

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 757 701**

51 Int. Cl.:

F03D 17/00 (2006.01)

F03D 1/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.01.2011 PCT/EP2011/000422**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.08.2011 WO11092032**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.01.2011 E 11704531 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.08.2019 EP 2531722**

54 Título: **Método de calibración in situ de sensores de carga de una pala de turbina eólica y una turbina eólica**

30 Prioridad:

01.02.2010 EP 10000974

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

29.04.2020

73 Titular/es:

LM WIND POWER A/S (100.0%)

Jupitervej 6

6000 Kolding, DK

72 Inventor/es:

SLOT, MARK, OLAF

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 757 701 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de calibración in situ de sensores de carga de una pala de turbina eólica y una turbina eólica

5 Campo técnico

La presente invención se refiere a un método de calibración in situ de sensores de carga de una turbina eólica de eje horizontal, la turbina eólica comprende: un rotor que incluye un cubo y una serie de palas de turbina eólica, que se extienden radialmente desde el cubo, el cubo se conecta a un tren de accionamiento que incluye un generador, que
10 convierte el movimiento de rotación mecánico del rotor en energía eléctrica, en el que dicho número de palas comprende al menos una primera pala de turbina eólica provista de una serie de primeros sensores de carga colocados en una primera sección transversal de la primera pala de turbina eólica.

Las nuevas palas de la turbina eólica están cada vez más equipadas con sensores de carga utilizados para fines de control y/o monitorización.
15

Antecedentes

Los documentos WO08135789 y EP2112375 de la misma familia de patentes divulgan un método para detectar la formación de hielo en las palas de una turbina eólica, en el que las palas están provistas de sensores de deformación de fibra para medir la deformación mecánica de las palas de la turbina eólica. Los documentos describen que el sensor de deformación de la fibra se puede calibrar mediante el uso de un procedimiento de calibración separado, en el que el ángulo de inclinación se coloca de modo que el componente máximo del peso de la pala actúe en los sensores en forma de aleta y en forma de borde, respectivamente. El rotor de la turbina eólica se hace girar a una velocidad constante para minimizar las fuerzas aerodinámicas y centrífugas y sin carga eléctrica en el generador de la turbina eólica. El procedimiento de calibración se lleva a cabo con las palas en una posición de paso fijo para varias revoluciones del rotor de la turbina eólica. Se puede extraer una señal sinusoidal de los datos utilizando un filtro de paso de banda bloqueado a la frecuencia de rotación de la turbina eólica.
20
25

Los documentos WO08020239 y WO08020240 describen un método de fabricación de una turbina eólica con varias palas de turbina eólica provistas de sensores de rejilla Bragg de fibra óptica.
30

El documento WO09056869 describe un método para controlar la deformación en una pala de turbina eólica, en el que al menos tres sensores de deformación están ubicados en uno de los componentes estructurales de la pala de la turbina eólica en un plano transversal del mismo, en el que se resuelven las señales de deformación de los sensores de deformación. en medidas de deformación en dos direcciones ortogonales.
35

El documento DE102006036157 divulga un método para calibrar un sensor de una turbina eólica. La calibración se lleva a cabo en un proceso separado una vez que se ha enviado una señal de inicio. La calibración se lleva a cabo colocando el rotor en una posición de freno con una pala en posición horizontal y dejando que la pala atraviese un ciclo de inclinación, después de lo cual se analiza la señal de datos del sensor. Alternativamente, la pala se mantiene en un ángulo de inclinación fijo mientras se recopilan datos para varias rotaciones del rotor.
40

Para obtener mediciones fiables, los sensores de carga deben calibrarse. Esto se puede hacer en la fábrica, pero es relativamente costoso. Si por alguna razón los sensores de carga necesitan ser recalibrados después de alguna operación en la turbina, sería muy costoso desmontar las palas y llevarlas a la fábrica para su calibración, lo cual es especialmente evidente para las turbinas eólicas mar adentro. Por lo tanto, existe una demanda de una posibilidad de calibrar los sensores en el sitio y preferiblemente mientras la pala está montada en la turbina eólica y más preferiblemente durante el funcionamiento normal de la turbina eólica.
45
50

Divulgación de la invención

Es un objeto de la invención obtener un nuevo método, que supere o mejore al menos una de las desventajas de la técnica anterior o que proporcione una alternativa útil.
55

De acuerdo con un primer aspecto de la invención, el objeto se obtiene mediante el método que comprende los pasos de: a) determinar un ángulo de acimut del rotor, b) determinar un ángulo de inclinación de la primera pala de turbina eólica, c) medir cargas en la primera sección transversal de la primera pala de la turbina eólica usando los primeros sensores de carga, d) calcular las cargas teóricas basadas en al menos el ángulo de acimut del rotor y el ángulo de inclinación de la pala determinado en los pasos a) y b), e) comparar las cargas medidas en el paso c) con las cargas teóricas calculadas en el paso d), y f) calibrar los primeros sensores de carga en función de la comparación del paso e), en el que la calibración se basa solo en las mediciones realizadas, cuando se corta el generador, y en el que los valores recogidos en los pasos a)-d) se muestrean y calculan repetidamente para cada muestra.
60

La ventaja del presente concepto es que es posible calibrar los sensores en el sitio mientras las palas están montadas en la turbina, es decir, sin necesidad de desmontar las palas de la turbina. La calibración se puede realizar mientras
65

la turbina está funcionando y está conectada a la red. Un sistema registra continuamente los datos relevantes (condiciones de funcionamiento de la turbina y mediciones del sensor), y después de un tiempo ha recopilado suficientes datos para poder realizar una calibración confiable de los sensores. La calibración se realiza de forma totalmente automática. No existe un procedimiento de calibración especial, es decir, no se requiere la interacción humana o la realización de maniobras especiales con la turbina. Todos los datos se recopilan durante el funcionamiento normal de la turbina. Sin embargo, la mayoría de los datos útiles se recopilarán principalmente en situaciones en las que la turbina está inactiva a bajas velocidades del viento y durante el arranque de la turbina. Estas situaciones operativas ocurren con relativa frecuencia, por lo que es solo cuestión de tiempo antes de que el sistema haya recopilado suficientes datos para realizar la calibración. Cuando el sistema recalibra continuamente los sensores, es posible detectar posibilidades repentinas en los valores de calibración que podrían indicar cambios en la rigidez a la flexión. Esto podría revelar el envejecimiento o un posible daño de la pala.

Al calcular una carga teórica para cada muestra basada tanto en el ángulo de acimut del rotor como en el ángulo de inclinación de la pala, se alivia la necesidad de mantener uno de los dos parámetros fijos, y ambos parámetros pueden cambiar entre muestras. En comparación con, por ejemplo, EP2112375 y DE102006036157, esto significa que la calibración de los sensores se puede realizar de forma continua y no tiene que pasar por un proceso de calibración especial. En cambio, las muestras de calibración se pueden recolectar automáticamente cuando las condiciones de la turbina eólica están dentro de los parámetros dados. Además, el método de autocalibración de acuerdo con la presente invención puede llevarse a cabo con mayor precisión, ya que cada muestra se compara con una carga teórica calculada por separado, en la que se pueden tener en cuenta múltiples parámetros. Los métodos de calibración de la técnica anterior se basan en condiciones simplificadas, donde se pueden extraer datos sinusoidales de los ciclos de paso o de los ciclos del rotor. Tales datos rara vez serán verdaderos sinusoidales en la práctica.

El término "desactivado" significa que el generador no está conectado a la red y, por lo tanto, no convierte la rotación del rotor en electricidad, es decir, el par del árbol principal es aproximadamente cero. Esto implica además que también el freno de emergencia no está activado.

De acuerdo con una realización ventajosa, solo las mediciones realizadas cuando la turbina eólica está inactiva y/o durante el arranque de la turbina se utilizan para calibrar los sensores de carga. En otras palabras, el resto de los datos de medición se descartan del proceso de calibración.

De acuerdo con otra realización ventajosa, la turbina eólica comprende dos o tres palas de turbina eólica. El proceso de calibración puede llevarse a cabo para cada pala de turbina eólica.

De acuerdo con aún otra realización ventajosa, los valores determinados en los pasos a)-d) y opcionalmente el paso e) se muestrean repetidamente, y en el que el paso f) se lleva a cabo después de un período de tiempo predeterminado o después de un número predeterminado de muestras distintas se han registrado, alternativamente, que varias muestras distintas exceden un valor umbral mínimo, que está determinado por una función que depende de la frecuencia de muestreo y la propagación de datos.

En una realización, la turbina eólica comprende además frenos para la rotación de frenado del rotor, y en el que solo las mediciones realizadas cuando los frenos no están activados se usan para calibrar los sensores de carga. Es decir, si los frenos están activados, los datos de medición se descartan del proceso de calibración.

En una realización ventajosa, la primera sección transversal comprende al menos dos sensores de carga. De este modo, es posible deducir los momentos de flexión de aletas y bordes por superposición, incluso si los dos sensores no están ubicados en los ejes de flexión exactos. Los al menos dos sensores de carga pueden comprender un primer sensor de carga ubicado cerca del borde de salida de la primera pala de la turbina eólica, y un segundo sensor de carga ubicado entre un borde delantero y el borde de salida de la primera turbina eólica en un lado de succión o lado de presión de la primera pala de turbina eólica. Esto proporciona una realización ventajosa, donde el primer sensor de carga y el segundo sensor de carga están ubicados cerca del primer eje de flexión principal y el segundo eje de flexión principal de la pala, respectivamente. De acuerdo con otra realización, el uno o ambos de los al menos dos sensores de carga están ubicados en los ejes de flexión principales de la pala.

De acuerdo con otra realización, la primera pala de turbina eólica está provista además de una serie de segundos sensores de carga posicionados en una segunda sección transversal de la primera pala de turbina eólica. Los mismos pasos de calibración que se realizaron para la calibración de los primeros sensores de carga también deben llevarse a cabo para la calibración de los segundos sensores de carga. La primera turbina eólica puede comprender sensores de carga solo en 1 a 5 secciones transversales diferentes, ventajosamente solo 1 a 4 secciones transversales diferentes, y más ventajosamente solo 1 a 3 secciones transversales diferentes. La primera pala de turbina eólica puede incluso comprender sensores de carga en solo 1-2 secciones transversales diferentes. Por lo tanto, las mediciones y la calibración se llevan a cabo solo para un pequeño número de sensores de carga, lo que en general reduce la complejidad computacional del sistema.

De acuerdo con una realización ventajosa, los cálculos de la etapa d) se basan en fuerzas gravitacionales y/o momentos gravitacionales de un peso propio de la primera pala de turbina eólica. Los cálculos pueden llevarse a cabo

ventajosamente a través de transformaciones de coordenadas basadas en uno o más de los siguientes parámetros: una inclinación de un cojinete principal del tren de accionamiento, el ángulo de acimut del rotor, el ángulo de inclinación de la primera pala y un ángulo de inclinación de la primera pala. Además, se puede usar una transformación de coordenadas basada en un ángulo entre un sistema de coordenadas de pala y un eje de flexión principal.

5 De acuerdo con otra realización ventajosa, los cálculos de la etapa d) se basan además en fuerzas de inercia y/o momentos de inercia de la rotación del rotor. Tales factores adicionales agregan mayor precisión al proceso de calibración. Las fuerzas de inercia pueden basarse ventajosamente en fuerzas centrífugas y/o fuerzas de Coriolis y/o fuerzas debidas a la aceleración del rotor. Además, puede ser posible agregar fuerzas de inercia debido a la guiñada de la turbina eólica a los cálculos. Esto agrega aún más precisión al proceso de calibración.

10 De acuerdo con aún otra realización, los cálculos de la etapa d) se basan además en fuerzas aerodinámicas y/o momentos aerodinámicos por la rotación del rotor y/o por el viento que impacta la primera pala de la turbina eólica. Dichas fuerzas tienden a acelerar el rotor. Nuevamente, tales factores agregan aún más precisión al método de calibración.

15 Aún más, los cálculos de la etapa d) pueden estar ventajosamente basados adicionalmente en propiedades generales de la primera pala de turbina eólica y una parte de la primera pala de turbina eólica ubicada en el exterior de la primera sección transversal. Por lo tanto, la parte externa comprende la parte de la pala ubicada entre la primera sección transversal y el extremo de la pala. Las propiedades generales pueden basarse en uno o más de los siguientes parámetros: masa, momento de masa, momento de inercia y producto de la inercia. Una vez que se calculan estas propiedades generales, el resto de los cálculos se pueden ejecutar linealmente y consumen mucho menos tiempo, ya que se evita la iteración a través de todas las secciones de la pala. Este enfoque innovador permite un cálculo en tiempo real sin requerir una capacidad computacional excesiva. Esto significa que las mediciones pueden procesarse inmediatamente después de cada muestra, y la calibración puede ejecutarse continuamente, es decir, en tiempo real.

20 En una realización, los cálculos del paso d) se basan además en pérdidas por fricción del tren de accionamiento. Una vez más, tales consideraciones agregan aún más precisión al proceso de calibración.

30 De acuerdo con una realización ventajosa, los datos de medición se filtran de acuerdo con uno o más de los siguientes esquemas. Por ejemplo, es posible descartar los datos de medición obtenidos cuando la velocidad del rotor del rotor excede la velocidad de corte del generador del proceso de calibración, alternativamente que se utiliza un umbral para el filtrado de datos, cuando el generador está activado y/o una velocidad del rotor excede un umbral de velocidad del rotor, para evitar incertidumbres debido a las fuerzas aerodinámicas. Las medidas obtenidas para velocidades de rotor por encima de este umbral se descartan así. Los datos de medición obtenidos cuando una desaceleración del rotor excede un umbral de desaceleración del rotor también pueden descartarse del proceso de calibración. Además, los datos de medición obtenidos cuando la velocidad de rotor absoluta del rotor es inferior a un umbral mínimo de velocidad del rotor pueden descartarse del proceso de calibración. Además, los datos de medición obtenidos cuando el paso de la primera pala de la turbina eólica es mayor que un umbral de paso máximo se pueden descartar del proceso de calibración. Además, los datos de medición obtenidos cuando el paso de la primera pala de la turbina eólica es inferior a un umbral de paso mínimo pueden descartarse del proceso de calibración. Es difícil construir un filtro perfecto que mantenga todos los datos confiables y descarte todos los datos no confiables. En la práctica, siempre habrá cierta superposición. Con la técnica de filtrado mencionada anteriormente, algunos de los datos confiables pueden descartarse, pero lo más importante es que se descartan todos los datos no confiables. Sin embargo, todavía queda una cantidad suficiente de datos para realizar una calibración confiable y precisa.

40 El proceso de calibración puede basarse, por ejemplo, en el ajuste de datos, como el ajuste de curva o el ajuste de plano, por ejemplo, mediante el método de mínimos cuadrados. Un ajuste de plano puede realizarse, por ejemplo, en un diagrama tridimensional que comprende los tres componentes espaciales de las fuerzas y/o momentos mencionados anteriormente.

45 Los sensores de carga pueden ser sensores adecuados, tales como, entre otros, medidores de deformación resistivos, medidores de deformación piezoeléctricos o rejillas de fibra Bragg u otros sensores de fibra.

50 El ángulo de acimut del rotor, el ángulo de inclinación de la pala y la velocidad de rotación del rotor se conocen típicamente a partir de las condiciones operativas de la turbina eólica. Sin embargo, en principio, estos parámetros pueden derivarse mediante el uso, por ejemplo, de acelerómetros u otros dispositivos de medición adecuados.

55 En principio, también puede ser factible calibrar los sensores, cuando el generador está activado, pero esto agrega complejidad a los cálculos, ya que pueden requerirse mediciones precisas del par del eje principal. En tal situación, el método comprende los pasos a)-f) solamente. Por lo tanto, la calibración puede basarse, por ejemplo, solo en mediciones obtenidas cuando la velocidad del viento está por debajo de un umbral predeterminado de velocidad del viento y/o la velocidad de rotación del rotor está por debajo de un umbral predeterminado de velocidad del rotor y/o cualquiera de las realizaciones y métodos de filtrado mencionados anteriormente. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, si la velocidad del rotor es relativamente alta, y/o el ángulo de inclinación es relativamente bajo (que normalmente es el caso cuando el generador está activado), las fuerzas aerodinámicas en la pala pueden introducir

un elemento principal de incertidumbre a los cálculos teóricos. En una situación especial, es posible basar la calibración en datos mientras el generador está conectado a baja velocidad del rotor y el ángulo de inclinación es relativamente alto. Sin embargo, esta es una condición operativa atípica de una turbina eólica.

5 De acuerdo con un segundo aspecto, la invención también proporciona una turbina eólica que comprende: un rotor que incluye un cubo y una serie de palas de turbina eólica, que se extienden radialmente desde el cubo, el cubo está conectado a un tren de accionamiento que incluye un generador, que convierte el movimiento de rotación mecánico del rotor en energía eléctrica, en el que dicho número de palas comprende al menos una primera pala de turbina eólica provista de una serie de primeros sensores de carga que incluyen al menos un sensor de carga primario y un sensor de carga secundario colocados en una primera sección transversal de la primera pala de turbina eólica. La turbina eólica está provista además de un sistema de calibración para calibrar los primeros sensores de carga, el sistema de calibración comprende: medios de extracción para determinar los parámetros operativos de la turbina eólica y al menos un ángulo de acimut del rotor, y un ángulo de inclinación de la primera pala de la turbina eólica, preferiblemente también una velocidad de rotor del rotor, medios de registro registran continuamente muestras que comprenden mediciones de carga obtenidas de los primeros sensores de carga, y los parámetros operativos de la turbina eólica, medios de cálculo para calcular cargas teóricas basadas en dichas muestras, medios de comparación para comparar el cargas teóricas y mediciones de cargas, y medios de calibración para calibrar los primeros sensores de carga basados en valores obtenidos de los medios de comparación. La turbina eólica puede estar adaptada para llevar a cabo cualquiera de las realizaciones del método mencionadas anteriormente.

20 Breve descripción de los dibujos

La invención se explica en detalle a continuación con referencia a una realización mostrada en los dibujos, en la que

25 La Fig. 1 muestra una turbina eólica,

La Fig. 2 muestra una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención provista de sensores de carga,

30 La Fig. 3 ilustra un ángulo de acimut del rotor utilizado en el método de calibración de acuerdo con la invención,

La Fig. 4 ilustra un sistema de coordenadas de barquilla utilizado en el método de calibración de acuerdo con la invención,

35 La Fig. 5 ilustra un sistema de coordenadas de cojinete principal utilizado en el método de calibración de acuerdo con la invención,

La Fig. 6 ilustra un sistema de coordenadas de cojinete de pala utilizado en el método de calibración de acuerdo con la invención,

40 La Fig. 7 ilustra un sistema de coordenadas de pala y un sistema de coordenadas de perfil utilizado en el método de calibración de acuerdo con la invención,

La Fig. 8 ilustra más propiedades generales de la pala de turbina eólica utilizada en el método de calibración de acuerdo con la invención,

45 La Fig. 9 muestra datos de una simulación de arranque de la turbina eólica,

La Fig. 10 muestra cargas gravitacionales y de inercia simuladas en función del tiempo,

50 La Fig. 11 muestra las cargas gravitacionales y de inercia calculadas en función del tiempo basadas en el método de calibración de acuerdo con la invención,

La Figura 12 muestra la diferencia entre las cargas gravitacionales y de inercia calculadas y simuladas,

55 La Fig. 13 muestra las cargas aerodinámicas simuladas en función del tiempo,

La Fig. 14 muestra las cargas aerodinámicas calculadas en función del tiempo basadas en el método de calibración de acuerdo con la invención,

60 La Fig. 15 muestra la diferencia entre las cargas aerodinámicas calculadas y simuladas,

La Fig. 16a-c muestran cargas calculadas versus cargas simuladas sin filtración de datos, y

La Fig. 17a-c muestra cargas calculadas versus cargas simuladas después de la filtración de datos.

