

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 671 792**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 80/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.01.2014 PCT/EP2014/000149**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.08.2014 WO14124725**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.01.2014 E 14700964 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.03.2018 EP 2956661**

54 Título: **Procedimiento para la comprobación del funcionamiento de un aerogenerador y aerogenerador**

30 Prioridad:
12.02.2013 DE 102013202261

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.06.2018

73 Titular/es:
**SENVION GMBH (100.0%)
Überseering 10
22297 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:
KRAMER, BERTIN

74 Agente/Representante:
LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 671 792 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 la comprobación del funcionamiento de un aerogenerador y aerogenerador

La invención se refiere a un procedimiento para supervisar el funcionamiento de un aerogenerador con una torre, una góndola dispuesta en la torre y un rotor que presenta al menos una pala de rotor, cuyo ángulo de pala se puede ajustar, registrándose durante el funcionamiento del aerogenerador las vibraciones de la pala de rotor de al menos una pala de rotor por medio de al menos un dispositivo de medición y determinándose a partir de las vibraciones de pala de rotor registradas al menos una frecuencia resonante momentánea de la al menos una pala de rotor, registrándose adicionalmente al menos un parámetro ambiental y/o al menos un parámetro de funcionamiento que influye o influyen en la frecuencia resonante de la al menos una pala de rotor. La invención también se refiere además a un dispositivo de control del funcionamiento de un aerogenerador, así como a un aerogenerador correspondiente.

La presente invención se refiere especialmente a la supervisión del estado de las palas de rotor de un aerogenerador. Las palas de rotor son algunos de los componentes más cargados de un aerogenerador durante su funcionamiento. Las palas de rotor están expuestas al viento y transmiten la energía almacenada en el viento en un movimiento de rotación, por lo que están expuestas a elevadas fuerzas de empuje, fuerzas de flexión, fuerzas centrífugas, turbulencias, cambios de carga, etc. Adicionalmente, las palas de rotor también están expuestas a influencias ambientales como la radiación solar, la lluvia, las nevadas y la formación de hielo.

Para que un aerogenerador funcione de forma rentable, las palas de rotor deben diseñarse para poseer una larga vida útil, pero también para que sean lo más ligeras posible. En su diseño deben tenerse en cuenta tanto la aerodinámica, las cargas que se producen, la dinámica del funcionamiento, la posibilidad de regulación y control del funcionamiento, como también el material. Los aspectos de seguridad consisten, entre otros, en desequilibrios, resonancias, desprendimiento de hielo y fatiga del material que también pueden producirse en las palas de rotor. Con respecto a la rentabilidad, deben considerarse especialmente la producción de energía de las palas de rotor en relación con su ubicación, las mediciones del viento asociadas, así como una vida útil lo más larga posible de las palas de rotor.

Dado que, por motivos de rentabilidad, las palas de rotor no deben sobredimensionarse, resulta deseable controlar las palas de rotor durante el funcionamiento para garantizar que, en caso de un aumento de las cargas que rebase las cargas en las que se basa el diseño de las palas de rotor, sea posible tomar medidas, a fin de reducir dichas cargas. Un ejemplo es el uso de la supervisión para la detección de la formación de hielo en las palas de rotor que resulta deseable en muchos lugares con un clima relativamente frío. La formación de hielo se puede producir incluso a temperaturas por debajo de los 3° Celsius y, por una parte, supone una carga como masa adicional para las palas del rotor y, por otra parte, representa como fuente de caída de hielo un peligro para las personas, los animales y los objetos que se encuentran en los alrededores.

Por el documento DE 10 2005 017 054 A1 se conocen un procedimiento y un dispositivo para la supervisión del estado de las palas de rotor en aerogeneradores. En este caso, el estado de las palas de rotor se supervisa por medio de la medición del ruido propagado por estructuras sólidas de al menos una pala de rotor con al menos un sensor fijado en la pala de rotor que está conectado a una unidad de transmisión inalámbrica de las señales de salida de los sensores a una unidad de evaluación en la que se determina un espectro de frecuencias a partir de las señales mediante métodos adecuados, comparándose el espectro de frecuencias con los espectros de referencia parametrizados correspondientes a los estados de deterioro y especiales definidos y almacenados en la unidad de evaluación y determinándose a partir de los mismos el estado de la pala de rotor. Aquí se lleva a cabo una medición del ruido propagado por estructuras sólidas a partir de una sucesión de una pluralidad de mediciones individuales realizadas directamente una tras otra, ajustándose el inicio de cada una de estas mediciones individuales a un ángulo de giro uniforme de la pala de rotor en relación con el eje de giro del rotor y acumulándose todos los espectros de frecuencia determinados de cada medición individual antes de la comparación con los espectros de referencia.

Mediante el ajuste del ángulo de giro uniforme es posible determinar no sólo la curva de amplitud del espectro de frecuencias, sino también su posición de fase. Las mediciones se realizan con un alto índice de repetición o de exploración para capturar el espectro armónico. Las amplitudes y las fases de los distintos armónicos de las ondas fundamentales (frecuencias resonantes) de la pala de rotor se convierten en un vector que se compara a continuación mediante métodos estadísticos adecuados con vectores del espectro de frecuencias para diferentes casos de deterioro, a fin de determinar una similitud con casos de deterioro conocidos. Dado que este procedimiento se puede utilizar de distintas maneras y es muy potente, requiere la instalación de un sistema adicional en un aerogenerador.

El documento WO 2012/000509 A2 se refiere a un procedimiento para detectar la formación de hielo y otras cargas en las palas de rotor de aerogeneradores. En este caso, los actuadores existentes, por ejemplo, los actuadores del ángulo de pala, se utilizan para excitar las vibraciones de las palas de rotor. Los sensores de vibración en la pala de rotor miden las vibraciones de la pala. La respuesta de medición se compara con las respuestas de referencia previamente registradas, de manera que sea posible determinar una formación de hielo en la pala de rotor. Alternativamente, los datos del sensor de este sistema activo también pueden utilizarse como entrada a un modelo matemático para la determinación del comportamiento variable de las palas de rotor. El sistema incluye un

analyzer de espectro. El espectro se puede utilizar para determinar el estado de la pala de rotor. También se registran y evalúan las variaciones en las frecuencias de resonancia o los cambios en el espectro.

El documento EP 2 511 524 A1 se refiere a un dispositivo y a un procedimiento para la supervisión de una pala de rotor para un aerogenerador por medio de un dispositivo de supervisión que comprende un sensor y al menos una marca detectable por el sensor y dispuesta en la pala de rotor. Los datos de movimiento se determinan a partir de los datos de posición medidos de la marca, comprendiendo los datos de movimiento formas propias dependientes del tiempo y oscilaciones, especialmente frecuencias resonantes y/o modos de oscilación. Además se proporcionan datos de referencia que se han determinado mediante una simulación o una medición de referencia. Gracias a la evaluación de la información espectral de los datos de movimiento registrados, es posible realizar comprobaciones muy precisas del estado de la pala de rotor. Los parámetros ambientales también se tienen en cuenta en la comparación con los datos de referencia.

Por el contrario, la presente invención se basa en la tarea de poner a disposición una supervisión del funcionamiento de un aerogenerador, especialmente con respecto a la formación de hielo u otros casos de deterioro, la cual garantice con poco esfuerzo un funcionamiento seguro del aerogenerador.

