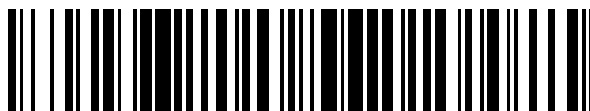


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 556 829**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.12.2011 E 11799354 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.11.2015 EP 2655875**

54 Título: **Método de control para una turbina eólica**

30 Prioridad:

21.12.2010 DK 201070568
21.12.2010 US 201061425585 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.01.2016

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

RISAGER, LARS;
DALSGAARD, SØREN;
KRISTOFFERSEN, JACOB KROGH;
THOMSEN, JESPER SANDBERG;
SØRENSEN, SØREN y
ANDERSEN, ASGER SVENNING

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 556 829 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 control para una turbina eólica

5 La presente invención se refiere a un método de control de una turbina eólica que comprende palas unidas a un buje de rotor para la rotación en un plano de rotor y un sistema de control para regular de manera individual el paso de las palas en relación con el buje con el objetivo de reducir el riesgo de cargas extremas únicas o sucesivas sobre las palas, la torre u otros componentes de la turbina eólica provocadas por ráfagas de viento.

Antecedentes

10 La mayoría de las turbinas eólicas modernas se controlan y regulan de manera continua, en su mayoría con la finalidad de garantizar una extracción de potencia máxima del viento bajo el viento actual, y las condiciones atmosféricas, mientras que al mismo tiempo se garantiza que las cargas sobre los diferentes componentes de la turbina eólica se mantienen en todo momento dentro de límites aceptables. De manera deseable, la turbina eólica también puede controlarse para tener en cuenta rápidos cambios repentinos en la velocidad del viento, las denominadas ráfagas de viento, y tener en cuenta los cambios dinámicos en las cargas sobre las palas individuales debido a por ejemplo el paso de la torre, o la velocidad del viento real que varía con la distancia al suelo (el perfil de viento o cortadura).

15 Con esta finalidad se recopilan y monitorizan varios parámetros mediante los controladores en una turbina eólica, tal como por ejemplo la velocidad y dirección actuales del viento, la velocidad de rotación del rotor, el ángulo de paso de cada pala, el ángulo de guiñada, información sobre el sistema de red de distribución eléctrica, y parámetros medidos (por ejemplo esfuerzos o vibraciones) desde sensores situados por ejemplo sobre las palas, la góndola, o sobre la torre.

20 Basándose en esto y siguiendo alguna estrategia de control se determinan los parámetros de control óptimos de la turbina con el fin de tener un rendimiento óptimo bajo las condiciones dadas. El rendimiento actual, y de ese modo la producción de potencia y la situación de carga de la turbina eólica se controla principalmente controlando los ángulos de paso de las palas, pero puede incluir además ajustar por ejemplo cualquier dispositivo aerodinámico activo diferente para cambiar las superficies aerodinámicas de las palas tales como flaps o medios de generación de torbellinos, ajustar la potencia y/o ajustar la velocidad de rotación del rotor.

25 Las turbinas eólicas se construyen y controlan tradicionalmente según estándares y según mapas de viento e incorporando la compensación de maximizar la producción de energía anual mediante la turbina eólica mientras que al mismo tiempo se garantiza una determinada vida útil de la turbina, es decir, manteniendo las cargas sobre los diferentes componentes de la turbina eólica dentro de límites aceptables en todo momento y a lo largo del tiempo. Por tanto, las turbinas eólicas se diseñan normalmente según una determinada (elevada) turbulencia pero a menudo se hacen funcionar a un nivel de turbulencias inferior y en algunas condiciones pueden controlarse de manera demasiado conservadora, mientras que en algunas condiciones de manera no lo suficientemente conservadora, dando como resultado una fatiga no deseada o cargas extremas sobre los componentes de la turbina eólica, especialmente las palas, góndola y torre.

30 El documento EP 1 666 723 A1 da a conocer un dispositivo de control de ángulo de paso de pala usado para un generador de energía eléctrica eólico que tiene una pluralidad de palas, pudiendo el dispositivo de control controlar de manera individual el ángulo de paso de cada pala. El dispositivo de control comprende un dispositivo de detección de ángulo azimut y un dispositivo de detección de parámetros que detecta parámetros predeterminados. El control individual del ángulo de paso se basa en valores de comando de ángulo de paso y un valor de comando de ángulo de paso común, que es común para cada pala.

Sumario de la invención

35 Por tanto, es un objeto de las realizaciones de la presente invención proporcionar un método de control para una turbina eólica que obvie o reduzca algunos de los problemas mencionados anteriormente en los métodos de control conocidos.

40 Es un objeto adicional de la invención proporcionar un método de control para reducir el riesgo de cargas extremas individuales o sucesivas sobre las palas, la torre u otros componentes de la turbina eólica provocadas por ráfagas de viento. Un objeto adicional de la invención es proporcionar un método de control para garantizar que las cargas sobre la turbina se mantienen dentro de límites aceptables en todas las condiciones del viento mientras que al mismo tiempo se mantiene una alta producción de energía de la turbina eólica.

45 Es un objeto adicional de la invención proporcionar un método de control que, de un modo sencillo y eficaz, pueda reaccionar rápido y de manera fiable a cambios en las condiciones de carga de viento.

50 Es un objeto adicional de las realizaciones de la invención proporcionar una turbina eólica con un sistema de control que pueda reaccionar de manera eficaz ante eventos tales como ráfagas de viento actuando también sólo sobre partes del plano de rotor.

55

Según la invención, esto se obtiene mediante un método de control de una turbina eólica que comprende palas unidas a un buje de rotor para la rotación en un plano de rotor y un sistema de control para regular de manera individual el paso de las palas en relación con el buje, comprendiendo el método las etapas de dividir el plano de rotor en un número de sectores, determinar los sectores individuales para cada pala durante la rotación por medio de un sensor de ángulo azimut, obtener datos de sensor desde un sensor de pala sobre una pala individual al menos en parte durante un paso de un sector durante la rotación, comparar los datos obtenidos con datos que representan datos de sensor de pala en la misma u otra pala al menos en parte durante un paso anterior del mismo sector durante la rotación, detectando de ese modo un evento para sectores individuales del plano de rotor, determinar una contribución de paso individual para un sector dado sólo cuando se detecta un evento en dicho sector y regular el paso de las palas según la contribución de paso individual para el sector dado al menos en parte durante el paso del sector.

Según una realización, los datos de sensor pueden comprender datos de carga de pala procedentes de un sensor de carga de pala y/o datos de pérdida aerodinámica de pala procedentes de un sensor de pérdida aerodinámica de pala.

De este modo se obtiene un método para detectar y determinar un evento aunque el evento no se produzca por todo el plano de rotor sino en una parte del plano de rotor. Tales eventos pueden comprender la aparición de cambios dinámicos o repentinos en el viento que actúa sobre el plano de rotor y ráfagas de viento, que en general pueden llevar a cambios repentinos correspondientes en las cargas sobre la turbina eólica, y especialmente sobre las palas y la torre.

Según una realización de la invención, la detección de eventos en el método de control de una turbina eólica comprende además la etapa de calcular para los sectores individuales del plano de rotor una desviación con respecto al estado de funcionamiento normal definido de los datos de carga de pala obtenidos relacionados con los sectores individuales.

El estado de funcionamiento normal definido puede expresarse desde el punto de vista de un estado estructural permisible máximo predefinido de la pala tal como por ejemplo carga, momento, desviación, pérdida aerodinámica o fatiga de la pala, o desde el punto de vista de una energía cinética aceptable máxima predefinida de una pala para un sector de rotor. Estos límites permisibles o aceptables pueden ser los mismos para todos los sectores de rotor o pueden variar de un sector a otro reflejando circunstancias especiales tales como, por ejemplo, ser inferiores en los sectores cerca de la torre o en los sectores que cubren la parte superior del plano de rotor en la que el viento generalmente puede alcanzar las velocidades más altas. Esto puede usarse para detectar eventos de viento en sectores arbitrarios del plano de rotor. Como ejemplo, si se sabe que una determinada parte del plano de rotor es crucial, puede tenerse en cuenta. El estado de funcionamiento normal definido puede variar además en función de diferentes parámetros de funcionamiento, tales como por ejemplo en función de la velocidad del viento media o un factor de turbulencia general. De este modo, el método de control puede por ejemplo establecer que las condiciones para el funcionamiento normal sean inferiores durante cargas de viento elevadas haciendo que el método de control sea más sensible. Además, el funcionamiento normal definido puede ser una función de más de una condición estructural de la pala tal como por ejemplo una combinación de carga de pala y ángulo de ataque de la pala.

Comparando datos de sensor de pala tales como cargas de pala que se miden en un sector de rotor con datos de sensor de pala medidos previamente en el mismo sector, el método de control puede detectar y por tanto reaccionar frente a cambios repentinos en el estado de pala para cada sector de rotor y de ese modo detectar eventos tales como ráfagas de viento u otros cambios dinámicos en el viento que actúa a través del plano de rotor. De este modo se obtiene además un método de control que puede detectar y reaccionar frente a campos de viento y patrones de viento más complejos que varían por el plano de rotor. De este modo, el método de control propuesto puede detectar y tener en cuenta efectos de cortadura y efectos dinámicos del viento tales como cambios extremos del viento y ráfagas de viento de rotor totales y parciales.

Las cargas de pala obtenidas relacionadas con un sector pueden compararse con datos de sensor de pala (tales como cargas) obtenidos previamente a partir de mediciones sobre la misma pala o a partir de mediciones sobre otra pala de turbina eólica. De este modo, el método puede realizarse en una turbina eólica usando mediciones de sensor a partir de una pala individual comparando datos de una rotación a la siguiente, o adicional o alternativamente puede realizarse mediante el uso de sensores de pala sobre un número de o todas las palas de turbina. Con la última opción pueden obtenerse intervalos de datos de sensor de pala relacionados con un sector dado a intervalos de tiempo más cortos y de ese modo información más detallada, y una mayor probabilidad de detectar y reaccionar frente a un evento.

Debido a la información más compleja y completa obtenida sobre la carga de viento dinámica que actúa a través del plano de rotor, el método de control puede reaccionar por consiguiente con mayor rapidez y precisión frente al evento percibido y detectado. Teniendo en cuenta estos eventos de viento dinámicos parciales o totales en el control de la turbina eólica, puede conseguirse que las cargas extremas sobre la turbina eólica o en cualquier parte o componente de la turbina eólica puedan reducirse considerablemente durante el funcionamiento sin o con sólo reducciones mínimas en la producción de potencia global. Por ejemplo, de este modo pueden reducirse las cargas de pala de turbina extremas tales como las cargas de borde o flap de pala, los momentos de flap de pala o la fatiga

de pala. De manera similar, durante tales eventos pueden reducirse momentos o cargas de inclinación, momentos o cargas de guiñada, cargas extremas sobre la torre, o góndola, u otros componentes de la turbina eólica tales como sobre los cojinetes, el árbol o similares.