65 Descripción detallada de la invención

1. Introducción

Las nuevas palas de la turbina eólica están cada vez más equipadas con sensores de carga utilizados para fines de control y/o monitorización. Para obtener mediciones confiables, los sensores de carga deben calibrarse. Esto se puede hacer en la fábrica, pero es relativamente costoso. Si por alguna razón los sensores de carga necesitan ser recalibrados después de alguna operación en la turbina, sería muy costoso desmontar las palas y llevarlas a la fábrica para su calibración. Por lo tanto, existe una demanda de la posibilidad de calibrar los sensores en el sitio y preferiblemente mientras la pala está montada en la turbina.

Este documento describe un concepto para la calibración completamente automática de los sensores en el sitio mientras la turbina está funcionando y conectada a la red. Se describen los métodos e ideas, y se presentan las ecuaciones necesarias para la implementación en el software del dispositivo de calibración automática.

La Figura 1 ilustra una turbina eólica moderna convencional contra el viento de acuerdo con el llamado "concepto danés" con una torre 4, una barquilla 6 y un rotor con una árbol de rotor sustancialmente horizontal. El rotor incluye un cubo 8 y tres palas 10 que se extienden radialmente desde el cubo 8, cada una con una raíz 16 de pala más cercana al cubo y un extremo 14 de pala más alejado del cubo 8.

La Figura 2 muestra una vista esquemática de una primera realización de una pala 10 de turbina eólica de acuerdo con la invención. La pala 10 de turbina eólica tiene la forma de una pala de turbina eólica convencional y comprende una región 30 de raíz más cercana al cubo, una región perfilada o una región 34 de plano aerodinámico más alejada del cubo y una región 32 de transición entre la región 30 de raíz y la región 34 de plano aerodinámico. La pala 10 comprende un borde 18 de ataque orientado hacia la dirección de rotación de la pala 10 cuando la pala está montada en el cubo, y un borde 20 de salida orientado en la dirección opuesta del borde 18 de ataque.

La región 34 del plano aerodinámico (también denominada región perfilada) tiene una forma de pala ideal o casi ideal con respecto a la generación de elevación, mientras que la región 30 de raíz debido a consideraciones estructurales tiene una sección transversal sustancialmente circular o elíptica, que por ejemplo la hace más fácil y segura montar la pala 10 en el cubo. El diámetro (o la cuerda) de la región 30 de raíz es típicamente constante a lo largo de toda la región 30 de raíz. La región 32 de transición tiene un perfil de transición que cambia gradualmente de la forma circular o elíptica de la región 30 de raíz al perfil de plano aerodinámico de la región 34 del plano aerodinámico. El ancho de la región 32 de transición típicamente aumenta sustancialmente de forma lineal al aumentar la distancia desde el cubo. La región de región 34 de plano aerodinámico tiene un perfil de superficie de sustentación con una cuerda que se extiende entre el borde 18 de ataque y el borde 20 de salida de la pala 10. El ancho de la cuerda disminuye a medida que aumenta la distancia desde el cubo.

Debe observarse que las cuerdas de diferentes secciones de la pala normalmente no se encuentran en un plano común, ya que la pala puede estar torcida y/o curvada (es decir, doblada previamente), proporcionando así al plano de la cuerda el curso torcido y/o curvo, siendo este el caso más frecuente para compensar que la velocidad local de la pala dependa del radio del cubo.

La pala 10 de turbina eólica de acuerdo con la invención está provista de un primer sensor 21 de carga (un primer sensor de aleta) y otro sensor 22 de carga (un primer sensor de borde) ubicado en una primera sección 42 transversal de la pala 10, así como un segundo sensor 23 de aleta y un segundo sensor 24 de borde ubicado en una segunda sección 43 transversal de la pala.

Los cálculos utilizados para el proceso de calibración se basan en los parámetros incluidos en la sección 15 y se ilustran en las Figs. 3-7.

La Figura 3 muestra una turbina eólica con un rotor que comprende tres palas de turbina eólica que incluyen una primera pala 10' de turbina eólica. Un ángulo de acimut del rotor ψ de la primera pala 10' de turbina eólica se define como 0 grados, cuando la pala 10' está apuntando hacia abajo a lo largo de un eje 50 longitudinal de la torre de la turbina eólica. Por lo tanto, el ángulo de acimut del rotor ψ se da como el ángulo entre el eje 50 longitudinal de la torre y un eje 52 longitudinal de la primera pala 10'. Para calcular los ángulos de acimut del rotor de la segunda y tercera pala de turbina eólica, se desplazan 120 grados y -120 grados del ángulo de acimut ψ del rotor de la primera pala 10' de turbina eólica, respectivamente.

Las Figs. 4-6 muestran modelos simplistas de una turbina eólica que ilustran parámetros adicionales usados en el método de calibración de acuerdo con la invención. Los modelos muestran el eje 50 longitudinal de la torre, un eje 51 longitudinal del cojinete principal del tren de accionamiento de la turbina eólica y el eje 52 longitudinal de la primera pala 10' de la turbina eólica. La Figura 4 muestra además un sistema de coordenadas de barquilla utilizado en el proceso de calibración, en el que el eje x se dirige en una dirección a favor del viento de la turbina eólica, el eje z se dirige hacia abajo a lo largo del eje 50 longitudinal de la torre, y el eje y es perpendicular al eje x y al eje z.

La Figura 5 muestra un sistema de coordenadas de cojinete principal fijo y un sistema de coordenadas de rotor giratorio, en el que el modelo se representa con el ángulo de acimut del rotor ψ igual a 0 grados con la primera pala 10° apuntando hacia abajo. El eje x se dirige en dirección a favor del viento de la turbina eólica a lo largo del eje 51 longitudinal del cojinete principal, el eje y se dirige en la misma dirección que el eje y del sistema de coordenadas de la barquilla, y el eje z es perpendicular al eje x y al eje y. El sistema de coordenadas del rotor gira alrededor del eje x, y las coordenadas del sistema de coordenadas de la barquilla pueden transformarse en el sistema de coordenadas del cojinete principal fijo y el sistema de coordenadas del rotor mediante un ángulo de inclinación τ , que se define como el ángulo entre el eje 51 longitudinal del cojinete principal y un plano horizontal.

La Figura 6 muestra un sistema de coordenadas de cojinete de pala y un sistema de coordenadas de pala, en el que el modelo se representa con un ángulo de inclinación θ de la primera pala igual a 0 grados. El eje z se dirige hacia arriba a lo largo del eje 52 longitudinal de la primera pala de la turbina eólica, el eje x se dirige en la misma dirección que el eje y del sistema de coordenadas de la barquilla, y el eje y se dirige en la dirección a favor del viento perpendicular al eje x y al eje z y, por lo tanto, también perpendicular al eje 52 longitudinal de la primera pala de turbina eólica. El sistema de coordenadas del cojinete de la pala gira con el sistema de coordenadas del rotor, y el sistema de coordenadas de la pala gira alrededor del eje z en relación con el sistema de coordenadas del cojinete de la pala según el paso θ de la pala. Las coordenadas del sistema de coordenadas del cojinete principal fijo y el sistema de coordenadas del rotor giratorio pueden transformarse en el sistema de coordenadas del cojinete de la pala y el sistema de coordenadas de la pala a través del ángulo de inclinación θ de la primera pala de la turbina eólica, y un ángulo de cono γ , que se define como el ángulo entre el eje 52 longitudinal de la primera pala de turbina eólica y un plano perpendicular al eje 51 longitudinal del cojinete principal.

La Figura 7 muestra el perfil de la primera sección 42 transversal de la primera pala de turbina eólica e ilustra la relación entre el sistema 28 de coordenadas de pala y un sistema 29 de coordenadas de perfil. El perfil de pala comprende un primer eje 25 de curvatura principal y un segundo eje 26 de flexión principal que se cruza en un centro 27 elástico del perfil de la pala. El sistema 29 de coordenadas de perfil tiene su origen en el centro 27 elástico, y el eje x y el eje y se alinean con el primer eje 25 de flexión principal y el segundo eje 26 de flexión principal, respectivamente, mientras que el eje z se dirige perpendicularmente al eje x y al eje y. El sistema 28 de coordenadas de pala puede transformarse en el sistema 29 de coordenadas de perfil a través de un ángulo ϕ , que se define como el ángulo entre el sistema 28 de coordenadas de pala y los ejes 25, 26 de flexión principales. Se ve que el primer sensor 21 de aleta es ubicado en el borde de salida cerca del primer eje 25 de flexión principal, mientras que el primer sensor 22 de borde está ubicado en un lado de succión del perfil de pala cerca del segundo eje 26 de flexión principal.

2. Descripción del concepto.

La base para el concepto de autocalibración en el sitio descrito en este documento es la turbina REpower 5M con palas LM 61.5 P2 equipadas con un sistema de sensor de fibra, tal como un sistema de sensor de rejilla de fibra Bragg, que consta de dos sensores 21, 22 (un sensor de aleta y un sensor de borde como se muestra en la Fig. 2 y la Fig. 7) colocados en $z = -8.12$ m y dos sensores 23, 24 en $z = -23.12$ m, un total de cuatro sensores por pala. Se observa que las secciones transversales se encuentran en el valor negativo de z, ya que el eje z apunta hacia afuera del extremo, véase Fig. 6. Los sensores 21-24 miden la deformación en la pala en la posición en que están montados. Los sensores 21, 23 de aleta y los sensores 22, 24 de borde no están necesariamente montados exactamente en los ejes 25, 26 de flexión principales, pero es posible utilizar una combinación de las dos mediciones del sensor en una sección transversal de la pala, por el principio de superposición, para calcular los momentos de flexión de forma de aleta y de forma de borde.

La ventaja del presente concepto es que es posible calibrar los sensores 21-24 en el sitio mientras las palas están montadas en la turbina. No es necesario desmontar las palas de la turbina. La calibración se lleva a cabo mientras la turbina está funcionando y conectada a la red. Un sistema registra continuamente los datos relevantes (condiciones de funcionamiento de la turbina y mediciones del sensor), y después de un tiempo ha recopilado suficientes datos para poder realizar una calibración confiable de los sensores.

La calibración se realiza de forma totalmente automática. No existe un procedimiento de calibración especial, es decir, no se requiere interacción humana o maniobras especiales con la turbina. Todos los datos se recopilan durante el funcionamiento normal de la turbina. Sin embargo, la mayoría de los datos útiles se recopilarán principalmente en situaciones en las que la turbina está inactiva a bajas velocidades del viento y durante el arranque de la turbina. Estas situaciones operativas ocurren con relativa frecuencia, por lo que es solo cuestión de tiempo antes de que el sistema haya recopilado suficientes datos para realizar la calibración.

Cuando el sistema recalibra continuamente los sensores, es posible detectar posibilidades repentinas en los valores de calibración que podrían indicar cambios en la rigidez a la flexión. Esto podría revelar el envejecimiento o un posible daño de la pala.

3. Métodos

A continuación, se describe una idea simple que hace posible hacer posibles calibraciones in situ.

Para realizar la calibración, se necesita una medición de los sensores 21-24 mientras la pala está expuesta a una carga conocida. La carga provoca una deformación en la pala en la posición del sensor. Si se conoce la carga, es posible calcular el nivel de deformación teórico. Si la medición del sensor no muestra este valor, el sensor debe calibrarse correspondientemente para mostrar el valor correcto.

Se puede aplicar una carga conocida a la pala por la caja, donde el rotor no gira y se coloca en el ángulo de acimut 90° (es decir, la pala está colgando en una posición horizontal). Cuando se conoce el momento de peso propio de la pala, es posible calcular el nivel de deformación estática. Al cabecear la pala a 0° y 90° , se puede aplicar la carga de peso propia en las direcciones de forma de borde y de forma de aleta, respectivamente, lo que permite una calibración de ambos sensores 21-24. El procedimiento se repite para las tres palas.

La idea anterior requiere que la turbina realice maniobras especiales durante la calibración. Para evitar esto, se usa un enfoque más sofisticado de acuerdo con la invención. Independientemente del ángulo de acimut ψ y el ángulo de inclinación θ , es posible calcular la carga de peso propia en la pala utilizando algunas transformaciones de coordenadas. Si el rotor de la turbina gira y/o la pala cabecea, las fuerzas dinámicas (fuerzas centrífugas y de Coriolis) actúan sobre las palas. Si la rotación se acelera, también actúan fuerzas de inercia sobre la pala. Todas estas fuerzas pueden calcularse teóricamente. Este enfoque se utiliza en el presente concepto de autocalibración.

Además, si hay algo de viento o rotación, las fuerzas aerodinámicas actuarán sobre la pala. Estas fuerzas tenderán a acelerar el rotor y, en función de la velocidad de aceleración del rotor, se agrega un modelo aerodinámico simplificado para tener esto en cuenta. También se agrega un modelo para pérdidas por fricción en el tren de accionamiento para obtener resultados más precisos.

Las cargas podrían calcularse dividiendo la pala en varias secciones transversales, y pasando por todas las secciones de la pala sumando las cargas. Hacer estos cálculos iterativos para cada muestra de tiempo requiere una cantidad significativa de capacidad computacional. Por lo tanto, se inventó un mejor enfoque. En lugar de sumar las cargas de las secciones de la pala, las cargas se pueden calcular utilizando algunas propiedades generales de toda la pala y la parte de la pala que está fuera o fuera de la sección transversal de los sensores, como masa, momento de masa, momentos y productos de inercia, etc. Una vez que se calculan estas propiedades, el resto de los cálculos se pueden ejecutar linealmente y consumen mucho menos tiempo, porque se evita la iteración a través de todas las secciones de la pala. Este enfoque innovador permite un cálculo en tiempo real sin requerir una capacidad computacional excesiva. Esto significa que las mediciones pueden procesarse inmediatamente después de cada muestra, y la calibración puede ejecutarse continuamente.

Debido a algunas incertidumbres y restricciones del modelo, no todas las muestras son útiles para la calibración, por lo que los datos recopilados deben filtrarse. Finalmente, cuando se recopilan suficientes datos, las cargas calculadas teóricamente se pueden trazar contra los niveles de deformación medidos en diagramas tridimensionales. El resultado debería ser gráficos con la mayoría de los puntos de datos ubicados cerca de un plano. Para la calibración, una función que describe el mapeo de los niveles de deformación medidos en las cargas calculadas teóricamente. El mejor ajuste se encuentra usando, por ejemplo, el método de mínimos cuadrados.

4. Ecuaciones generales para datos de turbina y palas

Para preparar los cálculos a realizar para cada muestra de tiempo, primero se deben hacer algunos cálculos generales de una vez por todas.

En lo que sigue, las palas se consideran cuerpos rígidos y se desprecian las deformaciones elásticas de la turbina.

La distancia radial desde el centro del rotor hasta la primera sección transversal, donde se encuentran los primeros sensores 21, 22, se calcula por la ecuación. 4.1, véase también Fig. 8. Si hay más de una sección transversal con sensores (por ejemplo, dos secciones transversales por pala), la distancia para cada sección transversal debe calcularse por separado.

$$r_{\text{sensor}} = r_{\text{cubo}} - z_{\text{sensor}} \cdot \cos \gamma. \quad (4.1)$$

La distancia radial desde el centro del rotor hasta el extremo de la pala es

$$r_{\text{extremo}} = r_{\text{cubo}} - z_{\text{extremo}} \cdot \cos \gamma. \quad (4.2)$$

Debería observarse que r y z típicamente no son iguales y está claro a partir de las ecuaciones anteriores que, por lo tanto, los dos ejes pueden tener una escala diferente.

La masa de una parte 40 de la pala que se encuentra en el exterior o fuera de la sección transversal donde se encuentran los sensores 21, 22 se calcula por la ecuación 4.3. Si hay más de una sección transversal con sensores, el cálculo de la masa debe repetirse para cada sección transversal.

$$m = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} m' dz. \quad (4.3)$$

La masa total de la pala es

$$m_{\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 m' dz. \quad (4.4)$$

Los momentos estáticos alrededor de la raíz de la pala (1er momento de inercia de masa), teniendo en cuenta solo la parte 40 de la pala que está fuera de la primera sección transversal donde se encuentran los sensores, se calculan por la ecuación. 4.5-4.7. Si hay más de una sección transversal con sensores, el cálculo de los momentos estáticos debe repetirse para cada sección transversal.

$$S_x = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} m' \cdot x_{\text{c.g.}} dz, \quad (4.5)$$

$$S_y = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} m' \cdot y_{\text{c.g.}} dz, \quad (4.6)$$

$$S_z = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} m' \cdot z dz. \quad (4.7)$$

Los momentos estáticos para toda la pala son

$$S_{x,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 m' \cdot x_{\text{c.g.}} dz, \quad (4.8)$$

$$S_{y,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 m' \cdot y_{\text{c.g.}} dz, \quad (4.9)$$

$$S_{z,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 m' \cdot z dz. \quad (4.10)$$

La distribución de los momentos de inercia de masa y los productos de inercia alrededor de la raíz de la pala se calculan por la ecuación 4.11-4.16. La última formulación después del signo 'casi igual a' es una aproximación que se puede usar si no se puede calcular el valor exacto. En algunas situaciones solo se calculan los momentos exactos de inercia, pero no los productos de inercia. En este caso, se puede usar la aproximación para los productos de inercia.

$$I'_{xx}(z) = \iint_A \rho \cdot (y^2 + z^2) dA \approx m' \cdot (y_{\text{c.g.}}^2 + z^2 + 0.005 \cdot c^2 + 0.112 \cdot t^2), \quad (4.11)$$

$$I'_{yy}(z) = \iint_A \rho \cdot (x^2 + z^2) dA \approx m' \cdot (x_{\text{c.g.}}^2 + z^2 + 0.058 \cdot c^2 + 0.061 \cdot t^2), \quad (4.12)$$

$$I'_{zz}(z) = \iint_A \rho \cdot (x^2 + y^2) dA \approx m' \cdot (x_{\text{c.g.}}^2 + y_{\text{c.g.}}^2 + 0.054 \cdot c^2 + 0.168 \cdot t^2), \quad (4.13)$$

$$I'_{xy}(z) = \iint_A \rho \cdot x \cdot y dA \approx m' \cdot x_{\text{c.g.}} \cdot y_{\text{c.g.}}, \quad (4.14)$$

$$I'_{xz}(z) = \iint_A \rho \cdot x \cdot z dA \approx m' \cdot x_{\text{c.g.}} \cdot z, \quad (4.15)$$

$$I'_{yz}(z) = \iint_A \rho \cdot y \cdot z dA \approx m' \cdot y_{\text{c.g.}} \cdot z. \quad (4.16)$$

Los momentos de masa de inercia y los productos de inercia alrededor de la raíz de la pala, teniendo en cuenta solo la parte 40 de la pala que está fuera de la sección transversal, donde se encuentran los sensores 21, 22, se calculan por la ecuación 4.17-4.22. Si hay más de una sección transversal con sensores, se debe repetir el cálculo de los momentos y productos de inercia para cada sección transversal.

$$I_{xx} = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} I'_{xx}(z) dz, \quad (4.17)$$

$$I_{yy} = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} I'_{yy}(z) dz, \quad (4.18)$$

$$I_{zz} = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} I'_{zz}(z) dz, \quad (4.19)$$

$$I_{xy} = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} I'_{xy}(z) dz, \quad (4.20)$$

$$I_{xz} = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} I'_{xz}(z) dz, \quad (4.21)$$

$$I_{yz} = \int_{z_{\text{extremo}}}^{z_{\text{sensor}}} I'_{yz}(z) dz. \quad (4.22)$$

Los momentos de inercia de masa y los productos de inercia de la ecuación 4.17-4.22 debe transferirse para tomarse alrededor de un punto fijo en el centro del rotor, utilizando la ecuación 4.23-4.28. Si hay más de una sección transversal con sensores, la transferencia de los momentos y productos de inercia debe repetirse para cada sección transversal.

