

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 028 862**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.07.2021** **E 21184542 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.02.2025** **EP 4116576**

54 Título: **Procedimiento para identificar una carga extrema en una instalación de energía eólica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
20.06.2025

73 Titular/es:

WOBEN PROPERTIES GMBH (100.00%)
Borsigstraße 26
26607 Aurich, DE

72 Inventor/es:

VOLLACK, STEPHAN y
VON ASWEGE, ENNO

74 Agente/Representante:

ERVITI ARBAIZA, Blanca María

ES 3 028 862 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

Procedimiento para identificar una carga extrema en una instalación de energía eólica

- 5 La presente invención se refiere a un procedimiento para identificar una carga extrema asimétrica provocada por una ráfaga de viento que actúa sobre una instalación de energía eólica. La presente invención también se refiere a un procedimiento para controlar una instalación de energía eólica para reducir cargas extremas. La invención se refiere también a una instalación de energía eólica para llevar a cabo al menos uno de los dos procedimientos.
- 10 Las instalaciones de energía eólica generan potencia eléctrica a partir del viento y suelen estar configuradas como las llamadas instalaciones de energía eólica de eje horizontal, cada una de ellas con un rotor aerodinámico con varias palas de rotor, en particular tres. Durante la operación, estas palas de rotor barren un campo de rotor a medida que el rotor aerodinámico gira. Los rotores de los aerogeneradores modernos tienen un diámetro de más de 100 m, a veces de más de 150 m. Esto permite generar mucha energía eólica, pero también da lugar a grandes cargas. Sobre todo en caso de ráfagas de viento, pueden producirse a corto plazo cargas extremas elevadas, que también pueden producirse solo localmente en el gran campo de rotor. Esto puede generar cargas asimétricas que pueden suponer una carga adicional para la instalación de energía eólica.
- 15 Para reducir dichas cargas de la instalación de energía eólica, se puede vigilar de forma continua la velocidad del viento y/o la carga sobre las palas de rotor. Si se identifica una carga demasiado elevada en el rotor aerodinámico o en las palas de rotor, las palas de rotor se pueden girar ligeramente hacia afuera del viento en su ángulo de ataque para reducir la carga o evitar un aumento adicional de la misma.
- 20 Sin embargo, aquí puede surgir el problema de que la elevada carga ya ejercida sobre el rotor aerodinámico haya provocado una flexión correspondiente de la torre de una instalación de energía eólica. La torre queda así -para decirlo en pocas palabras- ligeramente empujada hacia atrás o desviada hacia atrás. Al iniciar la reducción de carga, también se reduce la presión sobre el rotor aerodinámico, de modo que la instalación de energía eólica oscila de vuelta, al menos en la zona de la cabeza de la torre. Esto, a su vez, supone una tensión para la torre, que también debe evitarse.
- 25 Para identificar dichas cargas en una fase temprana, también se pueden utilizar dispositivos de medición para detectar la velocidad de viento, que pueden medir la velocidad de viento a una determinada distancia delante del rotor aerodinámico. Esto permite detectar una ráfaga de viento que se aproxima. Este tipo de detección temprana se puede lograr mediante un sistema de medición LiDAR, pero estos sistemas LiDAR pueden ser costosos y propensos a errores en condiciones de aire desfavorables, especialmente en aire muy contaminado, incluido aire con fuertes lluvias.
- 30 El documento US 2021/115896 A1 Se refiere a un procedimiento para reducir cargas sobre una pala de rotor. Está previsto reconstruir una o más señales de carga de pala de rotor. El documento US 2014/178197 A1 trata de un ajuste de pala individual en el que el plano del rotor está dividido en varios sectores. Los sectores individuales se determinan para cada pala durante la rotación utilizando un sensor de ángulo azimutal correspondiente.
- 35 La presente invención se basa por tanto en el objeto de abordar al menos uno de los problemas mencionados anteriormente. En particular, se propondrá una solución para identificar y/o evitar o reducir una carga extrema asimétrica causada por una ráfaga de viento. Se debería proponer al menos una solución alternativa a las soluciones conocidas hasta ahora.
- 40 Según la invención se propone un procedimiento según la reivindicación 1. El procedimiento se refiere por tanto a la identificación de una carga extrema asimétrica causada por una ráfaga de viento que actúa sobre una instalación de energía eólica. Una carga extrema es una carga que excede un valor umbral de carga predeterminable. Una carga extrema asimétrica es aquella que no actúa uniformemente sobre el rotor de la instalación de energía eólica, sino de forma puntual, es decir, sólo en una parte del campo de rotor.
- 45 La instalación de energía eólica subyacente tiene un rotor con al menos tres palas de rotor, donde las palas de rotor son ajustables en su ángulo de pala y el rotor barre un campo de rotores con sus palas de rotor.
- 50 El procedimiento incluye la detección continua de una carga de pala para cada pala de rotor. En particular, la carga de pala se puede detectar de forma continua o al menos casi continua. La detección también puede realizarse, por ejemplo, a intervalos de tiempo predeterminados, pero estos deben ser lo suficientemente pequeños como para que se detecte una carga de pala al menos tres veces por revolución a la velocidad de
- 55

rotación nominal del rotor. Preferiblemente la carga de pala debe detectarse con mucha más frecuencia, en particular al menos diez o veinte veces por revolución del rotor. Preferentemente, la carga de pala se detecta al menos cada 60° de revolución del rotor, en particular al menos cada 30° de revolución del rotor.

5 La carga de pala se puede medir en particular midiendo una carga, por ejemplo, mediante una ganga extensiométrica, en una raíz de pala de cada pala de rotor o en la pala de rotor cerca de la raíz de pala, en particular a una distancia máxima de 10 m desde la raíz de pala en la pala de rotor.

10 Se propone además que, para al menos un sector del campo de rotor, se determine al menos un perfil de carga sectorial temporal a partir de cargas de pala detectadas de diferentes palas de rotor con la misma posición azimutal. Este perfil de carga sectorial describe un perfil temporal de una carga de las palas de rotor en el sector e incluye un perfil extrapolado para un período temporal futuro. De este modo, para el al menos un sector se registra una carga de pala de la pala de rotor que está situada en el sector. El rotor continúa girando en consecuencia, de modo que después de un tiempo otra pala de rotor entra en el área del sector en consideración y la carga de pala para esta pala de rotor se registra y se incluye en el perfil de carga sectorial de este sector.

20 Estas dos cargas de pala ya pueden representar un perfil temporal. Este perfil temporal puede extrapolarse a lo largo del tiempo, por ejemplo, mediante una regresión lineal. Por ejemplo, si la carga de pala de una primera pala de rotor en el sector considerado es el 40 % de una carga de pala de referencia en el primer instante temporal, y la carga de pala de la siguiente pala de rotor es el 50 % de la carga de pala de referencia en el siguiente instante temporal, se puede asumir un 60 % de la carga de pala de referencia como un valor extrapolado para un tercer instante temporal y, por tanto, también para una tercera pala de rotor. El perfil desde el segundo al tercer instante temporal es por tanto el perfil extrapolado del perfil de carga sectorial.

25 La rotación del rotor se denomina rotación en dirección azimutal y, en consecuencia, las posiciones de las palas de rotor con respecto a esta rotación en dirección azimutal se denominan posiciones azimutales.

30 Para determinar un perfil de carga sectorial temporal, se propone que las cargas de pala se detecten o se tengan en cuenta en instantes de tiempo de detección sucesivos que estén separados por un período parcial en el que el rotor gira una pala de rotor más, de modo que se detecten o se tengan en cuenta cargas de pala sucesivas para el sector respectivo. Para cada sector, se registra una carga de pala siempre que una pala de rotor está en la posición correspondiente y la siguiente detección tiene lugar cuando la siguiente pala de rotor está en la posición correspondiente del sector debido a la rotación del rotor. Sin embargo, las cargas de pala también se pueden registrar de forma continua o casi continua, y luego se pueden asignar a sectores sucesivos. Esto significa que se pueden realizar varias mediciones por sector y, por ejemplo, promediarlas para determinar la carga de pala para el sector respectivo. Esto permite detectar cargas de pala consecutivas para cada sector, es decir, varias cargas de pala por revolución.

40 Se reconoció en particular que, mediante esta detección o consideración en los instantes de tiempo de detección, cargas de las diferentes palas de rotor se pueden asignar al mismo sector. No es necesario esperar a que el rotor complete una rotación completa.

45 Por supuesto, este enfoque se aplica preferiblemente no sólo para un sector, sino para muchos sectores. Por ejemplo, el campo de rotor se puede dividir en doce sectores iguales, de modo que cada sector tenga un tamaño de 30°. Para cada uno de estos doce sectores se determina luego un perfil de carga sectorial y para este fin se pueden proporcionar instantes de tiempo de detección separados y sucesivos para cada sector.

50 Por supuesto, la detección o la consideración en estos instantes de tiempo de detección sucesivos también se pueden realizar de tal manera que se tengan en cuenta las posiciones azimutales absolutas del rotor y las cargas de pala se detecten o tengan en cuenta siempre en las mismas posiciones. El período parcial es fijo en el caso de rotación uniforme del rotor a una velocidad de rotación constante. A una velocidad de rotación diferente, adquiere un valor diferente y en el caso de una aceleración o deceleración del rotor o de la velocidad de rotación, el período parcial también puede cambiar en consecuencia.

55 Ahora se propone además que la expectativa de una carga extrema se compruebe o verifique en función al menos un perfil de carga sectorial. En el caso más simple, una carga extrema es esperable cuando el perfil extrapolado de un perfil de carga sectorial alcanza o supera un valor umbral de carga. Si la instalación de energía eólica se sigue operando sin cambios, es esperable que esta carga extrema realmente se produzca y actúe en particular sobre una pala de rotor. Si la rotación continúa, la carga extrema puede actuar también sobre otra pala de rotor.

Sin embargo, se propone identificar dicha carga extrema esperable utilizando el perfil de carga sectorial y luego, en particular, tomar contramedidas para reducir la carga. Esto incluye, en particular, ajustar el ángulo de ataque de las palas de rotor o al menos el ángulo de ataque de la pala de rotor que a continuación vaya a alcanzar el sector para el que una carga extrema sea esperable debido a la prueba.

Preferentemente, se registran en este sentido los perfiles de carga sectorial para cada sector y se evalúan en este sentido. Para cada perfil de carga sectorial y, por tanto, para cada sector, se comprueba constantemente si es esperable una carga extrema en el sector en cuestión. Para cada perfil de carga sectorial, se verifica si alcanza o supera un valor umbral de carga.

