

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 627 039**

51 Int. Cl.:

**G01M 5/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.03.2009 PCT/DK2009/050060**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.10.2009 WO09121367**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.03.2009 E 09729001 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.05.2017 EP 2260281**

54 Título: **Sensor de deformación de transmisión óptica para turbinas eólicas**

30 Prioridad:

**31.03.2008 DK 200800472**  
**31.03.2008 US 40756**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**26.07.2017**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**OLESEN, IB SVEND**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 627 039 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**

Sensor de deformación de transmisión óptica para turbinas eólicas

**Campo de la invención**

5 La invención se refiere a la detección de deformación, en particular a la detección de deformación usando sensores ópticos.

**Antecedentes de la invención**

Las mediciones de deformaciones en componentes de turbina eólica proporcionan un conocimiento valioso de las cargas mecánicas de componentes de turbinas eólicas, por ejemplo, de palas de turbina.

10 Se conoce usar sensores de galgas extensiométricas y sensores ópticos en turbinas eólicas. Sin embargo, debido a las condiciones de funcionamiento muy duras de las turbinas eólicas, los sensores de deformación deben ser muy robustos.

15 El documento WO08020240 da a conocer una pala de turbina eólica que incorpora una fibra óptica configurada para la monitorización estructural de la pala de turbina. La fibra óptica comprende al menos un sensor de deformación. Un extremo de la fibra óptica es un punto de salida, que está conectado a un dispositivo de procesamiento de datos configurado para procesar señales del sensor de deformación. El otro extremo de la fibra óptica es un punto de salida alternativo, que también puede conectarse al dispositivo de procesamiento de datos, de manera que en caso de rotura de la fibra óptica, señales procedentes del sensor de deformación están disponibles desde al menos uno de los puntos de salida.

20 Aunque el documento WO08020240 da a conocer un sensor de deformación que tiene dos puntos de salida de modo que el sensor de deformación puede hacerse funcionar en caso de rotura de la fibra óptica, el sensor de deformación en el documento WO08020240 es relativamente complejo. Por tanto, sería ventajoso un sensor de deformación mejorado con un diseño más robusto.

El documento JP-2001 183114 da a conocer un ejemplo adicional de un elemento de medición de deformación para un cuerpo rotatorio, tal como una turbina eólica.

**25 Sumario de la invención**

Por consiguiente, la invención pretende preferiblemente mitigar, paliar o eliminar una o más de las desventajas mencionadas anteriormente por separado o en cualquier combinación. En particular, puede considerarse un objetivo de la presente invención proporcionar un sensor de deformación que resuelva los problemas mencionados anteriormente proporcionando un diseño óptico sencillo y robusto de un sensor de deformación.

30 Este objeto y varios objetivos adicionales se obtienen en un primer aspecto de la invención proporcionando un método para detectar deformación en un componente en una turbina eólica según las reivindicaciones.

La invención es ventajosa en particular, pero no de manera exclusiva, para obtener un diseño sencillo y robusto de un sensor de deformación óptico de fibra que puede establecer valores de deformación basándose en la luz que se transmite a través de la fibra.

35 Por consiguiente, se introduce luz en un extremo de entrada de una fibra y se mide la luz emitida desde el extremo de fibra opuesto con el fin de determinar un valor de deformación de un componente de la turbina eólica. Entre el extremo de entrada y el extremo de salida de la fibra, se proporcionan uno o más sensores de deformación, tales como sensores de Bragg de fibra. Dado que las características de transmisión espectral de los sensores de Bragg dependen de la deformación de la fibra, pueden determinarse valores de deformación del uno o más sensores de Bragg a partir de luz transmitida.

40 Puede ser una ventaja determinar valores de deformación a partir de luz transmitida, dado que puede permitir un diseño óptico más sencillo en comparación con medir la luz que se ha reflejado desde un sensor de Bragg.

45 Se comprende que la introducción de una señal óptica de entrada en una pluralidad de fibras ópticas del sistema de sensor puede lograrse usando una pluralidad de fuentes ópticas de entrada acopladas de manera individual a las fibras, es decir, acoplando fuentes primera y segunda a fibras primera y segunda respectivas. Alternativamente, una única fuente óptica de entrada puede acoplarse a todas las fibras usando, por ejemplo, un divisor de fibras.