$$I_{Oxx} = I_{xx} + \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma} \cdot \left(-2 \cdot S_z + m \cdot \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma} \right), \quad (4.23)$$

$$I_{Oyy} = I_{yy} + \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma} \cdot \left(-2 \cdot S_z + m \cdot \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma} \right), \quad (4.24)$$

$$I_{Ozz} = I_{zz}, \quad (4.25)$$

$$I_{Oxy} = I_{xy}, \quad (4.26)$$

$$I_{Oxz} = I_{xz} - S_x \cdot \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma}, \quad (4.27)$$

$$I_{Oyz} = I_{yz} - S_y \cdot \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma}. \quad (4.28)$$

Los momentos de inercia de masa y los productos de inercia de toda la pala son

$$I_{xx,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 I'_{xx}(z) dz, \quad (4.29)$$

$$I_{yy,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 I'_{yy}(z) dz, \quad (4.30)$$

$$I_{zz,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 I'_{zz}(z) dz, \quad (4.31)$$

$$I_{xy,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 I'_{xy}(z) dz, \quad (4.32)$$

$$I_{xz,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 I'_{xz}(z) dz, \quad (4.33)$$

$$I_{yz,\text{pala}} = \int_{z_{\text{extremo}}}^0 I'_{yz}(z) dz. \quad (4.34)$$

Los momentos de inercia de masa y los productos de inercia de la ecuación 4.29-4.34 debe transferirse para tomarse alrededor de un punto fijo en el centro del rotor, utilizando la ecuación 4.35-4.40.

$$I_{Oxx,\text{pala}} = I_{xx,\text{pala}} + \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma} \cdot \left(-2 \cdot S_{z,\text{pala}} + m_{\text{pala}} \cdot \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma} \right), \quad (4.35)$$

$$I_{Oyy,\text{pala}} = I_{yy,\text{pala}} + \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma} \cdot \left(-2 \cdot S_{z,\text{pala}} + m_{\text{pala}} \cdot \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma} \right), \quad (4.36)$$

$$I_{Ozz,\text{pala}} = I_{zz,\text{pala}}, \quad (4.37)$$

$$I_{Oxy,\text{pala}} = I_{xy,\text{pala}}, \quad (4.38)$$

$$I_{Oxz,\text{pala}} = I_{xz,\text{pala}} - S_{x,\text{pala}} \cdot \frac{r_{\text{cubo}}}{\cos \gamma}, \quad (4.39)$$

$$I_{Oyz,pala} = I_{yz,pala} - S_{y,pala} \cdot \frac{r_{cubo}}{\cos \gamma} \quad (4.40)$$

Finalmente, se deben estimar algunos factores para la fuerza aerodinámica y el momento. Si hay más de una sección transversal con sensores, los factores deben estimarse para cada sección transversal. Los factores se pueden encontrar usando la ecuación 4.41 y 4.42.

$$f_F = k_F \cdot \frac{p+2}{p+1} \cdot \left(1 - \left(\frac{r_{sensor}}{r_{extremo}} \right)^{p+1} \right), \quad (4.41)$$

$$f_M = k_M \cdot \left(1 - \left(\frac{r_{sensor}}{r_{extremo}} \right)^{p+2} \right). \quad (4.42)$$

El exponente p es un número real mayor que -1 y depende de la distribución de la fuerza aerodinámica; $p = 0$ se ajusta a una distribución constante de la fuerza aerodinámica en función del radio ($\sim r^0$), $p = 1$ se ajusta a una distribución lineal de la fuerza aerodinámica que es proporcional al radio ($\sim r^1$), $p = 2$ se ajusta a distribución cuadrática de la fuerza aerodinámica ($\sim r^2$) etc. Se ha encontrado que $p = 0$ es una suposición razonablemente buena para este propósito, y por lo tanto se recomienda usar $p = 0$.

Los factores de corrección k_F y k_M son iguales a 1, en el caso donde la distribución aerodinámica encaja perfectamente una función de potencia. Teniendo en cuenta una desviación arbitraria de la función de potencia, los factores de corrección pueden desviarse de 1. Al principio, los factores de corrección pueden aproximarse para ser iguales a 1. Para un modelo aerodinámico mejorado, los factores de corrección k_F y k_M deben ser ajustado empíricamente para proporcionar el mejor ajuste posible entre las cargas aerodinámicas reales y estimadas.

5.1 Ecuaciones a utilizar para cada muestra de tiempo

Para cada muestra de tiempo, donde las mediciones no se descartan debido a la filtración de datos, se deben realizar los siguientes cálculos.

En general, si hay más de una pala con sensores (típicamente tres palas) y si hay más de una sección transversal con sensores (por ejemplo, dos secciones transversales por pala), todos los parámetros que se refieren a la sección transversal de la pala deben ser calculados por separado para cada una de las secciones transversales equipadas con sensores.

De nuevo, las definiciones de los sistemas de coordenadas se muestran en las Figs. 3-7.

5.1 Fuerzas gravitacionales y momentos

Los componentes de gravedad en el sistema de coordenadas de barquilla son

$$g_{x,n.s.} = 0, \quad (5.1)$$

$$g_{y,n.s.} = 0, \quad (5.2)$$

$$g_{z,n.s.} = g. \quad (5.3)$$

Los componentes de gravedad se transforman en el sistema de coordenadas del cojinete principal teniendo en cuenta el ángulo de inclinación τ . Tenga en cuenta que el ángulo de inclinación se define opuesto al sistema de coordenadas.

$$g_{x,m.b.s.} = g_{x,n.s.} \cdot \cos \tau + g_{z,n.s.} \cdot \text{sen} \tau, \quad (5.4)$$

$$g_{y,m.b.s.} = g_{y,n.s.}, \quad (5.5)$$

$$g_{z,m.b.s.} = -g_{x,n.s.} \cdot \text{sen} \tau + g_{z,n.s.} \cdot \cos \tau. \quad (5.6)$$

Posteriormente, los componentes de gravedad se transforman en el sistema de coordenadas del rotor teniendo en cuenta el ángulo de acimut ψ . Las ecuaciones 5.7-5.9 son válidas para la primera pala $10'$ (apuntando hacia abajo a $\psi = 0^\circ$). Para cualquier otra pala, el ángulo de acimut ψ debe ser desplazado por la distancia angular entre las palas (por ejemplo, 120° para un rotor de tres palas).

$$g_{x,r.s.} = g_{x,m.b.s.}, \quad (5.7)$$

$$g_{y,r.s.} = g_{y,m.b.s.} \cdot \cos \psi + g_{z,m.b.s.} \cdot \text{sen} \psi, \quad (5.8)$$

$$g_{z,r.s.} = -g_{y,m.b.s.} \cdot \text{sen} \psi + g_{z,m.b.s.} \cdot \cos \psi. \quad (5.9)$$

5 La mayoría de las siguientes ecuaciones en este capítulo se deben repetir por separado para cada pala.

Ahora, los componentes de gravedad se transforman en el sistema de coordenadas de orientación de la pala teniendo en cuenta el ángulo de cono γ . Tenga en cuenta que, además de la rotación debido al ángulo del cono, el sistema de coordenadas de la orientación de la pala se rota en comparación con el sistema de coordenadas del rotor.

10

$$g_{x,b.b.s.} = g_{y,r.s.}, \quad (5.10)$$

$$g_{y,b.b.s.} = g_{x,r.s.} \cdot \cos \gamma - g_{z,r.s.} \cdot \text{sen} \gamma, \quad (5.11)$$

15

$$g_{z,b.b.s.} = -g_{x,r.s.} \cdot \text{sen} \gamma - g_{z,r.s.} \cdot \cos \gamma. \quad (5.12)$$

Finalmente, los componentes de gravedad se transforman en el sistema de coordenadas de la pala teniendo en cuenta el ángulo de inclinación θ .

$$g_{x,b.s.} = g_{x,b.b.s.} \cdot \cos \theta + g_{y,b.b.s.} \cdot \text{sen} \theta, \quad (5.13)$$

$$g_{y,b.s.} = -g_{x,b.b.s.} \cdot \text{sen} \theta + g_{y,b.b.s.} \cdot \cos \theta, \quad (5.14)$$

20

$$g_{z,b.s.} = g_{z,b.b.s.}. \quad (5.15)$$

Ahora, se puede calcular la fuerza axial y los momentos de flexión debidos a la gravedad, para la sección transversal de la pala en la que se encuentran los sensores.

$$F_{z,b.s.,\text{grav.}} = m \cdot g_{z,b.s.}, \quad (5.16)$$

$$M_{x,b.s.,\text{grav.}} = -(S_z - m \cdot z_{\text{sensor}}) \cdot g_{y,b.s.} + S_y \cdot g_{z,b.s.}, \quad (5.17)$$

25

$$M_{y,b.s.,\text{grav.}} = (S_z - m \cdot z_{\text{sensor}}) \cdot g_{x,b.s.} - S_x \cdot g_{z,b.s.}. \quad (5.18)$$

5.2 Fuerzas de inercia

En todos los cálculos siguientes, se descuidan las fuerzas de inercia debidas a la guiñada de la turbina.

30

Debido a la rotación del rotor, el sistema de coordenadas de la pala está girando en el espacio alrededor del eje del rotor. Por lo tanto, se deben tener en cuenta las fuerzas centrífugas. Los componentes de la fuerza de la sección transversal debido a la fuerza centrífuga son

35

$$F_{x,b.s.,\text{rotor centrif.}} = \left((S_x \cdot \cos \theta - S_y \cdot \text{sen} \theta) \cdot \cos \theta - (m \cdot r_{\text{cubo}} - S_z \cdot \cos \gamma - (S_x \cdot \text{sen} \theta + S_y \cdot \cos \theta) \cdot \text{sen} \gamma) \cdot \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \gamma \right) \cdot \omega^2, \quad (5.19)$$

$$F_{y,b.s.,\text{rotor centrif.}} = \left(-(S_x \cdot \cos \theta - S_y \cdot \text{sen} \theta) \cdot \text{sen} \theta - (m \cdot r_{\text{cubo}} - S_z \cdot \cos \gamma - (S_x \cdot \text{sen} \theta + S_y \cdot \cos \theta) \cdot \text{sen} \gamma) \cdot \cos \theta \cdot \text{sen} \gamma \right) \cdot \omega^2, \quad (5.20)$$

$$F_{z,b.s.,\text{rotor centrif.}} = -(m \cdot r_{\text{cubo}} - S_z \cdot \cos \gamma - (S_x \cdot \text{sen} \theta + S_y \cdot \cos \theta) \cdot \text{sen} \gamma) \cdot \cos \gamma \cdot \omega^2. \quad (5.21)$$

40

Debido a la aceleración del rotor, el sistema de coordenadas de la pala está acelerando en el espacio. Por lo tanto, se deben tener en cuenta las fuerzas de inercia debidas a la aceleración del rotor. Los componentes de la fuerza de la sección transversal debido a la aceleración del rotor son

$$F_{x,b.s.,acc.rotor} = \left((m \cdot r_{cubo} - S_z \cdot \cos \gamma) \cdot \cos \theta - S_y \cdot \sen \gamma \right) \cdot \dot{\omega}, \quad (5.22)$$

$$F_{y,b.s.,acc.rotor} = \left(-(m \cdot r_{cubo} - S_z \cdot \cos \gamma) \cdot \sen \theta + S_x \cdot \sen \gamma \right) \cdot \dot{\omega}, \quad (5.23)$$

$$F_{z,b.s.,acc.rotor} = \left(S_x \cdot \cos \theta - S_y \cdot \sen \theta \right) \cdot \cos \gamma \cdot \dot{\omega}. \quad (5.24)$$

5 Debido al cabeceo de la pala, el sistema de coordenadas de la pala está girando alrededor del eje de la pala. Los componentes de la fuerza de la sección transversal debido a la fuerza centrífuga que se origina en el cabeceo de la pala son

$$F_{x,b.s.,centrif.paso\ variable} = S_x \cdot \dot{\theta}^2, \quad (5.25)$$

$$F_{y,b.s.,centrif.paso\ variable} = S_y \cdot \dot{\theta}^2, \quad (5.26)$$

$$F_{z,b.s.,centrif.paso\ variable} = 0. \quad (5.27)$$

10 Debido a la aceleración de paso, el sistema de coordenadas de la pala está acelerando alrededor del eje de paso. Los componentes de la fuerza de la sección transversal debido a la aceleración del paso variable son

$$F_{x,b.s.,paso\ variable} = S_y \cdot \ddot{\theta}, \quad (5.28)$$

$$F_{y,b.s.,paso\ variable} = -S_x \cdot \ddot{\theta}, \quad (5.29)$$

$$F_{z,b.s.,paso\ variable} = 0. \quad (5.30)$$

15 En caso de rotación simultánea alrededor del eje del rotor y el eje de paso, la pala se mueve con relación a un sistema de coordenadas giratorio. Por lo tanto, se deben tener en cuenta las fuerzas de Coriolis. Los componentes de la fuerza de la sección transversal debido a la aceleración de Coriolis son

$$F_{x,b.s.,Coriolis} = -S_x \cdot \sen \gamma \cdot 2 \cdot \omega \cdot \dot{\theta}, \quad (5.31)$$

$$F_{y,b.s.,Coriolis} = -S_y \cdot \sen \gamma \cdot 2 \cdot \omega \cdot \dot{\theta}, \quad (5.32)$$

$$F_{z,b.s.,Coriolis} = -(S_x \cdot \sen \theta + S_y \cdot \cos \theta) \cdot \cos \gamma \cdot 2 \cdot \omega \cdot \dot{\theta}. \quad (5.33)$$

20 Ahora, se pueden sumar todas las fuerzas de inercia para obtener los componentes de la fuerza de inercia total para la sección transversal.

$$F_{x,b.s.,inercia} = F_{x,b.s.,centrif.rotor} + F_{x,b.s.,acc.rotor} + F_{x,b.s.,centrif.paso\ variable} + F_{x,b.s.,acc.paso\ variable} + F_{x,b.s.,Coriolis}, \quad (5.34)$$

$$F_{y,b.s.,inercia} = F_{y,b.s.,centrif.rotor} + F_{y,b.s.,acc.rotor} + F_{y,b.s.,centrif.paso\ variable} + F_{y,b.s.,acc.paso\ variable} + F_{y,b.s.,Coriolis}, \quad (5.35)$$

$$F_{z,b.s.,inercia} = F_{z,b.s.,centrif.rotor} + F_{z,b.s.,acc.rotor} + F_{z,b.s.,centrif.paso\ variable} + F_{z,b.s.,acc.paso\ variable} + F_{z,b.s.,Coriolis}. \quad (5.36)$$

5.3 Momentos de inercia

Primero, se calculan los componentes de velocidad angular de la pala.

$$\omega_x = \omega \cdot \text{sen } \theta \cdot \cos \gamma, \quad (5.37)$$

$$\omega_y = \omega \cdot \cos \theta \cdot \cos \gamma, \quad (5.38)$$

$$5 \quad \omega_z = -\omega \cdot \text{sen } \gamma + \dot{\theta}. \quad (5.39)$$

Los componentes de aceleración angular de la pala son

$$\dot{\omega}_x = (\omega \cdot \cos \theta \cdot \dot{\theta} + \dot{\omega} \cdot \text{sen } \theta) \cdot \cos \gamma, \quad (5.40)$$

$$\dot{\omega}_y = (-\omega \cdot \text{sen } \theta \cdot \dot{\theta} + \dot{\omega} \cdot \cos \theta) \cdot \cos \gamma, \quad (5.41)$$

$$10 \quad \dot{\omega}_z = -\dot{\omega} \cdot \text{sen } \gamma + \ddot{\theta}. \quad (5.42)$$

Los componentes de momento angular alrededor de un punto fijo en el centro del rotor, teniendo en cuenta solo la parte 40 de la pala que está fuera de la sección transversal en la que se encuentran los sensores, se calculan por la ecuación 5.43-5.45. Estas ecuaciones son las expresiones generales para el momento angular alrededor de un punto fijo para un cuerpo rígido.

$$15 \quad H_{Ox} = I_{Oxx} \cdot \omega_x - I_{Oxy} \cdot \omega_y - I_{Oxz} \cdot \omega_z, \quad (5.43)$$

$$H_{Oy} = -I_{Oxy} \cdot \omega_x + I_{Oyy} \cdot \omega_y - I_{Oyz} \cdot \omega_z, \quad (5.44)$$

$$H_{Oz} = -I_{Oxz} \cdot \omega_x - I_{Oyz} \cdot \omega_y + I_{Ozz} \cdot \omega_z. \quad (5.45)$$

20 Las derivadas de tiempo de los componentes de momento angular x e y de la ecuación 5.43 y 5.44 son

$$\dot{H}_{Ox} = I_{Oxx} \cdot \dot{\omega}_x - I_{Oxy} \cdot \dot{\omega}_y - I_{Oxz} \cdot \dot{\omega}_z, \quad (5.46)$$

$$\dot{H}_{Oy} = -I_{Oxy} \cdot \dot{\omega}_x + I_{Oyy} \cdot \dot{\omega}_y - I_{Oyz} \cdot \dot{\omega}_z. \quad (5.47)$$

25 Ahora se pueden calcular los componentes x e y debido a las fuerzas de inercia. Las ecuaciones 5.48 y 5.49 son las ecuaciones de momento generales para el movimiento rígido del cuerpo con ejes unidos al cuerpo. Se refieren al momento que se origina de las fuerzas de inercia teniendo en cuenta solo la parte de la pala que está fuera de la sección transversal en la que se encuentran los sensores. Los momentos de inercia se toman alrededor de un punto fijo en el centro del rotor.

$$M_{Ox, \text{b.s. inercia}} = -\dot{H}_{Ox} + H_{Oy} \cdot \omega_z - H_{Oz} \cdot \omega_y, \quad (5.48)$$

$$30 \quad M_{Oy, \text{b.s. inercia}} = -\dot{H}_{Oy} + H_{Oz} \cdot \omega_x - H_{Ox} \cdot \omega_z. \quad (5.49)$$

Finalmente, los momentos de inercia se mueven a la sección transversal donde se encuentran los sensores.

$$M_{x,b.s.,inercia} = M_{Ox,b.s.,inercia} - F_{y,b.s.,inercia} \left(\frac{r_{cubo}}{\cos \gamma} - z \right), \quad (5.50)$$

$$M_{y,b.s.,inercia} = M_{Oy,b.s.,inercia} + F_{x,b.s.,inercia} \left(\frac{r_{cubo}}{\cos \gamma} - z \right). \quad (5.51)$$

5.4 Fuerzas aerodinámicas y momentos

- 5 Primero, se calcula el momento de inercia de la masa de la pala alrededor del eje del rotor. En caso de paso variable individual, la ecuación 5.52 se debe repetir para cada pala por separado.

$$\begin{aligned} I_{Oxx,r.s.,pala,i} = & I_{Oxx,pala} \cdot \text{sen}^2 \theta_i \cdot \cos^2 \gamma + I_{Oyy,pala} \cdot \cos^2 \theta_i \cdot \cos^2 \gamma + I_{Ozz,pala} \cdot \text{sen}^2 \gamma \\ & - 2 \cdot I_{Oxy,pala} \cdot \text{sen} \theta_i \cdot \cos \theta_i \cdot \cos^2 \gamma + 2 \cdot I_{Oxz,pala} \cdot \text{sen} \theta_i \cdot \text{sen} \gamma \cdot \cos \gamma \\ & + 2 \cdot I_{Oyz,pala} \cdot \cos \theta_i \cdot \text{sen} \gamma \cdot \cos \gamma. \end{aligned} \quad (5.52)$$

- 10 El momento de inercia de la masa del rotor completo, incluido el tren de accionamiento, es

$$I_{Oxx,rotor} = \sum_{i=1}^B I_{Oxx,r.s.,pala,i} + I_{Oxx,cubo} + n_{engranaje}^2 \cdot I_{Oxx,generador}. \quad (5.53)$$

- 15 Las siguientes ecuaciones en esta sección se aplican a todas las palas, porque se supone que la carga aerodinámica se distribuye uniformemente y, por lo tanto, es la misma para todas las palas.