5 Los datos de carga de pala considerados comprenden especialmente datos de carga medidos sobre la pala de turbina tales como cargas de borde o flap de pala o momentos de flap de pala. Alternativa o adicionalmente, los datos de carga pueden comprender o representar cargas por fatiga sobre las palas de turbina. Los datos de carga de pala pueden obtenerse mediante uno o más sensores colocados en las palas de turbina eólica tal como por ejemplo en la raíz de pala o más hacia fuera en el revestimiento de pala. El sensor puede comprender por ejemplo sensores de medición de deformación, sensores ópticos, o similares. Adicional o alternativamente, el sensor de pala puede comprender sensores de pérdida aerodinámica, acelerómetros y/o sensores de desviación.

10 El plano de rotor puede dividirse en un número de secciones de tamaño regular o irregular, es decir, del mismo tamaño o tamaño diferente. Como ejemplo, el plano de rotor puede dividirse en sectores de 5-30 grados, tal como 5-20 grados tales como de aproximadamente 10 grados. El plano de rotor puede dividirse de manera similar en un factor multiplicado por el número de palas de sectores de igual tamaño tal como por ejemplo 12 sectores de 30 grados cada uno. Para cada pala de turbina, uno o más sensores de ángulo azimut de paso detectan en qué sector de rotor se desplaza actualmente la pala. De este modo las cargas de pala detectadas sobre cada pala pueden relacionarse con el sector de rotor en el que se produce la carga y de ese modo vincularse a la carga de viento y flujo de viento en ese sector de rotor.

15 Dividiendo el plano de rotor en sectores y relacionando los datos de sensor de pala tales como las cargas de pala a los sectores de rotor, el método de control propuesto aprovecha ventajosamente el hecho de que las palas estén rotando; es decir, se usa la información de una pala de ataque que se desplaza por un sector en la detección de un evento que se produce posteriormente en el mismo sector. Es decir, el método de control introduce memoria en el sistema que disminuye el riesgo de cargas extremas sucesivas.

20 Según una realización de la invención, el método de control de una turbina eólica comprende además la etapa de comparar un dato de sensor de pala instantáneo relacionado con un sector con un umbral de carga, siendo el umbral de carga una función de los datos de sensor de pala medios y un número de desviaciones estándar. El umbral de carga obtenido de este modo varía en función de los datos de sensor de pala medidos a lo largo del tiempo para ese sector específico. De este modo se obtiene que el método de control pueda detectar y manejar eventos de viento dinámicos elevados puesto que el detector, a diferencia de los métodos de control tradicionales, tiene en cuenta una estimación de la desviación estándar. El número de desviaciones estándar usado para determinar el umbral de carga puede ser una constante predefinida tal como por ejemplo un factor entre 1 y 6, o 2 y 4, tal como 3). En una realización adicional, este número de desviaciones estándar puede variar a lo largo del tiempo, o de un sector a otro, y dependiendo de parámetros de turbina eólica tales como por ejemplo la carga de pala media, la velocidad de rotación, el ángulo de paso de pala real, la velocidad del viento media o similar. De este modo el método de control puede ajustarse para ser más o menos sensible dependiendo directamente de estas condiciones. El número de desviaciones estándar usado puede predeterminarse basándose en el procesamiento posterior de simulaciones por ordenador sobre cargas de pala aceptables.

25 Los datos de sensor de pala medios y la desviación estándar de los datos de sensor de pala pueden determinarse calculando un promedio lineal sobre valores de cargas de pala previos o pueden determinarse calculando un promedio exponencial o similares. El cálculo del promedio exponencial puede ser ventajoso porque la desviación media y la estándar pueden obtenerse entonces actualizando los valores determinados previamente de una muestra a la siguiente con requisitos de memoria mínimos.

30 Según una realización de la invención, el método comprende además la detección de la orientación espacial de la turbina eólica, y la detección de eventos comprende la etapa de comparar un dato de sensor de pala instantáneo relacionado con un sector con un umbral de carga, siendo el umbral de carga una función de la posición espacial. De este modo, la turbina eólica puede protegerse de cargas extremas siempre que la turbina esté en un sector de guiñada crucial, es decir, esté orientada en una dirección específica. De este modo el umbral de carga podría ajustarse dependiendo de la orientación espacial (NESW) de la turbina eólica teniendo en cuenta de este modo potencialmente el conocimiento de estas orientaciones espaciales tales como las condiciones del viento o atmosféricas típicas y/o condiciones dadas por el emplazamiento. Tal conocimiento podría obtenerse opcionalmente haciendo que el umbral se base en el historial como, por ejemplo, cuando se calcula o ajusta a partir del historial de las señales de entrada de la orientación específica, u obtenerse a partir de datos de emplazamiento obtenidos de otro modo. De este modo, podría aplicarse una regulación de paso más conservadora y la turbina podría tener una mayor tendencia a una disminución de potencia en situaciones en las que la turbina eólica está orientada en direcciones con un mayor riesgo de ser críticas. De este modo se reduce adicionalmente el riesgo de sobrecargar la turbina. Como ejemplo, si la turbina eólica se coloca en un acantilado, el método de control según la invención podría establecer una mayor contribución de paso para los sectores de rotor más inferiores cuando la turbina gira subiendo el viento por el acantilado.

35 Según una realización de la invención, el método comprende además reducir el umbral de carga de un primer sector en un factor, cuando la carga de pala instantánea supera el umbral de carga en un segundo sector, estando el

segundo sector alejado de dicho primer sector menos de un número predefinido de sectores. De este modo puede usarse la detección de un evento en un sector para disminuir los umbrales de carga y de ese modo aumentar la sensibilidad del método en los sectores próximos a o cerca del sector de la detección de eventos. El factor puede ser una cierta constante predefinida en el intervalo de 0,7-0,99, por ejemplo entre 0,85 y 0,95. La reducción de umbral puede realizarse en todos los sectores dentro de por ejemplo 120 o 180° con respecto al sector de detección de eventos, o adicional o alternativamente en un número de sectores que preceden o siguen al sector de detección de eventos. El número de sectores afectados puede ser un número predefinido tal como por ejemplo 2 ó 4 o puede ser un número que aumenta con la gravedad del evento detectado. Mediante la reducción de umbral propuesta puede obtenerse que si se detecta un evento cuando una pala abandona un sector, ya está previsto que posiblemente ocurra la detección de evento para la siguiente pala y entonces la reducción de umbral puede hacer que la siguiente pala regule su paso saliéndose algo antes de lo que sería en otro caso.

Según una realización de la invención, el cálculo mencionado anteriormente comprende la etapa de comparar una carga de pala instantánea relacionada con un sector con un umbral de carga máximo que refleja una carga de pala aceptable como máximo predeterminada. De este modo se establece un límite de seguridad absoluto superior de la carga de pala instantánea por encima del cual se detecta un evento independientemente de otros parámetros tales como la carga de pala media, con lo que puede garantizarse que el método de control reaccionará frente a tales cargas de pala elevadas. De este modo puede reducirse el riesgo de perderse una detección de eventos.

En una realización adicional el cálculo mencionado anteriormente comprende la etapa de comparar una energía cinética instantánea derivada de la carga de pala relacionada con un sector con un umbral de energía cinética, siendo el umbral de energía cinética una función de la energía cinética de pala media y un número de desviaciones estándar. Mediante el uso de tal umbral de energía cinética en la detección de eventos en los sectores de rotor individuales, puede reducirse considerablemente el tiempo de detección en algunos tipos de eventos de viento dinámicos, es decir, el evento puede detectarse y de ese modo puede reaccionarse frente al mismo antes que en el caso de que la detección se base en las cargas de pala solamente.

La energía cinética sobre una pala relacionada con un sector dado puede determinarse a partir de las cargas de pala medidas y por ejemplo estimarse como un parámetro constante multiplicado por la derivada de tiempo de la carga de pala al cuadrado. El razonamiento detrás de esta correlación es la correlación entre un momento de flap de pala (o carga) y deformación en una sección de rotor. Estos son linealmente dependientes y como la energía cinética puede obtenerse a partir de la derivada de la deformación, la energía cinética puede obtenerse a partir de la derivada del momento de flap de pala.

Alternativa o adicionalmente, la energía cinética de pala puede estimarse a partir de desviaciones, aceleraciones o el desplazamiento angular de la pala.

Según una realización adicional de la invención, la contribución de paso individual puede determinarse para hacer que una pala individual regule su paso saliéndose de la trayectoria del viento cuando se detecta un evento en un sector dado. En una realización de la invención, la contribución de paso individual se añade a una referencia de paso colectivo que proporciona un paso común para todas las palas.

Por tanto, cuando se detecta un evento en un sector dado se añade una contribución de paso individual a la referencia de paso colectivo para obligar a que la pala individual regule su paso saliéndose de la trayectoria del viento al menos cuando pasa a través de una parte del sector crucial y posteriormente reducir el riesgo de una carga de pala extrema. De este modo el paso de las palas se regula adicionalmente cuando pasan por tales sectores cruciales en los que se detecta un evento de viento por la misma pala o una pala anterior. De este modo, disminuye el riesgo de cargas extremas puesto que el método de control adapta la contribución de paso individual en los diferentes sectores. La funcionalidad principal del método de control es por consiguiente usar sensores de pala tales como sensores de momento de flexión de raíz de flap absoluto para detectar cargas de pala críticas y reaccionar regulando de manera individual el paso de las palas para que se salgan de la trayectoria del viento.

Puede mantenerse una contribución de paso individual para cada sector de plano de rotor dependiendo de una detección de eventos de modo que se añade una contribución de paso para esas secciones sólo cuando se detecta un evento. La contribución de paso individual puede comprender un valor de constante predefinido tal como por ejemplo un ángulo entre 2-10 grados, por ejemplo 5 grados. Además, puede añadirse la misma contribución de paso a cualquier pala que pase a través del sector de evento pertinente. Alternativa o adicionalmente la contribución de paso individual puede adaptarse o disminuir o variar de cualquier otro modo en función de parámetros tales como tiempo, el valor de la carga de pala medida real, el valor real del paso de pala, etc.

En una realización de la invención, se regula el paso de la pala individual según la contribución de paso individual mientras que la pala pasa a través de dicho sector dado, en el que se detecta el evento. Alternativamente, la contribución de paso puede reducirse o establecerse a cero en caso de que la carga de pala medida o energía cinética de pala relacionada con el sector disminuya por debajo de un umbral determinado o se determine de otro modo que está bajo control.

Alternativa o adicionalmente, la contribución de paso puede determinarse en función de la posición de la pala dentro

del sector dado. De este modo el sector de rotor podría dividirse opcionalmente en un número de sectores de paso con diferentes contribuciones de paso, y por consiguiente podría regularse el paso de la pala cuando pasa a través de los diferentes sectores de paso dentro del sector de rotor. De este modo podría emplearse un esquema de actuación más refinado mientras se mantienen los sectores de sensor más bastos. Puede resultar ventajosa una red de sensores más basta correspondiente a sectores de rotor más grandes para reducir el ruido procedente de los sensores. Además, pueden no ser necesarios sectores de rotor más finos puesto que los datos de sensor de pala no cambian necesariamente tan rápido durante la rotación. Por otro lado, puede ser ventajosa una red de actuación más fina y sectores de paso más pequeños para proporcionar un paso más suave y de ese modo una adaptación más suave a las condiciones cambiantes durante una rotación.