Sin embargo, la comprobación de si es esperable una carga extrema no tiene por qué hacerse, o no solo, comparando el perfil de carga sectorial con un valor umbral de carga. También se pueden realizar pruebas adicionales, por ejemplo, para comprobar en qué medida se supera dicho valor umbral de carga o con qué rapidez cambia la carga, es decir, cómo de inclinado es el perfil de carga sectorial.

Además, también se puede prever una extrapolación más compleja, en la que, por ejemplo, no sólo se utiliza una línea recta sino también una función de orden superior para la extrapolación. En particular, para la extrapolación puede estar previsto utilizar más de dos cargas de pala detectadas sucesivamente para un sector.

Según un aspecto, se propone que el perfil de carga sectorial se configure como una función temporal polinómica de primer orden o de orden superior. Para este fin ya se ha descrito el uso de una línea recta, que es por tanto una función temporal polinómica de primer orden, es decir, una línea recta que también puede tener pendiente. En un orden superior, por ejemplo, se puede suponer una función polinómica cuadrática dependiente del tiempo.

Además, o alternativamente, se propone que se suponga o asuma una carga extrema esperable cuando el perfil de carga sectorial para un instante de tiempo futuro alcance o supere un valor umbral de carga predeterminado. Un instante de tiempo futuro de este tipo es, en particular, uno que está separado del punto actual por el período parcial. El instante de tiempo actual puede ser en particular el instante de tiempo en el que se detectó por última vez la carga de pala del sector en cuestión. En este sentido, el instante de tiempo futuro es en particular aquel en el que la siguiente pala de rotor alcanza al sector en cuestión.

Sin embargo, también es posible elegir de otra manera el instante de tiempo futuro, en particular elegirlo más lejos en el futuro, por ejemplo, dos períodos temporales parciales más allá del instante de tiempo actual. Cuanto más lejano en el futuro sea el instante de tiempo elegido, antes se podrá detectar una carga extrema esperada, pero menos fiable puede llegar a ser dicha expectativa.

Según un aspecto, se propone que el perfil de carga sectorial se determine a partir de al menos dos cargas de pala consecutivas de un sector y al menos un período parcial asociado, y para un siguiente tiempo de detección sucesivo, que todavía está en el futuro, se verifique si el perfil de carga sectorial alcanza o supera el valor umbral de carga de pala predeterminado. Utilizando dos cargas de pala consecutivas del mismo sector y el período parcial correspondiente, se puede determinar un gradiente temporal del perfil de carga sectorial y, asumiendo un gradiente constante, se puede determinar la carga de pala esperada del mismo sector para el próximo instante de tiempo de detección.

En este sentido se realiza una predicción de la carga de pala para el próximo instante de tiempo de detección. Con el perfil de carga sectorial determinado de esta manera, y por tanto también con el valor predicho de la carga de pala para el siguiente instante de tiempo de detección, se puede realizar una comparación con el valor umbral de carga de pala predeterminado. De esta forma se puede saber de antemano si una carga extrema es esperable. Se asume una carga extrema cuando se alcanza o se supera el valor umbral de carga de pala predeterminado.

De acuerdo con un aspecto, se propone que una carga de pala esperable se determine por medio del perfil de carga sectorial para un instante de tiempo de detección sucesivo a verificar o comprobar, la carga de pala actual se detecte en el instante de tiempo de detección sucesivo a verificar y se compare con la carga de pala esperable para determinar una desviación de expectativa. En función de la desviación de expectativa determinada se ajusta el perfil de carga sectorial.

El perfil esperado, que fue calculado de antemano, se compara con el perfil que realmente ocurrió. La desviación en este instante de tiempo de detección sucesivo que se debe comprobar puede formar la desviación de expectativa determinada. Dependiendo de esto se puede ajustar el perfil de carga sectorial. En particular, se trata de una predicción para el siguiente instante de tiempo de detección que sigue al instante de tiempo de detección actual comprobado. La desviación de expectativa se puede utilizar, por ejemplo, para

determinar si la carga de pala del sector en consideración aumenta más rápido de lo previsto por el perfil de carga sectorial. Esto permite detectar cuándo el valor umbral de carga de pala puede alcanzarse más rápido de lo esperado.

- 5 En particular, el ajuste del perfil de carga sectorial se puede realizar de tal manera que el perfil de carga sectorial se cambie de un perfil recto a un perfil curvo o se incremente de otro modo en su orden. Sin embargo, el perfil de carga sectorial también puede complementarse con un componente aditivo. Por ejemplo, a un perfil de carga sectorial diseñado como una línea recta con pendiente se le puede añadir una línea recta con mayor pendiente. También es posible ajustar de forma sencilla la parametrización del perfil de carga sectorial. Si el perfil de carga sectorial se define como una línea recta con una pendiente, esta pendiente se puede modificar en consecuencia. Si el perfil de carga sectorial es una función polinómica de segundo orden o superior, es decir, dependiente del tiempo, se pueden ajustar varios parámetros en consecuencia.

- 10 Según un aspecto, se propone que las cargas de pala de una pala de rotor que comprende una raíz de pala se detecten en cada caso en la región de la raíz de pala, en particular en cada caso como flexión de pala o momento de flexión de pala. Aquí se reconoció especialmente que toda la carga que actúa sobre la pala de rotor actúa en la raíz de pala o en la zona de la raíz de pala. Este tipo de carga de pala se puede detectar en particular mediante una o más galgas extensiométricas.

- 15 Lo ideal es que dicha carga de pala se absorba directamente en la raíz de pala. Sin embargo, la raíz de pala a menudo puede estar hecha de metal o al menos pasar a una zona de conexión metálica para la conexión con el cubo del rotor, mientras que el resto de la pala de rotor está hecha de otro material, en particular de plástico reforzado con fibra de vidrio. Para evitar las imprecisiones de medición correspondientes, que pueden producirse especialmente en la zona de transición antes mencionada entre dos materiales, se puede prever una pequeña distancia desde el sensor de medición en la pala de rotor hasta la raíz de pala, en particular hasta la brida de conexión. Se entiende como zona de la raíz de pala el 10% interior de la pala de rotor. Este es el primer 10% desde un adaptador de conexión de la pala de rotor a una punta de la pala de rotor. Aquí se pueden producir flexiones que se pueden detectar fácilmente y que reflejan esencialmente la carga total sobre la pala de rotor.

- 20 Para ello se pueden disponer en la pala de rotor, en la zona de la raíz de pala, sensores de flexión, especialmente galgas extensiométricas, que también están distribuidos en dirección circunferencial alrededor del eje longitudinal de la pala de rotor. Se deben disponer entonces al menos dos sensores de flexión, en particular galgas extensiométricas, distribuidos a 90° alrededor del eje longitudinal de la pala de rotor en dirección circunferencial. Esto se basa en la constatación de que la carga de pala que se va a medir también puede tener una dirección. Esta dirección depende en particular, pero no solo, del ángulo de pala. Los sensores de flexión distribuidos de esta manera permiten registrar la dirección de la respectiva carga de pala y, de este modo, registrar correctamente la amplitud total de la carga de pala.

- 25 Según un aspecto, se propone que se vigilen o monitoricen varios sectores del campo de rotor para cargas extremas y que se detecten las cargas de pala para cada sector vigilado en los instantes de tiempo de detección sucesivos, es decir, de tal manera que se detecten cargas de pala sucesivas para cada sector y a partir de esto se determine al menos un cambio en las cargas de pala del sector respectivo. Para este propósito, se propone además que un cambio esperado en las cargas de pala de un segundo sector se infiera a partir del al menos un cambio en las cargas de pala de un primer sector. Esto se hace en particular ajustando o adaptando el perfil de carga sectorial del segundo sector en función del perfil de carga sectorial del primer sector.

- 30 Está previsto detectar cargas extremas asimétricas, de modo que se espera que las cargas de pala de los sectores difieran entre sí. Sin embargo, se reconoció que un aumento, especialmente un aumento fuerte, de la carga de pala en un sector también permite sacar conclusiones sobre un aumento correspondiente de la carga de pala en otro sector, especialmente en un sector vecino. Por lo tanto, se propone que los resultados sobre un sector a partir de su perfil de carga sectorial se tengan en cuenta para otro sector, en particular para su perfil de carga sectorial. En particular, el perfil de carga sectorial del segundo sector se puede adaptar a partir del perfil de carga sectorial del primer sector si el primer sector está dispuesto delante del segundo sector en la dirección de rotación del rotor.

- 35 Sin embargo, también entran en consideración otras constelaciones. En particular, se reconoció que, en general, un aumento de una carga de pala en una posición del campo de rotor, en particular un aumento incrementado de dicha carga de palas, permite sacar conclusiones sobre un aumento de las cargas de pala en todo el campo de rotor. En otras palabras, aunque las cargas de pala absolutas de un sector no se pueden determinar directamente a partir de las de otro sector, un escenario de aumento de la velocidad del viento y, por tanto, de la carga de palas, puede aplicarse a todo el campo de rotor o al menos a un área del campo de rotor que se extiende por varios sectores.

Adicionalmente o alternativamente, llegar a la conclusión a partir del al menos un cambio de las cargas de pala del primer sector en términos del cambio esperado en las cargas de pala del segundo sector se puede realizar de tal manera que se determine un primer perfil de carga sectorial para el primer sector y se determine un segundo perfil de carga sectorial para el segundo sector. Para el primer perfil de carga sectorial, se determina una primera desviación de expectativa y el segundo perfil de carga sectorial se ajusta dependiendo de la primera desviación de expectativa. También en este caso se determina una desviación de expectativa, pero ésta no se utiliza, o no sólo se utiliza, para mejorar el perfil de carga sectorial del mismo sector, sino que se utiliza para mejorar el perfil de carga sectorial de otro sector. Esto significa que una carga extrema esperable en un sector puede detectarse incluso antes.

De acuerdo con la invención, se propone determinar un instante de tiempo de carga extrema en el que se espera que surja o aparezca una carga extrema. En particular, se propone que el instante de tiempo de carga extrema se determine a partir de al menos un perfil de carga sectorial. Por lo tanto, se recomienda verificar cuándo se produce o se espera una carga extrema. Dependiendo de esto, el controlador de la instalación de energía eólica puede tomar las precauciones adecuadas.

Una posible precaución es ajustar el ángulo de palas de rotor, o de al menos de una de ellas, en una etapa temprana para mitigar la carga extrema esperada. En particular, se reconoció que al tomar una medida tan temprana se evita que la carga de pala y, con ello, también el empuje sobre la pala de rotor y, por ende, sobre el rotor, no se reduzcan solo cuando la instalación de energía eólica con su cabeza de torre ya haya sido empujada significativamente hacia atrás. Si se reduce la carga solo a partir de ese momento, la cabeza de la torre puede oscilar de vuelta, lo que a su vez puede generar cargas en la torre que se deben evitar. Al reducir la carga de pala en una etapa temprana, se puede evitar o al menos reducir esta carga de la torre.