Las pérdidas por fricción mecánica en el tren de accionamiento están modeladas por una función polinómica general de tercer orden de la velocidad del rotor.

$$M_{x,fricción} = - \left(a_1 \cdot \frac{1}{\omega_{nom.}} \cdot \text{sign}(\omega) + a_2 \cdot \frac{\omega}{\omega_{nom.}^2} + a_3 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_{nom.}^3} \cdot \text{sign}(\omega) \right). \quad (5.54)$$

- 20 Si el rotor está equilibrado, la aceleración del rotor es provocada exclusivamente por momentos aerodinámicos que actúan sobre el rotor, pérdidas por fricción en el tren de accionamiento, el generador y posiblemente el freno mecánico. A continuación, se supone que el generador no está conectado, es decir, desactivado, y el freno no está activado. Por lo tanto, omitiendo los momentos del generador y del freno, el momento aerodinámico del rotor se puede calcular como

$$M_{x,rotor,aero.} = I_{Oxx,rotor} \cdot \dot{\omega} - M_{x,fricción}. \quad (5.55)$$

- 30 Se desconoce la distribución de las fuerzas aerodinámicas en el rotor, pero se debe hacer alguna suposición. En este documento se supone que la carga aerodinámica en términos de coeficiente de empuje local se distribuye uniformemente en el rotor.

- 35 Ahora, se pueden calcular las fuerzas y los momentos aerodinámicos en el sistema de coordenadas de orientación de la pala. Las ecuaciones 5.56 y 5.57 se refieren a las fuerzas aerodinámicas que actúan solo en la parte 40 de la pala que está fuera de la sección transversal donde se encuentran los sensores 21, 22. El momento se toma alrededor de la sección transversal en la que se encuentran los sensores.

$$F_{x,b.b.s.,aero.} = -f_F \cdot \frac{M_{x,rotor,aero.}}{B \cdot r_{extremo}} \quad (5.56)$$

$$F_{z,b.b.s.,aero.} = 0, \quad (5.57)$$

$$M_{y,b.b.s.,aero.} = \frac{f_M \cdot \frac{M_{x,rotor,aero.}}{B} + F_{x,b.b.s.,aero.} \cdot r_{sensor}}{\cos \gamma} \quad (5.58)$$

- 40

La fuerza aerodinámica fuera del plano del rotor es difícil de estimar, porque la aceleración del rotor no es una indicación directa de la fuerza fuera del plano del rotor. Pero hay coherencia entre las cargas dentro y fuera del plano. Las cargas aerodinámicas en la pala normalmente actuarán principalmente en la dirección perpendicular a la línea de la cuerda. Esta información es útil para estimar las cargas fuera de la superficie plana. Si se conoce la dirección de la fuerza aerodinámica resultante, la carga fuera del plano se puede calcular por la ecuación 5.59. Aquí se supone que la dirección de la carga aero dinámica depende del ángulo de inclinación θ y generalmente está compensada por un ángulo constante θ_{aero} . El ángulo θ_{aero} se determina empíricamente como el ángulo que proporciona el mejor ajuste entre las cargas aerodinámicas reales fuera de la superficie plana y las estimadas por la ecuación 5.59.

$$M_{x,b.b.s.,aero.} = -M_{y,b.b.s.,aero.} \cdot \tan(\theta + \theta_{aero.}). \quad (5.59)$$

Finalmente, los componentes de carga aerodinámica se transforman en el sistema de coordenadas de la pala.

$$F_{z,b.s.,aero.} = 0, \quad (5.60)$$

$$M_{x,b.s.,aero.} = M_{x,b.b.s.,aero.} \cdot \cos \theta + M_{y,b.b.s.,aero.} \cdot \text{sen} \theta, \quad (5.61)$$

$$M_{y,b.s.,aero.} = -M_{x,b.b.s.,aero.} \cdot \text{sen} \theta + M_{y,b.b.s.,aero.} \cdot \cos \theta. \quad (5.62)$$

5.5 Fuerzas y momentos totales

Ahora, se pueden sumar las cargas gravitacionales, las cargas de inercia y las cargas aerodinámicas para obtener las cargas totales.

$$F_{z,b.s.} = F_{z,b.s.,grav.} + F_{z,b.s.,inercia} + F_{z,b.s.,aero.}, \quad (5.63)$$

$$M_{x,b.s.} = M_{x,b.s.,grav.} + M_{x,b.s.,inercia} + M_{x,b.s.,aero.}, \quad (5.64)$$

$$M_{y,b.s.} = M_{y,b.s.,grav.} + M_{y,b.s.,inercia} + M_{y,b.s.,aero.}. \quad (5.65)$$

Debido a que la pala se flexiona alrededor de los ejes 25, 26 de flexión principales, las cargas se deben transformar en el sistema de coordenadas de perfil local, que está compuesto por los ejes de flexión principales de la sección transversal.

$$F_{z,p.s.} = F_{z,b.s.}, \quad (5.66)$$

$$M_{x,p.s.} = (M_{x,b.s.} - F_{z,b.s.} \cdot y_{e.c.}) \cdot \cos \varphi + (M_{y,b.s.} + F_{z,b.s.} \cdot x_{e.c.}) \cdot \text{sen} \varphi, \quad (5.67)$$

$$M_{y,p.s.} = -(M_{x,b.s.} - F_{z,b.s.} \cdot y_{e.c.}) \cdot \text{sen} \varphi + (M_{y,b.s.} + F_{z,b.s.} \cdot x_{e.c.}) \cdot \cos \varphi. \quad (5.68)$$

6. Verificación

Los cálculos descritos en las secciones 4 y 5 se validan comparando los resultados con simulaciones por el código aeroelástico Flex5.

En los cálculos se utilizan los siguientes parámetros para el modelo aerodinámico.

Tabla 6.1: Parámetros para el modelo aerodinámico. Tenga en cuenta que θ_{aero} debe estar en radianes en los cálculos.

	$z = -8.12 \text{ m}$	$z = -23.12 \text{ m}$
p	0	0
k_F	1.47	1.28
k_M	1	1
$\theta_{\text{aero.}}$	98.9°	97.4°

Se descubrió que los cálculos para los sensores posicionados en $z = -23.12 \text{ m}$ tienen incertidumbres mayores (aproximadamente el doble) que para $z = -8.12 \text{ m}$. Esto se debe a que el peso de la parte exterior de la pala es relativamente más pequeño y la perturbación aerodinámica es relativamente mayor para las secciones transversales más cercanas al extremo. A continuación, solo se muestran los resultados para $z = -23.12 \text{ m}$.

Flex5 simuló un arranque de turbina prolongado utilizando viento turbulento y una velocidad del viento media de 2.5 m/s. El rotor arranca en punto muerto y acelera lentamente hasta alrededor de 6.5 rpm (justo por debajo de la velocidad de activación del generador) mientras el paso variable se mueve de 90° a -1.8° a una tasa de paso variable de $-0.5^\circ/\text{s}$. La simulación se ilustra con los gráficos de la Figura 9 que muestran a) el componente longitudinal no perturbado de la velocidad del viento en el cubo del rotor, b) el ángulo de inclinación de la primera pala de la turbina eólica, c) la velocidad de paso variable de la primera turbina eólica pala, d) el ángulo de acimut del rotor de la primera pala de turbina eólica, y e) la velocidad del rotor respectivos en función del tiempo.

El ángulo de acimut ψ simulado, la velocidad del rotor ω , el ángulo de inclinación θ y la tasa de paso variable θ en función del tiempo se utilizaron como entrada para que el modelo actual verifique que el modelo es capaz de calcular las cargas de sección transversal en el sistema de coordenadas de perfil solo mediante estos parámetros.

6.1 Cargas gravitacionales y de inercia

Las Figuras 10-12 muestran los resultados, en las que solo se muestran cargas gravitacionales y de inercia. Se excluyen las cargas aerodinámicas. Esto es para verificar la carga gravitacional y de inercia de parte del modelo.

Como se ve en las figuras anteriores, existe una muy buena coherencia entre las cargas calculadas y simuladas de 0 a 150 segundos después del inicio. Las diferencias para la fuerza axial F_z son prácticamente cero, pero para los momentos de flexión M_x y M_y hay diferencias significativas después de 150 segundos. En este punto, la velocidad del rotor es de alrededor de 1.5 rpm. Las diferencias a velocidades más altas del rotor son provocadas principalmente por el hecho de que la simulación es aeroelástica. De hecho, toda la turbina es elástica; especialmente las palas se desvían y vibran significativamente. La desviación de la pala causa un error sistemático, que se puede véase en la diferencia en M_x de 200-300 segundos después del inicio, que es ligeramente más positivo que negativo. Estos efectos no se tienen en cuenta en el modelo actual, en el que la pala se considera un cuerpo rígido.

6.2 Cargas aerodinámicas

Las Figuras 13-15 muestran los resultados, en los que solo se muestran las cargas aerodinámicas. Se excluyen las cargas gravitacionales y de inercia. Esto es para verificar las cargas aerodinámicas que forman parte del modelo.

Como se ve en las figuras anteriores, las cargas aerodinámicas son muy pequeñas de 0 a 150 segundos después del inicio, en el que tanto la velocidad del viento como la velocidad del rotor son bajas. Las diferencias para la fuerza axial F_z son exactamente cero, porque no hay fuerzas aerodinámicas en la dirección z , ni en Flex5 ni en el modelo actual. Para los momentos de flexión M_x y M_y hay diferencias sistemáticas después de 150 segundos, especialmente para M_x , mientras que las diferencias para M_y son mucho más pequeñas. Las diferencias son cada vez más cuadráticas con la velocidad del viento relativa en la pala; en este caso, principalmente debido a la velocidad del rotor y, en menor medida, a la velocidad del viento, pero en otros casos también es posible lo contrario. El modelo aerodinámico es un modelo muy simplificado, donde no se conoce la distribución exacta y la dirección de las cargas aerodinámicas en la pala; solo se realiza una estimación aproximada basada en la aceleración del rotor.

7. Incertidumbres y restricciones del modelo

El par de torsión en el eje principal que se origina en el generador y/o el freno mecánico no se ha modelado. Se esperan grandes errores si el generador está conectado o el freno está activado. Por lo tanto, el modelo actual no se debe utilizar cuando el generador está activo o el freno está activado.

La principal incertidumbre en el modelo actual es el modelo aerodinámico. Como se ve en la figura 15, las diferencias son grandes después de 150 segundos de la simulación, especialmente para el momento de aleta. Debido a que las cargas aerodinámicas aumentan de forma cuadrática con la velocidad del viento relativa en la pala, el modelo aerodinámico solo tiene una precisión razonable a bajas velocidades del viento y bajas velocidades del rotor.

5 La incertidumbre a alta velocidad del viento relativa en la pala se puede explicar por la estructura del modelo aerodinámico. En el modelo aerodinámico, no se conoce la distribución ni la dirección exacta de las cargas aerodinámicas en la pala. La distribución de cargas depende de la distribución de la velocidad relativa local, que puede variar significativamente con el tiempo debido a la turbulencia, cortante del viento, error de guiñada, inclinación del rotor, pendiente del terreno, etc. El modelo aerodinámico asume la misma distribución de carga en las tres palas, pero en general las cargas pueden diferir significativamente. En este caso, el modelo aerodinámico no puede hacer una buena estimación de las cargas aerodinámicas en cada pala individual.

10 Por lo tanto, el modelo aerodinámico puede tener grandes incertidumbres en caso de viento fuerte y/o alta velocidad del rotor combinado con condiciones de funcionamiento no ideales tales como alta turbulencia, cortante del viento, error de guiñada, inclinación del rotor, pendiente del terreno, etc. Los errores por el modelo aerodinámico son a veces positivos y a veces negativos. Se espera que los errores se cancelen más o menos con el tiempo, lo que ayuda a mejorar la confiabilidad general del modelo.

15 En la ecuación 5.59 se supone la dirección del momento aerodinámico. Si la dirección es paralela al plano del rotor, la función tangente va hacia el \pm infinito, lo que es físicamente imposible. El modelo es cada vez más inexacto si $\theta_{aero} \approx \pm 90^\circ$, que es el caso en ángulos de paso muy bajos (ángulos de paso normalmente alrededor de -15° a 0°). Por lo tanto, el modelo se debe utilizar con gran atención si el ángulo de inclinación es bajo.

20 En todos los casos, la incertidumbre del modelo aerodinámico es mayor para el momento de flexión de la forma de aleta que para el momento de flexión de forma de borde y mayor para las secciones transversales más cercanas al extremo.

25 En el modelo actual se supone que la turbina es rígida, y especialmente se supone que la pala es un cuerpo rígido. Las vibraciones en la turbina y las palas no se tienen en cuenta, pero se espera que se cancelen en poco tiempo. Sin embargo, en caso de grandes desviaciones de la pala, se introduce un error sistemático causado por el movimiento del centro de gravedad y el endurecimiento centrífugo de la pala. Esto se puede véase en la Figura 12, en la que la diferencia en M_x de 200-300 segundos después del inicio es ligeramente más positiva que negativa. Las grandes desviaciones de la pala son provocadas por cargas aerodinámicas, que aumentan de forma cuadrática con la velocidad del viento relativa en la pala: por lo tanto, el modelo es cada vez más incierto a altas velocidades del viento o altas velocidades del rotor.

30 En el modelo de cargas de inercia, no se ha tenido en cuenta la guiñada de la turbina. Por lo tanto, se esperaría un error en caso de que la turbina esté guiñada. Se espera que este error sea relativamente bajo y se cancele más o menos con el tiempo.

35 Adicionalmente, la incertidumbre del modelo depende directamente de la incertidumbre de las propiedades de la pala, tales como masa, momentos estáticos y momentos de masa y productos de inercia. En el caso de las palas cubiertas de hielo, estas propiedades pueden cambiar significativamente y, por lo tanto, el modelo no es válido en el caso de las palas cubiertas de hielo. También se debe conocer la rigidez axial de la pala.

40 En el modelo se supone que el rotor está exactamente equilibrado en masa. Eso significa que las palas deben estar equilibradas para tener los mismos momentos estáticos.

45 Los sensores no se pueden colocar en (o cerca de) el centro elástico, de lo contrario, los sensores no reaccionarán al flexionar la pala. También, ambos sensores en una sección transversal no se pueden colocar en (o cerca de) la misma dirección (u opuesta) desde el centro elástico, de lo contrario será imposible distinguir entre los momentos de flexión de forma de aleta y forma de borde. Idealmente, los sensores se deben colocar en direcciones que estén desplazadas alrededor de 90° .

50 Finalmente, se debe mencionarse que, si la velocidad del rotor no es un parámetro de entrada conocido, puede encontrarse simplemente como la derivada del tiempo del ángulo de acimut del rotor. Del mismo modo, la aceleración del rotor se puede encontrar como la derivada del tiempo de la velocidad del rotor. Lo mismo se aplica para el ángulo de inclinación, la tasa de ángulos de paso y la aceleración de paso, respectivamente. En la práctica, la diferenciación intensificará la incertidumbre de la variable original. Por lo tanto, se debe considerar a fondo, si una incertidumbre o una baja resolución de la variable original exigen alguna filtración o alisamiento del resultado.

60 8. Filtración de datos

Debido a las incertidumbres y restricciones del modelo como se describe en la sección 7, el modelo solo es confiable bajo ciertas condiciones de operación. En principio, el registrador de datos registra continuamente las mediciones de los sensores todo el tiempo, ya sea que la turbina esté funcionando o no. Ahora, la tarea es filtrar los datos de tal manera que se guarden los datos registrados en condiciones de operación que brinden los resultados más confiables, mientras que se descartan los datos que darían los resultados menos confiables.

Se han llevado a cabo una serie de simulaciones de tiempo que representan diversas condiciones operativas de interés para este propósito utilizando el código aeroelástico Flex5 (véase tabla 8.1).

Tabla 8.1: Parámetros para las simulaciones de tiempo.

5

# de simulación	Tiempo simulado [s]	Velocidad del viento media [m/s]	Intensidad de turbulencia [-]	Ángulo de acimut inicial [°]	Ángulo de paso inicial [°]	Tasa de ángulos de paso [°/s]
1	300	2.5	0.44	0	90	-0.5
2	200	4	0.35	90	90	-0.5
3	200	6	0.28	180	90	-0.5
4	200	8	0.25	270	90	-0.5
5	200	4	0.35	0	90	-1
6	150	6	0.28	90	90	-1
7	100	8	0.25	180	90	-1
8	300	4	0.35	270	90	-2
9	150	6	0.28	0	90	-2
10	100	8	0.25	90	90	-2
11	300	4	0.35	180	90	-4
12	150	6	0.28	270	90	-4
13	100	8	0.25	0	90	-4
14	100	12	0.20	90	90	-1
15	100	16	0.17	180	90	-1
16	100	20	0.16	270	90	-1
17	100	24	0.14	0	90	-1
18	100	16	0.17	90	80	0
19	100	24	0.14	180	80	0
20	100	50	0.10	270	80	0

Las simulaciones # 1 a 17 son casos diferentes, donde la turbina está arrancando a diferentes velocidades del viento y con diferentes tasas de paso. Un ejemplo (simulación # 1) se muestra en la Figura 9. Las simulaciones # 18 a 20 son casos en los que la turbina está inactiva a altas velocidades del viento.

10

El ángulo de azimut ψ , la velocidad del rotor ω , el ángulo de inclinación θ y la tasa de ángulos de paso de las simulaciones se usan como entrada para el modelo actual para predecir las cargas de sección transversal en el sistema de coordenadas del perfil. Las cargas predichas se comparan con las cargas de las simulaciones de tiempo (véase Figuras 16a-c). Cada punto representa las cargas para un ángulos de paso de tiempo dado. La frecuencia de muestreo aquí es de 10 Hz. El tiempo total simulado fue de 3.150 segundos, lo que corresponde a 31.500 muestras.

15

Como se ve en las Figuras 16a-c, los puntos de datos están dispersos. Especialmente el momento M_x de aleta tiene una baja coherencia, pero también el momento de borde M_y tiene una dispersión significativa. La fuerza axial F_z está muy bien predicha. Idealmente, todos los puntos de datos se deben colocar en la línea recta $y = x$ con el cuadrado del coeficiente de correlación $R^2 = 1$. La dispersión es provocada por el hecho de que el modelo actual solo es confiable bajo ciertas condiciones de operación (véase sección 7).

20

Basado en parámetros conocidos, la filtración de datos debería mantener solo puntos de datos que sean confiables, es decir, puntos de datos cercanos a la línea $y = x$. Es imposible hacer un filtro perfecto que mantenga todos los datos confiables y descarte todos los datos no confiables. En la práctica, siempre habrá cierta superposición, pero lo más importante es descartar en conjunto todos los datos no confiables, incluso si algunos de los datos confiables se descartan. Pero aún debe quedar una cantidad suficiente de datos para realizar una calibración confiable y precisa.

25

8.1 Condiciones de límite de filtración

30

El modelo actual no es válido si el generador está activado. No hay indicación directa de cuándo el generador está activado o desactivado. Pero el generador solo se activa si la velocidad del rotor está por encima de la velocidad de activación del generador (6.8 rpm). Por lo tanto, se descartan todos los datos con una velocidad del generador superior a la velocidad de activación del generador (con un margen de seguridad razonable debido a la velocidad variable del generador).