Esta tarea se resuelve mediante un procedimiento para la supervisión del funcionamiento de un aerogenerador con una torre, con una góndola dispuesta en la torre y con un rotor que presenta al menos una pala de rotor, cuyo ángulo de pala se puede ajustar, registrándose durante el funcionamiento del aerogenerador, por medio de al menos un dispositivo de medición, las vibraciones de la pala de rotor de la al menos una pala de rotor y determinándose a partir de las vibraciones de la pala de rotor registradas al menos una frecuencia resonante momentánea de la al menos una pala de rotor, registrándose adicionalmente al menos un parámetro ambiental y al menos un parámetro de funcionamiento que influyen en la al menos una frecuencia resonante de la al menos una pala de rotor, perfeccionándose dicho procedimiento por el hecho de que se registran adicionalmente al menos tres parámetros, concretamente

- una temperatura

- una velocidad de rotor, una velocidad de generador y/o un parámetro asociado a las mismas, especialmente una velocidad del viento y

- un ángulo de pala de rotor y/o una potencia generada,

calculándose para la al menos una frecuencia resonante momentánea determinada de la al menos una pala de rotor al menos un valor previsto de frecuencia resonante dependiente del (de los) parámetro(s) ambiental(es) y de funcionamiento detectados adicionalmente y al menos un intervalo de certeza, controlando si la frecuencia resonante momentánea determinada se encuentra dentro o fuera del intervalo de certeza en torno al valor previsto de frecuencia resonante.

Por lo tanto, el procedimiento según la invención representa un método particularmente sencillo y seguro para detectar casos especiales de funcionamiento como, por ejemplo, la formación de hielo en las palas de rotor. Con esta finalidad se controla al menos una frecuencia resonante de la pala de rotor como ya ocurre en parte en el estado de la técnica. También pueden controlarse, por ejemplo, de dos a cuatro frecuencias resonantes, por ejemplo, respectivamente la primera y/o la segunda frecuencia resonante en la dirección de giro y/o en la dirección de impacto. Para ello se registra el desarrollo temporal de las vibraciones de pala de rotor por medio de un dispositivo de medición y se determina la frecuencia resonante momentánea de la pala de rotor a partir de las vibraciones de la pala de rotor registradas. Esto puede realizarse, por ejemplo, mediante una transformación de Fourier, especialmente una transformada rápida de Fourier (FFT), mediante un análisis de ondulaciones u otros procedimientos adecuados conocidos, así como mediante una posterior detección de máximos en el espectro de frecuencias.

Sin embargo, al contrario que en el estado de la técnica, no es necesario registrar un espectro armónico completo. La omisión del mismo ya simplifica considerablemente el procedimiento gracias a la reducción de los índices de exploración. Dado que las frecuencias básicas de las frecuencias resonantes de las palas de rotor se encuentran normalmente en el rango de uno a unos pocos Hz, resulta suficiente, por consiguiente, registrar las vibraciones con un índice de muestreo o de exploración comparativamente bajo. Así, una frecuencia de exploración de sólo 20 Hz permite en principio cubrir el espectro de frecuencias de hasta 10 Hz en el que normalmente se encuentran las oscilaciones fundamentales o las primeras frecuencias resonantes, así como, en su caso, las segundas frecuencias resonantes. Para mejorar la precisión resulta ventajoso un índice de exploración de hasta 50 Hz. En comparación con el procedimiento conocido por el documento DE 10 2005 017 054 A1, en el que se requerían índices de muestreo de hasta 1000 Hz para el registro de espectros armónicos, resulta por lo tanto una reducción significativa del esfuerzo y de la velocidad de procesamiento necesaria.

A diferencia del estado citado de la técnica según el documento DE 10 2005 017 054 A1, ahora tampoco es necesario mantener un arsenal de espectros de referencia, parametrizarlos en vectores ni llevar a cabo un análisis de similitud, sino que es suficiente con formar un valor previsto en dependencia de los parámetros ambientales y/o de los parámetros de funcionamiento del aerogenerador y con comparar las frecuencias resonantes medidas con este valor previsto. El valor previsto depende, según la invención, de los parámetros ambientales y/o de los

parámetros de funcionamiento. El esfuerzo de cálculo, así como el esfuerzo en relación con el espacio de almacenamiento disponible se reducen significativamente en comparación con el procedimiento conocido.

Preferiblemente se comunica un rebasamiento del al menos un intervalo de certeza a un sistema de gestión de funcionamiento del aerogenerador. En este caso, un rebasamiento del intervalo de certeza significa que el valor de la diferencia entre la frecuencia resonante momentánea determinada y el valor previsto es mayor que el intervalo de certeza. Puede tratarse tanto de un rebasamiento de un valor límite superior, como también de una caída por debajo de un valor límite inferior, formándose los valores límite a través del intervalo de certeza en torno al valor previsto. Un mensaje como éste puede ser preferiblemente una advertencia de hielo o un mensaje de hielo, en especial en caso de caer por debajo de un valor límite inferior. En este caso, el sistema debe bien apagarse o bien ponerse en funcionamiento a una potencia reducida en la que las palas de rotor y todo el aerogenerador sigan funcionando de forma segura, incluso si, por ejemplo, se forma hielo.

La detección de las vibraciones de la al menos una pala de rotor se lleva a cabo preferiblemente por medio de sensores fijados en los rotores, en especial sensores fijados en las palas de rotor que comprenden especialmente sensores de aceleración, sensores de deformación y/o sensores de dilatación correspondientes se disponen con preferencia dentro de la raíz de la pala de rotor o en la raíz de la pala de rotor. Los sensores ventajosos adecuados son los conductores de luz con rejillas de fibra Bragg (FBG). Los calibres extensométricos o los sensores acústicos que miden el ruido propagado por estructuras sólidas también resultan apropiados en el marco de la presente invención.

Como parámetro de funcionamiento se registra según la invención una velocidad del rotor, una velocidad del generador o un parámetro asociado a las mismas. Las fuerzas centrífugas dependientes de la velocidad influyen notablemente en las frecuencias resonantes. Una mayor velocidad del rotor da lugar a una rigidez, al igual que en el caso de una cuerda tensada, lo que conduce a un aumento de la frecuencia resonante.

Según la invención como parámetro ambiental se registra o registran alternativa o adicionalmente una temperatura y/o una velocidad del viento y/o como parámetro de funcionamiento se registran un ángulo de pala de rotor y/o una potencia generada. Estos parámetros influyen directa o indirectamente en el comportamiento vibratorio de la pala de rotor supervisada o están correlacionados con el mismo. De este modo, el material de la pala de rotor se endurece a temperaturas decrecientes, lo que da lugar a un aumento del módulo de elasticidad y, por lo tanto, de la frecuencia resonante de oscilación. El ángulo de la pala de rotor varía la orientación de la pala de rotor hacia el plano del rotor y, por consiguiente, la conexión técnica de vibración al sistema en su conjunto a través de la variación de las condiciones de sujeción, de manera que el ángulo de la pala de rotor también influya en la frecuencia fundamental o en la frecuencia resonante o en las frecuencias resonantes de la pala de rotor.

La potencia generada también es un factor que se correlaciona con la frecuencia resonante, dado que en el rango de carga parcial y en el rango de carga completa del aerogenerador, tanto la velocidad, como también los ángulos de la pala de rotor varían y con el aumento de la velocidad del viento las palas del rotor están sometidas a cargas más elevadas y se doblan fuera del plano del rotor. La velocidad del viento reinante también está correlacionada con la frecuencia resonante o con las frecuencias resonantes, especialmente a través de la potencia generada, de la velocidad y del ángulo de paso.