Según un aspecto, se propone que los ángulos de pala de rotor sean ajustables de manera mutuamente independientemente.

Dado que los ángulos de pala de las palas de rotor se pueden ajustar independientemente unos de otros, es posible influir individualmente en las cargas de pala. Gracias a la detección temprana de cargas específicas mediante el procedimiento propuesto, también se puede utilizar de forma específica el ajuste independiente, es decir, el ajuste individual de los ángulos de pala. También se reconoció que un ajuste de pala individual puede suponer una carga elevada, especialmente para los accionamientos de ajuste. Sin embargo, al detectar con antelación la carga de pala esperable, se puede iniciar el ajuste a tiempo, lo que permite una velocidad de ajuste más baja, lo que reduce la carga.

Además, o como alternativa, se propone tener en cuenta el ángulo de pala de rotor en cuestión para determinar un perfil de carga sectorial para cada carga de pala detectada. En particular, se propone que cada carga de pala detectada se convierta en una carga de pala equivalente en función del ángulo de pala asociado, que corresponde a una carga de pala en un ángulo de pala de referencia predeterminado.

Aquí se reconoció especialmente que el ángulo de pala tiene una gran influencia en la carga de pala y que, por lo tanto, esto ya se puede tener en cuenta al determinar el perfil de carga sectorial. También se reconoció que la instalación de energía eólica puede tener un ajuste de pala individual, en el que las palas de rotor pueden asumir diferentes ángulos de pala independientemente una de otra. Esto puede generar diferentes cargas de pala para diferentes palas de rotor en el mismo sector y con el mismo viento. Se propone tener esto en cuenta y, en particular, descartarlo en el cálculo.

Incluso si los ángulos de pala de todas las palas de rotor se ajustan de manera sincrónica, pueden resultar diferentes ángulos de pala para palas de rotor diferentes en el mismo sector pueden ya que las palas de rotor están en el mismo sector en diferentes momentos.

Cada perfil de carga sectorial tiene como objetivo reflejar una carga en el sector en cuestión, independientemente de la pala de rotor específica que esté experimentando actualmente dicha carga. Para obtener un perfil uniforme, se propone convertir cada carga de pala determinada en una carga de pala equivalente. La carga de pala equivalente indica entonces la carga de pala que se produciría si la pala de rotor tuviera el ángulo de pala de referencia predeterminado. De este modo, el ángulo de referencia de la pala crea un valor de referencia uniforme, de modo que las cargas de la pala determinadas en diferentes ángulos se pueden comparar más fácilmente.

Además, el perfil de carga sectorial también incluye un perfil extrapolado para un período futuro. Si la carga de pala está relacionada con un ángulo de pala de referencia, esta extrapolación se puede realizar sin tener que conocer el ángulo de pala de rotor correspondiente para el período extrapolado. Además, el perfil de carga

sectorial se puede diseñar como un perfil continuo, aunque en realidad solo puede existir una carga de pala en el sector correspondiente si también hay una pala de rotor en el sector. De esta forma, los rangos de tiempo entre dos instantes de tiempo estarían indefinidos en lo que respecta al ángulo de pala de rotor, ya que no hay ninguna pala de rotor en el sector. Al referirse al ángulo de referencia de la pala, se elimina virtualmente la dependencia del ángulo de pala y se elimina así el problema de incertidumbre antes mencionado.

De forma especialmente preferida, se utiliza como ángulo de pala de referencia predeterminado un ángulo de pala de carga parcial, que se ha determinado y se utiliza como ángulo de pala aerodinámicamente óptimo para el rango de carga parcial o la operación con carga parcial.

En particular, se basa en una instalación de energía eólica controlada de tal manera que se utiliza un ángulo de pala fijo para todas las palas de rotor en el rango de carga parcial.

El rango de carga parcial u operación con carga parcial es el rango en el cual la velocidad predominante del viento aún no ha alcanzado la velocidad nominal del viento y/o la instalación de energía eólica todavía está funcionando por debajo de la velocidad de rotación nominal, potencia nominal y/o par nominal sin ser estrangulada artificialmente.

Con un ángulo de pala de rotor de este tipo, se puede esperar una carga de pala máxima en comparación con otros ángulos de pala. Si el perfil de carga sectorial está relacionado con este ángulo de pala, el perfil de carga sectorial también refleja la curva de carga máxima. De esta manera se puede evaluar la carga máxima y, en función de ella, si supera el valor umbral de carga de pala predeterminado, se puede fijar o especificar un ángulo de pala con una carga de pala menor. A continuación, la instalación de energía eólica o las palas de rotor individuales pueden funcionar ya con un ángulo de pala diferente del ángulo de pala de referencia predeterminado.

Preferiblemente, se puede determinar un ángulo de pala mínimo del que no se debe balar a partir de una evaluación de un perfil de carga sectorial. Si el ángulo de pala es menor, se ajusta a este ángulo de pala mínimo especificado. Sin embargo, si el ángulo de pala actual es mayor o igual, no es necesario realizar ningún ajuste. Esto se basa en una definición común de los ángulos de pala, donde alcanzan su valor máximo hacia una posición de bandera, es decir, su valor máximo cuando están completamente orientadas hacia el viento. El ángulo de pala en carga parcial mencionado es, por lo tanto, pequeño. El ángulo de pala en carga parcial puede oscilar entre -5° y 10° , en particular entre 0° y 5° , mientras que el ángulo de pala en posición de bandera oscila entre 80° y 110° , en particular entre 90° y 100° .

Según un aspecto, se propone que cada carga de pala detectada se convierta en un valor de viento local en función del ángulo de pala asociado, en donde se prevé particularmente que se establezca un campo de viento a partir de los valores de viento de algunos o todos los sectores. Adicionalmente o alternativamente, se propone que cada perfil de carga sectorial se convierta en un perfil de viento en el sector, de modo que cada perfil de viento incluya un perfil extrapolado para un periodo temporal futuro. En particular, está previsto establecer un perfil del campo de viento a partir de los perfiles de viento de algunos o todos los sectores.

La carga de pala detectada se basa en una situación de viento específica y, por lo tanto, también puede derivarse de la carga de pala detectada. Por ejemplo, las relaciones entre la carga de pala detectada y la situación del viento se pueden registrar en un sistema de medición con sensores de viento complejos adicionales, en particular LiDAR. A partir de estas relaciones, que se pueden registrar de antemano, se pueden extraer conclusiones sobre los valores de viento y el campo de viento a partir de las cargas durante la operación en curso. El campo de viento describe así la distribución de los valores de viento a través de los sectores del campo de rotor. Las relaciones entre la carga de pala detectada y la situación del viento también se pueden determinar mediante simulaciones, por ejemplo, utilizando el procedimiento de elementos de pala (BET, "Blatt-Element-Methode").

Esta situación de viento puede incluir no sólo una velocidad de viento media sino también una dirección de viento para el sector en cuestión. Por tanto, un valor de viento puede formarse como un par de valores formados por la velocidad de viento y la dirección de viento. Si las direcciones de viento difieren de un sector a otro, también se puede derivar de esto la cizalladura del viento. Esto también puede ser parte del valor de viento. Las direcciones de viento y la cizalladura se pueden derivar de las variaciones en la carga de las palas de un sector al siguiente. Por ejemplo, la dirección del viento podría derivarse de dos valores de carga diferentes, uno que representa un momento de flexión y el otro un momento de torsión de la misma pala.

A partir de los perfiles de carga sectoriales, también se puede derivar un perfil de viento para el respectivo sector, es decir, un cambio temporal en el valor de viento del sector en cuestión. También en este caso, los cambios en la dirección de viento pueden formar parte de dicho perfil de viento. La cizalladura del viento

también se puede derivar de esto, teniendo en cuenta especialmente los perfiles de viento de otros sectores, especialmente los vecinos.

5 De este modo, se reconoció que los perfiles de viento pueden derivarse de los perfiles de carga sectoriales y que pueden considerarse en general como un campo de viento y, por tanto, como un perfil de campo de viento. Los perfiles de carga sectoriales subyacentes también contienen perfiles extrapolados y, del mismo modo, los perfiles de viento y, por tanto, el perfil de campo de viento, también pueden contener una región extrapolada. Por tanto, es posible predecir el campo de viento en el campo de rotor.

10 Sin embargo, también es posible crear un campo de viento a partir únicamente de los valores de viento de algunos o todos los sectores. No se ha de crear necesariamente un perfil del campo de viento con un pronóstico, sino que crear un estado real también puede ser útil.

15 Según un aspecto, se propone que cuando se identifica una carga extrema esperable en al menos un sector, se cambia o modifica una operación de instalación para reducir o limitar una carga en la instalación de energía eólica. En particular, se propone cambiar la operación de instalación de manera que el ángulo de pala de al menos una de las palas de rotor se ajuste para reducir o limitar una carga de pala en la al menos una pala de rotor. Por lo tanto, se propone que la identificación de una carga extrema esperable se utilice para tomar medidas oportunas para reducir la carga modificando el funcionamiento de la instalación de energía eólica. Se recomienda en particular que las palas de rotor, o al menos una, se giren a tiempo fuera del viento. Los efectos de esto ya se han descrito anteriormente.

25 En particular, se propone que si se ha identificado un instante de tiempo de carga extrema en el que la carga extrema es esperable, se cambie la operación de instalación antes de que se alcance el instante de tiempo de carga extrema. Esto no sólo evita que se produzca la carga extrema, sino que también evita una reacción exagerada al cambiar la operación de la instalación de energía eólica, si la reacción no se produce hasta que se produce la carga extrema.

30 Adicionalmente o alternativamente, se propone que se identifique un sector en el que se espera la carga extrema y se cambie el ángulo de pala de un rotor antes de que alcance el sector para el que se espera la carga extrema. En particular, aquí se propone un ajuste de pala individual, que ajusta específicamente solo la pala de rotor respectiva para reducir la carga con el fin de evitar la carga extrema esperada exactamente en el sector localizado. De lo contrario, la instalación de energía eólica puede seguir funcionando con normalidad y, en particular, no es necesario realizar ajustes de pala en otras zonas del campo de rotor, o no en la misma medida, para que se pueda seguir generando allí la mayor cantidad de energía posible.