35

$$\omega < 0.6 \text{ rad/s.}$$

(8.1)

El modelo actual tampoco es válido si el freno está activado. No hay indicación directa de cuándo se activa el freno. Pero si se activa el freno, se espera una desaceleración rápida del rotor. Por lo tanto, se deben descartar los datos con una aceleración del rotor altamente negativa.

$$\dot{\omega} > -0.05 \text{ rad/s}^2. \quad (8.2)$$

Si el freno está activado y el rotor se ha detenido, ya no hay desaceleración. Pero el freno aún superará el par de torsión aerodinámico, por lo que estos datos también se deben descartar. Como precaución, se deben descartar todos los datos con una velocidad del rotor cercana a cero. Esto también evita registrar una cantidad excesiva de datos en la misma posición del rotor, lo que podría sesgar la calibración.

$$-0.001 \text{ rad/s} < \omega < 0.001 \text{ rad/s}. \quad (8.3)$$

Suponiendo que el generador está desactivado y el freno no está activado, una alta aceleración (o desaceleración) del rotor solo es posible si hay un gran par de torsión aerodinámico en el rotor. Esta es una situación en la que el modelo aerodinámico es incierto. Por lo tanto, se descartan los datos con alta aceleración del rotor (o desaceleración).

$$-0.005 \text{ rad/s}^2 < \dot{\omega} < 0.005 \text{ rad/s}^2. \quad (8.4)$$

El modelo aerodinámico es incierto cuando la velocidad del viento relativa en la pala es alta. Además, la suposición de que las palas son cuerpos rígidos no se cumple en este caso, porque las palas se flexionan y vibran. No hay indicación directa de la velocidad del viento relativa en la pala o de la velocidad del viento libre. Si el ángulo de ataque es bajo (dentro de $\pm 10^\circ$), la velocidad del viento relativa en la pala es casi paralela al eje x del sistema de coordenadas de la pala. Este suele ser el caso en las condiciones de operación más típicas. En este caso, la aproximación en la ecuación 8.5 se aplica, y se da una indicación indirecta de la velocidad del viento relativa en la pala. Los datos con valores altos se deben descartar.

$$\frac{v_{rel.}}{r} \approx \frac{\omega}{\cos \theta} < 0.15 \text{ rad/s}. \quad (8.5)$$

La ecuación 8.5 es cada vez más incierta cerca de la asíntota a $\theta = 90^\circ$. Si la turbina está en modo de pausa o detenida, existe el riesgo de que la velocidad del viento sea alta, sin ningún método para detectarla, ya que el ángulo de inclinación es cercano a 90° y no aplica la ecuación 8.5. Por lo tanto, se descartan los datos con ángulos de paso altos.

$$\theta < 75^\circ. \quad (8.6)$$

La Ecuación 5.59 es cada vez más incierta cerca de la asíntota en $\theta - \theta_{aero.} = -90^\circ$. Por lo tanto, se descartan los datos con ángulos de paso bajos.

$$\theta > 0^\circ. \quad (8.7)$$

Usando la filtración de los datos descritos en la ecuación 8.1 a 8.7, los puntos de datos que dan una mala predicción de las cargas desaparecen y hay una coherencia mucho mejor entre las cargas predichas por el modelo actual y las cargas simuladas por Flex5 (ver Figuras 17a-c).

Las cargas predichas por el modelo actual todavía no son perfectamente exactas, porque todavía queda un poco de dispersión, principalmente en el momento M_x de la aleta. Sin embargo, si hay suficientes puntos de datos, los errores serán más o menos promedio, y se puede hacer un ajuste de curva muy bueno.

9. Requisitos de datos para la calibración

Esta sección describe cuántas muestras se necesitan antes de llevar a cabo una calibración confiable.

La media de la muestra y la desviación estándar de la deformación en la i ésima posición del sensor se puede calcular por la ecuación. 9.1 y 9.2, respectivamente.

$$\bar{\epsilon}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \epsilon_{i,j}, \quad (9.1)$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (\varepsilon_{i,j} - \bar{\varepsilon}_i)^2} \quad (9.2)$$

5 En las muestras recogidas para la calibración, la deformación es causada principalmente por la gravedad. Suponiendo que la deformación es causada exclusivamente por la gravedad, y los ángulos de azimut y paso están distribuidos uniformemente, la desviación estándar de la muestra esperada de la deformación sería

$$s_{\text{esperado},i} = \frac{-(S_z - m \cdot z) \cdot g \cdot \sqrt{\left(\frac{x_{\text{sensor},i} - x_{\text{e.c.}}}{EI_{\text{borde}}}\right)^2 + \left(\frac{y_{\text{sensor},i} - y_{\text{e.c.}}}{EI_{\text{aleta}}}\right)^2}}{2} \quad (9.3)$$

10 Si la desviación estándar de la muestra de la deformación es menor de lo esperado, significa que relativamente pocas muestras tienen una deformación cercana a los valores extremos. Por otro lado, si la desviación estándar de la muestra de la deformación es mayor de lo esperado, significa que relativamente muchas muestras tienen una deformación cercana a los valores extremos. Esto último es mejor, porque si la mayoría de las muestras se agrupan en pequeños niveles de deformación, el ajuste de la curva sería más incierto que si la mayoría de las muestras estuvieran en niveles de deformación extremos. Por lo tanto, se sugiere que el número mínimo necesario de muestras dependa de la relación
15 entre la desviación estándar de la muestra esperada y la desviación estándar de la muestra de la deformación. Además, se sugiere que el número necesario de muestras dependa de la frecuencia de muestreo. Se sugiere que se cumpla la siguiente desigualdad para ambos sensores antes de realizar la calibración.

$$n \geq n_{\text{min},i} = 1,000 \text{ s} \cdot (f_s + 10 \text{ Hz}) \cdot \left(\frac{s_{\text{esperado},i}}{s_i}\right)^4, \quad (9.4)$$

20 Dependiendo de la frecuencia de muestreo y la dispersión de datos, esto corresponde a un poco más de 1,000 segundos de datos de alta calidad que han pasado la filtración descrita en la sección 8. Después de adquirir cierta experiencia con datos de medición reales, el criterio en el la desigualdad anterior podría modificarse para ajustarse a los nuevos requisitos.

25 10. Ajuste de datos para la calibración

Cuando la desigualdad en la ecuación 9.4 se cumple para ambos sensores en una sección transversal, la calibración real se puede llevar a cabo.

30 Las deformaciones en las posiciones del sensor pueden calcularse teóricamente por

$$\varepsilon_i = R_{x,i} \cdot M_{x,p.s.} + R_{y,i} \cdot M_{y,p.s.} - \frac{F_{z,p.s.}}{AE}, \quad (10.1)$$

dónde están las deformaciones relativas

$$35 \quad R_{x,i} = -\frac{y_{\text{sensor},i} - y_{\text{e.c.}}}{EI_{\text{aleta}}}, \quad (10.2)$$

$$R_{y,i} = \frac{x_{\text{sensor},i} - x_{\text{e.c.}}}{EI_{\text{borde}}}. \quad (10.3)$$

40 Con dos sensores en una sección transversal, la ecuación 10.1 se puede reorganizar en ecuaciones lineales

$$M_{x,p.s.} = m_{x,1} \cdot \left(\varepsilon_1 + \frac{F_{z,p.s.}}{AE}\right) + m_{x,2} \cdot \left(\varepsilon_2 + \frac{F_{z,p.s.}}{AE}\right) + b_x, \quad (10.4)$$

$$M_{y,p.s.} = m_{y,1} \cdot \left(\varepsilon_1 + \frac{F_{z,p.s.}}{AE}\right) + m_{y,2} \cdot \left(\varepsilon_2 + \frac{F_{z,p.s.}}{AE}\right) + b_y. \quad (10.5)$$

45 Las ecuación 10.4 y 10.5 son las ecuaciones generales para los planos que describen $M_{x,p.s}$ y $M_{y,p.s}$, respectivamente, como funciones de las variables independientes.

$$\left(\varepsilon_1 + \frac{F_{z,p.s.}}{AE}\right) \quad \text{y} \quad \left(\varepsilon_2 + \frac{F_{z,p.s.}}{AE}\right).$$

50

Los momentos relativos $m_{x,i}$ y $m_{y,i}$ son las pendientes de los planos en las direcciones respectivas y al principio las constantes b_x y b_y deben ser iguales a cero, pero aquí se incluyen para tener en cuenta cualquier compensación, por ejemplo, causada por sensores pretensados, etc.

5 La conexión entre las deformaciones relativas y los momentos relativos es

$$R_{x,1} = \frac{m_{y,2}}{m_{x,1} \cdot m_{y,2} - R_{y,1} \cdot R_{x,2}}, \quad (10.6)$$

$$R_{y,1} = \frac{-m_{x,2}}{m_{x,1} \cdot m_{y,2} - R_{y,1} \cdot R_{x,2}}, \quad (10.7)$$

10

$$R_{x,2} = \frac{-m_{y,1}}{m_{x,1} \cdot m_{y,2} - R_{y,1} \cdot R_{x,2}}, \quad (10.8)$$

$$R_{y,2} = \frac{m_{x,1}}{m_{x,1} \cdot m_{y,2} - R_{y,1} \cdot R_{x,2}}, \quad (10.9)$$

15 o correspondientemente

$$m_{x,1} = \frac{R_{y,2}}{R_{x,1} \cdot R_{y,2} - R_{x,2} \cdot R_{y,1}}, \quad (10.10)$$

$$m_{x,2} = \frac{-R_{y,1}}{R_{x,1} \cdot R_{y,2} - R_{x,2} \cdot R_{y,1}}, \quad (10.11)$$

20

$$m_{y,1} = \frac{-R_{x,2}}{R_{x,1} \cdot R_{y,2} - R_{x,2} \cdot R_{y,1}}, \quad (10.12)$$

$$m_{y,2} = \frac{-R_{x,1}}{R_{x,1} \cdot R_{y,2} - R_{x,2} \cdot R_{y,1}}, \quad (10.13)$$

25 Mientras el registrador de datos está muestreando las deformaciones medidas, para cada punto de datos que pasa la filtración, se deben guardar las siguientes variables: las deformaciones ε_1 y ε_2 y las cargas $F_{z,ps}$, $M_{x,ps}$ y $M_{y,ps}$ calculado por la ecuación. 5.66-5.68.

30 Ahora es posible encontrar los coeficientes $m_{x,1}$, $m_{x,2}$, $m_{y,1}$, $m_{y,2}$, b_x y b_y para obtener los planos (ecuaciones 10.4 y 10.5) que mejor ajustan los momentos $M_{x,ps}$ y $M_{y,ps}$ de flexión calculados. Los coeficientes se pueden encontrar usando, por ejemplo, el método de mínimos cuadrados. Este método no se describirá aquí, porque está más allá del alcance de este documento y es bien conocido por la persona experta.

11. Ecuaciones para usar después de la calibración

35 Cuando el sistema se usa para monitorizar las cargas de la pala después de una calibración exitosa de los sensores, debe tenerse en cuenta que al calcular los tres componentes de carga de sección transversal $F_{z,ps}$, $M_{x,ps}$ y $M_{y,ps}$ de solo dos mediciones ε_1 y ε_2 son imposibles. Se necesita una entrada más para configurar una ecuación adicional, para que sea posible resolver el sistema de ecuaciones.

40 Aquí se propone simplemente usar la fuerza axial $F_{z,p,s}$ calculada por la ecuación. 5.66, suponiendo que la incertidumbre introducida por esto es bastante pequeña, incluso para condiciones de operación a alta velocidad del viento y del rotor y con el generador conectado. Ahora que $F_{z,p,s}$ es una cantidad conocida, los momentos de flexión $M_{x,p,s}$ y $M_{y,p,s}$ pueden calcularse directamente por la ecuación 10.4 y 10.5.

45 Cabe señalar que las cargas resultantes están en el sistema de coordenadas de perfil local que incluye también la deformación de la pala. Si las cargas son necesarias en otro sistema de coordenadas, por ejemplo, el sistema de coordenadas de la pala, las cargas deben transformarse de manera correspondiente.

12. Resultados

50

Los datos filtrados que se muestran en la figura 8.2 no cumplen la desigualdad en la ecuación. 9.4 para el sensor 1, es decir, por ejemplo, el primer sensor 21 de aleta, pero para el sensor 2, es decir, por ejemplo, el sensor 22 de borde, hay suficientes muestras (véase la tabla 12.1).

55

Tabla 12.1: Figuras para evaluar los requisitos para calibración de los sensores.

	Sensor 1	Sensor 2
f_s	10 Hz	
$S_{i,esperado}$	2.54e-4	2.16e-4
S_i	2.34e-4	2.75e-4
$n_{min,i}$	27.915	7.522
N	11.349	

5 Aunque el número de muestras no es suficiente según la ecuación 9.4, la calibración como se describe en la sección 10 todavía se lleva a cabo aquí, solo para mostrar cuáles serían los resultados (ver tablas 12.2 y 12.3).

Tabla 12.2: Resultados de calibración para la regresión de $M_{x,p.s}$.

	Mejor ajuste	Valor real	Diferencia
$m_{x,1}$	-2.094e+9 Nm	-2.079e+9 Nm	+0.70%
$m_{x,2}$	4.954e+8 Nm	4.712e+8 Nm	+5.15%
b_x	-2.434 Nm	0 Nm	-2,434 Nm
r^2	0.9951		
$\hat{\sigma}M_x$	26.515 Nm		

10 Los resultados en la tabla 12.2 corresponden a un error total en $M_{x,p.s}$ de + 0.24% del momento real más una compensación de -2.4 kNm.

Tabla 12.3: Resultados de calibración para la regresión de $M_{y,p.s}$.

15

	Mejor ajuste t	Valor real	Diferencia
$m_{y,1}$	1.130e+9 Nm	-1.133e+9 Nm	-0.18%
$m_{y,2}$	-2.747e+9 Nm	-2.749e+9 Nm	-0.08%
b_y	-2.233 Nm	0 Nm	-2.233 Nm
r^2	0.9997		
$\hat{\sigma}M_y$	9.112 Nm		

Los resultados en la tabla 12.3 corresponden a un error total en $M_{y,p.s}$ de -0.06% del momento real más una compensación de -2.2 kNm.

20 13. Trabajo futuro

La guiñada de la turbina no se tiene en cuenta en el modelo actual porque el ángulo de guiñada probablemente no es un parámetro fácilmente accesible para registrar. Sin embargo, la guiñada cambiaría las cargas de la pala, especialmente si la velocidad del rotor es moderada o alta. El impacto de esto aún no ha sido investigado. Si es posible obtener acceso al ángulo de guiñada, sería relevante actualizar el modelo actual para tener en cuenta las cargas de inercia originadas por la guiñada. De lo contrario, sería relevante investigar la actividad de guiñada típica de una turbina real y averiguar cuál es el impacto de esto.

25

Los parámetros para el modelo aerodinámico se deben ajustar con mediciones de campo de una turbina eólica real para ver si se pueden mejorar. El modelo aerodinámico simplificado es la parte débil del modelo actual, y debe considerarse si es posible mejorarlo por medio de otras ecuaciones bastante simples.

30

Otra gran incertidumbre es la suposición de palas rígidas. Para mejorar aún más el modelo actual, sería necesario tener en cuenta la deformación y la vibración de las palas elásticas. Sin embargo, esto aumentaría significativamente la complejidad del modelo.

5 Después de adquirir cierta experiencia con las mediciones de campo, debe investigarse si las condiciones de los límites de filtración deben cambiarse. También podrían agregarse nuevos tipos de filtros si fuera relevante, por ejemplo, algunos filtros inteligentes que tengan en cuenta más de un parámetro y más de una condición. En lugar de descartar datos que no pasan la filtración, podría considerarse incluir una contribución ponderada de estos datos. La ponderación dependerá de hasta qué punto los datos cumplan con los criterios de filtración.

10 14. Conclusiones

Se presentó un método para una calibración in situ totalmente automática de sensores de carga en una pala de turbina eólica. No es necesario detener la turbina para la calibración. Un registrador de datos está registrando datos relevantes para la calibración mientras la turbina está funcionando normalmente. Además, no es necesaria la interacción humana para realizar la calibración.

15 El concepto requiere al menos dos sensores de deformación en cada sección transversal de la pala. El registrador de datos debe registrar al menos el ángulo de azimut, el ángulo de paso junto con algunos valores calculados. Para los cálculos, se necesitan varias propiedades de turbina y pala, tales como masa de pala, momento de masa, momentos de inercia, etc.

20 Solo los datos registrados a velocidades de viento y rotor relativamente bajas y cuando el generador está desconectado son utilizables. Esto suele ocurrir cuando la turbina está inactiva o arranca a bajas velocidades del viento. Los datos restantes se descartan. Se sugieren datos utilizables acumulados de poco más de 1,000 segundos para realizar una calibración confiable.

25 Para probar el concepto, se realizaron algunas simulaciones temporales de la turbina REpower 5M con palas LM 61.5 P2 utilizando el código aeroelástico Flex5. Los resultados de las simulaciones de tiempo se trataron como si fueran mediciones de los sensores de tensión en una pala de deformación eólica real, y posteriormente se utilizaron como entrada para la calibración.

30 Los resultados mostraron que es posible utilizar el concepto para calibrar los sensores de carga. Los errores de calibración máximos fueron 0.24% para el momento de flexión de aleteo y -0.06% para el momento de flexión por el borde, con compensaciones alrededor de -2 kNm.

35 La invención se ha descrito con referencia a una realización preferida. Sin embargo, el alcance de la invención no se limita a la realización ilustrada, y se pueden realizar alteraciones y modificaciones sin desviarse del alcance de la invención.

40 15. Lista de números de referencia

- 2 turbina eólica
- 45 4 góndola de torre
- 6 barquilla
- 8 cubo
- 50 10 pala
- 14 extremo de pala
- 55 16 raíz de pala
- 18 borde anterior
- 20 borde posterior
- 60 21 primer sensor de aleta
- 22 primer sensor de borde
- 65 23 primer sensor de aleta

- 24 primer sensor de borde
- 25 primer eje principal de flexión
- 5 26 segundo eje principal de flexión
- 27 centro elástico
- 28 sistema de coordenadas de pala
- 10 29 sistema de coordenadas de perfil
- 30 región de raíz
- 15 32 región de transición
- 34 región de plano aerodinámico
- 40 parte de la pala de la turbina eólica ubicada fuera o fuera del casco de la primera sección transversal de la pala de la turbina eólica
- 20 42 primera sección transversal
- 43 segunda sección transversal
- 25 50 eje longitudinal de la torre
- 51 eje longitudinal del cojinete principal
- 30 52 eje longitudinal de la primera pala de la turbina eólica

Símbolo	Unidad	Descripción
A	[m ²]	Área de sección transversal
a_1	[W]	Pérdidas por fricción lineal en el tren de transmisión a velocidad nominal (solo pérdidas mecánicas)
a_2	[W]	Pérdidas por fricción cuadrática en el tren de transmisión a velocidad nominal (solo pérdidas mecánicas)
a_3	[W]	Pérdidas de fricción de tercer orden en el tren de transmisión a velocidad nominal (solo pérdidas mecánicas)
AE	[Nm ²]	Rigidez axial
b_x	[Nm]	desvío constante para M_x , p.s.
b_y	[Nm]	desvío constante para M_y , p.s.
B	[-]	Número de palas
c	[m]	Longitud de la cuerda
$E_{l\text{borde}}$	[Nm ²]	Rigidez de flexión por el borde
$E_{l\text{aleta}}$	[Nm ²]	Rigidez de flexión por la aleta
f_F	[-]	Factor de multiplicación para fuerza aerodinámica
f_M	[-]	Factor de multiplicación para momento aerodinámico
f_s	[Hz]	Frecuencia de muestreo
$F_{x,b.s.,aero.}$	[N]	Fuerza aerodinámica en la dirección x (sistema de coordenadas de cojinete de pala)
$F_{x,b.s.,Coriolis}$	[N]	Fuerza de Coriolis en la dirección x (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{x,b.s.,inercia}$	[N]	Fuerza de inercia en la dirección x (sistemas de coordenada de la pala)
$F_{x,b.s.,accpaso}$	[N]	Fuerza en la dirección x causada por la aceleración del paso
$F_{x,b.s.,centrif. avance}$	[N]	Fuerza centrífuga en la dirección x causada por la velocidad de avance (Sistema de coordenadas de la pala)
$F_{x,b.s., acc.rotor}$	[N]	Fuerza en la dirección x causada por la aceleración del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{x,b.s., centrif. rotor}$	[N]	Fuerza centrífuga en la dirección x causada por la velocidad del rotor (sistema de coordenadas del rotor)
$F_{y,b.s.,Coriolis}$	[N]	Fuerza de Coriolis en la dirección y (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{y,b.s.,inercia}$	[N]	Fuerza de inercia en la dirección y (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{y,b.s.,accpaso}$	[N]	Fuerza en la dirección y causada por la aceleración de avance (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{y,b.s.,centrif. avance}$	[N]	Fuerza centrífuga en la dirección y causada por la velocidad de avance (sistema de coordenadas de la pala)