En el marco de la invención, la velocidad puede ser tanto la velocidad del rotor, como también la velocidad del generador, especialmente en el caso de aerogeneradores en los que el rotor está conectado al generador a través de un engranaje. Un engranaje como éste suele tener una transmisión fija, de manera que la velocidad del rotor y la velocidad del engranaje estén vinculadas entre sí.

Preferiblemente, una función en la que se basa el al menos un valor previsto de frecuencia resonante se puede adaptar a una configuración actual de turbina por medio de una evaluación estadística de los datos de medición. En el marco de la invención esto significa que el al menos un valor previsto de frecuencia resonante o la al menos una función generadora se pueden adaptar a una configuración de turbina actual y no se ajusta definitivamente de forma fija en el inicio del funcionamiento de un aerogenerador. La configuración actual puede experimentar cambios estructurales o, por ejemplo, signos de envejecimiento en componentes como las palas de rotor. Éstos pueden dar lugar a un cambio progresivo de las frecuencias resonantes supervisadas que deberían tenerse en cuenta en la supervisión durante la vida útil de un aerogenerador. Para ello se puede controlar, por ejemplo, si los valores de medición para la frecuencia resonante de la pala de rotor están sistemáticamente por encima o por debajo del valor previsto. Si esto ocurre durante el funcionamiento continuo sin indicación de fallo, la función que genera el valor previsto se adapta a las condiciones actuales o a la configuración actual de la turbina.

En una forma de realización sencilla y ventajosa, el al menos un valor previsto de frecuencia resonante se calcula como resultado de una función de modelo basada en una simulación del aerogenerador que depende del o de los parámetro(s) ambiental(es) y/o del o de los parámetro(s) de funcionamiento, generándose datos de medición de vibraciones simulados especialmente en la simulación. Estos datos de medición de vibraciones simulados se pueden generar, por ejemplo, con un índice de exploración correspondiente a un índice de exploración realmente utilizado, a fin de que la simulación sea lo más realista posible. Una simulación como ésta ya puede reproducir de forma satisfactoria la dependencia de la(s) frecuencia(s) resonante(s) de los parámetros ambientales y de funcionamiento. En la práctica, la función basada en la simulación puede asumirse directamente o, si resulta que las frecuencias

resonantes reales difieren sistemáticamente de las de la simulación, pueden introducirse las correcciones sistemáticas y los términos de corrección correspondientes.

En una alternativa también se prevé ventajosamente que el al menos un valor previsto de frecuencia resonante se calcule por medio de los datos de medición reales del aerogenerador a supervisar para las vibraciones de la al menos una pala de rotor en condiciones de funcionamiento normales. En este caso, casi nunca son necesarias más correcciones.

Preferiblemente, el al menos un valor previsto de frecuencia resonante se calcula como resultado de al menos una función de ajuste (cálculo de ajuste), en especial de acuerdo con el método de mínimos cuadrados en relación con los datos de medición simulados o reales de las vibraciones de la al menos una pala de rotor, dependiendo especialmente la función de ajuste de la frecuencia resonante linealmente del o de los parámetro(s) ambiental(es) y/o del o de los parámetro(s) de funcionamiento. En el caso del ángulo de ajuste de la pala también se pueden utilizar de forma alternativa y ventajosa una función senoidal o una función cosenoidal.

Para cada frecuencia resonante supervisada se utiliza una función de ajuste propia. La función de ajuste respectiva se basa en datos de medición de vibraciones reales o simulados de la pala de rotor o de las palas de rotor del aerogenerador en funcionamiento continuo sin mensajes de fallo. Dado que las dependencias de los parámetros ambientales y de los parámetros de funcionamiento pueden aproximarse linealmente con una buena aproximación, resulta una implementación del procedimiento especialmente sencilla y fácil de calcular. En este caso, el método de mínimos cuadrados también se denomina especialmente regresión múltiple. Si la función de ajuste sólo presenta dependencias lineales, se trata de una regresión lineal que tiene lugar antes de la supervisión. En funcionamiento esto significa que para cada valor de medición momentáneo de la frecuencia resonante o las frecuencias resonantes se utiliza durante la supervisión respectivamente una función de ajuste muy simple junto con los parámetros ambientales o los parámetros de funcionamiento también medidos, determinándose de un modo extremadamente sencillo un valor previsto para la frecuencia resonante.

Especialmente en el caso de que las vibraciones medidas directamente en el aerogenerador real o en las palas de rotor deban ser la base de la al menos una función de ajuste, se prevé preferiblemente que la al menos una función de ajuste se adapte a una configuración individual de la turbina en una fase de aprendizaje especialmente de forma automática. Esto puede ocurrir al principio de la vida útil o del funcionamiento de un aerogenerador, pero también en cualquier caso si la configuración del aerogenerador cambia, por ejemplo, a causa de una reparación o una sustitución de las palas de rotor o de otros componentes relevantes en cuanto a las vibraciones.

Durante el funcionamiento continuo, la al menos una función de ajuste también se mejora preferiblemente mediante mediciones adicionales en condiciones de funcionamiento normales. Esto significa que la base de datos, a partir de la cual se calcula o calculan la al menos una función de ajuste o sus parámetros de ajuste o parámetros de regresión, se amplía y, en especial, se extiende a una gama mayor de parámetros ambientales y parámetros de funcionamiento, de manera que sea posible un modelado aún más fiable del comportamiento vibratorio real de la pala de rotor o de las palas de rotor. Los intervalos de certeza también se mejoran o el intervalo de certeza también se mejora aún más como consecuencia de la ampliación de la estadística.

Preferiblemente se calcula también el al menos un intervalo de certeza en función del o de los parámetros ambientales y/o de los parámetros de funcionamiento.

La frecuencia resonante determina preferiblemente la primera frecuencia de giro de pala. En este caso se trata de la frecuencia de vibración con respecto al movimiento pivotante de la pala dentro del plano del rotor. Ésta es particularmente sensible a las variaciones en la configuración, por ejemplo, la fatiga del material o las condiciones de funcionamiento irregulares como, por ejemplo, la formación de hielo en la pala de rotor. Por otra parte, en la mayoría de los casos hay una señal especialmente clara para esta frecuencia de vibración en el espectro de frecuencias. Otras señales igualmente claras suelen estar presentes en la primera frecuencia resonante en la dirección de impacto, así como en la segunda frecuencia resonante en la dirección de giro y la dirección de impacto.