40 Además, o alternativamente, se propone ajustar los ángulos de pala de todas las palas de rotor. En particular, se propone que esto se haga antes del instante de tiempo en el que se espera la carga extrema y que se reduzca nuevamente cuando las cargas se hayan reducido nuevamente. En principio, también es concebible que todas las palas de rotor se ajusten simultáneamente cuando se aproxima el sector en el que se espera la carga extrema.

45 De acuerdo con un aspecto, se propone que se determine un ángulo de ajuste para ajustar al menos una pala de rotor a partir del al menos un perfil de carga de sector determinado, y/o se determine un instante de tiempo objetivo hasta el cual se debe ajustar el ángulo de ajuste, y en particular se determine y predefina una velocidad de ajuste a partir del instante de tiempo objetivo y del ángulo de ajuste, y/o se determine un ángulo de pala mínimo a ajustar por debajo del cual una pala de rotor no se ajusta en su ángulo de pala.

50 De este modo, se prevé específicamente que el perfil de carga sectorial no sólo se utilice para determinar si se produce un ajuste de la pala, sino también para determinar su tamaño. Es posible derivar un ángulo de pala y ajustarlo directamente a partir del perfil de carga sectorial, con lo que también se puede tener en cuenta un perfil de ángulo de pala. Este perfil de ángulo de pala se puede basar en el perfil de carga sectorial o se puede seleccionar de tal manera que el ajuste del ángulo de pala comience temprano para que alcance un valor final deseado a tiempo.

55 A partir del perfil de carga sectorial no sólo es posible determinar con antelación cuándo es aconsejable un ajuste, sino también cómo debe realizarse mejor. El perfil de carga muestra cuándo se puede alcanzar una carga máxima y también su magnitud. A partir de esto, se puede derivar el instante de tiempo objetivo en el que se debe completar el ajuste de pala y el ángulo de pala que se debe lograr para reducir suficientemente la carga esperable. Esto da como resultado el ángulo de ajuste. La velocidad de ajuste se puede determinar y especificar utilizando el tiempo de ajuste que se debe observar, es decir, el tiempo hasta que se alcanza el instante de tiempo objetivo. De este modo, cada pala de rotor se puede ajustar a la nueva posición con una velocidad de ajuste adaptada.

La mayor carga se espera para un ángulo de pala bajo, especialmente con un ángulo de pala con carga parcial, lo cual ya se explicó anteriormente. Para aliviar la o evitar grandes cargas, una pala de rotor se gira en fuera del viento, lo que significa que su ángulo de pala aumenta. Por lo tanto, un ángulo de pala mínimo a ajustar es un límite inferior para el ángulo de pala a ajustar y, por lo tanto, un límite superior de carga. Puede suceder que el ángulo de pala ya sea mayor que el ángulo de pala mínimo a ajustar y entonces no se deba realizar ninguna reducción del ángulo de pala debido a una carga extrema esperada, que se deriva de al menos un perfil de carga sectorial, porque entonces la carga actual aumentaría aún más.

Según un aspecto, se propone un procedimiento para controlar una instalación de energía eólica, donde la instalación de energía eólica se controla en función de una identificación de una carga extrema asimétrica causada por una ráfaga de viento que actúa sobre una instalación de energía eólica, y donde el procedimiento para controlar ejecuta al menos un procedimiento para identificar una carga extrema asimétrica causada por una ráfaga de viento según uno de los aspectos anteriores. Por tanto, el procedimiento de control se basa en el procedimiento de identificación. La instalación de energía eólica se controla en función de la identificación de cargas extremas.

En la medida en que el procedimiento para identificar una carga extrema asimétrica causada por una ráfaga de viento también incluya pasos o características para controlar otros pasos o características, estos pasos o características también deben incluirse en el procedimiento de control.

La invención se refiere también a una instalación de energía eólica, preparado para

- ejecutar un procedimiento para identificar una carga extrema asimétrica provocada por una ráfaga de viento que actúa sobre la instalación de energía eólica, y/o

- ejecutar un procedimiento para controlar la instalación de energía eólica, donde la instalación de energía eólica se controla en función de la identificación de una carga extrema asimétrica causada por una ráfaga de viento que actúa sobre una instalación de energía eólica,

donde la instalación de energía eólica

- comprende un rotor con al menos tres palas de rotor,

- las palas de rotor son ajustables en su ángulo de pala, y

- el rotor barre un campo de rotor con sus palas de rotor,

y el procedimiento comprende

- detectar de manera continua una carga de pala para cada pala de rotor;

- determinar para al menos un sector del campo de rotor al menos un perfil de carga sectorial temporal a partir de cargas de pala detectadas de diferentes palas de rotor con la misma posición azimutal, que describe un perfil temporal de una carga de las palas de rotor en el sector y conteniendo un perfil extrapolado para un período temporal futuro, donde

- las cargas de pala se detectan o se tienen en cuenta en instantes de tiempo de detección sucesivos que están separados por un período parcial en el que el rotor gira una pala de rotor más, de modo que se detectan o tienen en cuenta cargas de pala sucesivas para el sector respectivo; y

- comprobar si es esperable una carga extrema en función del al menos un perfil de carga sectorial, donde se determina un instante de tiempo de carga extrema en el que se espera que surja una carga extrema, en particular por que el instante de tiempo de carga extrema se determina a partir del al menos un perfil de carga sectorial.

En particular, dicho procedimiento para controlar la instalación de energía eólica se implementa en la instalación de energía eólica, en particular en un ordenador de proceso o de control u otro dispositivo de control. Se proporciona un dispositivo de detección para detectar una carga de pala para cada pala de rotor. Esto puede incluir, por ejemplo, galgas extensiométricas en las palas de rotor y al menos un dispositivo de evaluación para evaluar las señales correspondientes recibidas de las galgas extensiométricas.

En particular, la instalación de energía eólica está preparada para llevar a cabo un procedimiento según uno de los aspectos descritos anteriormente. En particular, la instalación de energía eólica tiene un dispositivo de control para ejecutar un procedimiento de control, y el procedimiento de control se implementa en el dispositivo de control. Para ello, el dispositivo de control puede disponer de un ordenador de proceso en el que se implementa el procedimiento. Sin embargo, el dispositivo de control también puede comprender varias unidades en las que se divide el proceso.

Preferiblemente, el dispositivo de control comprende una unidad de control para controlar la instalación de energía eólica y una unidad de detección para detectar una carga extrema.

La invención se explica a continuación con más detalle a modo de ejemplo mediante realizaciones con referencia a las figuras adjuntas.

Figura 1 muestra una instalación de energía eólica en una vista en perspectiva.

Figura 2 muestra un gráfico de tiempo para ilustrar un aspecto.

Figura 3 muestra una vista frontal de un campo de rotor.

Figura 4 muestra una vista lateral esquemática de una instalación de energía eólica y por tanto también de un campo de rotor mostrado en la Figura 3.

Figuras 5 y 6 muestran, cada una, una vista frontal de un campo de rotor en diferentes posiciones del rotor.

Figura 7 muestra un gráfico de tiempo para ilustrar una mejora del pronóstico.

La figura 1 muestra una representación esquemática de una instalación de energía eólica según la invención. La instalación de energía eólica 100 tiene una torre 102 y una góndola 104 en la torre 102. En la góndola 104 está dispuesto un rotor aerodinámico 106 con tres palas de rotor 108 y un spinner 110. Durante la operación de una instalación de energía eólica, el rotor aerodinámico 106 se pone en movimiento de rotación por acción del viento y, de este modo, también gira un rotor electrodinámico o un rotor de un generador, que está acoplado directa o indirectamente al rotor aerodinámico 106. El generador eléctrico está situado en la góndola 104 y genera energía eléctrica. Los ángulos de paso de las palas de rotor 108 se pueden cambiar mediante motores de paso en las raíces de pala de rotor 109 de las respectivas palas de rotor 108.

La instalación de energía eólica 100 tiene un generador eléctrico 101, que está indicado en la góndola 104. Se puede generar potencia eléctrica por medio del generador 101. Para la alimentación de potencia eléctrica se ha previsto una unidad de alimentación 105, que puede estar configurada en particular como inversor. Esto permite generar una corriente de alimentación trifásica y/o una tensión de alimentación trifásica según amplitud, frecuencia y fase para alimentar a un punto de conexión a la red PCC. Esto se puede realizar directamente o junto con otras instalaciones de energía eólica en un parque eólico. Se proporciona un controlador de instalación 103 para controlar la instalación de energía eólica 100 y también la unidad de alimentación 105. El controlador de instalación 103 también puede recibir valores predeterminados de fuentes externas, en particular de un ordenador de parque central.

La figura 2 muestra un diagrama de tiempo en el que se muestra un perfil o curva de carga ejemplar de una carga de pala equivalente para tres palas de rotor, que se convierte así en un ángulo de referencia, es decir, se normaliza. Estos perfiles de carga, que también pueden denominarse sinónimamente perfiles de carga de pala, se denominan en la figura 2 B1, B2 y B3, es decir, perfiles de carga para una primera, segunda y tercera pala de rotor.

Además, se muestra un perfil de ángulo de pala 202. Los ángulos de pala se pueden ajustar independientemente uno del otro, lo que también sirve como base aquí, pero las desviaciones entre las palas no son importantes para la explicación general según la Figura 2, de modo que por razones de simplicidad solo se muestra esta única curva de ángulo de pala 202 en esta Figura 2.

El diagrama de tiempo muestra en la abscisa el tiempo en segundos, en la ordenada izquierda la carga en kilonewton-metros y en la ordenada derecha el ángulo de pala en grados. El punto cero temporal se elige en el lugar donde el perfil de carga habría alcanzado un valor umbral, es decir, el valor máximo permitido, si no se hubiera modificado el ángulo de pala. Para este propósito, se muestra una curva de carga de pala no óptima B2', que alcanza un valor de carga extrema 204 en $t=0$ y representa una curva sin ajuste del ángulo de pala.