5 En una realización adicional de la invención, se regula el paso de la pala individual según la contribución de paso individual hasta que disminuye la carga de pala instantánea relacionada con dicho sector dado, o disminuye en un factor de carga en relación con una carga de pala máxima obtenida tras la detección del evento. De este modo se detiene la regulación de paso de pala individual provocada por el evento cuando las cargas de pala pueden considerarse como bajo control de nuevo. Deteniendo en primer lugar la regulación de paso adicional cuando la carga de pala disminuye en un factor de carga en relación con la carga de pala máxima más reciente, la carga de pala está bajo control con un grado de certeza superior. Como ejemplo puede considerarse que el evento ha pasado cuando la carga de pala ha disminuido hasta por ejemplo el 80 ó 90% de la carga máxima.

Alternativamente, podría mantenerse el paso individual por ejemplo mientras la carga de pala instantánea supere el umbral de carga.

20 En una realización adicional de la invención, la contribución de paso individual es una función de la velocidad de rotación del rotor. De este modo la contribución de paso individual puede reducirse en función del tiempo, por ejemplo como una función que disminuye exponencialmente de modo que se determina la contribución de paso para una nueva pala que entra en el sector de evento dependiendo de cuánto tiempo ha pasado desde que la última pala pasó a través del sector de evento.

25 Según una realización adicional de la invención, la regulación del paso de pala individual se inicia con una distancia de compensación angular antes de que la pala entre en el sector dado. De este modo el método puede compensar el retraso que puede estar presente en un sistema de actuación de paso, haciendo de otro modo que los ángulos de paso sólo se efectúen completamente tras algún tiempo. La distancia de compensación angular puede elegirse en correspondencia con el factor de retraso del sistema de actuación de paso y la velocidad de rotación del rotor. De este modo puede conseguirse que en realidad se regule el paso de la pala según la regulación de paso de pala individual decidida ya con la entrada en el sector dado en el que anteriormente se determinó el evento.

Todavía en una realización adicional de la invención, el sistema de control comprende memoria adaptada para datos relacionados con los datos de sensor de pala obtenidos, y el método comprende determinar una contribución de paso requerida de una pala retrasada a partir de datos procedentes de sensores sobre una pala de ataque.

35 De este modo, el método de control propuesto reduce el riesgo de no sólo una carga de pala extrema debido a un evento de viento en algún sector de rotor, sino que también reduce el riesgo de cargas de pala extremas que se producen sucesivamente cuando una nueva pala entra en un sector afectado por un evento de viento. Dicho de otro modo, el método de control propuesto combina un algoritmo de detección de eventos con un algoritmo de aprendizaje de paso de evento porque el primer algoritmo de detección de eventos detecta eventos de viento tales como ráfagas que aparecen en sectores arbitrarios del plano de rotor y el último algoritmo de aprendizaje de paso encapsula esta información para adaptar el ángulo de paso de pala en estos sectores de manera correspondiente también para las palas siguientes.

45 Dividiendo el plano de rotor en sectores y relacionando las cargas de pala con los sectores de rotor, el método de control propuesto aprovecha ventajosamente el hecho de que las palas estén rotando; es decir, se usa la información procedente de los sensores de carga de pala de ataque para predecir de manera óptima la contribución de paso requerida de las palas retrasadas de manera óptima para evitar cargas de pala extremas o alternativamente para reducir el riesgo de cargas de pala extremas. Es decir, el algoritmo introduce memoria en el sistema que disminuye el riesgo de cargas extremas sucesivas.

50 Según una realización, la contribución de paso individual puede determinarse en función del gradiente de los datos de sensor de pala. De este modo, la contribución de paso puede determinarse para reflejar mejor la energía cinética presente cuando se entra en un sector para el cual se ha detectado un evento. De este modo puede reducirse la contribución de paso en caso de que el gradiente de los datos de sensor de pala medidos esté limitado evitando de ese modo una regulación de paso demasiado extrema cuando no es necesario. De manera correspondiente, puede aumentarse la contribución de paso en caso de gradientes relativamente grandes de los datos de sensor de pala medidos.

Según una realización, la contribución de paso individual se ajusta en función de la diferencia entre el umbral de carga de sector y la carga de pala medida. Esto puede obtenerse aplicando un controlador P, PI y/o PID en el que la actualización o corrección de la referencia de paso se realiza de manera continua comparando los datos de sensor

de pala medidos con los datos de sensor de pala esperados basándose en información de la última pala en ese sector. De este modo la contribución de referencia de paso de sector puede modificarse significativamente si la diferencia entre el umbral de carga de sector y los datos de sensor de pala reales es grande y baja si la diferencia es baja. De este modo, puede obtenerse una reducción más gradual de la contribución de paso de sector de pala basándose en las circunstancias físicas y reales.

Se obtiene un aspecto adicional de la invención mediante una turbina eólica que comprende palas unidas a un buje de rotor para la rotación en un plano de rotor y un sistema de control para regular el paso de las palas en relación con el buje, en la que el sistema de control, para sectores individuales del plano de rotor determinados por medio de un sensor de ángulo azimut, puede detectar un evento obteniendo datos de sensor de pala relacionados con un sector desde un sensor de pala sobre una pala individual al menos en parte durante el paso del sector durante la rotación, y comparar los datos obtenidos con datos relacionados con el mismo sector y que representan datos de sensor de pala sobre la misma u otra pala al menos en parte durante un paso anterior del mismo sector durante rotación, y determinar una contribución de paso individual para un sector dado sólo cuando se detecta un evento en dicho sector, comprendiendo la turbina eólica además un sistema de regulación de paso que de manera individual regula el paso de las palas según la contribución de paso individual para el sector dado al menos en parte durante el paso de pala del sector.

Los datos de sensor pueden comprender datos de carga de pala procedentes de un sensor de carga de pala.

El sistema de control de la turbina eólica puede estar configurado además para realizar el método de control según lo descrito anteriormente.

En una realización de la invención el sistema de control comprende memoria adaptada para datos procedentes de sensores de carga sobre una pala de ataque, pudiendo el sistema de control determinar una contribución de paso requerida de una pala retrasada a partir de los datos en la memoria.

Las ventajas de la turbina eólica y el sistema de control de turbina eólica descritos anteriormente son tal como se describió anteriormente en relación con el método de control de una turbina eólica.

En una realización, cada pala de la turbina eólica comprende un sensor de carga de pala colocado a la misma distancia respecto al buje. De este modo se garantiza que los datos procedentes de una pala puedan ser directamente comparables con los datos medidos por otra pala. De este modo los datos obtenidos de los sensores de carga de pala se refieren a eventos de viento en la misma posición y principalmente sólo son una función de la posición de ángulo azimut de la pala y el tiempo.

En una realización adicional, una pala comprende un número de sensores de pala colocados a diferentes distancias respecto al buje, definiendo de ese modo un número de subsectores para cada sector individual del plano de rotor, y pudiendo detectar el sistema de control para cada subsector individual un evento obteniendo datos de carga de pala relacionados con dicho subsector. De este modo pueden detectarse eventos relacionados con cada subsector. De este modo puede obtenerse una subdivisión más fina del plano de rotor y de ese modo un método de control que puede reaccionar frente a un evento más fino o local. Además, de este modo, los eventos locales pueden detectarse con mayor certeza porque se obtienen mediciones de datos en más posiciones en el plano de rotor.

Según aún un aspecto adicional, la presente invención se refiere a un sistema de control para regular de manera individual el paso de palas de turbina en relación con un buje de una turbina eólica, estando unidas las palas al buje de rotor para la rotación en un plano de rotor, y en el que el sistema de control, para sectores individuales del plano de rotor determinados por medio de un sensor de ángulo azimut, puede detectar un evento obteniendo datos de sensor de pala relacionados con un sector y desde un sensor de pala sobre una pala individual al menos en parte durante un paso del sector durante la rotación, y comparando los datos obtenidos con datos relacionados con el mismo sector y que representan datos de sensor de pala sobre la misma u otra pala al menos en parte durante un paso anterior del mismo sector durante la rotación, y determinar una contribución de paso individual para un sector dado sólo cuando se detecta un evento en dicho sector, estableciendo adicionalmente el sistema de control el comando de paso de pala según la contribución de paso individual para el sector dado al menos en parte durante el paso de pala del sector.

Las ventajas del sistema de control de turbina eólica son tal como se describió anteriormente en relación con el método de control de una turbina eólica.

50 Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirán diferentes realizaciones de la invención con referencia a los dibujos, en los que:

la figura 1 es un boceto del plano de rotor dividido en sectores de rotor individuales,

la figura 2 ilustra un concepto para el método de control según la invención,

la figura 3 es un boceto de la estimación de las cargas de pala y cargas de pala medias (las cargas de pala

determinadas en este caso como el momento de flap de pala) en secciones de rotor seleccionadas,

la figura 4 proporciona una visión global de una realización del detector de eventos,

la figura 5 ilustra el inicio y final de un evento de viento a partir de una medición de carga de pala,

la figura 6 ilustra la detección de eventos basándose en cargas de pala y energía cinética de pala,

5 la figura 7 ilustra la reducción de los umbrales de carga de sector según una realización de la invención,

la figura 8 ilustra la determinación de una contribución de paso de pala individual para una pala basándose en el método de control basado en sectores,

la figura 9 ilustra el concepto del retraso del sistema de regulación de paso,

10 la figura 10 muestra la velocidad del viento entrante, la etiqueta de evento para una de las palas y la contribución de paso resultante para dos secciones de rotor y cuando se aplica a una pala, los datos resultantes de una simulación de prueba en función del tiempo,

la figura 11 ilustra la determinación de una contribución de paso de sector según una realización de la invención mediante el suavizado de contribuciones de paso de sectores adyacentes, y

15 la figura 12 ilustra un método de adaptación de la contribución de paso de sector a los datos de pala reales tal como se miden.

Descripción detallada de los dibujos

20 La figura 1 ilustra la etapa del método de dividir el plano de rotor 100 de una turbina eólica en un número de sectores 101 según una realización del método de control de turbina eólica propuesto. En este ejemplo, el plano de rotor 100 está dividido en 12 sectores de rotor 101 del mismo tamaño. Las palas de rotor 102 denominadas A, B y C están delineadas en una posición en la que la pala de rotor A está en el primer sector (101, 1), la pala de rotor B está en el sector 5 (101, 2) y la tercera pala de rotor C está en el sector número 8 (101, 3). La línea vertical 105 ilustra el eje de la torre de la turbina eólica.

25 Con el fin de reducir el riesgo de inducir momentos de inclinación/guñada mediante el método de control de paso individual según la invención, el número de sectores puede establecerse ventajosamente según la siguiente regla garantizando de ese modo que todas las palas cambien de sector de manera sincrónica:

$$\left(\frac{N_s}{3} \right) \in \mathbb{Z}^+$$

30 donde N_s es el número de sectores de rotor 101. El sensor de azimut que mide el ángulo azimut 104 de una o más palas 101 puede usarse para determinar los sectores que contienen una pala en un momento dado. De este modo un vector S que comprende como sus elementos los números de los sectores que comprenden una pala de rotor, puede determinarse a partir de los ángulos de límite de sector definidos por:

$$\varphi_{s, inicio} = (s-1) \frac{360}{N_s} \quad s = 1, 2, \dots, N_s$$

$$\varphi_{s, final} = s \frac{360}{N_s}$$

Es decir, para por ejemplo $N_s = 12$, el sector 2 se define para ángulos azimut en el intervalo $[30^\circ; 60^\circ]$.