La tarea en la que se basa la invención también se resuelve mediante un dispositivo de control del funcionamiento de un aerogenerador con una torre, con una góndola dispuesta en la torre y con un rotor que presenta al menos una pala de rotor cuyo ángulo de pala se puede ajustar, con al menos un dispositivo de medición que se configura y dispone para el registro de las vibraciones de la pala de rotor de la al menos una pala de rotor durante el funcionamiento del aerogenerador, diseñándose y/o configurándose el dispositivo de control del funcionamiento para la determinación de al menos una frecuencia resonante momentánea de la al menos una pala de rotor a partir de las vibraciones de pala de rotor registradas y para el procesamiento adicional de al menos un parámetro ambiental y de al menos un parámetro de funcionamiento que influyen en la frecuencia resonante de la al menos una pala de rotor, perfeccionándose dicho dispositivo por el hecho de que el dispositivo de control del funcionamiento se diseña y/o configura para procesar adicionalmente al menos tres parámetros, concretamente

- una temperatura
- una velocidad de rotor, una velocidad de generador y/o un parámetro asociado a las mismas, especialmente una velocidad del viento y
- un ángulo de pala de rotor y/o una potencia generada,

- diseñándose y/o configurándose el dispositivo de control del funcionamiento adicionalmente para calcular, para la al menos una frecuencia resonante momentánea determinada de la al menos una pala de rotor, al menos un valor previsto de frecuencia resonante dependiente del o de los parámetro(s) ambiental(es) y/o del o de los parámetro(s) de funcionamiento detectados adicionalmente y al menos un intervalo de certeza, y para supervisar si la al menos una frecuencia resonante momentánea determinada se encuentra dentro o fuera del al menos un intervalo de certeza en torno al, como mínimo, un valor previsto de frecuencia resonante.
- El sistema de control del funcionamiento se diseña y/o configura con especial preferencia para ejecutar un procedimiento según la invención antes descrito. Por lo tanto, las características y ventajas citadas en relación con el procedimiento también se aplican al sistema de control del funcionamiento.
- Finalmente, la tarea en la que se basa la invención también se resuelve mediante un aerogenerador con una torre, con una góndola dispuesta en la torre y con un rotor que presenta al menos una pala de rotor cuyo ángulo de pala se puede ajustar, con al menos un dispositivo de medición que se configura y dispone para detectar las vibraciones de pala de rotor de la al menos una pala de rotor durante el funcionamiento del aerogenerador, y con un sistema de control del funcionamiento según la invención antes descrito.
- Por lo tanto, el procedimiento según la invención se implementa en el sistema de control del funcionamiento existente en el aerogenerador, no siendo necesario un sistema de supervisión adicional.
- Las características, propiedades y ventajas mencionadas con respecto a los distintos objetos inventivos, es decir, el procedimiento, el sistema de control del funcionamiento y el aerogenerador, también se aplican sin limitación a los demás objetos inventivos relacionados entre sí.
- En la descripción de formas de realización según la invención, así como en las reivindicaciones y los dibujos adjuntos, se pueden ver otras características de la invención. Las formas de realización según la invención pueden cumplir características individuales o una combinación de varias características.
- La invención se describe a continuación sin limitación de la idea inventiva general por medio de ejemplos de realización en relación con los dibujos, haciéndose referencia expresa a los dibujos con respecto a todas las características según la invención no explicadas con mayor detalle en el texto. Se muestra en la:
- Figura 1 una representación esquemática en sección transversal de una pala de rotor,
- Figura 2 una representación conceptual del funcionamiento de un sensor de rejillas de fibra Bragg,
- Figura 3 distribuciones de la velocidad del generador, del ángulo de paso y de la potencia de un aerogenerador en función de la velocidad media del viento,
- Figura 4 una representación de la primera frecuencia resonante de una pala de rotor en dependencia del ángulo de paso y de la velocidad del generador y
- Figura 5 un diagrama de flujo esquemático de un ejemplo de realización de un procedimiento según la invención.
- En los dibujos, los elementos y/o las piezas respectivamente iguales o de tipo similar se dotan de las mismas referencias, por lo que no es necesaria una nueva presentación.
- En la figura 1 se representa esquemáticamente una pala de rotor 2 en la sección transversal. Por medio de una línea discontinua se representa un contorno de perfil en una sección central. La raíz de pala de rotor 4 se representa como un círculo sólido. Se indica un sistema de coordenadas, señalando el eje x en dirección de impacto 5 desde el lado de succión al lado de presión, mientras que el eje y señala en dirección de giro 7 hacia el canto delantero de perfil. El eje z apunta al interior del plano de dibujo hacia la punta de pala no representada.
- En el perímetro interior de la raíz de pala de rotor 4 se montan cuatro sensores de dilatación 6, 6', 8, 8', respectivamente dos sensores de dilatación 6, 6' en la dirección de impacto 5 y dos sensores de dilatación 8, 8' en la dirección de giro 7. Por este motivo, si la pala del rotor se dobla, generalmente un sensor de un par de sensores 6, 6' u 8, 8' se comprime y el otro se expande. Los sensores de dilatación 6, 6', 8, 8' pueden ser, por ejemplo, sensores de rejillas de fibra Bragg.
- En la figura 2 se representa el principio de funcionamiento de un sensor de dilatación 6 basado en una rejilla de fibra Bragg 12. El sensor de dilatación 6 comprende un conductor de luz 10 en cuyo núcleo se aplica en una zona una rejilla de fibra Bragg con un índice de refracción que varía periódicamente. El período de rejilla o la distancia entre dos zonas iguales es Λ .
- Si por un lado se acopla al conductor de luz 10 un espectro de luz amplio 14, se transmite una gran parte del espectro de luz. Sin embargo, debido a la periodicidad de la rejilla de fibra Bragg, una parte de banda estrecha con la longitud de onda Bragg λ_B del espectro de luz se refleja, de manera que el espectro de luz reflejado 16 sólo contenga esta longitud de onda Bragg λ_B . Por el contrario, en el espectro de luz transmitido 15 falta exactamente la parte reflejada de λ_B en comparación con el espectro de luz acoplado 14.
- Si el conductor de luz 10 se expande o comprime como consecuencia de una sollicitación mecánica, la periodicidad Λ de la rejilla de fibra Bragg cambia y la longitud de onda Bragg λ_B varía de forma correspondiente. Por lo tanto, la longitud de onda de la luz reflejada proporciona información sobre la dilatación o compresión del conductor de luz

10. Los cambios continuos de la longitud de onda reflejada también son, por consiguiente, una medida para las vibraciones de la pala de rotor 2 en la que se disponen los sensores de rejilla de fibra Bragg.

Las desviaciones sistemáticas de la longitud de onda Bragg λ_B , por ejemplo, como consecuencia de cambios de temperatura de los sensores, pueden eliminarse disponiendo sensores de rejilla de fibra Bragg similares transversalmente o descargados en un pequeño tubo, estando los mismos ciertamente expuestos a los mismos cambios de temperatura aunque no están sometidos a carga como consecuencia de las vibraciones de la pala de rotor.

La figura 3 muestra en qué medida la velocidad del generador, la potencia y el ángulo de paso, es decir, el ángulo de ajuste de la pala de rotor, dependen de la velocidad del viento reinante en relación con un aerogenerador del tipo MM92 de la solicitante. Cada punto de datos representa un promedio a lo largo de un período de medición determinado de varios minutos, con lo que resulta una dispersión relativamente amplia de los puntos de datos debido a las fluctuaciones que se producen durante el período de medición en las condiciones de funcionamiento. Los puntos de datos más gruesos se basan en una simple simulación del aerogenerador.

Se puede ver que a velocidades del viento bajas la velocidad del generador sólo aumenta al principio con la velocidad del viento. Se trata del así llamado rango de carga parcial en el que aún no se alcanza la potencia nominal del aerogenerador. Después de alcanzar una velocidad nominal del generador, el ajuste del ángulo de pala se utiliza para regular la potencia si la velocidad del viento sigue aumentando. Esta regulación se produce incluso antes de que se alcance la potencia nominal del aerogenerador.