Puede ser ventajoso usar una pluralidad de detectores de luz con detectores primero y segundo conectados a fibras primera y segunda respectivas para medir las distribuciones de intensidad espectral de salida de las fibras, dado que el uso de un detector para cada salida de fibra puede facilitar un sistema de detección más sencillo y más fiable.

50 En una realización, la señal óptica de salida puede comprender al menos una muesca que representa una intensidad luminosa mínima, en la que el valor de deformación puede establecerse determinando una ubicación

espectral de una muesca de intensidad en la distribución de intensidad espectral medida. Por tanto, al determinar una ubicación espectral de una muesca de intensidad en la luz transmitida, en el que la muesca de intensidad está provocada por el efecto de filtro del sensor de Bragg, es posible determinar un valor de deformación comparando la ubicación espectral medida con una longitud de onda del sensor de Bragg cuando no está deformado.

5 En otra realización, la distribución de intensidad espectral de la señal óptica de salida puede medirse con el detector de luz a lo largo de un intervalo espectral que cubre un intervalo de funcionamiento espectral del uno o más sensores de red. Dado que la fibra puede comprender una pluralidad de sensores de red, teniendo cada uno diferentes longitudes de onda de filtro de funcionamiento, todo el intervalo espectral de funcionamiento de los  
10 sensores de red puede medirse con un detector de luz que puede medir intensidades en todas las longitudes de onda dentro de ese intervalo espectral de funcionamiento.

En una realización, la al menos una fibra óptica está conectada de manera operativa al componente de la turbina eólica, por ejemplo uniendo la fibra al componente o integrando la fibra con el componente.

15 En una realización, la señal óptica de entrada es una señal óptica de banda ancha con una distribución espectral que es más amplia que un intervalo de funcionamiento espectral del uno o más sensores de red. Para poder detectar cambios en la transmisividad de todos los sensores de red, la anchura espectral de la señal óptica de entrada debe ser más ancha que el intervalo de funcionamiento espectral de los sensores.

20 En una realización, la intensidad luminosa de la señal óptica de salida transmitida puede compararse con una intensidad luminosa de la señal óptica de entrada. Puede ser ventajoso comparar la señal óptica de salida con la señal óptica de entrada, dado que esto puede proporcionar un método para compensar las variaciones de intensidad de la señal óptica de entrada.

25 En una realización, la señal óptica de entrada se introduce alternativamente en una de al menos dos fibras ópticas usando división de tiempo, en la que las señales ópticas de salida de las al menos dos fibras ópticas se combinan en una única señal óptica de salida. Cuando el sensor de deformación comprende una pluralidad de fibras, puede ser ventajoso introducir luz de entrada en una fibra cada vez, dado que esto puede permitir la detección de perfiles de intensidad espectral de todas las fibras usando un único detector espectral.

En una realización, el valor de la deformación se suministra al controlador de turbina eólica para usarse en el control de la turbina eólica.

30 En una realización, el valor de la deformación se usa en el control de cabeceo de al menos una pala de turbina eólica y/o en el control de generación de potencia de la turbina eólica. Por ejemplo, el conocimiento de deformaciones en una pala de turbina puede usarse para optimizar la generación de potencia ajustando el cabeceo.

En un segundo aspecto, la invención se refiere a un sistema óptico de detección de deformación para un componente de turbina eólica, según las reivindicaciones.

35 Por tanto, un detector de distribución de luz espectral puede estar conectado de manera operativa a cada una de las fibras ópticas y estar ubicado aguas abajo con respecto al sensor en cada fibra óptica. Cuando se usan dos o más fibras ópticas, pueden usarse fibras de detección de deformación individuales para diferentes componentes de la turbina eólica de modo que los perfiles de intensidad espectral emitidos por las fibras ópticas pueden medirse mediante detectores conectados a cada una de las fibras para determinar valores de deformación de los componentes de turbina eólica correspondientes.

40 Se comprende que un componente de turbina eólica puede comprender diferentes componentes tales como una torre de turbina eólica, una góndola, un árbol de rotor, un rotor que comprende palas de rotor, o una pala de un rotor.