- Aproximadamente 5 s antes de este punto cero, los tres perfiles de carga B1-B3 están sujetos a fluctuaciones, pero aumentan en su amplitud. Anteriormente estaban sujetos a fluctuaciones similares, pero no en aumento, lo que no se muestra aquí. Las fluctuaciones en la carga de estos tres perfiles de carga B1-B3 se deben, entre otras cosas, al hecho de que las palas de rotor barren diferentes áreas en el campo de rotor debido a la rotación del rotor y, por lo tanto, están expuestas a diferentes cargas de viento. Especialmente en la zona inferior las cargas pueden ser menores y en la zona superior mayores. Sin embargo, también hay fluctuaciones del viento u otras variaciones en el campo de viento. Los perfiles también se presentan de forma simplificada, ya que aquí no son importantes otras pequeñas fluctuaciones.
- El diagrama de tiempo de la Figura 2 se basa en la operación de la instalación de energía eólica en la que el rotor gira a aproximadamente 20 rpm. Esto significa que el rotor gira una pala cada 1 segundo aproximadamente. Esto produce una especie de pico de carga para cada pala cambiante aproximadamente cada 1 s. Las palas de rotor cubren una zona de viento que genera un alto nivel de carga. Esto se explicará con más detalle en las figuras 3 y 4 a continuación.
- En el diagrama de tiempo según la figura 2, el valor de carga extrema 204 también se muestra como una línea recta horizontal. Esta carga no debe alcanzarse o al menos no debe superarse.
- Partiendo de la carga inicialmente baja, se puede identificar que dicha carga va aumentando. Para evitar que se alcance el valor de carga extremo 204, se puede realizar una comprobación correspondiente. Las cargas mostradas se pueden detectar, por ejemplo, mediante galgas extensiométricas en la raíz de pala o cerca de la raíz de pala y compararlas con un valor umbral, como el valor de carga extrema 204.
- Sin embargo, esto tiene la desventaja de que dicha detección y comparación se produce muy tarde. Como alternativa, se podría realizar una comparación con un valor umbral reducido para poder activar antes una contramedida, es decir, un ajuste de pala. Sin embargo, esto podría provocar una activación no deseada si el valor de carga extrema 204 no se alcanza en absoluto, sino que dicho valor umbral reducido solo se alcanza una vez.
- En lugar de ello, se propone evaluar el aumento observado en la Figura 2 para anticipar el alcance esperado del valor de carga extrema 204.
- Un aumento de carga de este tipo se puede detectar, por ejemplo, considerando solo un perfil de carga de pala, por ejemplo, el primer perfil de carga de pala B1. Para este fin se muestra a modo de ejemplo una recta de subida individual 206, en forma de línea recta continua, que está diseñada básicamente como conexión de los dos valores máximos del primer perfil de carga de pala B1. Sin embargo, dicha recta de carga individual 206 tiene la desventaja de que puede ser imprecisa y/o requiere que se registre al menos una revolución del rotor.
- En lugar de ello se propone un perfil de carga sectorial 208, que se muestra allí como una línea recta discontinua. El perfil de carga sectorial 208 se muestra aquí como una línea recta y se determina a partir de dos valores de los dos perfiles de carga de pala B1 y B3. Los dos valores de carga utilizados para este propósito se muestran como el primer y el segundo valor de carga W1 y W2. A partir de estos dos valores, que en el ejemplo mostrado están separados por solo 1 segundo, se puede determinar este perfil de carga sectorial 208 y se puede ver que la carga en el sector alcanzaría muy pronto el valor máximo.
- En el momento en que se alcanza el segundo valor de carga W2, se puede calcular este perfil de carga sectorial 208 y detectar que se está a punto de alcanzar el valor de carga extrema 204. Así, en este momento, en este caso un segundo antes de alcanzar el valor de carga extrema 204, se inicia el cabeceo. Se aumenta el ángulo de pala de todas las palas, de manera que las palas de rotor se orientan fuera del viento. Esto queda demostrado mediante el perfil de ángulo de pala 202.
- Mediante el ajuste adelantado del ángulo de pala o de los ángulos de pala se consigue una velocidad de ajuste moderada, que en este caso es, por ejemplo, de 2° por segundo (2°/s). Sin embargo, también podría ser menor y ser de, por ejemplo, 1°/s. En el ejemplo mostrado, el ángulo de pala ha cambiado 2° en el primer segundo desde el inicio del ajuste. Esto ya significa que la curva de carga B2 de la segunda pala ya no alcanza el valor de carga extrema 204. Después de dos segundos, el ángulo de pala se ajusta en 4°, lo que produce una reducción significativa de la carga. El ángulo de pala se puede reducir nuevamente, al menos un poco. Sólo con fines ilustrativos, en la representación de la Figura 2 se asume el valor constante de 4° a partir de 1s.
- En particular, se propone lo siguiente: En el momento de activar un ajuste de pala, la carga actual sobre las palas, un ángulo de paso y la carga esperable se pueden al menos estimar. En base a esto, se puede predecir un ángulo de modo que se conozca el ángulo final resultante. Esto permite ajustar la velocidad de paso según

corresponda y ampliarla lenta o rápidamente, dependiendo de la situación. De esta forma se puede especificar y controlar con precisión la velocidad de paso, es decir, la velocidad a la que se ajustan las palas de rotor.

5 Este perfil de carga sectorial 208 puede considerar alternativamente también los valores de carga de los tres perfiles de carga de pala B1-B3, por ejemplo, considerando adicionalmente el tercer valor de carga W3 del perfil de carga de pala B2. El perfil de carga sectorial 208 sería entonces algo diferente. También podría diseñarse como una línea recta, pero también como una curva de segundo orden, es decir, descrita por un polinomio de segundo orden que depende del tiempo.

10 Los valores de carga W1 a W3 pueden ser, por ejemplo, valores promedios de varios valores medidos de la respectiva pala en el sector relevante. El perfil de carga sectorial 208 no tiene que ser una tangente de los dos perfiles de carga de pala B1 y B3 o de los tres perfiles de carga. Sin embargo, los valores de carga W1 a W3 están en el rango de los valores máximos de los perfiles de carga de pala, porque este es el sector con la carga máxima. También se examinan los sectores con menor carga, pero no activan el ajuste de pala. Por lo tanto, 15 su evaluación no se presenta aquí.

Por ejemplo, el campo de rotor se puede dividir en 36 sectores de 10° cada uno, y en cada uno de estos 36 sectores se registra un perfil de carga sectorial 208. Esto también genera perfiles de carga sectorial que, por ejemplo, pueden estar en el rango inferior, pero luego no conducen a la identificación de una carga alta.

20 En el ejemplo de 36 sectores, existen 36 perfiles de carga sectoriales y de éstas se considera la más crítica para minimizar la carga, es decir aquella que tiene tendencia a alcanzar el valor de carga extrema 204. El perfil de carga sectorial 208 es una de ellas y, por lo tanto, se sitúa aproximadamente en los picos de carga de los tres perfiles de carga de pala B1-B3.

25 Mediante la utilización de todas las palas de rotor, es decir, de los valores de carga de todas las palas de rotor de un sector, el perfil de carga sectorial 208 se puede construir con antelación, por ejemplo, como una línea recta basada en dos valores de carga, es decir, en un valor de carga de cada una de las dos palas de rotor. Sin embargo, también es posible incluir varios valores, por ejemplo, tres valores, como ya se ha descrito anteriormente. Esto permite determinar el perfil de carga de pala aún antes de que el rotor haya completado una revolución. Sin embargo, ya hay disponibles tres valores que permiten visualizar el perfil de carga sectorial 30 208 no sólo como una línea recta, sino también como una curva. Cuando se utilizan tres valores de carga, se puede utilizar una curva de segundo orden, es decir, una que se puede describir mediante un polinomio de segundo orden. Sin embargo, también es posible utilizar una línea recta que esté esencialmente determinada al evaluar tres valores, pero que pueda compensar las imprecisiones en los valores. El resultado por tanto puede ser más preciso.

También es posible incluir aún más valores. Si se registran cuatro valores, lo que requiere una rotación del rotor, se puede utilizar una línea recta como perfil de carga sectorial 208, que está aún más sobredeterminada y, por lo tanto, se pueden compensar aún mejor las imprecisiones. Sin embargo, también es posible utilizar una 40 curva de segundo orden, que también está sobredeterminada y, por lo tanto, puede compensar las imprecisiones. En caso necesario, por supuesto también sería posible utilizar una curva de orden aún superior.

La variante preferida es simular los perfiles de carga sectoriales utilizando una curva de primer o segundo 45 orden.

La evaluación de dicho perfil de carga sectorial 208 se puede llevar a cabo comprobando si dentro de un período de prueba predeterminado T_P el perfil de carga sectorial 208 alcanza el valor de carga extrema 204. En la Figura 2, este periodo de prueba T_P es aproximadamente 2 s. El valor actual del perfil de carga sectorial, 50 y por lo tanto también la carga actual, solo ha alcanzado un valor de carga extrema reducida 210. Por lo tanto, la detección se produce muy pronto, de modo que la medida de ajuste de las palas de rotor solo permite alcanzar el valor de carga extrema reducida de 210. Este período de prueba T_P también se puede seleccionar en función de la velocidad de ajuste de pala.

55 La figura 3 muestra un campo de rotor 320 en una vista frontal, en el que también se indican esquemáticamente tres palas de rotor A-C. Además, se muestra un evento de viento 322 que impulsa una carga extrema, por ejemplo, una ráfaga. Este evento de viento 322 ocurre en un área específica del campo de rotor 320 y por tanto en un sector específico. El evento de viento 322 también puede afectar a múltiples sectores.

60 Una rotación del rotor 324 también se indica esquemáticamente mediante una flecha correspondiente. Sin embargo, la rotación del rotor no cambia la posición del evento de viento 322 y, por lo tanto, una pala de rotor tras otra alcanzará este evento de viento mientras esté presente.

La figura 3 muestra dos sectores ejemplares S1 y S2, que se pueden representar cada uno mediante un ángulo medio ϕ_x o ϕ_y . La pala de rotor B se encuentra actualmente en el sector S2. Se puede detectar el tiempo que una o dos palas de rotor necesitan para cubrir este ángulo. De esto también se puede derivar una velocidad de aumento de carga.

La situación de la Figura 3 se muestra en la Figura 4 en una vista lateral. El evento de viento 322 se simplifica como un cilindro que se mueve hacia el campo de rotor 320. Esto lo indica el movimiento del evento 326. Por lo tanto, se puede ver que el evento de viento 322 solo ocurre durante un período de tiempo limitado. Esto da el período de tiempo T_E que ilustra la escala de tiempo del evento de viento que genera la carga extrema.

Las figuras 5 y 6 ilustran cómo se puede gestionar la situación de carga, en particular cómo se puede registrar un perfil de carga sectorial. La figura 5 muestra a modo de ejemplo un sector en aproximadamente la posición de las 8 en punto. La figura 5 muestra también un campo de rotor 520 que tiene tres palas de rotor A, B y C. La pala de rotor C está en la posición de las 8 en punto. Allí se registra la carga actual, por ejemplo, mediante galgas extensiométricas adecuadas en la raíz de pala o cerca de la raíz de pala. Además, se registra un ángulo de medición α_m . El ángulo de medición α_m es el ángulo actual de la pala de rotor C. Se puede medir, pero también se puede leer o utilizar a partir de los datos de control de la instalación de energía eólica.