En la figura 4 se representan los resultados de una simulación del aerogenerador, mostrándose por razones de claridad sólo los valores de medición simulados para la primera frecuencia resonante o frecuencia fundamental en la dirección de giro de la pala de rotor en comparación con el ángulo de ajuste de pala (ángulo de paso) y la velocidad del generador. Resulta una distribución fundamentalmente en forma de "V", representando un brazo 20 de la "V" el funcionamiento de viento débil con un ángulo de ajuste de pala constante en la posición de 0° y con una velocidad del generador variable y representando el otro brazo 22 el funcionamiento con un viento más fuerte a una velocidad nominal constante del generador con un ángulo de ajuste de pala variable. Los valores de medición simulados muestran un aumento de la primera frecuencia resonante con una velocidad del generador creciente y una disminución con un ángulo de ajuste de pala creciente. En la zona mostrada, las dependencias son en una buena aproximación lineales. Dependencias similares resultan, por ejemplo, con la temperatura, la velocidad del viento medida y la potencia.

Si las propiedades de vibración de la pala de rotor variaran, por ejemplo, como consecuencia de la formación de hielo o de roturas del material, la frecuencia resonante cambiaría, en especial, la primera frecuencia resonante disminuiría en la dirección de giro debido al aumento de masa en caso de formación de hielo. Si este cambio es significativo ante la dispersión de los datos y la precisión de medición, se puede utilizar, por ejemplo, para un aviso de hielo. También se pueden definir diferentes valores límite o intervalos de certeza, por una parte, para el aviso de hielo y, por otra parte, para la reducción de potencia o la parada del aerogenerador.

La figura 5 representa un desarrollo esquemático de un ejemplo de realización de un procedimiento según la invención. El ejemplo de realización representado comprende dos partes y concretamente en primer lugar una parte en la que se determina la función que se utiliza para generar el valor previsto de frecuencia resonante y, en su caso, el intervalo de certeza, y además una parte en la que se lleva a cabo la supervisión continua del funcionamiento del aerogenerador, por ejemplo, para detectar la formación de hielo en la pala de rotor.

En la primera parte del procedimiento, los datos de medición 34 con respecto a, por ejemplo, la primera frecuencia resonante de la pala de rotor en la dirección de giro, se determinan o extraen a partir de un aerogenerador real 30 o de una simulación 32. Estos datos de medición 34 también son datos de medición o datos simulados relacionados con la temperatura ambiente, la velocidad del viento, la potencia generada, la velocidad del generador, la velocidad del rotor y/o el ángulo de ajuste de pala. A continuación, se puede seleccionar una muestra al azar 36 de los datos de medición 34 para la que se sabe que han predominado respectivamente condiciones de funcionamiento normales y que cubre un rango lo más amplio posible de los parámetros ambientales y/o de funcionamiento que se producen. En el paso 38 se genera a partir de la muestra al azar 36 un conjunto de datos de referencia 40 que presenta de una forma ordenada los datos de medición de la muestra al azar 36 con todos los parámetros ambientales y/o de funcionamiento también registrados.

Al conjunto de datos de referencia 40 se aplica una regresión lineal o también un "Least-Square-Fit" 42 para determinar los coeficientes de regresión 44 para una función de ajuste que puede tener, por ejemplo, una dependencia lineal o cuadrática de uno o varios parámetros ambientales y/o de funcionamiento. También se puede seleccionar una forma mixta en la que, por ejemplo, la dependencia de la primera frecuencia resonante de la velocidad del generador o del rotor, así como de la temperatura, se considere lineal y la dependencia del ángulo de pala se considere cuadrada. Debido a la pluralidad de valores de medición, el sistema de ecuaciones a optimizar resulta en gran medida redundante y se encuentra una solución óptima para todos los parámetros de ajuste. El intervalo de certeza también se puede determinar de forma fiable con la ayuda de la regresión lineal. La función de ajuste así determinada proporciona el valor previsto de la primera frecuencia resonante para cada estado de funcionamiento momentáneo en relación con la temperatura ambiente, la velocidad, el ángulo de pala, etc.

La segunda parte del ejemplo de realización de la figura 5 se refiere a la supervisión. Por ejemplo, se inicia 50 una detección de hielo y se leen 52 los valores de medición actuales del funcionamiento del aerogenerador. Estos valores de medición se refieren a los parámetros ambientales y/o de funcionamiento, como la temperatura, la velocidad del viento, el ángulo de pala, la potencia y/o la velocidad, así como a las señales de vibración registradas de forma continua de la o las palas del rotor procedentes de los sensores de vibración, de aceleración o de dilatación.

Para la detección de hielo se lleva a cabo una distinción de casos 54 con respecto a la temperatura ambiente. Si este valor es superior a un valor límite de un intervalo preferido de 0°C a 5°C, especialmente de 3°C, no cabe esperar una formación de hielo y no se produce ningún mensaje de hielo. No obstante, si la temperatura ambiente no supera los 3 °C, se continúa con los pasos siguientes 56 a 62. Con esta finalidad, a partir de los datos de vibración temporales se determina, en primer lugar en el marco de una transformada rápida de Fourier (FFT) 56, la primera frecuencia resonante en la dirección de giro de la pala rotor. También pueden determinarse otras frecuencias resonantes, por ejemplo, la primera frecuencia resonante en la dirección de impacto de la pala de rotor y/o en su caso la segunda frecuencia resonante si esto resulta útil para la detección de hielo, habiéndose establecido para ello las correspondientes funciones de valor previsto.

En el paso 58 se calculan para las condiciones ambientales y/o de funcionamiento actuales el valor previsto o los valores previstos para la frecuencia resonante o las frecuencias resonantes supervisadas de la función de ajuste elegida y el coeficiente de regresión 44 previamente determinado, así como el correspondiente intervalo de certeza 60. A continuación se comprueba en la distinción de casos 62 si la frecuencia resonante previamente determinada o las frecuencias resonantes previamente determinadas se encuentra o encuentran fuera del intervalo de certeza (respectivo) en torno al valor previsto (respectivo). Si no es el caso, no se emite 66 ningún mensaje de hielo, si es el caso se emite 64 un mensaje de hielo. Acto seguido, la segunda parte del procedimiento pasa a la siguiente iteración si no se cumple ninguna condición de salida y se finaliza 68 la detección de hielo.

La consulta 62 puede definirse como "mayor que" o "mayor que o igual a" o "menor que" o "menor que o igual a" para comprobar si una frecuencia resonante determinada se encuentra dentro o fuera del intervalo de certeza.

En el procedimiento descrito, las frecuencias resonantes supervisadas están normalmente en un rango por debajo de 10 Hz o incluso preferiblemente de hasta 100 Hz. Por este motivo, generalmente es suficiente explorar las vibraciones de las palas de rotor con un índice de exploración de 20 Hz, preferiblemente de hasta 50 Hz, o con igual preferencia de hasta 100 Hz o en especial de hasta 200 Hz. Para lograr una alta precisión de medición de la frecuencia resonante o las frecuencias resonantes supervisadas en el marco de una FFT, el número de exploraciones debería ser del orden de 1000. Esto se realiza, por lo tanto, en un tiempo de medición de aproximadamente 10 a 50 segundos. También es posible supervisar una muestra en curso de mediciones en la que para cada medición individual se utilizan las últimas 1024 ó 2048 mediciones para la FFT. Por ejemplo, una FFT de 500 a 1000 puntos de medición más la determinación del valor de pico en el espectro de frecuencias para la determinación de la frecuencia resonante o las frecuencias resonantes dura considerablemente menos de 1/50 segundos con los sistemas de procesamiento de datos actualmente utilizados y, por consiguiente, también puede implementarse en un dispositivo de control del funcionamiento de un aerogenerador.