35 La figura 2 ilustra un resumen del método de control. En este caso y a continuación el método de control según la presente invención se describe y muestra a modo de ejemplo mediante el uso de cargas de pala medidas por sensores de carga de pala. Sin embargo, los eventos de viento para cada sector y métodos de control descritos a continuación pueden basarse de manera similar adicional o alternativamente en otras señales de entrada que reflejan una condición estructural o del entorno de la pala tales como sensores de pérdida aerodinámica, acelerómetros de pala, sensores de velocidad del viento, sensores de desviación de pala, sensores de ángulo de ataque, medidores de deformación de pala o similares.

40 Basándose en las mediciones de los sensores de carga de pala 200 y el ángulo azimut 104 medido por el sensor de ángulo azimut, un detector de eventos 201 detecta si una de las palas 102 experimenta un evento de viento, en qué sector de rotor 101 y a qué ángulo azimut de rotor. Esta información está contenida en el vector de evento B_{evento} que indica si se detecta un evento en los sectores S . La salida del detector de eventos se usa posteriormente con las mediciones de los sensores de posición de paso 203 que miden el paso real de cada pala θ , y el sensor de velocidad de rotor opcional en un algoritmo de aprendizaje de paso 202 para estimar un desplazamiento de referencia de paso

45

individual adicional $\Delta\theta$ para las palas sometidas al evento de viento. Finalmente, estos desplazamientos de referencia de paso individual se añaden a la referencia de paso colectivo θ_{col} en un sistema de control de paso y opcionalmente en combinación con otros desplazamientos de paso individual y dan como resultado una referencia de paso de pala final $\theta_{ref, 204}$ para cada pala.

5 Un evento detectado puede desencadenar adicionalmente la siguiente acción: se envía una petición de referencia de válvula de sistema de paso máximo a un sistema de control de paso con el fin de obtener una tasa de paso máxima. Esto saturará la tensión de control del sistema de regulación de paso de la pala en la que se detecta que un evento es máximo.

10 En una realización de la invención, los desplazamientos de referencia de paso individual se añaden a la referencia de paso colectivo durante detecciones de evento aunque la tensión de control de sistema de regulación de paso se satura al máximo simultáneamente. Esto puede realizarse para permitir una transferencia suave o más uniforme del paso cuando se detiene el evento de viento, y la tensión de control de sistema de regulación de paso ya no se satura más al máximo.

15 Mediante la combinación del algoritmo de detección de eventos 201 y el algoritmo de aprendizaje de paso de evento 202 puede reducirse considerablemente el riesgo de cargas de flap/inclinación/guñada extremas durante ráfagas de viento extremas, porque el primer algoritmo de detección 201 detecta ráfagas de viento que aparecen en partes arbitrarias del plano de rotor mientras que el último algoritmo de aprendizaje de paso 202 encapsula esta información para adaptar los ángulos de paso individual θ de las palas siguientes de manera correspondiente.

20 Para cada sector en el plano de rotor se estiman la media μ_M y la desviación estándar σ_M del momento de flap y se actualizan cada vez que la pala pasa a través de un sector. Se usan estas medidas para estimar la carga de momento de flap esperada en los sectores.

25 La estimación de la carga de pala media μ_M , 303 tal como el momento de flap de pala medio en los sectores seleccionados 101 del sector número 3, 4, 7, 8, 11, y 12, se ilustra en la figura 3. La desviación estándar de la carga de pala σ_M puede estimarse de manera similar. Las curvas en el sistema de coordenadas superior muestran la carga de pala M_{Flap} , 200 tal como se mide sobre cada una de las tres palas de turbina en función del tiempo t . En el centro de la figura 3 se muestra el vector de sector S , es decir, qué sector pasa cada una de las palas en un momento dado durante la medición. Por ejemplo, las curvas para la pala A se muestran con una línea negra continua 301, y esta pala pasa en primer lugar a través del sector número 11, entra en el sector 12 y a continuación en el sector número 1, etc. De manera similar, la pala B se muestra en líneas discontinuas y la pala C se muestra en líneas de puntos. A partir de estas mediciones a continuación puede determinarse la media μ_M y la desviación estándar σ_M de la carga de pala para cada sector de rotor tal como se ilustra en las curvas inferiores en la figura 3 que muestran la carga de pala media a lo largo del tiempo para 6 sectores diferentes. Por motivos de claridad no se muestran todos los valores de sector. La media μ_M y la desviación estándar σ_M de la carga de pala se estiman y actualizan cada vez que una pala pasa a través de un sector. De este modo el valor medio y la desviación estándar relacionados con un sector de rotor sólo se actualizan cuando el sector contiene una pala. Esto proporciona una tasa de actualización de las cargas esperadas de 3P. Es decir, la carga de pala media en un sector dado se calcula a partir de muestras de las tres palas de turbina.

La estimación de $\mu_M(n)$ y $\sigma_M(n)$ en los diferentes sectores puede realizarse en una realización con el cálculo del promedio exponencial en función del número de muestra n :

$$40 \quad \mu_M(n) = \frac{T}{\tau_{Carga}} M_{Flap}(n) + \left(1 - \frac{T}{\tau_{Carga}}\right) \mu_M(n-1)$$

$$\psi_M(n) = \frac{T}{\tau_{Carga}} M_{Flap}^2(n) + \left(1 - \frac{T}{\tau_{Carga}}\right) \psi_M(n-1)$$

$$\sigma_M(n) = \sqrt{\psi_M(n) - \mu_M^2(n)}$$

45 donde T es el tiempo de muestreo, τ_{Carga} es la constante de tiempo del cálculo del promedio exponencial, y $\psi_M(n)$ es una variable intermedia usada para calcular $\sigma_M(n)$. Alternativamente, el valor medio y la desviación estándar de las cargas de pala pueden determinarse mediante más expresiones de desviación estándar y media linealizada estándar.

50 Además, como el momento de flap en una sección y la deformación en la misma sección están correlacionadas y son linealmente dependientes, y como la energía cinética puede hallarse a partir de la derivada de tiempo de la deformación, la energía cinética de cada sector puede estimarse por analogía a partir de la derivada del momento de flap de flexión de raíz medido M_{Flap} como:

$$E = \left(k \frac{dM_{Flap}}{dt} \right)^2$$

donde k es una constante de conversión usada para convertir la derivada de tiempo del momento de flap en la energía cinética de pala dependiendo por ejemplo de la rigidez de la pala de turbina y puede estimarse a partir de simulaciones o pruebas. Alternativa o adicionalmente, la energía cinética de pala puede estimarse a partir de desviaciones, aceleraciones o el desplazamiento angular de la pala.

Para cada sector en el plano de rotor, puede estimarse por tanto el valor medio μ_{ES} y la desviación estándar σ_{ES} de la energía cinética de pala y actualizarse cada vez que una pala pasa a través de un sector, y puede calcularse usando el mismo enfoque que el descrito anteriormente en relación con la determinación del valor medio y la estimación estándar de las cargas de pala.

El valor medio y la estimación estándar de las cargas de pala y opcionalmente de la energía cinética de sector también pueden usarse para detectar si se ha producido un evento de viento en un sector dado con el paso de pala. En la figura 4 se ilustra una visión global de una realización del algoritmo de detector de eventos.

El detector de eventos tal como se muestra en la figura 4 se basa tanto en el momento de flap de flexión de raíz como en la energía cinética de pala derivada del momento de flap de flexión de raíz. Sin embargo, el detector de eventos también puede basarse en las cargas de pala solamente o alternativamente en la energía cinética de pala solamente, o en diferentes combinaciones de los dos parámetros. El detector de eventos puede tener además en cuenta otros parámetros como mediciones de viento local en la detección de eventos.

El paso individual de una pala en un sector puede modificarse siempre que se detecte un evento en ese sector, y además para una determinada cantidad de tiempo después de que se haya producido un evento. En un sector dado, el inicio de una detección de eventos puede establecerse como una función tanto en el momento de flap de flexión de raíz como la energía cinética de pala derivada del momento de flap de flexión de raíz tal como se determina en un detector de carga de pala, 401, y en un detector de energía cinética 402. La motivación para un detector de energía cinética es reducir el tiempo de detección en algunos eventos de viento dinámicos. El detector de energía cinética es idéntico al detector de momento de flap a excepción de las señales de entrada. Entonces de manera continua se evalúa si un evento de viento detectado todavía está activo a partir de los umbrales tal como se describe a continuación y opcionalmente siguiendo un esquema de reducción de tiempo de detección de eventos 403 (basándose en las cargas de pala) u opcionalmente un esquema de mantenimiento de detección de eventos 404 (basándose en la energía cinética estimada), que en principio acorta o prolonga la duración del evento de viento detectado basándose en diferentes criterios. Esto se describe en más detalle en relación con las figuras 5 y 6. Si se detecta un evento de viento o bien 405 basándose en las cargas de pala M_{FLAP} o bien la energía cinética estimada E, el vector de evento de pala B_{EVENTO} que indica si se detecta un evento en los sectores que comprenden las palas se establece de manera correspondiente, y se determina una contribución de paso de pala individual $\Delta\theta$ y se añade a la referencia de paso de pala θ_{ref} . Además, un evento detectado en un sector puede afectar a los umbrales en los sectores anteriores de este modo preparando a una pala entrante para el evento de viento detectado. Esto se realiza en el esquema de reducción de umbral de pala 406 en el que el factor de reducción de umbral k se determina influyendo en el umbral de carga 406 y opcionalmente el umbral de energía cinética 407. Esto se describirá en más detalle más adelante.

Con el fin de determinar desviaciones con respecto a las cargas esperadas en un sector dado, se compara la carga de pala absoluta como M_{Flap} medida con uno o más umbrales de carga diferentes T. Un umbral puede ser generalmente una constante predefinida fija o puede ser una función de parámetros medidos o estimados como la desviación estándar y/o media de carga de pala determinada. Pueden usarse conjuntos de umbrales diferentes detectando de ese modo un evento de viento en un sector basándose en un conjunto de condiciones.