Dependiendo del ángulo de pala de rotor y de la carga detectada, se obtiene una carga normalizada para un valor de ángulo específico. En particular, se puede utilizar como valor de referencia un ángulo de pala de 0° o un ángulo de carga parcial.

También aquí el rotor continúa girando según la rotación del rotor 524 y una posición más adelante se ilustra en la Figura 6.

En la figura 6, la pala de rotor B está en la posición de las 8 en punto y allí nuevamente se registra la carga sobre la pala y el ángulo de pala, ilustrados por el ángulo de medición α_m . Aquí se puede calcular la carga normalizada a un ángulo de referencia, y esto proporciona dos valores a partir de los cuales se puede determinar un perfil de carga sectorial. Mediante la normalización se puede efectuar el cálculo usando diferentes posiciones de pala, ya que es posible que se haya realizado un ajuste de pala durante la rotación de la pala de rotor B desde la posición de las 4 en punto a la posición de las 8 en punto. También es posible que las palas de rotor B y C tengan ángulos de pala diferentes. Sin embargo, para poder realizar una declaración para el sector en consideración, en particular respecto al perfil de carga basada en valores de diferentes palas de rotor, esta normalización se lleva a cabo preferiblemente con respecto a un ángulo de referencia.

El procedimiento explicado a modo de ejemplo para la posición de las 8 en punto se realiza de forma idéntica y prácticamente simultánea para todos los sectores en los que se ha dividido el rotor y, por tanto, el campo de rotor 520. Por supuesto, no se puede registrar un valor de carga para todos los sectores exactamente al mismo tiempo, porque las palas de rotor solo pueden estar en un sector a la vez. De este modo, se pueden registrar los valores correspondientes para tres sectores al mismo tiempo.

La figura 7 muestra un diagrama de tiempo que muestra las mediciones de carga para dos sectores. La abscisa muestra un eje de tiempo y la ordenada una carga, que podría corresponder a la ordenada izquierda de la Figura 2, al menos en principio. La figura 7 pretende explicar principalmente la mejora de un pronóstico, de manera que no se muestran valores de carga concretos. También, la Figura 2 es muy esquemática. Aquí se supone que los valores de carga en dos sectores se consideran para poco menos de una revolución.

Medidas en el sector S_1 están representados por un + y medidas en el sector S_2 por una x. En consecuencia, la primera medición tiene lugar en el instante t_1 para el primer sector, la siguiente medición en el instante t_2 para el segundo sector. En el instante t_3 se vuelve a realizar una medición en el primer sector, es decir, para la siguiente pala, y en el instante t_4 para el segundo sector, también para esta siguiente pala. Estos valores medidos se representan como valores medidos M_1 - M_4 . A partir de los valores medidos M_1 y M_3 para el primer sector se puede determinar un perfil de carga sectorial, por ejemplo, como una línea recta. A partir de esto, se puede predecir un valor de carga para el instante t_5 , que se representa en el diagrama como P_5 . Se eligió un círculo como símbolo para dejar claro que no se trata de una medición, sino de un pronóstico. De igual manera, para el instante t_6 se obtiene un valor de pronóstico P_6 para el segundo sector, es decir, a partir de los valores medidos M_2 y M_4 .

Ahora, en el instante t_5 , se realiza otra medición M_5 y resulta que superan el valor pronosticado P_5 . Por tanto, se puede deducir que, contrariamente a lo previsto, la velocidad del viento está aumentando. Esta información también se puede utilizar para el segundo sector S_2 . De esto se puede deducir que el pronóstico P_6 puede ser demasiado bajo. En consecuencia, del mayor incremento en la velocidad de viento derivado del desarrollo del

primer sector, se puede deducir que éste es el caso del sector S_2 También es de esperar. En consecuencia, el pronóstico P_6 se puede aumentar al pronóstico corregido K_6 .

5 La invención describe una solución que permite identificar de forma temprana un perfil de carga sectorial. De este modo, se detecta un perfil de carga sector por sector, basándose en los valores de cada pala de rotor que se encuentra en el sector en un instante de medición determinado.

10 La figura 2 ilustra en particular un denominado evento de control de carga, que se muestra allí esquemáticamente, pero que corresponde a un registro de carga real. La ilustración también debería transmitir en principio que se puede reconocer que las cargas en todas las palas están aumentando continuamente y, por lo tanto, es posible una intervención temprana utilizando el ángulo de pala.

15 En particular se partió de las siguientes premisas: Se supone o asume que las cargas aumentan a lo largo de una escala de tiempo característica, normalmente de varios segundos. Se supone además que hay un aumento de la velocidad de viento local y asimétrico que no afecta a todo el campo de rotor. Esto debería ilustrarse particularmente con las figuras 3 y 4. Por lo tanto, el evento mostrado también puede considerarse como un evento de corte. Se supone una escala de tiempo en la que cada pala pasa por la carga extrema que impulsa el evento o condición de viento varias veces. De esta manera, cada pala barre varias veces el sector o sectores correspondientes en los que se produce dicha carga extrema del evento de viento.

20 En particular se proponen las siguientes medidas, que también se explicarán en las figuras. Se registra un perfil temporal de los momentos de flexión de todas las palas. Por ejemplo, puede haber galgas extensiométricas que se evalúan constantemente.

25 Es posible determinar una diferencia entre dos momentos de flexión de pala de dos palas consecutivas, por ejemplo, de la pala C a la pala B, como se explica en las figuras 5 y 6. La carga se puede registrar en función de la posición de rotor y se puede calcular una diferencia. En este caso se registran dos valores de carga.

30 A la hora de determinar la flexión de pala o la carga de pala y, por tanto, también a la hora de determinar la diferencia entre dos momentos de flexión de la pala, también se tiene en cuenta la influencia del ángulo de pala. Por ejemplo, se puede tener en cuenta el ángulo de pala delantera o se puede utilizar un ángulo de referencia general como base. En cualquier caso, se tiene en cuenta la influencia del ángulo de pala y esto se puede hacer determinando la diferencia del ángulo de pala entre los dos instantes de medición, es decir, entre las dos palas de rotor. Esta diferencia del ángulo de pala también se puede tener en cuenta en la diferencia entre los dos valores de carga de pala, es decir, entre los dos momentos de flexión de la pala, porque esto provoca un cambio relativo en el momento de flexión de la pala, que de este modo se tiene en cuenta.

35 En base a estas diferencias tanto en el ángulo de pala como en el tiempo, se determina una pendiente que se utiliza para estimar una carga extrema esperable en ciertos intervalos de tiempo discretos.

40 La pendiente puede determinarse mediante una línea recta lineal, pero también mediante un polinomio de orden superior. Si es necesario, se pueden registrar más de dos valores.

45 Si se supera un criterio límite, se activa un control para aumentar el ángulo de pala de una o de todas las palas con el fin de reducir la carga extrema esperable. El criterio límite puede formarse a partir de una combinación de un valor umbral de carga extrema, como el valor de carga extrema 204 en la Figura 2, y un intervalo de tiempo desde el instante actual en el tiempo hasta la aparición de una carga extrema correspondiente, es decir, hasta que se alcanza el valor umbral de carga extrema. En otras palabras, la línea recta, si asciende, puede alcanzar el criterio límite, es decir, el valor de carga extrema 204, pero si este está muy lejos en el futuro, no es necesario realizar ninguna acción.

50 Se puede seleccionar el número de sectores en que se divide el campo de rotor, por ejemplo, en 36 sectores, cada uno de 10° .

55 Esto significa que, al considerar dicha pendiente, los ángulos de pala se pueden ajustar de manera temprana, lo que permite establecer una velocidad de paso baja. De esta manera, además de reducir las cargas extremas sobre las palas, también se puede conseguir un funcionamiento más suave. Esto se puede utilizar para evitar cargas máximas en los motores de paso y para reducir la desviación de la torre en situaciones extremas.

60 En particular, la carga se puede extrapolar para un tercio de revolución del rotor. Después de un tercio de revolución del rotor, se pueden registrar dos valores, es decir, para una pala y para la pala siguiente, y se puede realizar una extrapolación a partir de esto. Para cada sector considerado, se conoce la calidad del pronóstico

después de $1/X$ revolución del rotor. Actualmente se supone que $X = 3$. El enfoque aquí se centra especialmente en identificar la calidad del pronóstico o mejorarlo, como se explica en la Figura 7.

5 Aunque se necesita un tercio de revolución para girar el rotor de una pala a la siguiente en un sector, es posible evaluar la calidad del pronóstico antes de que se produzca otro tercio de revolución del rotor, aunque también se podría esperar a que se produzca un tercio de revolución del rotor. Ya es posible determinar si el aumento del viento es en general más fuerte o más débil una vez que el rotor se ha movido un poco más. Este conocimiento se puede aplicar a las previsiones ya realizadas y así evaluar la calidad. Si durante este tiempo el aumento del viento se acelera, quedará claro que se ha superado un pronóstico.

10 Esta información puede luego utilizarse para los siguientes sectores para corregir el pronóstico, como se explica en la Figura 7.