En una realización, el componente de turbina eólica comprende al menos palas de turbina primera y segunda, y las fibras primera y segunda están fijadas a las palas de turbina primera y segunda respectivas.

Una realización del sistema de detección de deformación comprende medios para implementar un método según cualquiera de los aspectos y realizaciones anteriores.

45 Una realización del sistema de detección de deformación comprende medios de almacenamiento de datos para conservar un registro de las deformaciones en el componente de turbina eólica con el fin de estimar la condición de trabajo segura restante del componente. Por consiguiente, los valores de deformación almacenados pueden integrarse, sumarse o procesarse de otro modo para estimar un valor de la condición de trabajo segura restante del componente.

50 En un tercer aspecto, la invención se refiere al uso de un método o un sistema de detección de deformación según cualquiera de los aspectos y realizaciones anteriores en un componente de turbina eólica tal como una pala de turbina eólica, una torre, un árbol, un soporte y/o una caja de engranajes con el fin de detectar deformaciones.

En un cuarto aspecto, la invención se refiere a una turbina eólica que comprende un sistema de detección de deformación según el segundo aspecto.

Cada uno del primer, segundo, tercer y cuarto aspectos de la presente invención puede combinarse con cualquiera de los otros aspectos. Estos y otros aspectos de la invención resultarán evidentes a partir de, y podrán esclarecerse con referencia a, las realizaciones descritas a continuación en el presente documento.

5 En resumen, la invención se refiere a un sistema de detección de deformación óptico de banda ancha para una turbina eólica. El sistema de detección de deformación incluye una fibra óptica con una entrada en un extremo y una salida en el extremo opuesto. La fibra óptica está dotada de sensores de Bragg entre la entrada y la salida. Al introducir luz en la entrada de la fibra, medir la distribución de intensidad espectral en la salida de la fibra y determinar ubicaciones espectrales de muescas de intensidad en la distribución de intensidad espectral, es posible determinar valores de deformación en las ubicaciones de los sensores de Bragg a partir de la luz transmitida.

## 10 **Breve descripción de las figuras**

Ahora se explicará la presente invención, sólo a modo de ejemplo, con referencia a las figuras adjuntas, en las que la figura 1 ilustra una turbina eólica 1,

la figura 2A ilustra un sistema de detección de deformación de red de Bragg de fibra conocido,

la figura 2B muestra distribuciones de intensidad espectral,

15 la figura 3 ilustra un sistema de detección de deformación basándose en luz transmitida,

las figuras 4A-4C muestran perfiles espectrales de luz introducida y luz transmitida,

la figura 5 ilustra una realización en la que se usa un único detector para medir la señal óptica de salida desde dos o más fibras,

la figura 6 ilustra un sistema de detección de deformación con tres fibras ópticas y un controlador.

## 20 **Descripción de una realización**

La figura 1 ilustra una turbina eólica 1, que comprende una torre de turbina eólica 2 y una góndola de turbina eólica 3 colocada en la parte superior de la torre 2. El rotor de turbina eólica 4 comprende al menos una pala de turbina eólica, por ejemplo, tres palas de turbina eólica 5 tal como se ilustra en la figura. El rotor está montado en un buje 6, que está conectado a la góndola 3 a través del árbol a baja velocidad que se extiende fuera de la parte frontal de la góndola.

La figura 2A muestra un sistema de detección de deformación conocido que usa el principio de redes de Bragg de fibra que incluye una fibra óptica 10 con varios sensores de FBG 9a-9d distribuidos en la fibra.

La figura 2B muestra una distribución de intensidad espectral 21 de luz introducida en la fibra 10, una distribución de intensidad espectral 22 de luz que se ha transmitido a través de un sensor de FBG 9a, y una distribución de intensidad espectral 23 de luz que se ha reflejado por un sensor de FBG 9a. La muesca 24 en el perfil de transmisión 22 corresponde a la parte espectral de la luz introducida que se refleja, es decir, la muesca 24 corresponde al perfil de reflexión 23. Una distribución de intensidad espectral aporta a las amplitudes radiación óptica o intensidades ópticas para un intervalo de longitudes de onda.

En la figura 2A, una fuente de luz 12 suministra una señal de entrada al extremo proximal de la fibra antes de un divisor óptico 11. En la figura 2B se ilustra un ejemplo de la distribución de intensidad espectral de la señal de entrada mediante el perfil de entrada 21.

