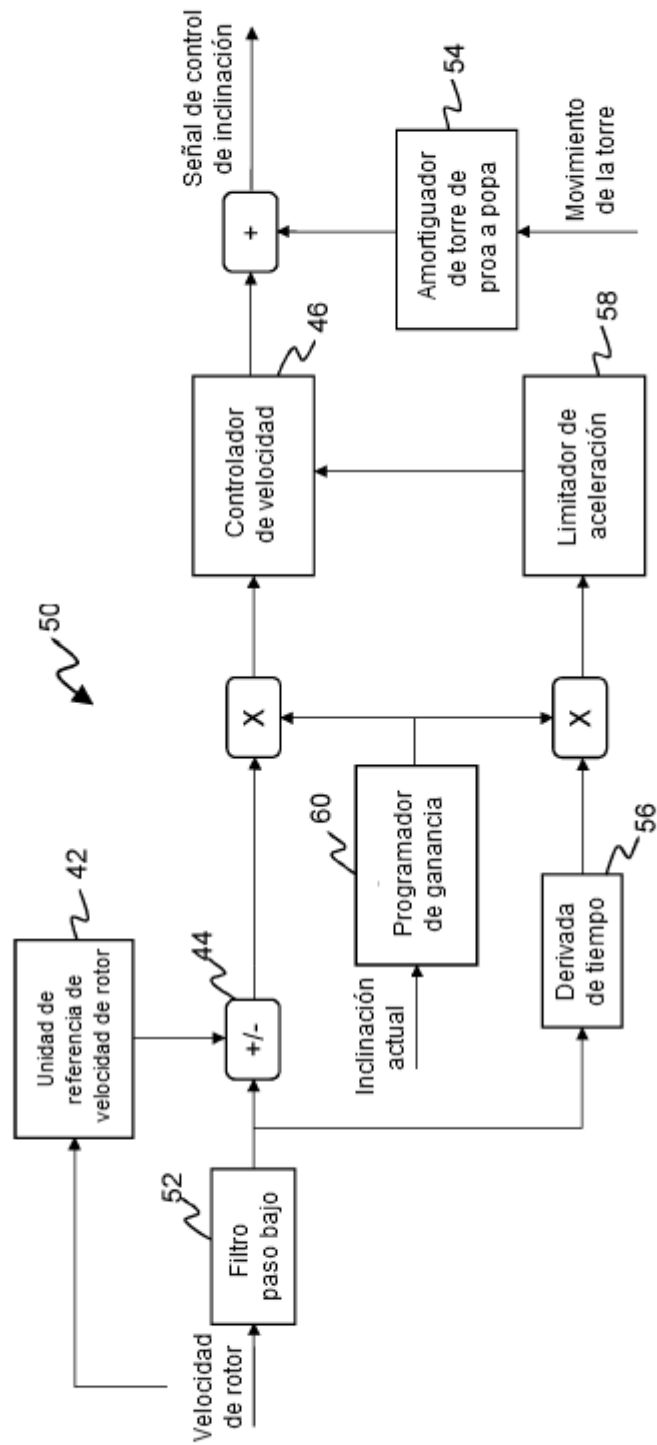
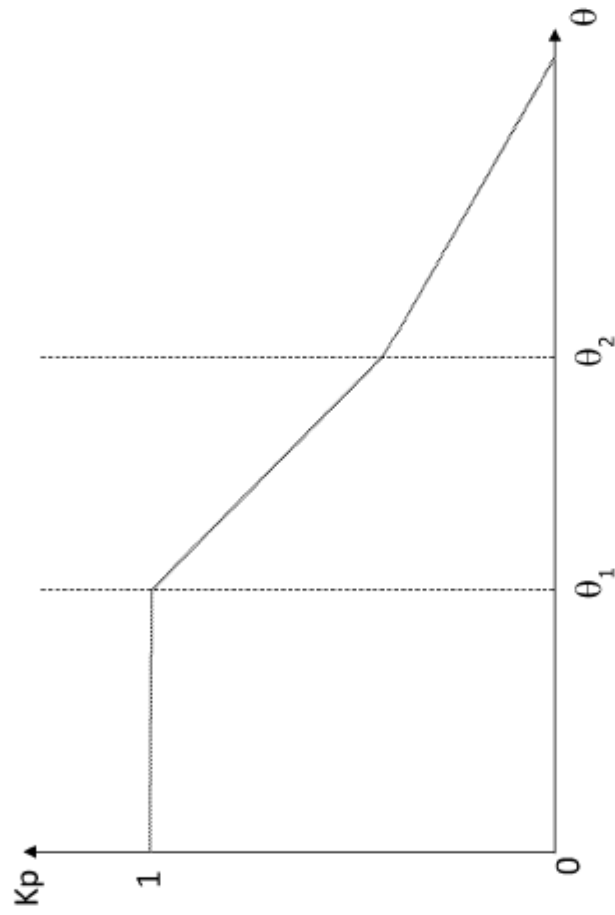


FIG. 3



**FIG. 4**