A continuación se explica a modo de ejemplo un cálculo de una función de ajuste para un valor previsto de frecuencia resonante. La frecuencia resonante, que depende, por ejemplo, linealmente de la velocidad del generador, del ángulo de paso y de la temperatura, se puede describir, por ejemplo, mediante la siguiente función de modelo:

$$F(\theta_m, \omega_m, T_m) = A \cdot \theta_m + B \cdot \omega_m + C \cdot T_m + D,$$

siendo F la función de modelo lineal con la unidad [Hz], siendo A, B, C y D los coeficientes de regresión de la función, siendo θ_m el ángulo medio de paso durante el período de medición en [°], siendo ω_m la velocidad media del generador durante el período de medición para un punto de medición [1/min] y siendo T_m la temperatura media en [°C]. El tiempo de medición se refiere aquí al tiempo en el que se han recogido, por ejemplo, las 1000 muestras para la FFT.

En primer lugar se genera un conjunto de datos de referencia a partir de los datos de medición disponibles. Éste contiene los valores de medición para el ángulo de ajuste de pala medio o para el ángulo de paso, la velocidad media del generador y la temperatura media para el período de medición citado. Adicionalmente se asignan a estos valores la primera y la segunda frecuencia resonante calculadas. Partiendo del conjunto de datos de referencia, se determinan en el siguiente paso los coeficientes A, B, C y D de la función de modelo para una de estas frecuencias resonantes. Dado que se trata de una función lineal de varias variables independientes, se realiza una regresión lineal múltiple.

La función de modelo se puede escribir de forma general como:

$$y_i = x_{i1}b_1 + x_{i2}b_2 + x_{i3}b_3 + b_4 \quad \text{con } i = 1, \dots, n,$$

siendo n el tamaño de muestra y pudiendo comprender de varios cientos a algunos miles de valores de medición, y siendo b_1 a b_4 los parámetros de regresión A a D.

Es conveniente observar la función de modelo en la notación matricial. En este caso, las minúsculas representan vectores y las mayúsculas matrices. Por lo tanto, se aplica lo siguiente

$$y = Xb + e,$$

siendo el vector $e = (e_1, e_2, e_3, e_4)$ un término de interferencia.

5 En la notación matricial, la ecuación antes citada es

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1k} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}.$$

En el presente caso, $k = 4$ y $x_{i4} = 1$ es para todos i . Con ayuda de una regresión múltiple es posible determinar los coeficientes b_1 a b_4 de manera que la función de modelo se aproxime lo más posible a los datos de medición del conjunto de datos de referencia. Las desviaciones e_i de la función de modelo con respecto a los valores de medición reales se denominan residuos. Éstos se minimizan con el método de mínimos cuadrados ("Least-square fit"), de manera que se minimice

10

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = e'e = (e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n) \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}.$$

Con $e = y - Xb$ resulta para la suma al cuadrado de los residuos después de algunas conversiones:

$$e'e = y'y - 2b'X'y + b'X'Xb.$$

15 Esta suma al cuadrado se minimiza derivando parcialmente la expresión hacia b y poniéndola igual a cero:

$$\min_b(e'e) = \frac{\partial(e'e)}{\partial b} = -2X'y + 2X'Xb = 0$$

$$X'Xb = X'y.$$

Por consiguiente, para los coeficientes b resulta una estimación que minimiza los cuadrados de desviación. Los coeficientes se determinan con $b = (X'X)^{-1} X'y$.

20

Con la ayuda de la función de modelo puede calcularse ahora para cualquier valor x un valor previsto de regresión $\hat{y}_{\text{regresión}}$ para la primera o la segunda frecuencia resonante:

$$\hat{y}_{\text{regresión}} = y = Xb + e.$$

En general, el valor previsto μ en las estadísticas identifica el valor que adopta una magnitud aleatoria en el promedio. Dado que la totalidad tomada como base es a menudo desconocida o infinitamente grande, no siendo posible, por lo tanto, determinar μ , el valor previsto se aproxima mediante el valor medio aritmético \bar{x} de una muestra al azar:

25

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Para obtener una medida para la dispersión de los valores de la muestra en torno a su valor medio, resulta útil la desviación estándar empírica s:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

30

A medida que aumenta el tamaño de la muestra, el valor medio aritmético \bar{x} converge al valor previsto μ . Lo mismo se aplica a la desviación estándar empírica s que se aproxima a la totalidad básica con el tamaño de muestra creciente de la desviación estándar σ . Si se asume una distribución normal de los valores de medición de la muestra x , es posible determinar, con la ayuda de la desviación estándar, la probabilidad P con la que un valor de medición se produce dentro de un intervalo en torno al valor previsto. Este rango también se denomina intervalo de certeza.

35

Los límites de este intervalo de certeza son, por ejemplo, de una probabilidad del 99 %:

$$\mu - U_{99} \cdot \sigma < X < \mu + U_{99} \cdot \sigma$$

El valor U_{99} puede tomarse de las tablas de distribución normal. Para un intervalo de certeza del 99% se aplica $U_{99} = 2,58$.

A continuación se muestra cómo se determina la dispersión de la regresión. El error estándar se puede calcular para la regresión múltiple. Partiendo de la varianza de los residuos de muestra

$$\tilde{s}_e^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 = \frac{e'e}{n}$$

5 se determina un estimador imparcial de la varianza de la totalidad básica corrigiendo la varianza de los residuos de muestra con el factor $n/(n-k)$, siendo n el número de observaciones y k el número de grados de libertad, en el ejemplo $k = 4$. La raíz de la varianza corregida da como resultado el error estándar de la regresión

$$\hat{s}_{\text{regresión}} = \sqrt{\frac{e'e}{n-k}}$$

10 En caso de un tamaño de muestra lo suficientemente grande, $\hat{y}_{\text{regresión}}$ se aproxima al valor previsto μ de la totalidad básica y $\hat{s}_{\text{regresión}}$ se aproxima a la desviación estándar σ de la totalidad básica. Esto puede asumirse con una buena aproximación para un tamaño de muestra $n > 500$. Por lo tanto, a partir de la regresión múltiple se puede especificar un intervalo de certeza en el que se encontrarán los datos de medición reales y_{real} . Suponiendo una distribución normal de los valores de medición, esto significa que con una probabilidad del 99% se aplica

$$\hat{y}_{\text{regresión}} - 2.58 \cdot \hat{s}_{\text{regresión}} < y_{\text{real}} < \hat{y}_{\text{regresión}} + 2.58 \cdot \hat{s}_{\text{regresión}}$$

15 Este hecho se utiliza en el ejemplo de realización según la invención para la detección de hielo. La idea en la que se basa el procedimiento desarrollado consiste en que el hielo en las palas de rotor da lugar a un aumento de la masa que se hace perceptible a través de una disminución de la primera (y segunda) frecuencia resonante. Para un punto de funcionamiento concreto, el valor previsto μ se determina mediante la función de modelo. A continuación se comparan los valores de medición reales para la primera y, en su caso, la segunda frecuencia resonante con el valor previsto correspondiente. Si el valor de medición para la primera frecuencia resonante o si ambos valores de medición son más pequeños que el límite inferior del intervalo de certeza respectivo en torno al valor previsto, puede asumirse una alta probabilidad de hielo en la pala de rotor. Como condición adicional se establece que la temperatura media es menor de 3°C. La probabilidad de error en caso de una desviación significativa es como máximo del 0,5 %.