Cada sensor de FBG 9a-9d en la figura 2A refleja una fracción de la señal de entrada de una longitud de onda específica de vuelta hacia la fuente de luz 12. La señal de entrada puede tener una distribución de intensidad espectral 21 y la señal reflejada puede tener una distribución de intensidad espectral tal como se ilustra mediante el perfil de reflexión 23 en la figura 2B. La distribución de intensidad espectral de la luz transmitida por uno de los sensores de FBG 9a-9d se ilustra mediante el perfil de transmisión 22 en la figura 2B, en la que la distribución espectral de la muesca 24 de intensidades débiles corresponde a la distribución espectral del perfil de reflexión 21. Por consiguiente, la ubicación espectral de la muesca 24 es la misma que la ubicación espectral del perfil de reflexión 23, y por ejemplo, la intensidad mínima de la muesca 24 tiene la misma, o casi la misma, ubicación espectral que la intensidad máxima del perfil de reflexión 23.

Por motivos de conveniencia, podría decirse que un sensor 9a-9d tiene una longitud de onda específica y refleja una longitud de onda específica, por ejemplo, una longitud de onda W1 para el sensor 9a. Sin embargo, de hecho, el sensor refleja una distribución de longitud de onda espectral que puede tener una longitud de onda central o una longitud de onda pico de W1. La figura 2 ilustra tales distribuciones espectrales con distintas longitudes de onda centrales de W1-W4 que corresponden a los sensores 9a-9d, respectivamente.

Además, cada sensor de FBG transmite una señal hacia el siguiente sensor 9b en el que la señal transmitida tiene

una muesca 24 que corresponde a la longitud de onda específica del sensor 9a anterior.

El conector en Y 11 deja que la luz de entrada pase a los sensores de FBG pero desvía y envía las señales reflejadas desde el sensor 9a-9d, con longitudes de onda W1-W4, hasta un interrogador 13 que detecta las señales.

5 Con el fin de poder determinar valores de deformación a partir de luz reflejada, el sistema de sensor ilustrado en la figura 2 requiere tanto un conector en Y 11 como una terminación óptica (no ilustrada) del extremo de fibra distal para evitar reflexiones desde el extremo de fibra distal. Sin embargo, el conector en Y 11 y la terminación óptica aumentan la complejidad del sistema de detección de deformación y, por tanto, puede ser beneficioso evitar el uso de tales componentes ópticos.

10 Además, determinar valores de deformación a partir de luz reflejada puede requerir una salida de potencia óptica elevada de la fuente de luz 12 para compensar pérdidas de potencia óptica en el conector en Y 11 en el que tanto la luz de entrada como la luz reflejada se amortiguan debido a unas características de transmisión imperfectas del conector en Y. Por consiguiente, puede ser deseable tener un sistema de detección de deformación que requiera una potencia de entrada más baja de la fuente de luz de entrada 12 en comparación con el sensor de deformación basado en reflexión.

15 La figura 3 ilustra una realización de un sistema óptico de detección de deformación 19 para una pala de turbina eólica 5 según la invención. La fibra óptica 10 que comprende sensores de FBG 9a-9f está conectada de manera operativa a la pala 5. La fibra óptica 14 puede adherirse a la superficie exterior o a la superficie interior de la estructura de pala hueca.

20 Alternativamente, la fibra puede integrarse en el material compuesto usado para fabricar la pala 5. La fibra óptica 10 puede ser una única fibra o la fibra 10 puede estar constituida por secciones de fibras que están conectadas de manera óptica unas con respecto a otras. En una realización, la primera parte 10a de la fibra óptica que guía la luz desde la fuente de luz 12 hasta el extremo distal de la pala comprende los sensores 9a-9f, mientras que la segunda parte 10b de la fibra, que no comprende ningún sensor, guía la luz de vuelta al detector de luz 15.

25 En este contexto, debe interpretarse que la luz emitida por la fuente de luz 12 incluye luz visible o luz casi visible, luz ultravioleta (UV) y/o luz infrarroja (IR). En general, la luz puede interpretarse como radiación electromagnética en el intervalo de longitud de onda visible o casi visible de 350 nm a 800 nm, así como luz UV o luz en el UV cercano en el intervalo de longitud de onda de hasta aproximadamente 200 nm, y luz IR o luz en el IR cercano en el intervalo de longitud de onda de hasta aproximadamente 1,7 micrómetros.