15 En particular, mediante la solución propuesta se logra una mejora. En una variante anterior, que ahora se mejora, el sistema de paso reacciona cuando se produce una carga extrema en una sola pala e intenta evitar un aumento adicional de la carga inclinándose muy rápidamente. Una reducción tan breve del empuje absorbido por el rotor provoca que la torre se acelere fuertemente hacia delante, lo que también genera cargas extremas no deseadas en la torre. Sin embargo, la solución propuesta permite un paso más lento, es decir, un ajuste más lento de las palas de rotor, lo que no produce una disminución rápida del empuje y, por lo tanto, no hace que la torre acelere hacia adelante bruscamente. Hasta ahora la torre volvía a oscilar hacia adelante, a partir de un empuje previamente fuerte. Ahora esto se puede evitar.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para identificar una carga extrema asimétrica causada por una ráfaga de viento, que actúa sobre una instalación de energía eólica (100), donde la instalación de energía eólica
5 - comprende un rotor (106) con al menos tres palas de rotor (108);
- las palas de rotor (108) son ajustables en su al ángulo de pala; y
- el rotor, con sus palas de rotor, barre un campo de rotor (320);
y el procedimiento comprende
- detectar de manera continua una carga de pala para cada pala de rotor (108);
10 - determinar para al menos un sector del campo de rotor al menos un perfil de carga sectorial temporal (208) a partir de cargas de pala detectadas de diferentes palas de rotor con la misma posición azimutal, que describe un perfil temporal de una carga de las palas de rotor en el sector y que contiene un perfil extrapolado para un período temporal futuro, donde
- las cargas de pala se detectan o se tienen en cuenta en instantes de tiempo de detección sucesivos
15 que están separados por un período parcial en el que el rotor gira una pala de rotor más, de modo que se detectan o tienen en cuenta cargas de pala sucesivas para el sector respectivo; y
- comprobar si es esperable una carga extrema en función del al menos un perfil de carga sectorial (208), caracterizado por que
- se determina un instante de tiempo de carga extrema en el que se espera que surja una carga extrema, en particular donde
20 - el instante de tiempo de carga extrema se determina a partir del al menos un perfil de carga sectorial (208).
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que
- el perfil de carga sectorial (208) está configurado como una función temporal polinómica de primer orden o de
25 orden superior; y/o
- una carga extrema esperable se asume cuando el perfil de carga sectorial (208) para un instante de tiempo futuro alcanza o supera un valor umbral de carga de pala predeterminado (204).
3. Procedimiento según se reivindica en la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que
30 - el perfil de carga sectorial (208) se determina a partir de al menos dos cargas de pala sucesivas de un sector y de al menos un período parcial asociado; y
- se comprueba para un siguiente instante de tiempo de detección sucesivo, que todavía está en el futuro, si el perfil de carga sectorial (208) alcanza o supera un, o el, valor umbral de carga de pala predeterminado (204), respectivamente.
35
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
- se determina una carga de pala esperable por medio del perfil de carga sectorial (208) para un instante de tiempo de detección sucesivo a comprobar;
- para el instante de tiempo de detección sucesivo a comprobar se detecta la carga de pala actual y se compara
40 con la carga de pala esperable para determinar una desviación de expectativa; y
- el perfil de carga sectorial (208) se adapta en función de la desviación de expectativa determinada.
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
- las cargas de pala de una pala de rotor, que comprende una raíz de pala, se detectan en cada caso, en la
45 región de la raíz de pala [para la descripción: el 10% interior], en particular en cada caso como flexión de pala o momento de flexión de pala.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
- se vigilan varios sectores del campo de rotor (320) para cargas extremas; y
50 - las cargas de pala de cada sector vigilado se detectan en los instantes de tiempo de detección sucesivos, de modo que se detectan cargas de pala sucesivas para cada sector y a partir de ello se determina al menos un cambio de las cargas de pala del sector respectivo; y
- a partir del al menos un cambio de las cargas de pala de un primer sector se extrae una conclusión relativa a un cambio de las cargas de pala esperable de un segundo sector, en particular tal que
55 - el perfil de carga sectorial (208) del segundo sector se adapta en función del perfil de carga sectorial (208) del primer sector; y/o de tal manera que
- se determina un primer perfil de carga sectorial para el primer sector, y se determina un segundo perfil de carga sectorial para el segundo sector;
- se determina una primera desviación de expectativa para el primer perfil de carga sectorial; y
60 - el segundo perfil de carga sectorial se adapta en función de la primera desviación de expectativa.
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
- los ángulos de pala de las palas rotor son ajustables de manera mutuamente independiente; y/o

- para determinar un perfil de carga sectorial (208) para cada carga de pala detectada se tiene en cuenta el ángulo de pala de la pala de rotor, en particular por que
- cada carga de pala detectada se convierte en función del ángulo de pala asociado en una carga de pala equivalente que corresponde a una carga de pala en un ángulo de pala de referencia predeterminado.

5

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
- cada carga de pala detectada se convierte en un valor de viento local en función del ángulo de pala asociado, donde está previsto en particular que
 - se establezca un campo de viento a partir de los valores de viento de algunos o todos los sectores; y/o que
- 10 - cada perfil de carga sectorial se convierte en un perfil de viento en el sector, de modo que cada perfil de viento contenga un perfil extrapolado para un período temporal futuro, donde está previsto en particular que
- se establezca un perfil de campo de viento a partir de los perfiles de viento de algunos o todos los sectores.

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
- 15 - cuando se identifica una carga extrema esperable en al menos un sector, se modifica una operación de instalación para reducir o limitar una carga de la instalación de energía eólica (100), en particular por que la operación de instalación se modifica de manera que el ángulo de pala de al menos una de las palas de rotor se ajusta para reducir o limitar una carga de pala en la al menos una pala de rotor (108), donde en particular
- 20 - cuando se ha identificado un instante de tiempo de carga extrema en el que la carga extrema es esperable, se modifica la operación de instalación antes de que se alcance el instante de tiempo de carga extrema; y/o
- se identifica un sector en el que se espera la carga extrema, y se cambia el ángulo de pala de una pala rotor antes de que alcance el sector en el que se espera la carga extrema; y/o
 - se ajusta el ángulo de pala de todas las palas de rotor.

10. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que
- a partir del al menos un perfil de carga sectorial determinado (208)
 - se determina un ángulo de ajuste para ajustar al menos una pala de rotor (106); y/o
 - se determina un instante de tiempo objetivo hasta el cual se debe ajustar el ángulo de ajuste, y se determina y predefine en particular una velocidad de ajuste a partir del instante de tiempo objetivo y del ángulo de ajuste; y/o
 - se determina un ángulo de pala mínimo a ajustar, por debajo del cual no se ajusta el ángulo de pala de una pala de rotor.

11. Procedimiento para controlar una instalación de energía eólica (100), donde
- 35 la instalación de energía eólica se controla en función de la identificación de una carga extrema asimétrica que es causada por una ráfaga de viento, que actúa sobre una instalación de energía eólica (100); donde el procedimiento para controlar control comprende o utiliza al menos un procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores.

12. Instalación de energía eólica (100), preparada para
- ejecutar un procedimiento para identificar una carga extrema asimétrica que es causada por una ráfaga de viento que actúa sobre la instalación de energía eólica (100); y/o
 - ejecutar un procedimiento para controlar la instalación de energía eólica (100), donde la instalación de energía eólica se controla en función de la identificación de una carga extrema asimétrica que es causada por una ráfaga de viento que actúa sobre una instalación de energía eólica;
- 45 donde la instalación de energía eólica
- comprende un rotor (106) que tiene al menos tres palas de rotor (108);
 - las palas de rotor (108) son ajustables en su ángulo de sus palas; y
 - el rotor (106) con sus palas de rotor (108) barre un campo de rotor (320);
- 50 y el procedimiento comprende
- detectar de manera continua una carga de pala para cada pala de rotor (108);
 - determinar para al menos un sector del campo de rotor al menos un perfil de carga sectorial temporal (208) a partir de cargas de pala detectadas de diferentes palas de rotor con la misma posición azimutal, que describe un perfil temporal de una carga de las palas de rotor en el sector y conteniendo un perfil extrapolado para un período temporal futuro, donde
 - las cargas de pala se detectan o se tienen en cuenta en instantes de tiempo de detección sucesivos que están separados por un período parcial en el que el rotor (106) gira una pala de rotor (108) más, de modo que se detectan o tienen en cuenta cargas de pala sucesivas para el sector respectivo; y
 - comprobar si es esperable una carga extrema en función del al menos un perfil de carga sectorial (208),
- 55 donde
- se determina un instante de tiempo de carga extrema en el que se espera que surja una carga extrema, en particular donde
 - el instante de tiempo de carga extrema se determina a partir del al menos un perfil de carga sectorial (208).
- 60

13. Instalación de energía eólica (100) según la reivindicación 12, caracterizada por que
- la instalación de energía eólica (100) está preparada para llevar a cabo un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 11, en particular por que
- 5 - la instalación de energía eólica (100) comprende un dispositivo de control para ejecutar uno de los procedimientos, y el procedimiento se implementa en el dispositivo de control.