25 Todas las características citadas, incluidas las características que se deducen por sí solas de los dibujos, así como las características individuales reveladas en combinación con otras características, se consideran fundamentales para la invención por sí solas y en combinación. Las formas de realización según la invención pueden llevarse a cabo con características individuales o con una combinación de varias características.

Lista de referencias

- 30 2 Pala de rotor
- 4 Raíz de pala de rotor
- 5 Dirección de impacto
- 6, 6' Sensor de dilatación en dirección de impacto
- 7 Dirección de giro
- 35 8, 8' Sensor de dilatación en dirección de giro
- 10 Fibra guiaondas
- 12 Rejilla de fibra Bragg
- 14 Espectro de luz acoplado
- 15 Espectro de luz transmitido
- 40 16 Espectro de luz reflejado
- 20 Rango de carga parcial
- 22 Rango de plena carga
- 30 Sistema real
- 32 Simulación
- 45 34 Datos de medición
- 36 Muestra al azar a partir de datos de medición

	38	Generación de un conjunto de datos de referencia
	40	Conjunto de datos de referencia
	42	Realización de una regresión múltiple
	44	Coefficientes de regresión
5	50	Inicio de la detección de hielo
	52	Lectura de valores de medición
	54	Distinción de casos: temperatura > 3°C
	56	FFT, determinación de la 1ª (y de la 2ª) frecuencia resonante
	58	Cálculo del valor previsto
10	60	Cálculo del intervalo de certeza
	62	Distinción de casos: ¿desviación significativa?
	64	Mensaje de hielo
	66	Ningún mensaje de hielo
	68	Finalización de la detección de hielo
15	λ_B	Longitud de onda Bragg
	Λ	Período de la rejilla de fibra Bragg

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la supervisión del funcionamiento de un aerogenerador con una torre, una góndola dispuesta en la torre y un rotor que presenta al menos una pala de rotor (2), cuyo ángulo de pala se puede ajustar, registrándose durante el funcionamiento del aerogenerador las vibraciones de la pala de rotor de la al menos una pala de rotor (2) por medio de al menos un dispositivo de medición (6, 6', 8, 8') y determinándose a partir de las vibraciones de pala de rotor registradas al menos una frecuencia resonante momentánea de la al menos una pala de rotor (2), registrándose adicionalmente al menos un parámetro ambiental y/o al menos un parámetro de funcionamiento que influyen en la frecuencia resonante de la al menos una pala de rotor (2), caracterizado por que se registran adicionalmente al menos tres parámetros, concretamente
- 5 - una temperatura,
 - una velocidad del rotor, una velocidad del generador y/o un parámetro asociado a las mismas, especialmente una velocidad del viento, y
 - un ángulo de pala de rotor y/o una potencia generada,
 calculándose (56, 58) para la al menos una frecuencia resonante momentánea determinada de la al menos una pala de rotor (2) al menos un valor previsto de frecuencia resonante dependiente del (de los) parámetro(s) ambiental(es) y de funcionamiento detectados adicionalmente y al menos un intervalo de certeza y controlándose (62) si la frecuencia resonante momentánea determinada se encuentra dentro o fuera del intervalo de certeza en torno al valor previsto de frecuencia resonante.
- 15
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que un rebasamiento del al menos un intervalo de certeza se comunica (64) a un sistema de gestión del funcionamiento del aerogenerador.
- 20
3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado por que la detección de las vibraciones de la al menos una pala de rotor (2) se lleva a cabo por medio de sensores fijados en los rotores, en especial sensores fijados en la pala de rotor que comprenden especialmente sensores de aceleración, sensores de deformación y/o sensores de dilatación (6, 6', 8, 8').
- 25
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que una función en la que se basa el al menos un valor previsto de frecuencia resonante se puede adaptar a una configuración actual de turbina por medio de una evaluación estadística de los datos de medición.
- 30
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que el al menos un valor previsto de frecuencia resonante se calcula como resultado de una función de modelo basada en una simulación del aerogenerador (32) que depende del o de los parámetro(s) ambiental(es) y/o del o de los parámetro(s) de funcionamiento, generándose datos de medición de vibraciones simulados especialmente en la simulación.
- 35
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que el al menos un valor previsto de frecuencia resonante se calcula para las vibraciones de la al menos una pala de rotor (2) en condiciones de funcionamiento normales por medio de datos de medición reales (34, 36, 38) del aerogenerador real (30) a supervisar.
- 40
7. Procedimiento según la reivindicación 5 ó 6, caracterizado por que el al menos un valor previsto de frecuencia resonante se calcula como resultado de al menos una función de ajuste (cálculo de ajuste), especialmente según el método de mínimos cuadrados en relación con los datos de medición simulados o reales para las vibraciones de la al menos una pala de rotor (2), dependiendo especialmente la función de ajuste de la frecuencia resonante linealmente del o de los parámetro(s) ambiental(es) y/o del o de los parámetro(s) de funcionamiento, adaptándose especialmente la al menos una función de ajuste a una configuración individual de la turbina en una fase de aprendizaje especialmente de forma automática.
- 45
8. Procedimiento según la reivindicación 7, caracterizado por que, durante el funcionamiento continuo, la al menos una función de ajuste se mejora preferiblemente mediante mediciones adicionales en condiciones de funcionamiento normales.
- 50
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que también se calcula el al menos un intervalo de certeza en dependencia del o de los parámetros ambientales y/o parámetros de funcionamiento.
- 55
10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado por que como frecuencia resonante se determina la primera frecuencia de giro de pala.
- 60
11. Dispositivo de control del funcionamiento de un aerogenerador con una torre, con una góndola dispuesta en la torre, con un rotor que presenta al menos una pala de rotor (2), cuyo ángulo de pala se puede ajustar, y con al menos un dispositivo de medición (6, 6', 8, 8') que se configura y dispone para el registro de las vibraciones de la pala de rotor de la al menos una pala de rotor (2) durante el funcionamiento del aerogenerador, diseñándose y/o configurándose el dispositivo de control de funcionamiento para la determinación de al menos una frecuencia resonante momentánea (56) de la al menos una pala de rotor (2) a partir de las vibraciones de pala de rotor
- 65

registradas y para el procesamiento adicional de al menos un parámetro ambiental y de al menos un parámetro de funcionamiento que influyen en la frecuencia resonante de la al menos una pala de rotor (2), caracterizado por que el dispositivo de control del funcionamiento se diseña y/o configura para procesar adicionalmente al menos tres parámetros, en concreto

- 5 - una temperatura
- una velocidad del rotor, una velocidad del generador y/o un parámetro asociado a las mismas, especialmente una velocidad del viento y
- un ángulo de pala de rotor y/o una potencia generada,

10 diseñándose y/o configurándose adicionalmente el dispositivo de control del funcionamiento para calcular (58, 60), para la al menos una frecuencia resonante momentánea determinada de la al menos una pala de rotor (2), al menos un valor previsto de frecuencia resonante dependiente del o de los parámetro(s) ambiental(es) y/o de los parámetros de funcionamiento detectados adicionalmente y al menos un intervalo de certeza, y para supervisar (62) si la al menos una frecuencia resonante momentánea determinada se encuentra dentro o fuera del al menos un intervalo de certeza en torno al, como mínimo, un valor previsto de frecuencia resonante.