En una realización de la invención se aplican tres umbrales diferentes sobre las cargas de pala:

$$T_1 = M_{Flap,Min}$$

$$T_2 = \mu_M + N_M(\mu_M)\sigma_M$$

$$T_3 = M_{Flap,Max}(\mu_M)$$

En este caso, el umbral T_1 se establece como un límite de momento de flap mínimo constante por debajo del cual no se produce ningún evento de viento independientemente de los valores de los demás umbrales. El umbral T_2 es una función que varía a lo largo del tiempo dependiendo de la carga de pala media derivada y las desviaciones estándar. $N_M(\mu_M)$ es un número, que puede establecerse como una constante predefinida tal como por ejemplo un factor entre 1 y 6, o 2 y 4, tal como 3), o puede determinarse alternativamente como un parámetro que varía a lo largo del tiempo, de un sector a otro, y dependiendo de parámetros de turbina eólica tales como por ejemplo la carga de pala

media, la velocidad de rotación, el ángulo de paso de pala real, la velocidad del viento media o similares. De este modo el método de control puede ajustarse para ser más o menos sensible dependiendo directamente de estas condiciones. El número de desviaciones estándar usadas puede determinarse mediante el procesamiento posterior de simulaciones por ordenador sobre cargas de pala aceptables. El tercer umbral T_3 se establece como un momento de flap de pala aceptable máximo que es una función de la carga de pala media tal como se halla de las simulaciones. Este umbral cubre especialmente situaciones a cargas de pala medias elevadas, en las que de lo contrario habría un riesgo aumentado de detectar un evento demasiado tarde. Por tanto, la función T_3 puede elegirse como una función que disminuye lineal o exponencialmente en μ_M . Los umbrales T_2 y T_3 pueden mantenerse constantes a medida que la pala pasa a través de un sector, y actualizarse cuando la pala sale del sector. Además, los umbrales pueden derivarse a partir de muestras de las palas de ataque solamente o pueden determinarse incluyendo las mediciones realizadas en la misma pala también. Además, puede establecerse un cuarto umbral T_4 como un límite máximo por encima del cual se produce un evento de viento independientemente de la carga de pala media determinada de otro modo:

$$T_4 = M_{\text{Flap,Alarma}}$$

El umbral resultante se aumenta desde tres umbrales diferentes como:

$$T_M = \max(T_1, \min(T_2, T_3))$$

O en caso del umbral superior absoluto mencionado anteriormente también se aplica:

$$T_M = \min(T_4, \max(T_1, \min(T_2, T_3)))$$

De este modo no se detecta ningún evento cuando $|M_{\text{Flap}}| \leq T_M$ que se somete a prueba de manera continua cuando una pala pasa a través de un sector. La motivación para los umbrales es hallar un equilibrio entre dos tipos de errores de detección; un tipo de error de falsa alarma en el que se detecta un evento sin que sea el caso y otro tipo de error en el que se pierde una detección de eventos. Así los umbrales se establecen con el fin general de, por un lado, detectar un evento lo antes posible, mientras que por otro lado se detecta lo menos o lo más tarde posible (preferiblemente nada) en el caso de que en realidad no tenga lugar ningún evento.

Se establecen valores y funciones de umbral similares para el detector de energía cinética 402, y la detección de un evento a partir de la energía cinética es idéntica al detector de momento de flap descrito anteriormente a excepción de las señales de entrada.

Con el fin de reducir la influencia de falsas alarmas y reducir el tiempo de detección puede implantarse un esquema de reducción de tiempo de detección de eventos. El concepto de esto se ilustra en la figura 5. La detección de eventos de viento se inicia en t_1 , donde la carga de pala medida M_{Flap} supera el umbral T . Por la figura puede observarse que el detector de eventos indicará que el evento se ha detenido en t_2 cuando el momento de flap de pala medido está controlado $M_{\text{Flap}} < M_{\text{control}}$, tal como se determina mediante la disminución de carga de pala o habiendo disminuido por un determinado factor de carga k_{max} dado por $M_{\text{Flap}} < M_{\text{control}} = \text{Max} - k_{\text{max}}(\text{Max} - T)$, tal como se ilustra en la figura 5. De este modo la detección de viento se detiene antes. Alternativamente, la detección de viento puede detenerse cuando la carga de pala medida está de nuevo por debajo del umbral.

Según una realización adicional, la detección puede establecerse para iniciarse de nuevo en t_3 si la pendiente del momento de flap cambia de negativa a positiva por una determinada cantidad de tiempo tal como se ilustra en la figura 5.

Además, si el detector de energía cinética sólo detecta un evento mientras la energía cinética está por encima del umbral de energía cinética, la carga de pala puede no estar todavía controlada en todas las situaciones puesto que la derivada de la carga de pala puede disminuir antes de que la carga de pala haya alcanzado su máximo. Esto se ilustra en la figura 6. La curva superior ilustra una carga de pala medida $M_{\text{Flap}} 200$, la curva central muestra la derivada correspondiente de la misma, es decir, la tasa de cambio de la carga de pala, 601, y la curva inferior ilustra la energía cinética correspondiente $E 602$ derivada de la misma, que es proporcional a la tasa de cambio de la carga de pala al cuadrado. Por tanto, puede implementarse un esquema de mantenimiento de detección de eventos 404 en el que se mantiene activa la etiqueta que indica un evento hasta que la tasa de cambio del momento de flap cambia de signo de positivo a negativo en el momento t_2 .

Cuando se detecta un evento en una pala en un sector dado, la pala puede detectar el evento al salir del/de los sector(es) en el/los que se produce el evento, por ejemplo si un evento cubre los sectores 2, 3, y 4 y se detecta en el sector 4. Por tanto, la pala retrasada podría beneficiarse de la información de evento de la pala de ataque. Este concepto de un esquema de reducción de umbral de pala 406 puede implementarse tal como se ilustra en la figura 11.

Por la figura 7 puede observarse que cuando se detecta un evento 701 mediante la pala B, 102, el umbral T visto por

la pala A se reduce 702 en un factor k hasta que la pala A alcanza la posición de azimut en la que se detectó el evento por la pala B en primer lugar. Es decir, la detección de un evento por la pala B aumenta la sensibilidad de detección para la pala A. Los umbrales de momento de flap y energía cinética pueden reducirse mediante este esquema de reducción de umbral de pala o cualquiera de estos. El umbral T reducido resultante puede determinarse entonces como:

$$T_M = \min(T_4; \max(T_1; k \cdot \min(T_2; T_3)))$$

El factor k por el que se reducen los umbrales puede alcanzar un valor predefinido tal como en el intervalo de [0,85-0,98] o puede determinarse en función de por ejemplo el ángulo azimut φ_{azi} , y puede determinarse y ajustarse de manera fina a partir de simulaciones numéricas.

La figura 8 ilustra cómo el paso de las palas individuales puede actualizarse según el método de control propuesto. Una muestra de tiempo de cargas de pala medidas M_{Flap} para la pala de rotor A se muestra en el sistema de coordenadas superior junto con los valores de los umbrales; el umbral mínimo absoluto T_1 , el umbral máximo T_3 , y el umbral T_2 que es una función de la carga de pala media y la desviación estándar. El segundo conjunto de curvas de la parte superior muestran el paso de pala real θ como se mide de manera continua para la pala A, 801, y la referencia de paso $\theta_{ref,A} = \theta_{col} + \Delta\theta$, 802. Los segmentos de curva en el tercer sistema de coordenadas muestran en qué sector de rotor está la pala de rotor A, y las curvas inferiores ilustran las contribuciones de paso individual determinadas relacionadas con los sectores afectados 1 y 2 (811 y 812, respectivamente) que se añadirán al paso de pala de las palas que pasan a través de estos sectores. Ventajosamente sólo puede almacenarse para cada sector la contribución de paso de evento requerida para mantener el momento de flap controlado.

Como se indica en la figura 8 se añade una etapa de contribución de paso de evento de $\Delta\theta$ a la referencia de paso colectivo cuando el evento se detecta en el momento t_1 . Cuando la carga vuelve a estar controlada (en el momento t_2) la detección se detiene, y la contribución de paso requerida se mantiene constante al valor de paso θ_{req} hasta que la carga disminuye por debajo del umbral de momento de flap. Esta contribución de paso requerida puede determinarse como la cantidad de contribución de paso con la pala en el momento en el que la carga de pala está controlada. Cuando la carga disminuye por debajo del umbral de momento de flap 803, la contribución de paso puede disminuirse 804 por ejemplo exponencial o linealmente a lo largo del tiempo.

Con el fin de corregir la dinámica del sistema de regulación de paso, puede implementarse una compensación de retraso de sistema de regulación de paso según una realización de la invención. El concepto de esto se ilustra en la figura 9. Este concepto es beneficioso para las palas retrasadas; es decir, si una pala A detecta un evento y almacena una contribución de paso requerida para un determinado sector tal como el sector 3 tal como se ilustra en la figura, entonces la pala retrasada C podría iniciar ventajosamente su secuencia de paso antes de entrar en este sector 3. De este modo pueden reducirse algo las cargas extremas sucesivas. En la figura 9 se indica la compensación de retraso de sistema de regulación de paso mediante τ_{paso} , que es un parámetro que depende del sistema de actuación de paso, ω_{rot} es la velocidad de rotación del rotor, y γ_{comp} es el correspondiente ángulo de compensación.

La figura 10 muestra los resultados de una simulación de prueba del método de control de paso según una realización de la invención. En la figura se muestra de arriba abajo la velocidad del viento entrante V, la etiqueta de evento para una de las palas (B en este caso) que indica que se detecta un evento en este sector en el momento $t=52$ s, y una variable que determina qué sector contiene la pala B. Como puede observarse por esta curva, el evento se detecta cuando el sector número 1 contiene la pala B y el evento se termina cuando la pala está en el sector 2. Las dos curvas siguientes muestran la contribución de paso resultante para las dos secciones de rotor afectadas 1 y 2 y la curva inferior muestra entonces la contribución de paso de evento para la pala B afectada cuando en primer lugar pasa a través de las secciones 1 y 2 en las que se detecta el evento, y entonces sucesivamente cuando la pala vuelve a las mismas secciones una revolución más tarde en el momento $t=56,6$, sin embargo a un grado mucho menor.

La figura 11 ilustra la determinación de una contribución de paso de sector según una realización de la invención mediante el suavizado de contribuciones de paso de sectores adyacentes.

En general, los límites entre los diferentes sectores de rotor pueden ser o bien fijos o bien libres. Es decir, cuando una pala cambia de un sector a otro, la contribución de paso de sector de rotor puede cambiar de cero a algún valor grande o a la inversa (tal como se ilustra mediante la curva 1102), lo que no siempre puede ser óptimo en relación con la reducción de carga o carga del sistema de regulación de paso.

Según esta realización, las contribuciones de paso de sector de rotor se suavizan por los sectores con el fin de obtener una transferencia menos brusca del paso por los sectores. El suavizado de sector puede realizarse mediante por ejemplo interpolación entre contribuciones de referencia de paso de sectores adyacentes. Esto se ilustra en la figura 11 con una interpolación lineal entre los cuatro sectores utilizando el centro de los sectores como puntos de interpolación dando como resultado la contribución de paso que varía linealmente mostrada por la línea gruesa 1100. El eje x es el ángulo azimut de pala φ y el eje y es la contribución de paso de sector de rotor $\Delta\theta$. La

interpolación puede ser alternativamente de orden superior.

5 La contribución de paso individual deberá reducirse a cero de una manera inteligente cuando ha desaparecido el evento de viento. Como se mencionó anteriormente esto puede realizarse de manera muy simple estableciendo la contribución de referencia de paso para un sector dado en cero cuando la carga de pala está por debajo del umbral de carga de sector. Esto, sin embargo, puede provocar involuntariamente en algunas situaciones que la pala regule su paso entrando en la trayectoria del viento momentáneamente tras un evento.