DIBUJOS

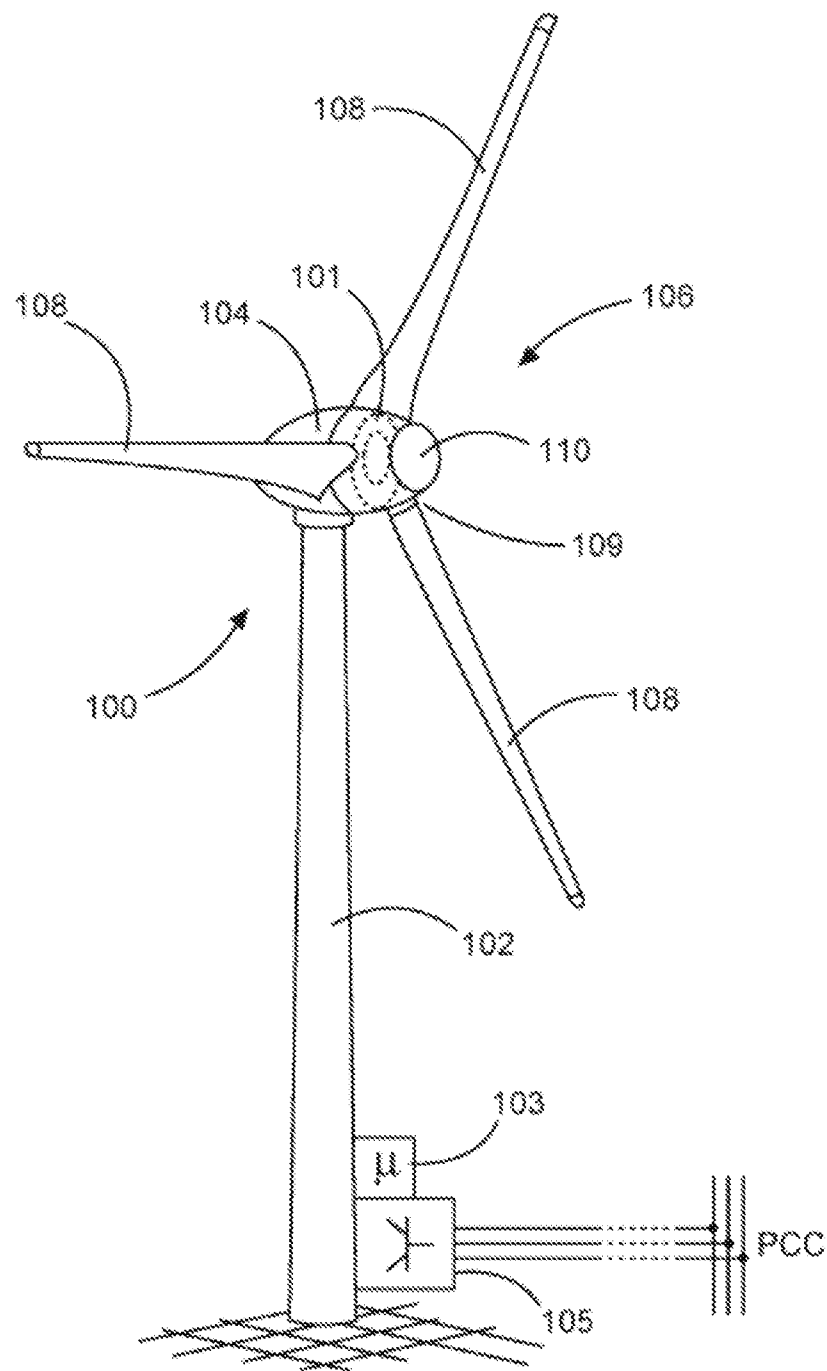


Fig. 1

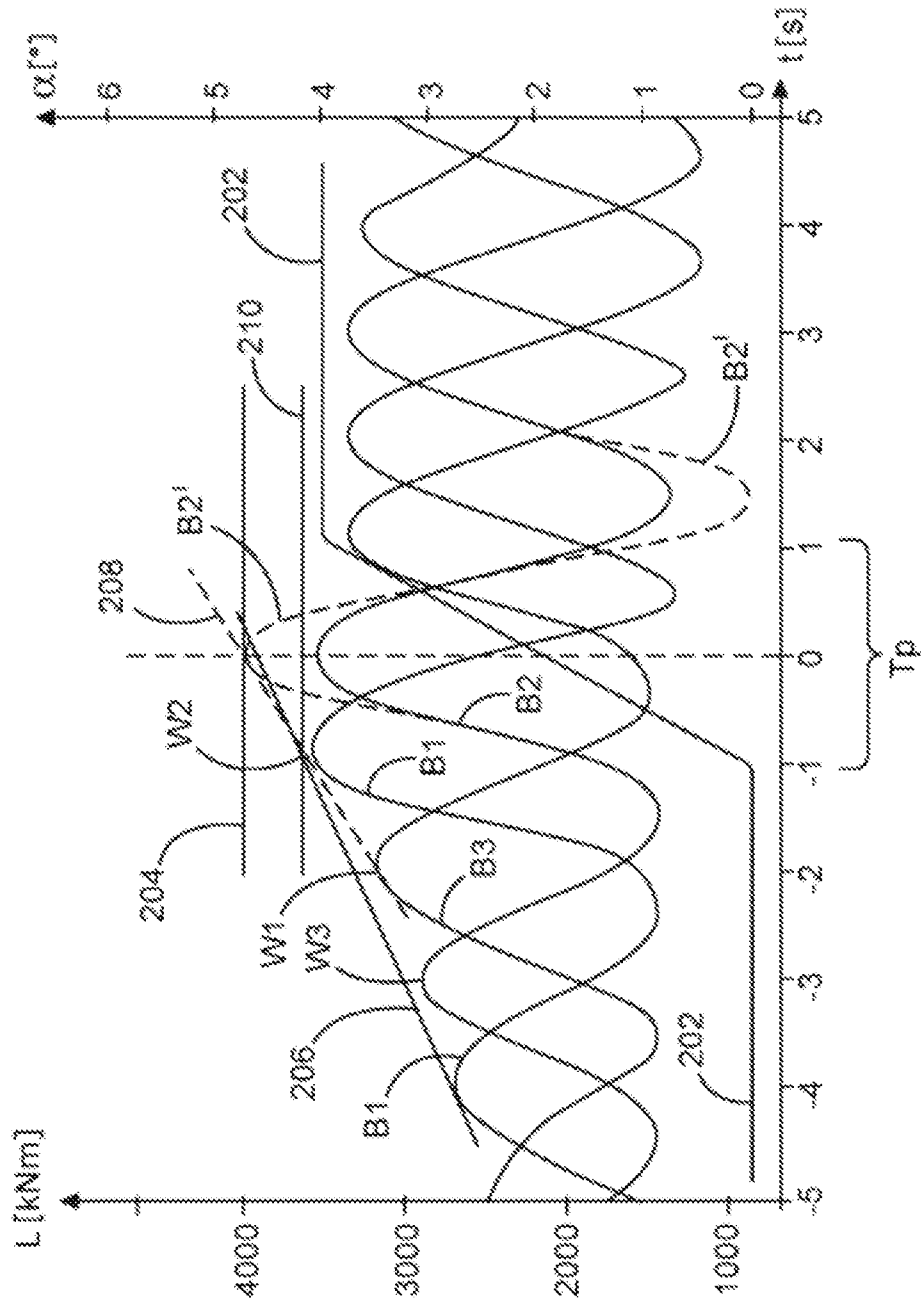
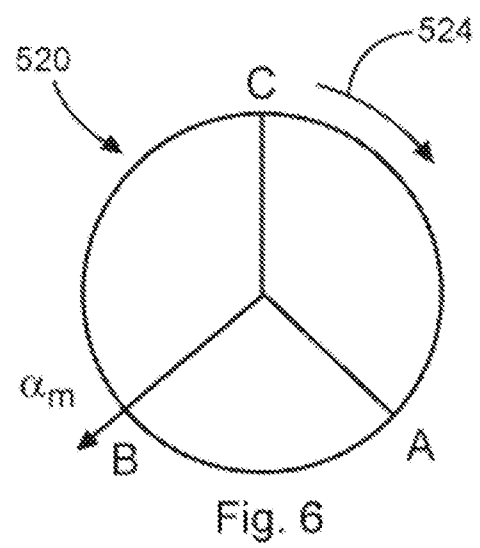
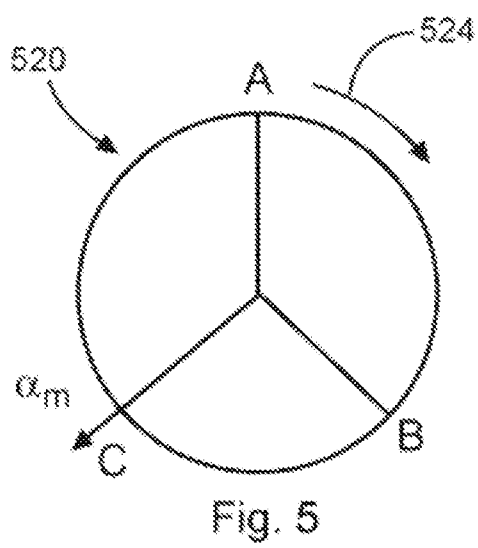
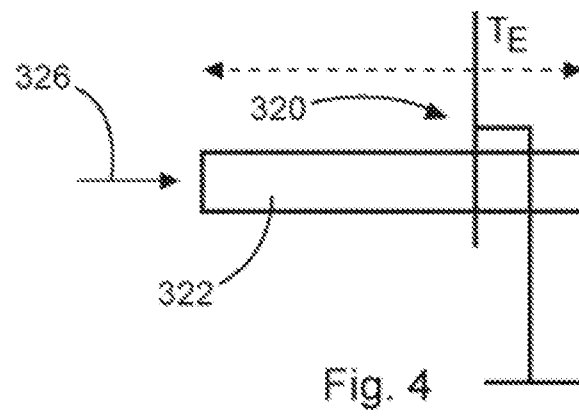
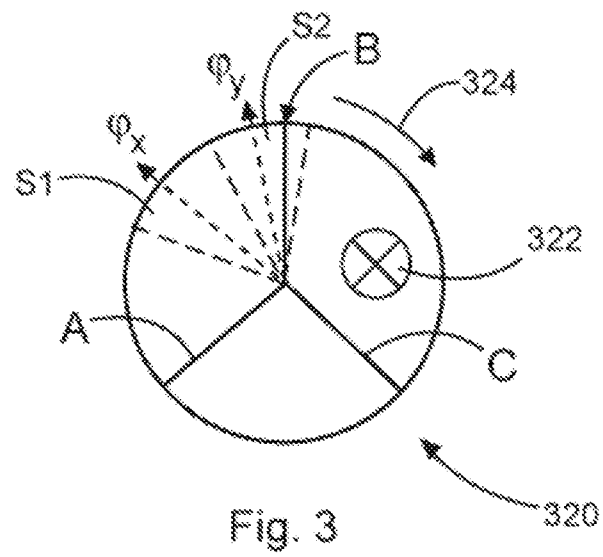


Fig. 2



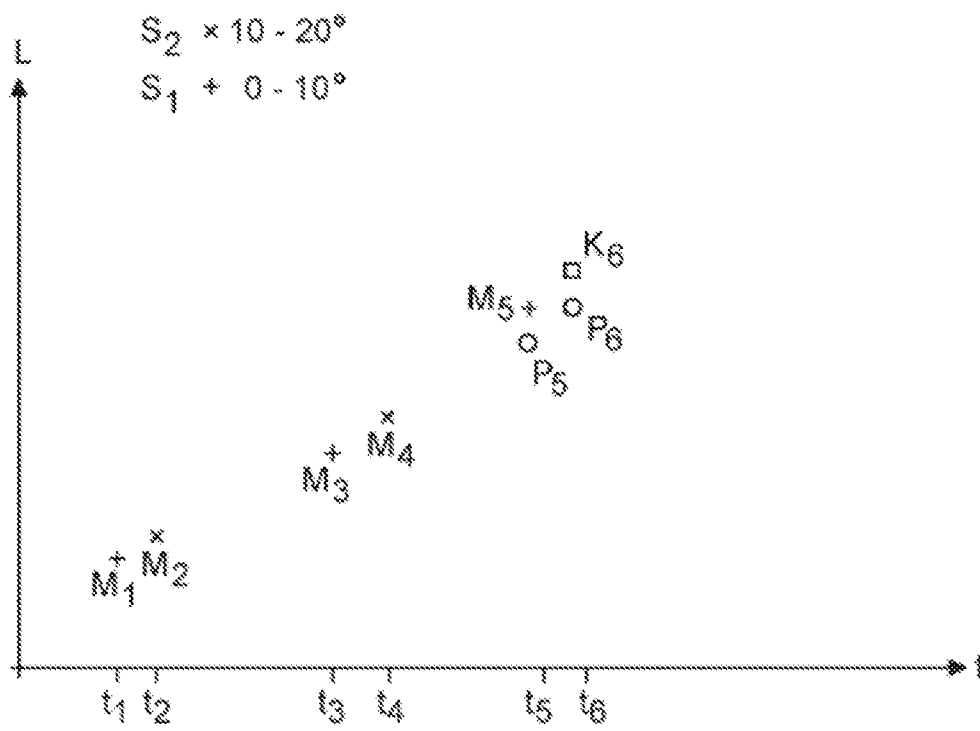


Fig. 7