15 12. Sistema de control del funcionamiento según la reivindicación 11, caracterizado por que el sistema de control del funcionamiento se diseña y/o configura para poner en práctica un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 10.

20 13. Aerogenerador con una torre, con una góndola dispuesta en la torre y con un rotor que presenta al menos una pala de rotor (2) cuyo ángulo de pala se puede ajustar, con al menos un dispositivo de medición (6, 6', 8, 8') que se configura y dispone para el registro de las vibraciones de la pala de rotor de la al menos una pala de rotor (2) durante el funcionamiento del aerogenerador, y con un sistema de control del funcionamiento según la reivindicación 11 ó 12.

Fig. 1

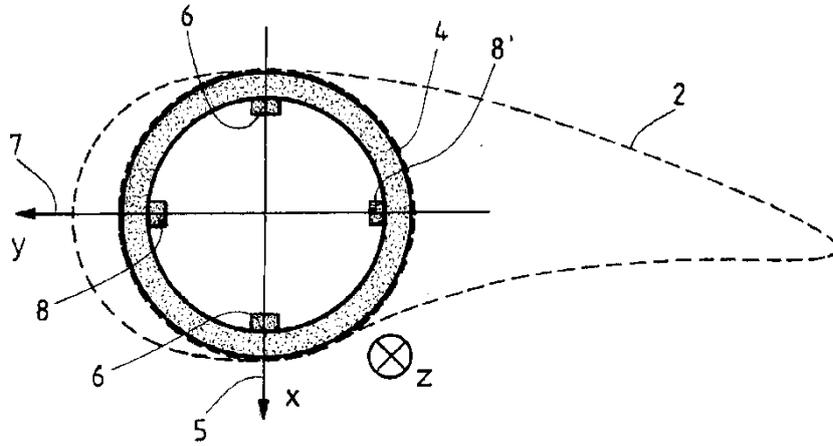


Fig. 2

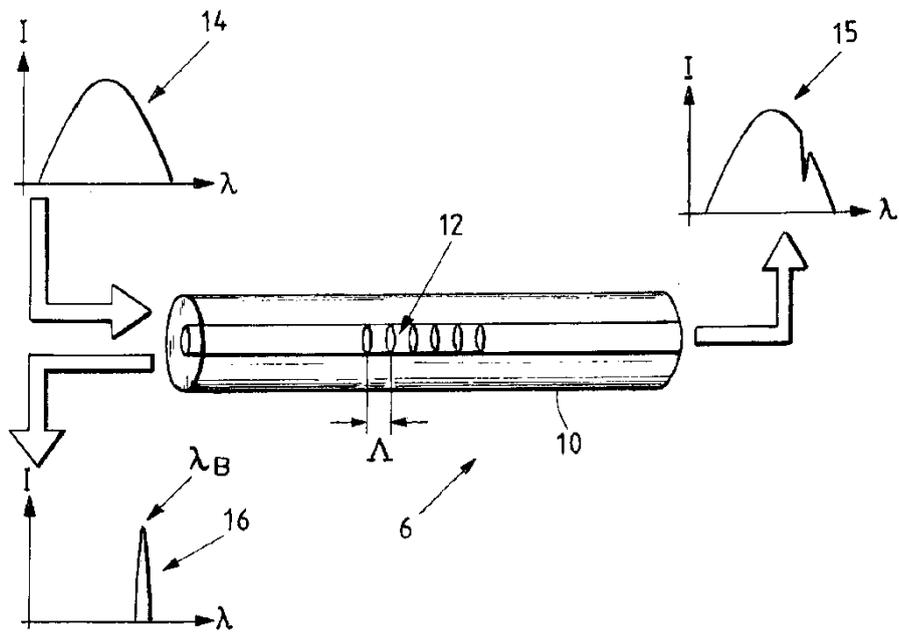


Fig. 3

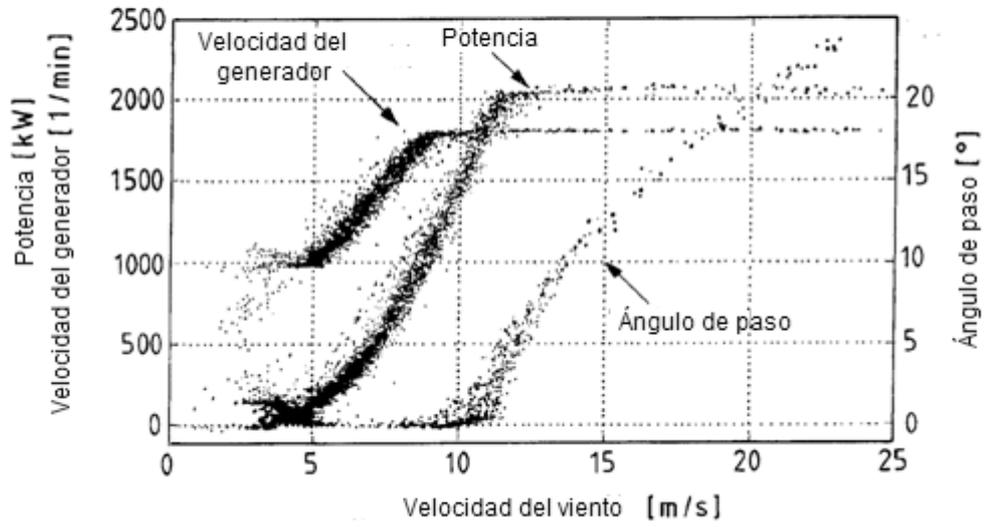


Fig. 4

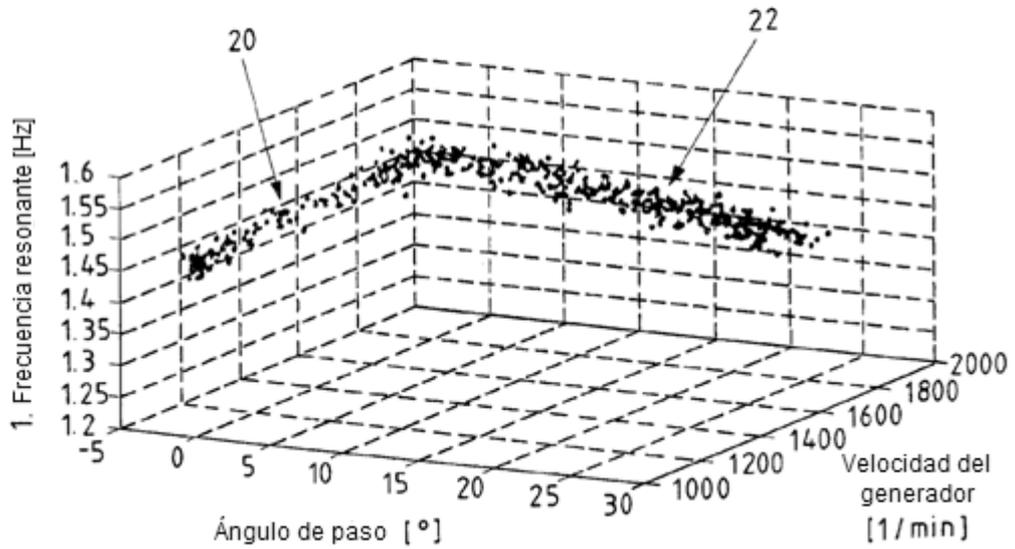


Fig. 5