10 En la figura 12 se ilustra un diagrama de bloques de un esquema de control según una realización de la invención en el que la contribución de paso individual $\Delta\theta_s(n)$ para un sector de rotor s en la etapa de tiempo n se actualiza y determina en función de la contribución de paso para el mismo sector s pero para una etapa de tiempo anterior $(n-1)$ $\Delta\theta_s(n)$ $(n-1)$. Esta actualización o corrección de la referencia de paso se realiza comparando de manera continua los datos de sensor de pala medidos tal como la carga de pala M con los datos de sensor de pala esperados basándose en información de la última pala en ese sector. En la figura esto se ilustra mediante comparación de la carga de pala medida M con el umbral de carga de sector T . Se aplica un controlador P en el que la señal de error se define mediante la diferencia entre el umbral de carga de sector T y la carga de pala real M . La reducción de la contribución de referencia de paso de sector se halla entonces multiplicando la señal de error por el factor de ganancia proporcional. Finalmente, se halla la contribución de referencia de paso resultante restando la reducción de contribución de referencia de paso de sector de la contribución de referencia de paso de sector actual. Alternativa o adicionalmente puede aplicarse un controlador PI o PID.

20 De este modo la tasa de reducción de contribución de referencia de paso de sector será elevada si la diferencia entre el umbral de carga de sector y la carga de pala real es grande y baja si la diferencia es baja. De este modo, puede obtenerse una reducción más gradual de la contribución de paso de sector de pala basándose en las circunstancias físicas y reales.

REIVINDICACIONES

1. Método de control de una turbina eólica que comprende palas unidas a un buje de rotor para la rotación en un plano de rotor y un sistema de control para regular de manera individual el paso de las palas en relación con el buje, comprendiendo el método las etapas de
 - 5 - dividir el plano de rotor (100) en un número de sectores (101);
 - determinar los sectores individuales para cada pala (102) durante la rotación por medio de un sensor de ángulo azimut (104);
 - obtener datos de sensor desde un sensor de pala (200) sobre una pala individual al menos en parte durante un paso de un sector durante la rotación,
 - 10 caracterizado por que el método comprende además:
 - comparar los datos obtenidos con datos que representan datos de sensor de pala sobre la misma u otra pala al menos en parte durante un paso anterior del mismo sector durante la rotación, detectando de ese modo un evento (201) para sectores individuales del plano de rotor,
 - 15 - determinar una contribución de paso individual ($\Delta\theta$) para un sector dado sólo cuando se detecta un evento en dicho sector, y
 - regular el paso de las palas según la contribución de paso individual para el sector dado al menos en parte durante el paso del sector.
2. Método de control de una turbina eólica según la reivindicación 1, en el que los datos de sensor comprenden datos de carga de pala procedentes de un sensor de carga de pala (200).
- 20 3. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los datos de sensor comprenden datos de pérdida aerodinámica de pala procedentes de un sensor de pérdida aerodinámica de pala.
4. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la detección de eventos (201) comprende además la etapa de calcular para los sectores individuales del plano de rotor una desviación con respecto a un estado de funcionamiento normal definido de los datos de sensor de pala obtenidos relacionados con los sectores individuales.
- 25 5. Método de control de una turbina eólica según la reivindicación 4, en el que el cálculo comprende la etapa de comparar un dato de sensor de pala instantáneo relacionado con un sector con un umbral de carga, siendo el umbral de carga una función de los datos de sensor de pala medios y un número de desviaciones estándar.
- 30 6. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además la detección de la orientación espacial de la turbina eólica y en el que la detección de eventos comprende la etapa de comparar datos de sensor de pala instantáneos relacionados con un sector con un umbral de carga, siendo el umbral de carga una función de la posición espacial.
- 35 7. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 5-6, en el que el método comprende además reducir el umbral de carga de un primer sector en un factor, cuando la carga de pala instantánea supera el umbral de carga en un segundo sector, estando el segundo sector alejado de dicho primer sector menos de un número predefinido de sectores.
8. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la detección de eventos comprende la etapa de comparar un dato de sensor de pala instantáneo relacionado con un sector con un umbral de carga máximo que refleja un dato de sensor de pala aceptable como máximo predeterminado.
- 40 9. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 4-8, en el que el cálculo comprende la etapa de comparar una energía cinética instantánea derivada de la carga de pala relacionada con un sector con un umbral de energía cinética, siendo el umbral de energía cinética una función de la energía cinética de pala media y un número de desviaciones estándar.
- 45 10. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se regula el paso de la pala individual según la contribución de paso individual hasta que disminuye la carga de pala instantánea relacionada con dicho sector dado.
- 50 11. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 2-10, en el que se regula el paso de la pala individual según la contribución de paso individual hasta que la carga de pala instantánea

- relacionada con dicho sector dado disminuye en un factor de carga en relación con una carga de pala máxima obtenida tras la detección del evento.
12. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la contribución de paso individual es una función de la velocidad de rotación del rotor.
- 5 13. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la regulación del paso de pala individual se inicia con una distancia de compensación angular antes de que la pala entre en dicho sector dado.
- 10 14. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la contribución de paso individual se determina además en función de la posición de la pala dentro del sector dado.
- 15 15. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de control comprende memoria adaptada para datos relacionados con los datos de sensor de pala obtenidos, y en el que el método comprende determinar una contribución de paso requerida de una pala retrasada a partir de datos procedentes de sensores sobre una pala de ataque.
- 16 16. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la contribución de paso individual se determina en función del gradiente de los datos de sensor de pala.
- 17 17. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 5-16, en el que la contribución de paso individual se ajusta en función de la diferencia entre el umbral de carga de sector y la carga de pala medida.
- 20 18. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el plano de rotor se divide en sectores de 5-30 grados, tal como 5-20 grados tal como de aproximadamente 10 grados.
- 19 19. Método de control de una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el plano de rotor se divide en sectores de igual tamaño.
- 25 20. Turbina eólica que comprende palas unidas a un buje de rotor para la rotación en un plano de rotor, un sistema de regulación de paso para regular el paso de las palas y un sistema de control para regular de manera individual el paso de las palas en relación con el buje, en la que el sistema de control, para sectores individuales (101) del plano de rotor (100) determinados por medio de un sensor de ángulo azimut (104), está dispuesto para obtener datos de sensor de pala (200) relacionados con un sector y desde un sensor de pala sobre una pala individual (102) al menos en parte durante un paso del sector durante la rotación, caracterizada por que el sistema de control está dispuesto además para:
- 30 - comparar los datos obtenidos con datos relacionados con el mismo sector y que representan datos de sensor de pala sobre la misma u otra pala al menos en parte durante un paso anterior del mismo sector durante la rotación detectando (201) de ese modo un evento para sectores individuales del plano de rotor,
- 35 - determinar una contribución de paso individual ($\Delta\theta$) para un sector dado sólo cuando se detecta un evento en dicho sector, y
- de manera individual regular el paso de las palas según la contribución de paso individual para el sector dado al menos en parte durante el paso de pala del sector.
- 40 21. Turbina eólica según la reivindicación 20, en la que los datos de sensor comprenden datos de carga de pala procedentes de un sensor de carga de pala.
22. Turbina eólica según la reivindicación 20, en la que el sistema de control está configurado para realizar el método de control según cualquiera de las reivindicaciones 1-19.
- 45 23. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 20-22, en la que el sistema de control comprende memoria adaptada para datos procedentes de sensores de carga sobre una pala de ataque, pudiendo el sistema de control determinar una contribución de paso requerida de una pala retrasada a partir de los datos en la memoria.
24. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 20-23, en la que cada pala comprende un sensor de carga de pala colocado a la misma distancia respecto al buje.
- 50 25. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 20-24, en la que una pala comprende un número de sensores de pala colocados a diferentes distancias respecto al buje, definiendo de ese modo un número de subsectores para cada sector individual del plano de rotor, y en la que el sistema de control para cada subsector individual puede detectar un evento obteniendo datos de carga de pala relacionados con dicho

subsector.