ES 2 757 701 T3

$F_{y,b.s., acc\ rotor}$	[N]	Fuerza en la dirección y causada por la aceleración del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{y,b.s. centrif, rotor}$	[N]	Fuerza centrífuga en la dirección y causada por la velocidad del rotor (sistema de coordenada del rotor)
$F_{z,b.b.s.,aero.}$	[N]	Fuerza aerodinámica en la dirección z (sistema de coordenadas que lleva la pala)
$F_{z,b.s.}$	[N]	Fuerza en la dirección z (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{z,b.s.,aero}$	[N]	Fuerza aerodinámica en la dirección z (sistema de coordenadas de cojinete de pala pala)
$F_{z,b.s.,grav}$	[N]	Fuerza gravitacional en la dirección z (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{z,b.s.,Coriolis}$	[N]	Fuerza de Coriolis en la dirección z (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{z,b.s.,inercia}$	[N]	Fuerza de inercia en la dirección z (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{z,b.s.,acc, avance}$	[N]	Fuerza en la dirección z causada por la aceleración de avance (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{z,b.s.,centrif, paso}$	[N]	Fuerza centrífuga en la dirección z causada por la velocidad de avance (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{z,b.s., acc, rotor}$	[N]	Fuerza en la dirección z causada por la aceleración del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
$F_{z,b.s.,centrif, rotor}$	[N]	Fuerza centrífuga en la dirección z causada por la velocidad del rotor (sistema de coordenadas del rotor)
$F_{z,p.s.}$	[N]	Fuerza en la dirección z (sistema de coordenadas del perfil)
$F_{z,r.s., acc, rotor}$	[N]	Fuerza en la dirección z causada por la aceleración del rotor (sistema de coordenadas del rotor)
g	[m/s ²]	Aceleración gravitacional
$g_{x,b.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección x (sistema de coordenadas de la pala)
$g_{x,b.b.s.}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección x (sistema de coordenadas de cojinete de pala)
$g_{x, m.b.s.}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección x (sistema de coordenadas de cojinete de pala)
$g_{x,r.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección x (sistema de coordenadas del rotor)
$g_{x,n.s.}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección x (sistema de coordenadas de barquilla)
$g_{y,b.s.}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección y (sistema de coordenadas de la pala)
$g_{y,b.b.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección y (sistema de coordenadas de cojinete de pala)
$g_{y,m.b.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección y (sistema de coordenadas de cojinete principal)
$g_{y,n.s.}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección y (sistema de coordenadas de barquilla)
$g_{y,r.s.}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección y (sistema de coordenadas del rotor)
$g_{z,b.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección z (sistema de coordenadas de la pala)
$g_{z,b.b.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección z (sistema de coordenadas de cojinete de pala)
$g_{z,m.b.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección z (sistema de coordenadas de cojinete de pala)
$g_{z,n.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección z (sistema de coordenadas barquilla)
$g_{z,r.s}$	[m/s ²]	Aceleración gravitacional en la dirección z (sistema de coordenadas del rotor)
H_{Ox}	[kg·m ² /s]	Momento angular en la dirección x alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
H_{Oy}	[kg·m ² /s]	Momento angular en la dirección y alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
H_{Oz}	[kg·m ² /s]	Momento angular en la dirección z alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
H_{Ox}	[kg·m ² /s ²]	Derivada de tiempo del momento angular en la dirección x alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)

ES 2 757 701 T3

H _{Oy}	[kg·m ² /s ²]	Derivada de tiempo del momento angular en la dirección y alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistemas de coordenadas de la pala)
i	[-]	Número del sensor
I _{Oxx}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa en la dirección x alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
I _{Oxx,pala}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa de la pala en la dirección x alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistemas de coordenadas de la pala)
I _{Oxy}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa con respecto a los ejes x e y alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistemas de coordenadas de la pala)
I _{Oxy,pala}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa de la pala con respecto a los ejes x e y alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistemas de coordenadas de la pala)
I _{Oxz}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa con respecto a los ejes x y z alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistemas de coordenadas de la pala)
I _{Oxz,pala}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa de la pala con respecto a los ejes x y z alrededor del punto fijo en el centro de rotor (sistemas de coordenadas de la pala)
I _{Oyy}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa en la dirección y alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistemas de coordenadas de la pala)
I _{Oyy,pala}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa de la pala en la dirección y alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistemas de coordenadas de la pala)
I _{Oxx,generador}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa del generador alrededor de su eje de rotación
I _{Oxx,cubo}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la de la masa del cubo alrededor del eje del rotor
I _{Oxx,rotor}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa del rotor alrededor del eje del rotor (incl., tren de transmisión completo)
I _{Oxx,r.s.,pala,i}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa de la pala alrededor del eje del rotor para el íesimo (sistema de coordenadas del rotor de la pala)
I _{Oyz}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa con respecto a los ejes y y z alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
I _{Oyz,pala}	[kg·m ²]	Producto de inercia de masa de la pala con respecto a los ejes y y z alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
I _{Ozz}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa en la dirección z alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
I _{Ozz,pala}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa de la pala en la dirección z alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
I _{xx}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa en la dirección x alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{xx,pala}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa de la pala en la dirección x alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{yx}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa con respecto a los ejes x e y alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{xy,pala}	[kg·m ²]	Producto de la inercia de la masa de la pala con respecto a los ejes x e y alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{xz}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa con respecto a los ejes x y z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{xz,pala}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa de la pala con respecto a los ejes x y z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{yy}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa en la dirección y alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{yy,pala}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa de la pala en la dirección y alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{yz}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa con respecto los ejes y y z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{yz,pala}	[kg·m ²]	Producto de inercia de la masa de la pala con respecto a los ejes y y z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{zz}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa en la dirección z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I _{zz,pala}	[kg·m ²]	Momento de inercia de la masa de la pala en la dirección z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I' _{xx}	[kg·m]	Distribución del momento de inercia de la masa en la dirección x alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I' _{xy}	[kg·m]	Distribución del producto de inercia de la masa con respecto a los ejes x e y alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)

ES 2 757 701 T3

I'_{xz}	[kg·m]	Distribución del producto de inercia de la masa con respecto a los ejes x y z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I'_{yy}	[kg·m]	Distribución del momento de inercia de la masa en la dirección y alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I'_{yz}	[kg·m]	Distribución del producto de inercia de la masa con respecto a los ejes y e z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
I'_{zz}	[kg·m]	Distribución del momento de inercia de la masa en la dirección z alrededor de la raíz de la pala (sistema de coordenadas de la pala)
j	[-]	Número de muestra
k_F	[-]	Factor de corrección para la fuerza aerodinámica
k_M	[-]	Factor de corrección para el momento aerodinámico
m	[kg]	masa
m'	[kg/m]	Distribución de la masa
$m_{x,i}$	[Nm]	Momento relativo en la dirección x para el sensor i
$m_{y,i}$	[Nm]	Momento relativo en la dirección y para el sensor i
$M_{Ox,b.s.,inercia}$	[Nm]	Momento de inercia de flexión en la dirección x alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de la pala)
$M_{Oy,b.s.b.s.inercia}$	[Nm]	Momento de inercia de flexión de la dirección y alrededor del punto fijo en el centro del rotor (sistema de coordenadas de pala)
$M_{x,b.b.s.,aero}$	[Nm]	Momento aerodinámico de flexión en la dirección x (sistema de coordenadas de cojinete de pala)
$M_{x,b.s}$	[Nm]	Momento de flexión en la dirección x (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{x,b.s.,aero}$	[Nm]	Momento aerodinámico de flexión en la dirección x (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{x,b.s.inercia}$	[Nm]	Momento de inercia de flexión en la dirección x (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{x,b.s.,grav.}$	[Nm]	Momento gravitacional de flexión en la dirección x (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{x,p.s.}$	[Nm]	Momento de flexión en la dirección x (sistemas de coordenadas de perfil)
$M_{y,b.b.s.,aero}$	[Nm]	Momento aerodinámico de flexión en la dirección y (sistemas de coordenadas de cojinete pala)
$M_{y,b.s.}$	[Nm]	Momento de flexión en la dirección y (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{y,b.s.aero}$	[Nm]	Momento aerodinámico de flexión en la dirección y (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{y,b.s.,inercia}$	[Nm]	Momento de inercia de flexión en la dirección y (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{y,b.s.,grav.}$	[Nm]	Momento gravitacional de flexión en la dirección y (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{y,p.s.}$	[Nm]	Momento de flexión en la dirección y (sistemas de coordenadas de pala)
$M_{x,fricción}$	[Nm]	Torque de fricción de tren de transmisión solo pérdida mecánica
$M_{x,rotor,aero}$	[Nm]	Torque aerodinámico del rotor en la dirección x (sistemas de coordenadas del rotor)
n	[-]	Número total de muestras que han pasado la filtración
$n_{min,i}$	[-]	Número mínimo de muestras que ha pasado la filtración necesaria para calibración para el sensor i
$n_{engranaje}$	[-]	Índice de engranaje
p	[-]	Exponente para distribución de fuerza aerodinámica
r	[m]	Radio representativo para fuerzas aerodinámicas (= distancia desde el centro del rotor)
r^2	[-]	Cuadrado del coeficiente de correlación de la muestra (= coeficiente de determinación)
r_{cubo}	[m]	Radio del cubo (= distancia desde el centro del rotor a la raíz de la pala)
$r_{extremo}$	[m]	Radio de extremo (= distancia desde el centro del rotor al extremo de la pala)
r_{sensor}	[m]	Radio del sensor (= distancia desde el centro del rotor a la posición del sensor)
$R_{x,i}$	[(Nm) ⁻¹]	Deformación relativa en la dirección x para el sensor i
$R_{y,i}$	[(Nm) ⁻¹]	Deformación relativa en la dirección y para el sensor i
$S_{esperada,i}$	[-]	Desviación estándar de la muestra esperada de la deformación en la iésima posición del sensor
S_i	[-]	Desviación estándar de la muestra de la deformación en la iésima posición del sensor
S_x	[kg·m]	Momento estático (primer momento de inercia de la masa) en la dirección x
S_y	[kg·m]	Momento estático (primer momento de inercia de la masa) en la dirección y

ES 2 757 701 T3

S_z	[kg·m]	Momento estático (primer momento de inercia de la masa) en la dirección z
t	[m]	Grosor absoluto del perfil
$V_{rel.}$	[m]	Velocidad relativa del viento en la pala a una distancia radial dada del centro del rotor
x	[m]	Coordenada x (sistemas de coordenada de la pala)
$X_{c.g.}$	[m]	Coordenada x del centro de gravedad de la sección transversal (sistemas de coordenada de pala)
$X_{e.c.}$	[m]	Coordenada x de la posición central elástica (sistema de coordenadas de pala)
$X_{sensor,i}$	[m]	Coordenada x de la iésima posición del sensor (sistema de coordenadas de pala)
y	[m]	Coordenada y (sistema de coordenadas de pala)
$y_{c.g.}$	[m]	Coordenada y del centro de gravedad de la sección transversal (sistemas de coordenada de pala)
$y_{e.c.}$	[m]	Coordenada y de la posición del centro elástico (sistema de coordenadas de pala)
$y_{sensor,i}$	[m]	Coordenada y de la iésima posición del sensor (sistema de coordenadas de la pala)
Z	[m]	Coordenada z (sistema de coordenadas de pala)
Z_{sensor}	[m]	Coordenada z de la posición del sensor (sistemas de coordenada de pala)
$Z_{extremo}$	[m]	Coordenada z del extremo de la pala (sistema de coordenadas de pala)
γ	[rad]	Ángulo de cono
ϵ_i	[-]	Deformación en la iésima posición del sensor
$\underline{\epsilon}_{i,j}$	[-]	Deformación en la iésima posición del sensor y la jésima muestra
ϵ_i	[-]	Media de deformación de la muestra en la iésima posición del sensor
θ	[rad]	Ángulo de paso
$\dot{\theta}$	[rad/s]	Relación de paso
$\ddot{\theta}$	[rad/s ²]	Aceleración de avance
θ	[rad]	Ángulo entre sistema de coordenadas de pala y dirección de la fuerza aerodinámica
θ_i	[rad]	Ángulo de paso para la iésima pala
ρ	[kg/m ³]	Densidad de masa del material de pala
$\hat{\sigma}_{M_x}$	[Nm]	Error estándar del M_x estimado
$\hat{\sigma}_{M_y}$	[Nm]	Error estándar del M_y estimado
τ	[rad]	Ángulo de inclinación
φ	[rad]	Ángulo entre sistema de coordenadas de pala y ejes de flexión principales
ψ	[rad]	Ángulo de azimut
ω	[rad/s]	Velocidad del rotor
$\omega_{nom.}$	[rad/s]	Velocidad nominal del rotor
ω_x	[rad/s]	Velocidad angular en la dirección x (sistema de coordenadas de pala)
ω_y	[rad/s]	Velocidad angular en la dirección y (sistema de coordenadas de pala)
ω_z	[rad/s]	Velocidad angular en la dirección z (sistema de coordenadas de pala)
$\dot{\omega}$	[rad/s ²]	Aceleración del rotor
$\ddot{\omega}_x$	[rad/s ²]	Aceleración angular en la dirección x (sistema de coordenadas de pala)
$\ddot{\omega}_y$	[rad/s ²]	Aceleración angular en la dirección y (sistema de coordenadas de pala)
$\ddot{\omega}_z$	[rad/s ²]	Aceleración angular en la dirección z (sistema de coordenadas de pala)

REIVINDICACIONES

1. Un método de calibración in situ de sensores de carga de una turbina eólica de eje horizontal, la turbina eólica comprende:
- 5 - un rotor que incluye un cubo y un número de palas de la turbina eólica, que se extienden radialmente desde el cubo, el cubo está conectado a un tren de transmisión que incluye un generador, que convierte el movimiento de rotación mecánico del rotor en energía eléctrica, en el que
- 10 - dicho número de palas comprende al menos una primera pala de turbina eólica provista de un número de primeros sensores de carga colocados en una primera sección transversal de la primera pala de turbina eólica, y en la que el método comprende los pasos de:
- 15 a) determinar un ángulo de azimut del rotor de la primera pala de turbina eólica,
- b) determinar un ángulo de paso de la primera pala de turbina eólica,
- 20 c) medir cargas en la primera sección transversal de la primera pala de la turbina eólica usando los primeros sensores de carga,
- d) calcular cargas teóricas basadas en al menos el ángulo de azimut del rotor y el ángulo de paso de la pala determinado en los pasos a) y b),
- 25 e) comparar las cargas medidas en el paso c) con las cargas teóricas calculadas en el paso d), y
- f) calibrar los primeros sensores de carga en base a la comparación del paso e),
- 30 - en el que la calibración se basa solo en mediciones realizadas, cuando el generador está desconectado, y en el que los valores recogidos en los pasos a)-e) se muestrean y calculan repetidamente para cada muestra, y
- en el que el paso f) se lleva a cabo después de que se haya registrado un número predeterminado de muestras distintas, alternativamente que un número de muestras distintas excede un valor umbral mínimo, que está determinado por una función que depende de la frecuencia de muestreo y la difusión de datos, y
- 35 - en el que el ángulo de azimut del rotor y el ángulo de paso se muestrean continuamente, y en el que el ángulo de azimut del rotor y el ángulo de paso pueden cambiar entre muestras.
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la turbina eólica comprende además frenos para la rotación de frenado del rotor, y en el que solo las mediciones realizadas cuando los frenos no están activados se utilizan para calibrar los sensores de carga.
- 40
3. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la primera sección transversal comprende al menos dos sensores de carga que incluyen un primer sensor de carga y un segundo sensor de carga, ventajosamente el primer sensor de carga está ubicado cerca de un borde de salida de la primera pala de turbina eólica, y el segundo sensor de carga está ubicado entre un borde delantero y el borde salida de la primera pala de turbina eólica en un lado de succión o un lado de presión de la primera pala de turbina eólica.
- 45
4. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la primera pala de turbina eólica está provista además de un número de segundos sensores de carga colocados en una segunda sección transversal de la primera pala de turbina eólica.
- 50
5. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los cálculos de la etapa d) se basan en fuerzas gravitacionales y/o momentos gravitacionales a partir de un peso propio de la primera pala de turbina eólica.
- 55
6. Un método de acuerdo con la reivindicación 5, en el que los cálculos de la etapa d) se basan además en fuerzas de inercia y/o momentos de inercia desde la rotación del rotor.
- 60
7. Un método de acuerdo con la reivindicación 5 o 6, en el que los cálculos de la etapa d) se basan además en fuerzas aerodinámicas y/o momentos aerodinámicos de la rotación del rotor y/o del viento que impacta la primera pala de la turbina eólica.
- 65
8. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los cálculos de la etapa d) se basan además en propiedades generales de la primera pala de turbina eólica y una parte de la primera pala de turbina

eólica ubicada fuera del casco de la primera sección transversal, en donde las propiedades generales se basan en uno o más de los siguientes parámetros: masa, momento de masa, momento de inercia y producto de inercia.

5 9. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los cálculos del paso d) se basan además en pérdidas por fricción del tren de transmisión.

10 10. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los datos de medición obtenidos cuando la velocidad del rotor excede una velocidad de corte del generador se descartan del proceso de calibración, y/o los datos de medición obtenidos cuando una velocidad absoluta del rotor del rotor es inferior que un umbral mínimo de velocidad del rotor se descartan del proceso de calibración.

15 11. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los datos de medición obtenidos cuando una desaceleración del rotor del rotor excede un umbral de desaceleración del rotor se descartan del proceso de calibración.

20 12. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los datos de medición obtenidos cuando el paso de la primera pala de la turbina eólica es mayor que un umbral de paso máximo se descartan del proceso de calibración, y/o los datos de medición obtenidos cuando el paso de la primera pala de la turbina eólica es inferior a un umbral de paso mínimo se descartan del proceso de calibración.

25 13. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el proceso de calibración se basa en el ajuste de datos, como el ajuste de curva o el ajuste de plano, por ejemplo, mediante el método de mínimos cuadrados.

14. Una turbina eólica que comprende:

30 - un rotor que incluye un cubo y un número de palas de turbina eólica, que se extienden radialmente desde el cubo, estando conectado el cubo a un tren de transmisión que incluye un generador, que convierte el movimiento de rotación mecánica del rotor en energía eléctrica, en la que

35 - dicho número de palas comprende al menos una primera pala de turbina eólica provista de un número de primeros sensores de carga que incluyen al menos un sensor de carga primario y un sensor de carga secundario colocado en una primera sección transversal de la primera pala de turbina eólica, y la turbina eólica está provista además de un sistema de calibración para calibrar los primeros sensores de carga, el sistema de calibración comprende:

40 - medios de extracción para determinar los parámetros operativos de la turbina eólica y al menos un ángulo de azimut del rotor, y un ángulo de paso de la primera pala de turbina eólica, preferiblemente también una velocidad del rotor del rotor,

- medios de registro que registran continuamente muestras que comprenden mediciones de carga obtenidas de los primeros sensores de carga, y parámetros operativos de la turbina eólica,

- medios de cálculo para calcular las cargas teóricas de cada muestra en función de dichas muestras,

45 - medios de comparación para comparar las cargas teóricas y las mediciones de cargas, y

50 - medios de calibración para calibrar los primeros sensores de carga en función de los valores obtenidos desde los medios de comparación, los medios de calibración se configuran para llevar a cabo la calibración después de que se haya registrado un número predeterminado de muestras distintas, alternativamente que un número de muestras distintas excede un valor umbral mínimo, que está determinado por una función que depende de la frecuencia de muestreo y la dispersión de datos, caracterizado porque el sistema de calibración está configurado para muestrear continuamente el ángulo de azimut y el ángulo de paso del rotor, y además configurado para permitir que el ángulo de azimut del rotor y el ángulo de paso cambien entre muestras.