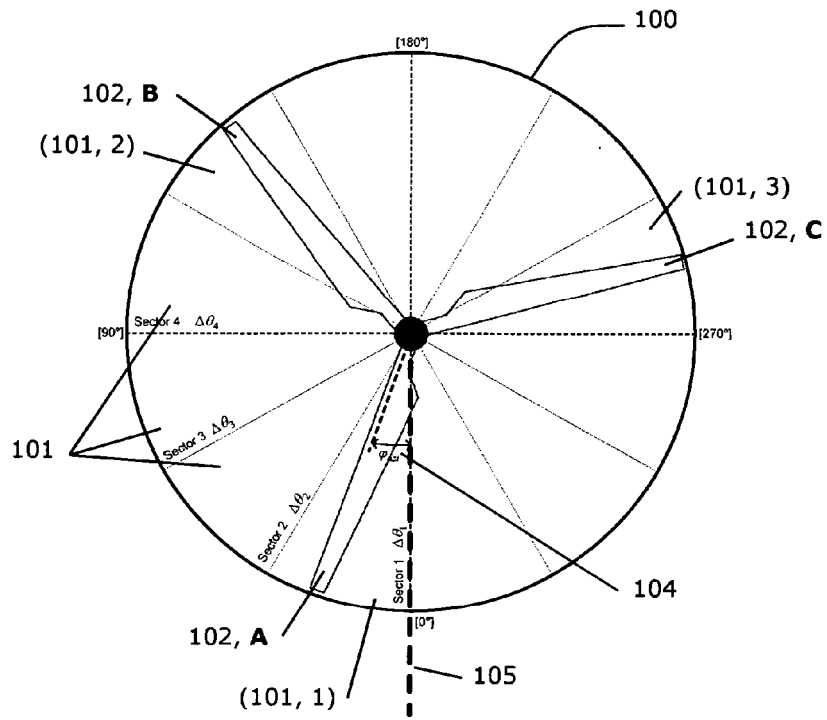


Fig. 1

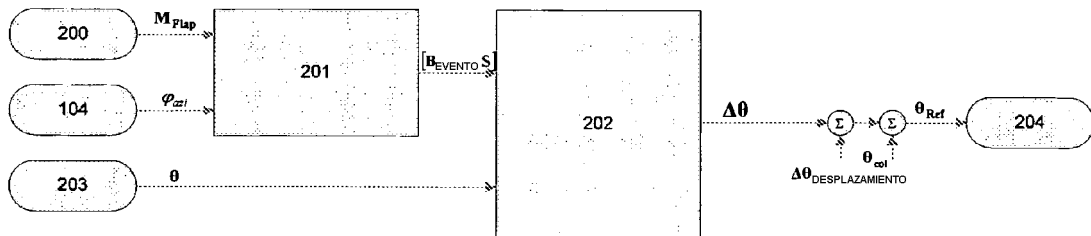


Fig. 2

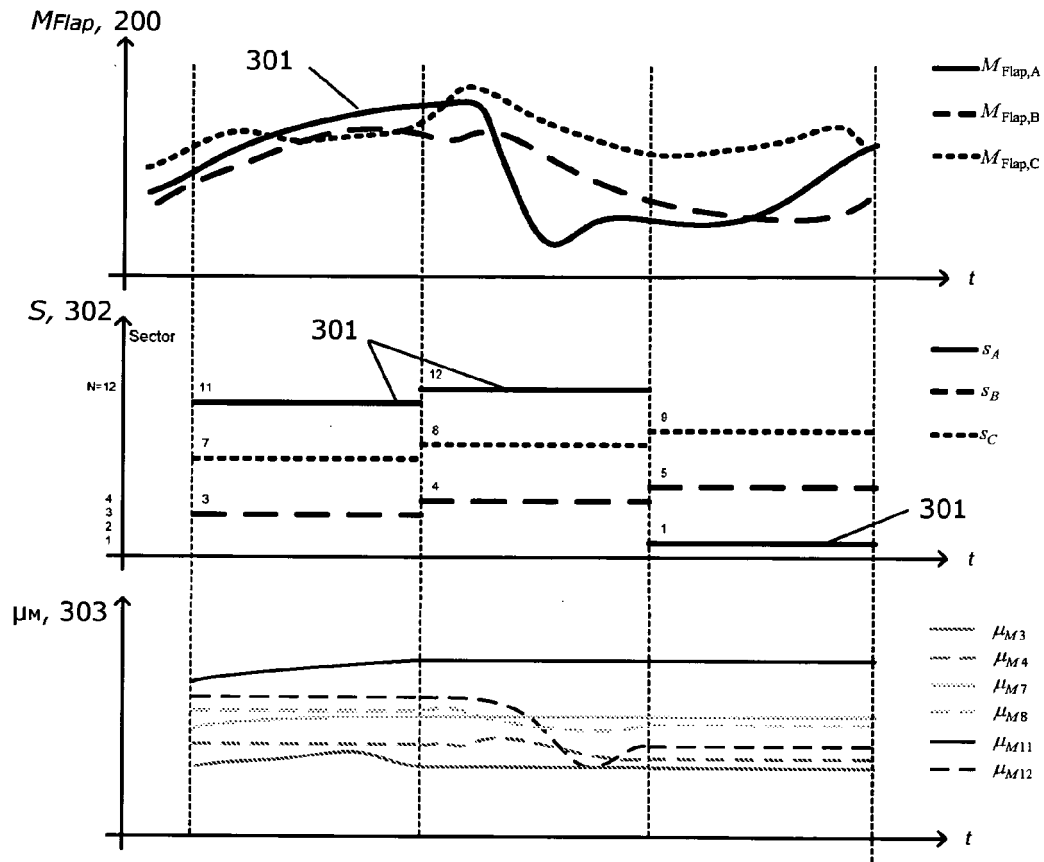


Fig. 3

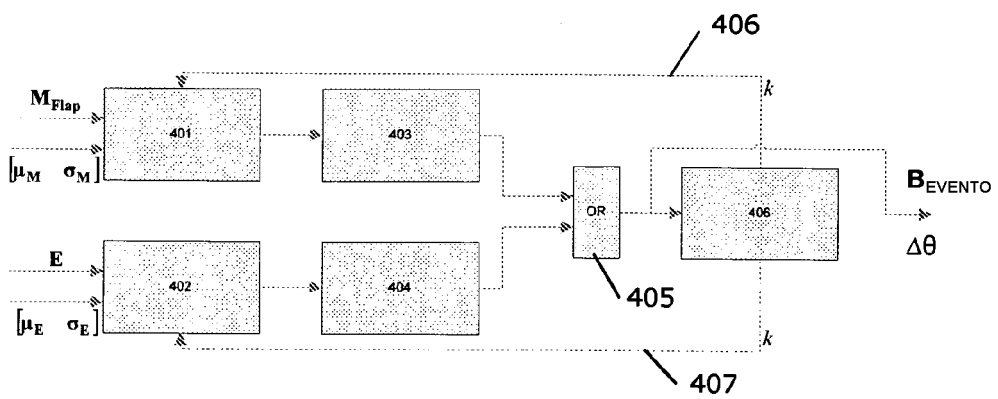


Fig. 4

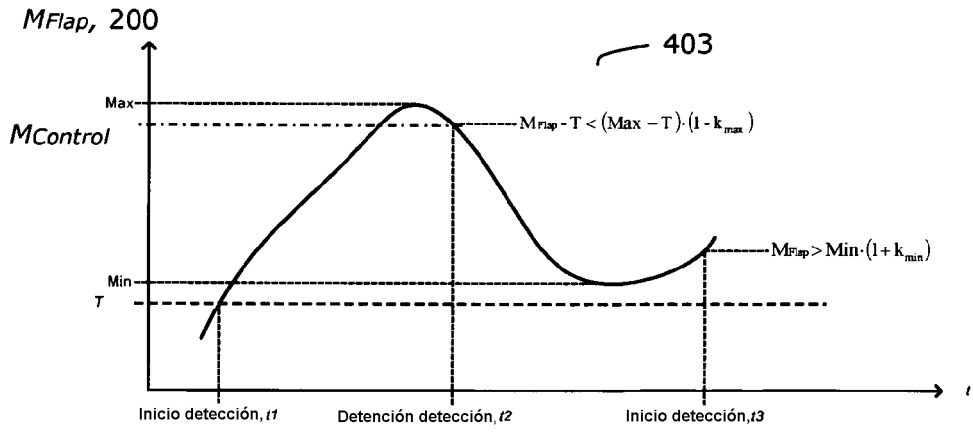


Fig. 5

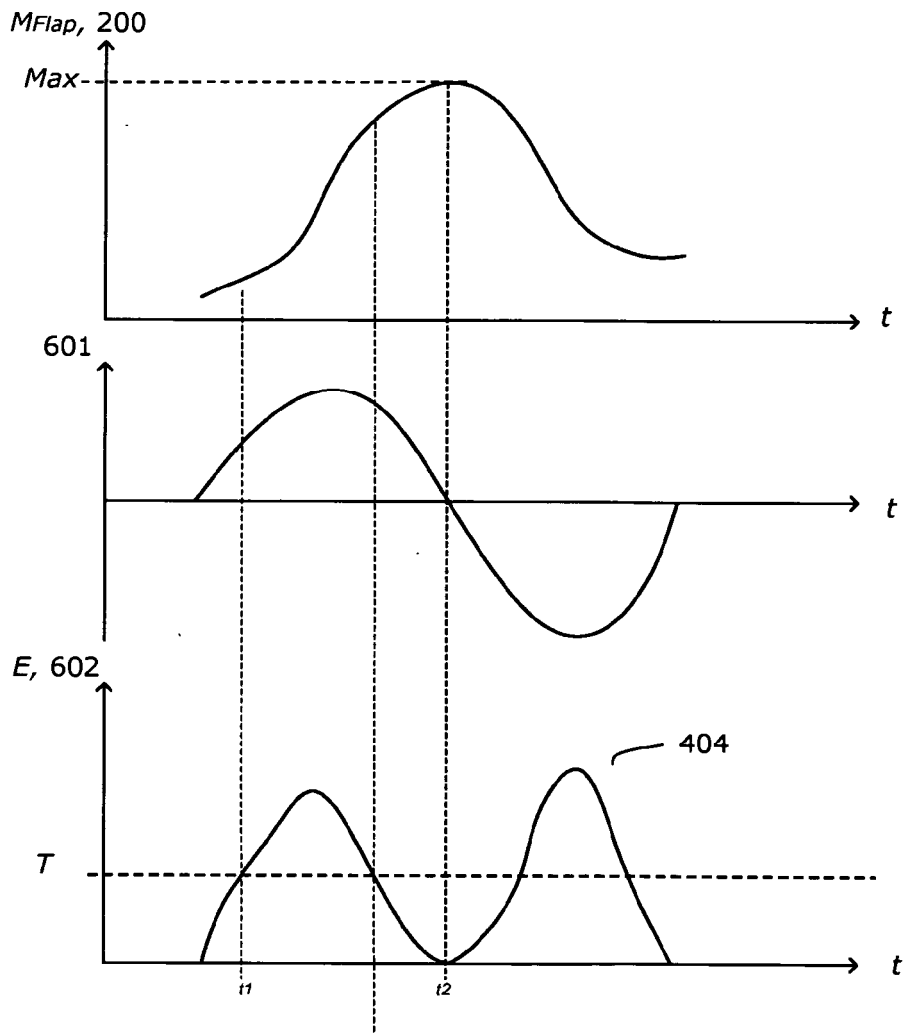


Fig. 6