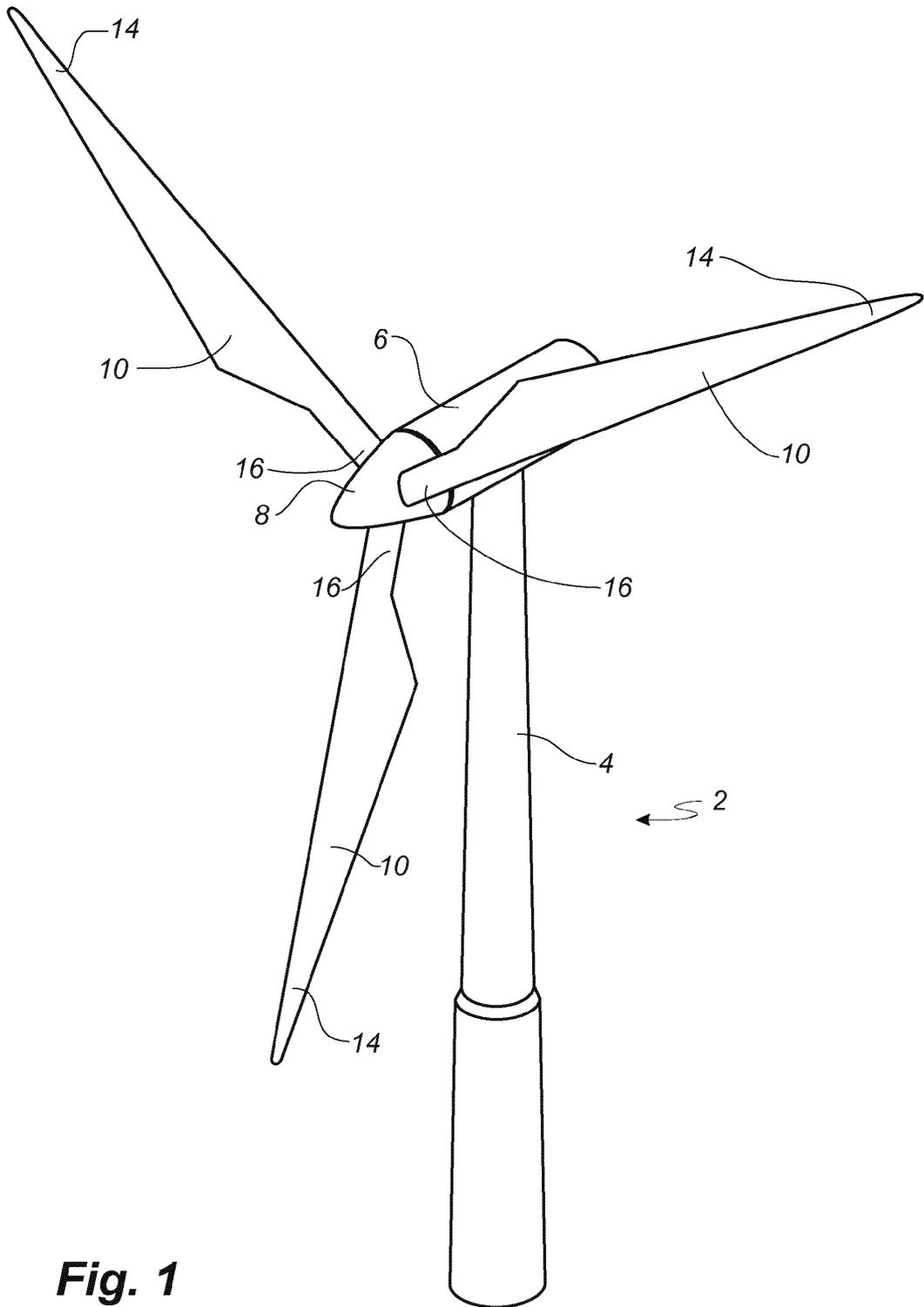
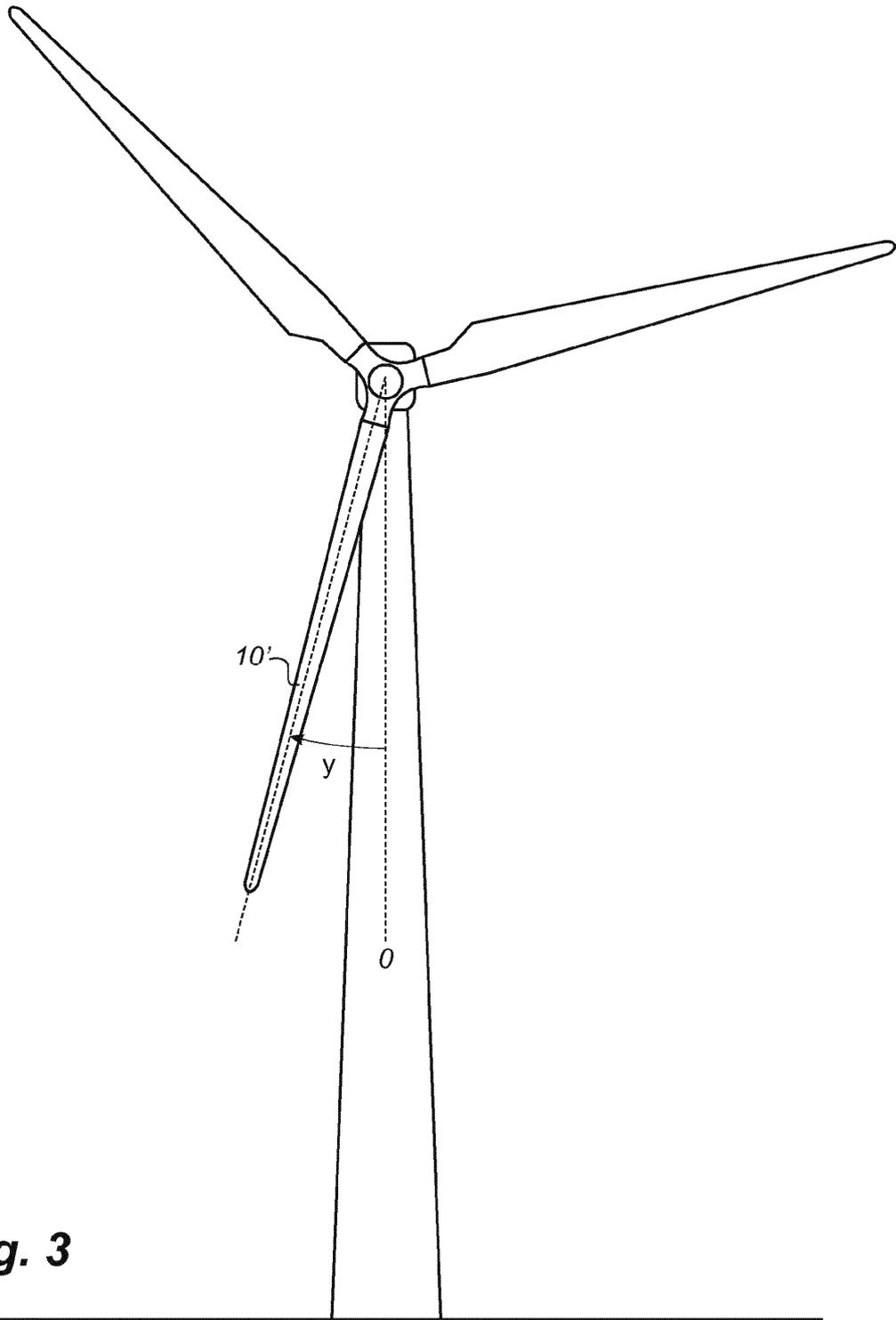