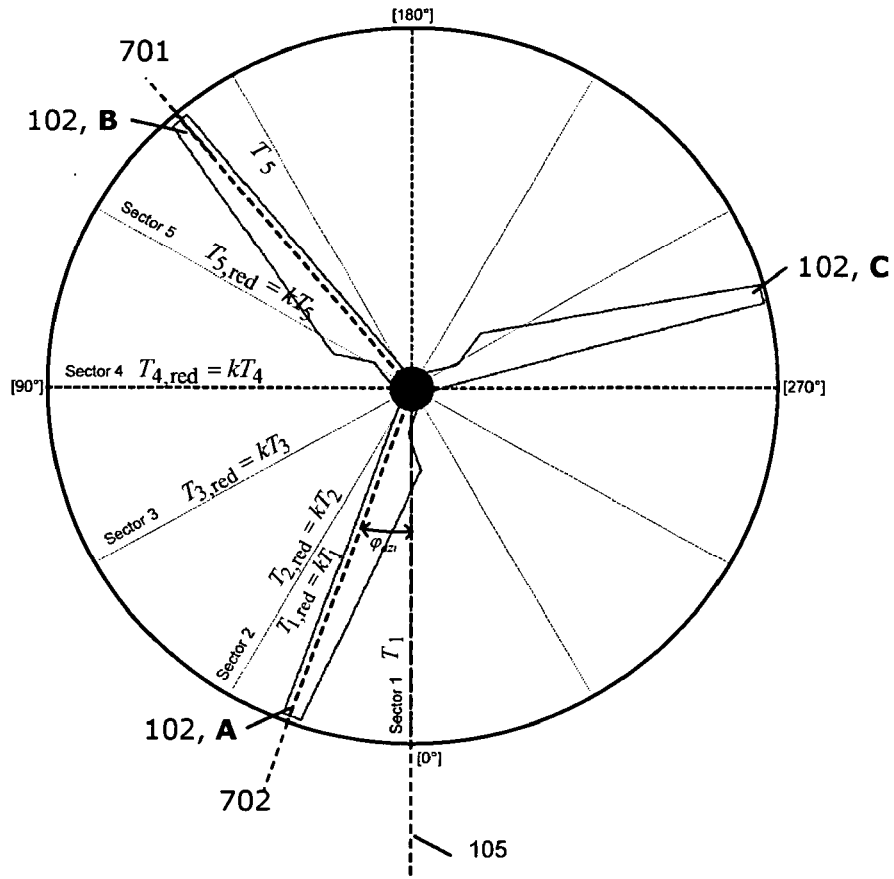


Fig. 7

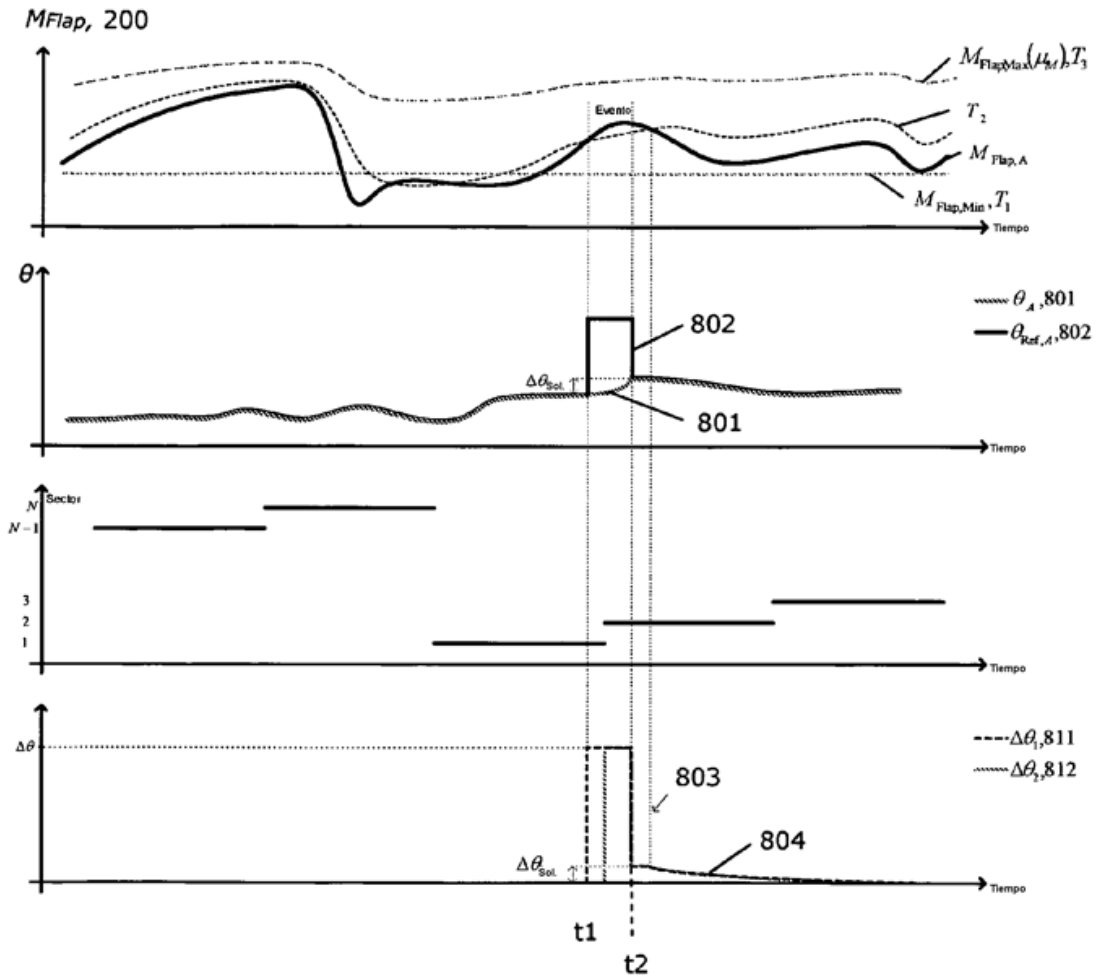


Fig. 8

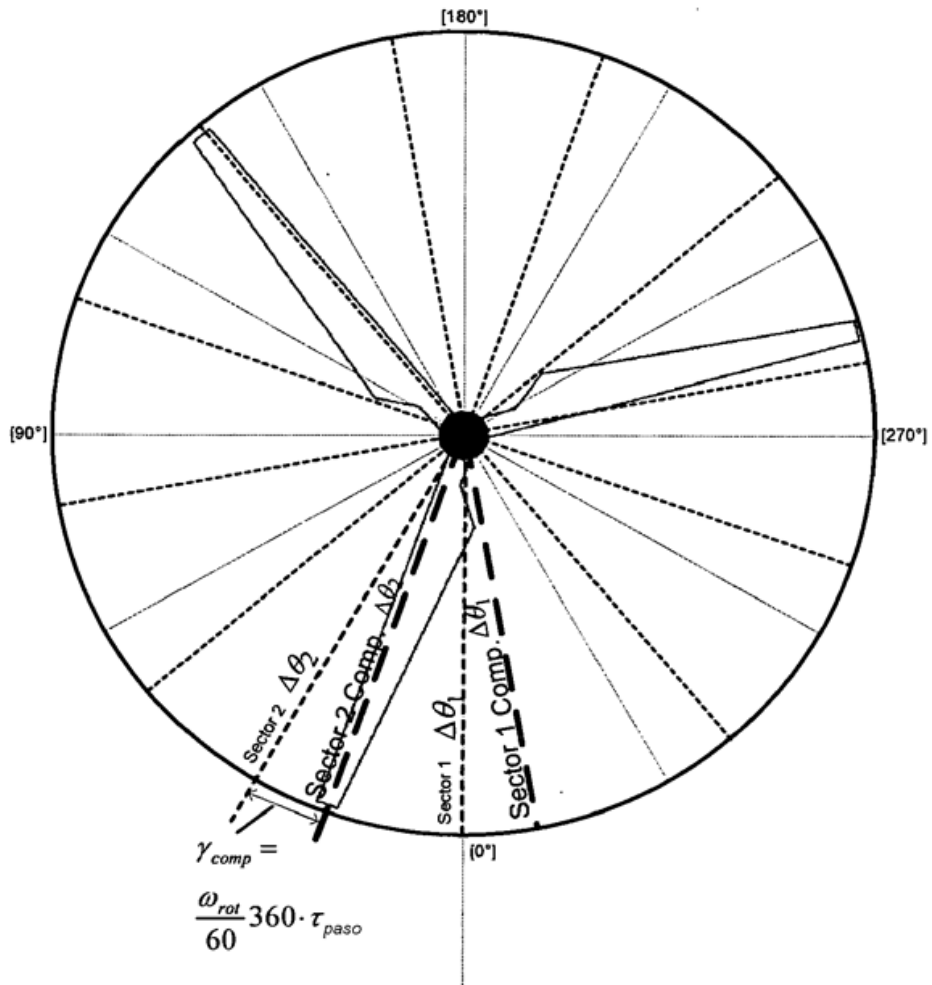


Fig. 9

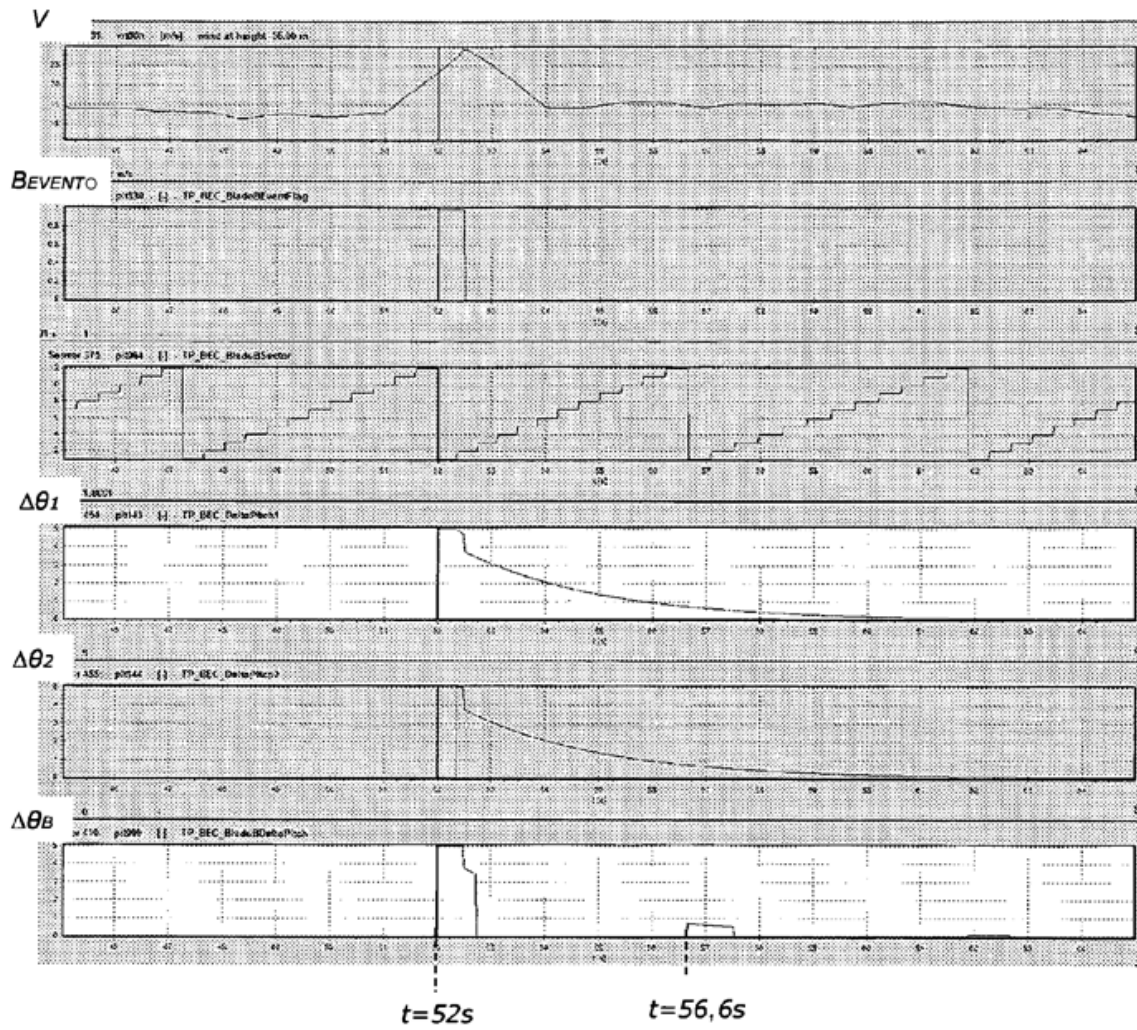


Fig. 10

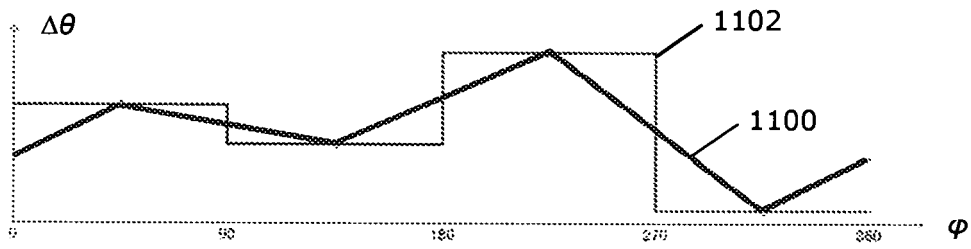


Fig. 11

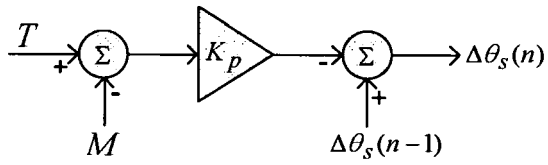


Fig. 12