Fig. 1



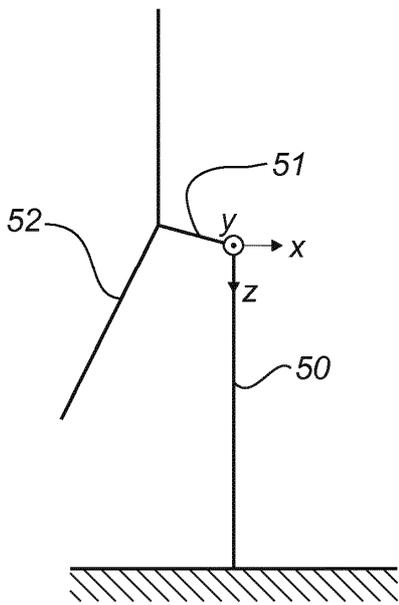


Fig. 4

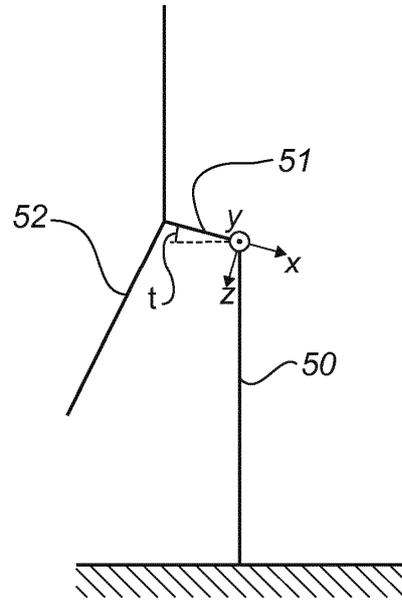


Fig. 5

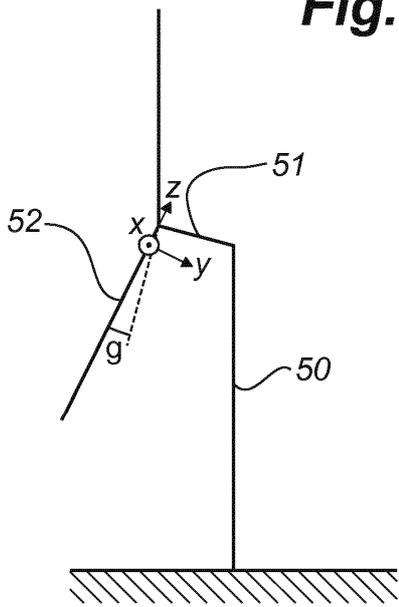


Fig. 6

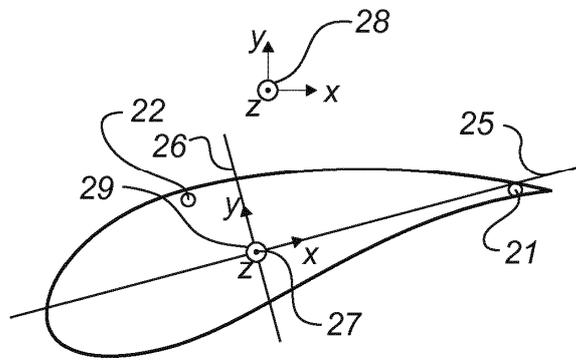


Fig. 7

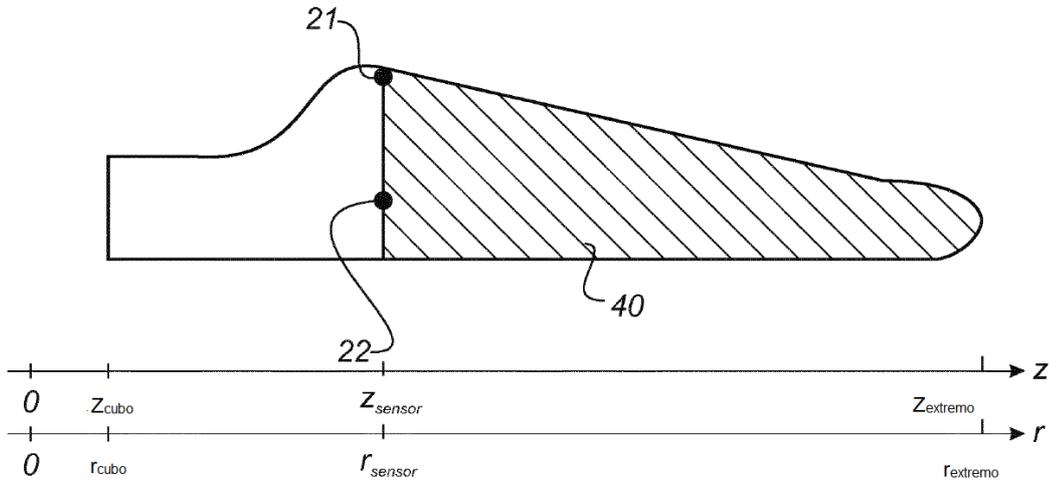


Fig. 8

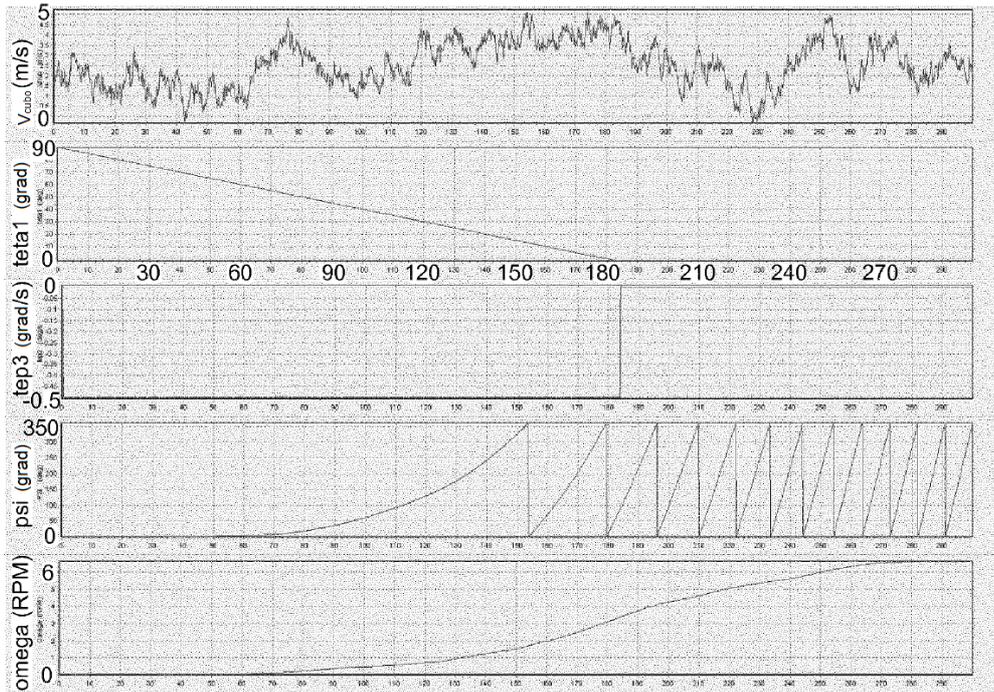


Fig. 9

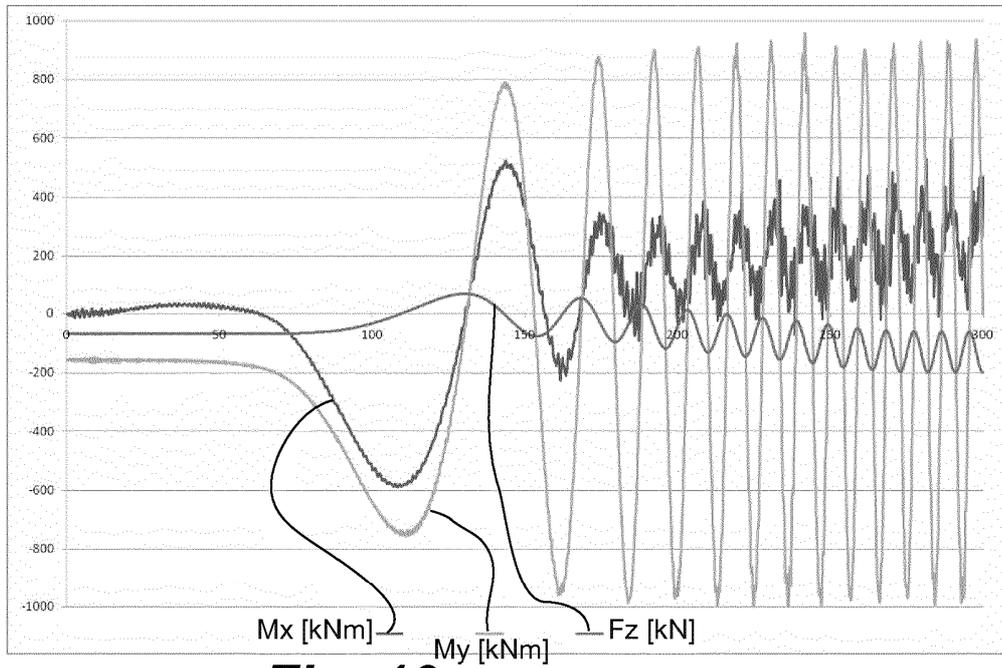


Fig. 10

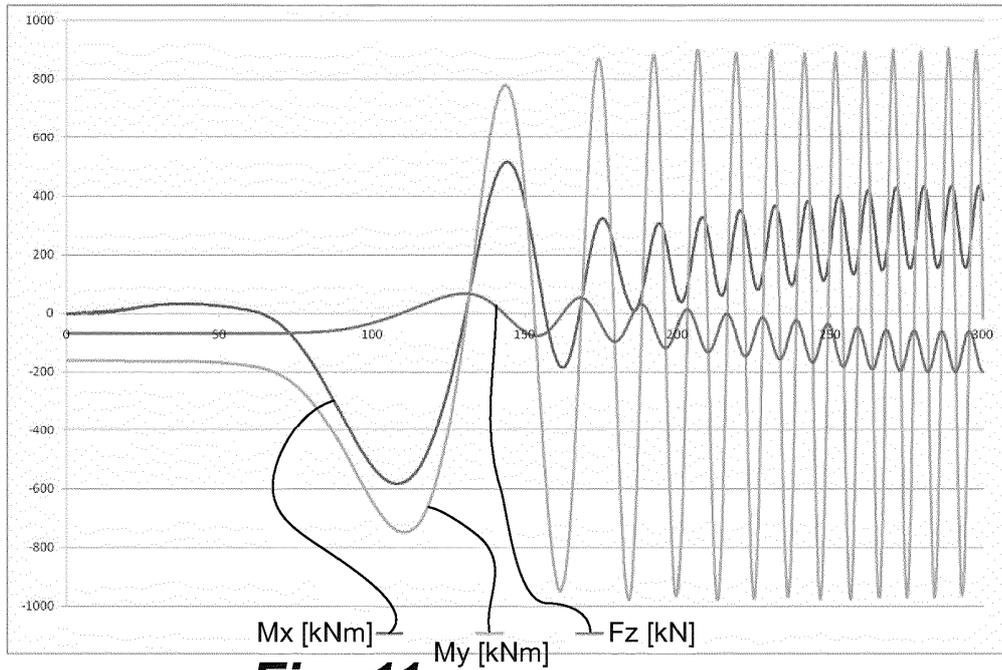


Fig. 11

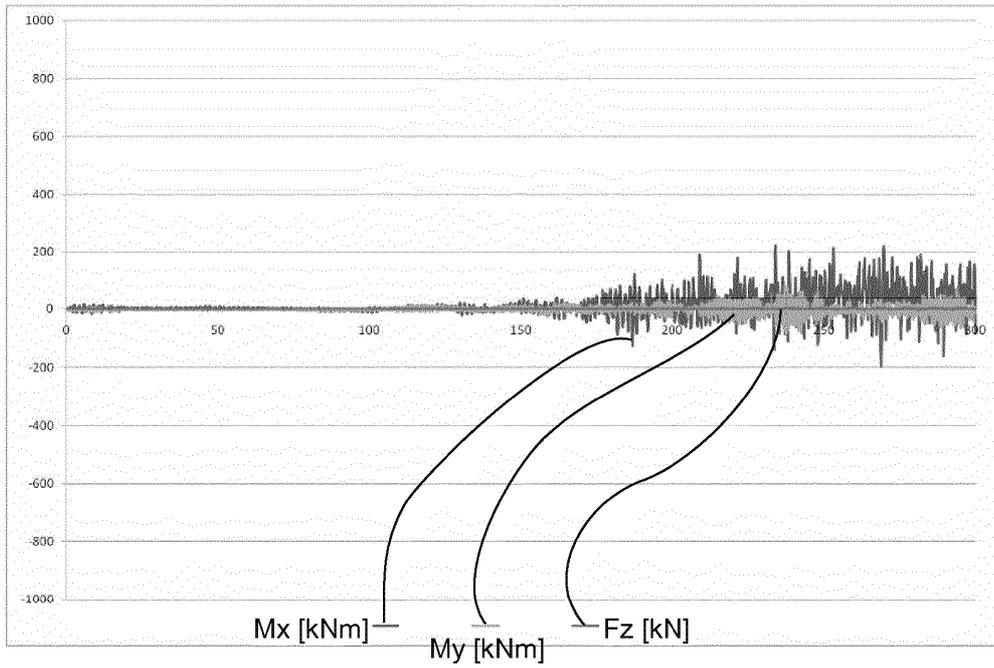


Fig. 12

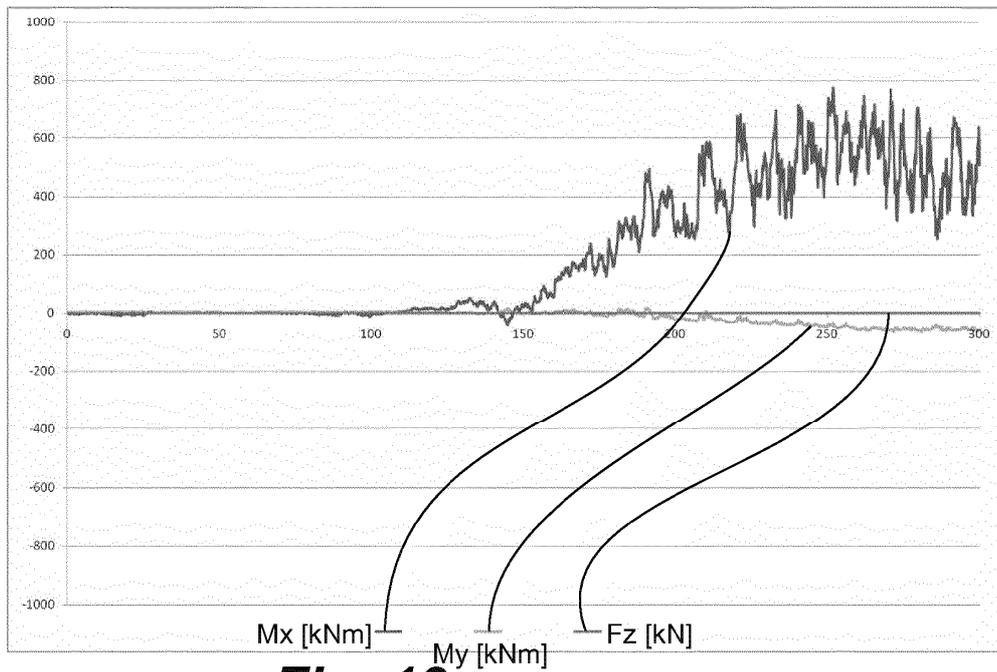


Fig. 13

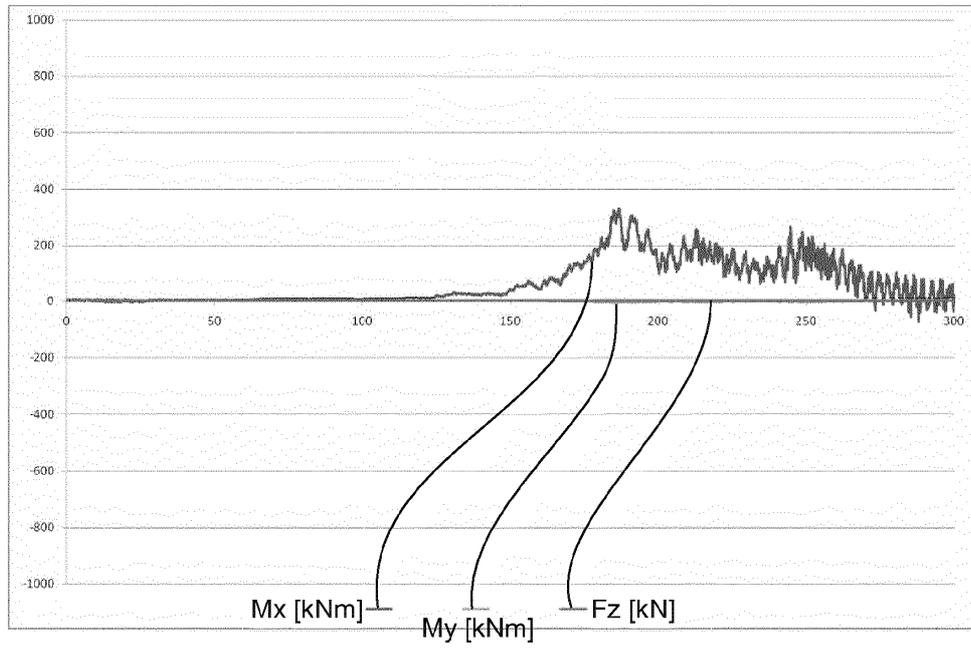


Fig. 14

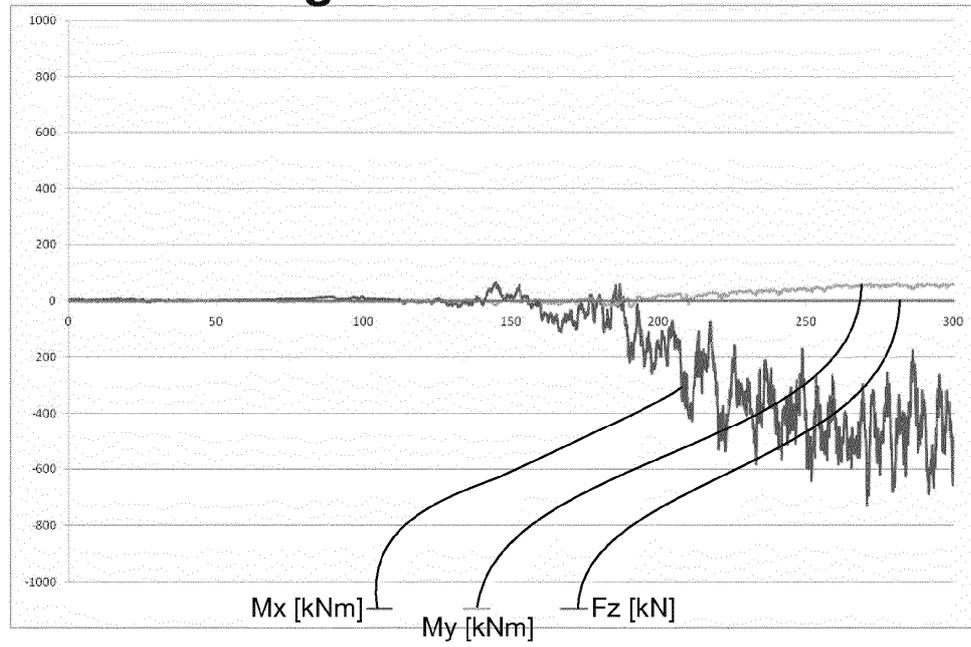


Fig. 15

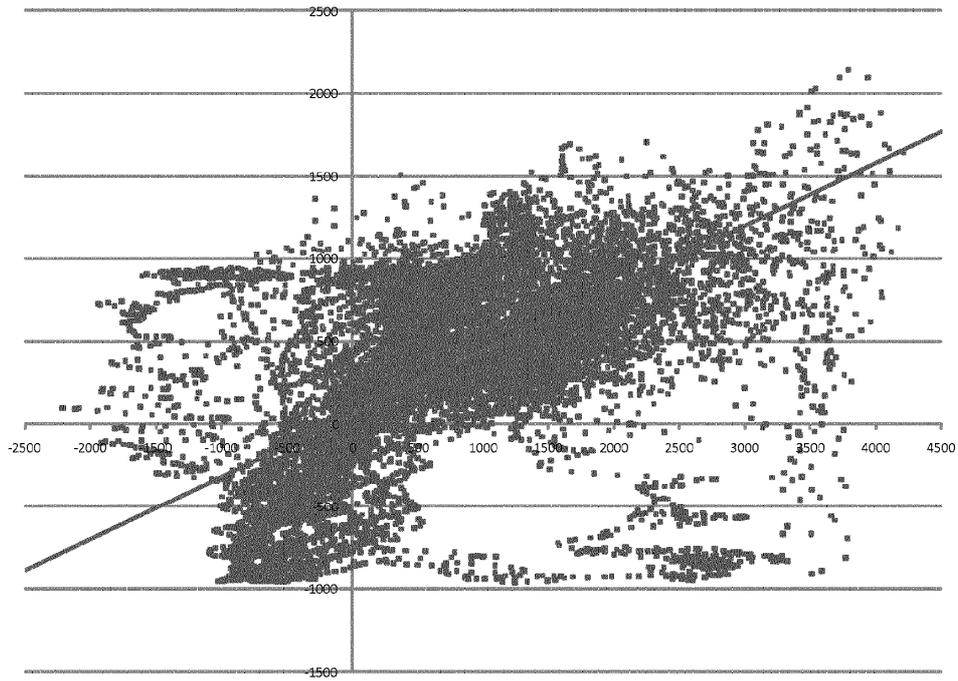


Fig. 16a

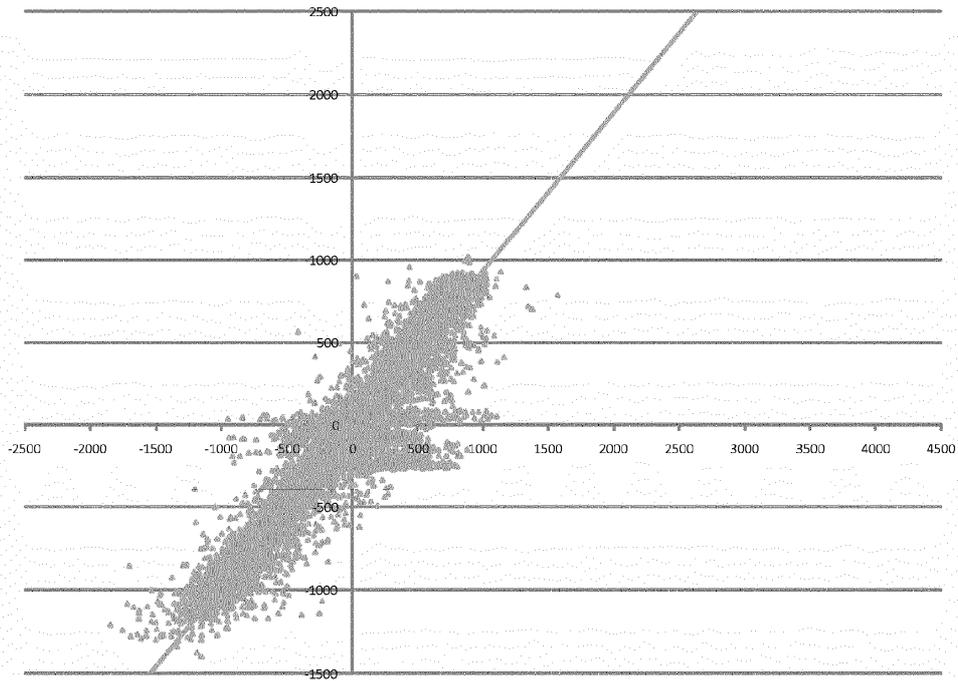


Fig. 16b

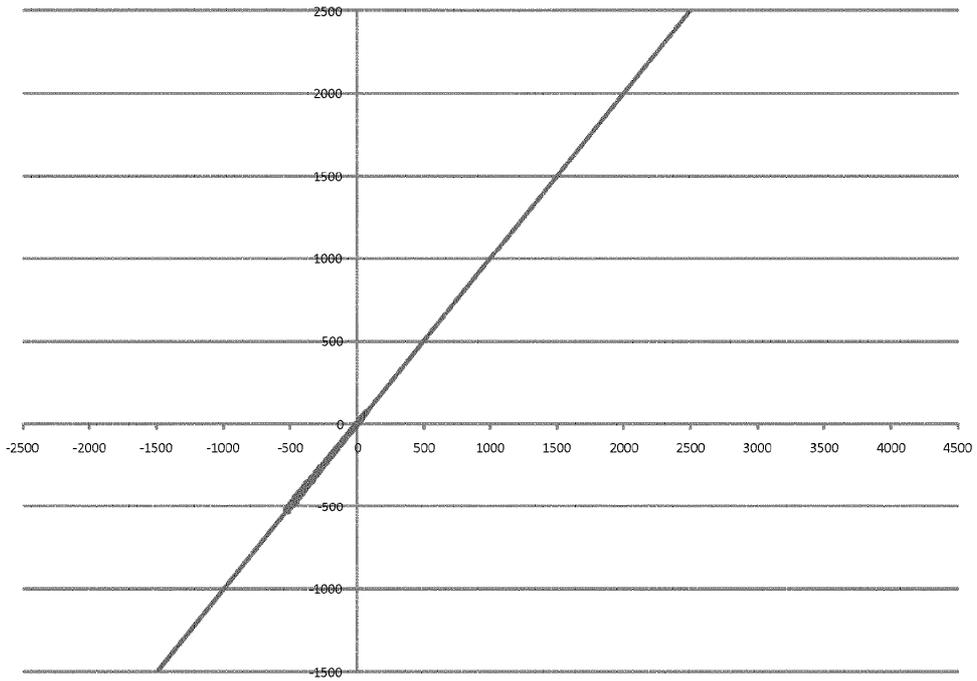


Fig. 16c

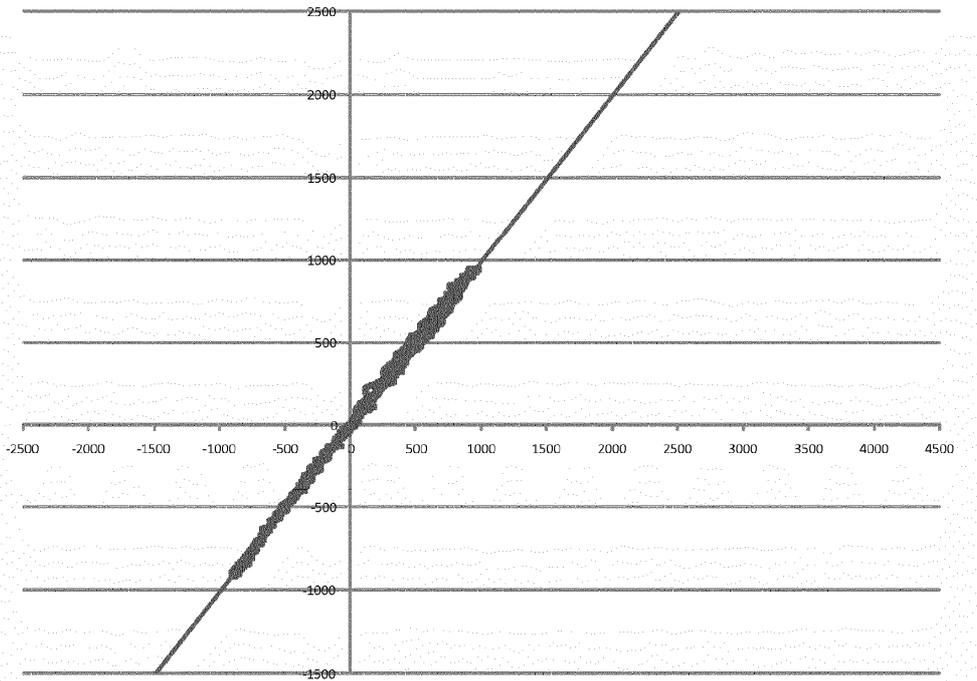


Fig. 17a

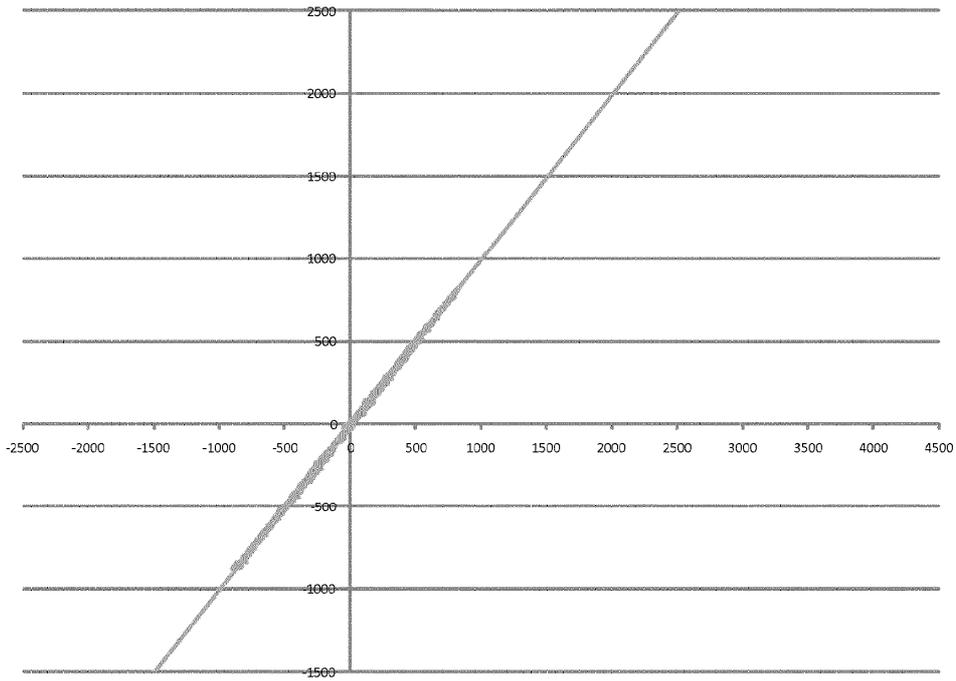


Fig. 17b

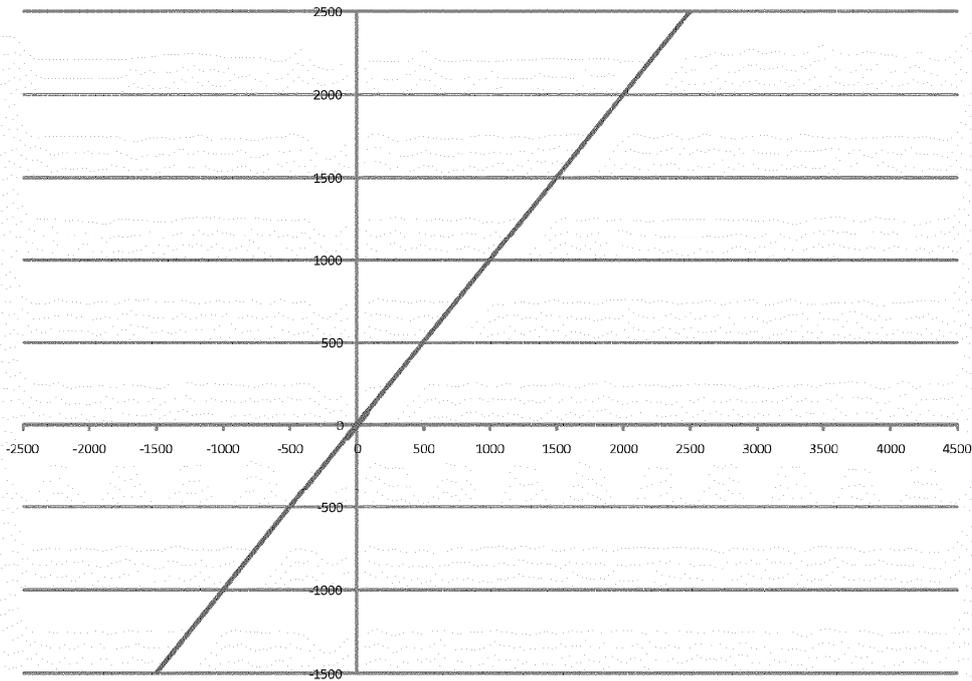


Fig. 17c