30 La fibra óptica 10 puede interpretarse como una fibra transparente, delgada, realizada habitualmente de vidrio (sílice) o plástico, para transmitir luz a lo largo de su eje, mediante el proceso de reflexión interna (total). La fibra consiste en un núcleo más denso rodeado por una capa de revestimiento. Normalmente, las fibras ópticas se proporcionan como una fibra multimodo o fibra de modo único, sin embargo, también pueden proporcionarse fibras ópticas con propósitos especiales.

35 Los sensores 9a-9f pueden ser elementos de sensor individuales insertados en la fibra óptica 10, o los sensores 9a-9f pueden estar formados como variaciones del índice de refracción en la fibra 10.

La fibra 10 puede tener un extremo de entrada 10c y un extremo de salida 10d, que pueden extenderse al buje 6 de la turbina eólica y conectarse a la fuente de luz 12 y al detector de luz 15, respectivamente.

40 La fuente de señal óptica de entrada 12 está conectada a la fibra óptica 5 en una ubicación aguas arriba de los sensores 9a-9f, y el detector de luz 15 está conectado a la fibra óptica en una ubicación aguas abajo de los sensores 9a-9f para medir luz transmitida influida por el efecto de filtrado de los sensores 9a-9f.

45 La figura 4A muestra la distribución de intensidad espectral 420 de la señal óptica de entrada desde la fuente de entrada 12. La señal óptica de entrada es una señal de banda ancha que tiene una anchura espectral de  $W_{ib}$  menos  $W_{ia}$ . La figura 4A también muestra la característica de filtro de transmisión 411 de un sensor de FBG 9a. La característica de transmisión muestra una transmisividad mínima a la longitud de onda W1 y una muesca de filtro 412 en las proximidades de la longitud de onda W1. La abscisa del sistema de coordenadas representa la longitud de onda y la ordenada representa o bien la potencia o bien la intensidad de la señal de entrada o la señal transmitida a través del sensor de FBG 9a.

50 Cuando el sensor de FBG 9a está expuesto a deformación, la transmisividad mínima del sensor y, por tanto, la muesca de intensidad 412, se desplazan desde la longitud de onda W1 hasta la longitud de onda W1s tal como se muestra por la característica de transmisión desplazada 413. Por consiguiente, determinando la longitud de onda desplazada W1a o el desplazamiento de longitud de onda DW, puede determinarse la deformación del sensor de FBG.

55 La figura 4B muestra una distribución de intensidad espectral medida de una señal óptica de salida transmitida influida por una pluralidad de sensores de FBG 9a-9f, en la que un primer sensor 9a provoca una muesca 412 con longitud de onda W1, un segundo sensor 9b provoca una muesca 412 con longitud de onda W2, y por ejemplo un

sexto sensor 9f provoca una muesca 412 con longitud de onda W3.

Los desplazamientos DW de las muescas en las distribuciones de intensidad espectral 411, 431 pueden determinarse monitorizando la luz transmitida a través del uno o más sensores de FBG 9a-9f con un detector de luz espectral 15 conectado de manera operativa a un extremo de salida de la fibra óptica 10.

- 5 Por tanto, cuando la señal óptica de salida desde la fibra 10 comprende al menos una muesca que representa una intensidad luminosa mínima, puede establecerse el valor de deformación de un sensor 9a determinando una ubicación espectral, es decir, una longitud de onda W1s, de la muesca de intensidad en la distribución de intensidad espectral medida.

- 10 El detector de luz espectral 15, por ejemplo un analizador de espectro o un interrogador, detecta la potencia óptica a diferentes longitudes de onda, o pequeños intervalos de longitudes de onda bastante diferentes y, por tanto, puede determinar un perfil espectral 431. El detector de luz espectral 15 puede usar un elemento dispersivo, por ejemplo un prisma, para separar en el espacio diferentes longitudes de onda de modo que las diferentes longitudes de onda pueden medirse con diferentes sensores de luz, por ejemplo píxeles de un sensor de CCD.

- 15 Al procesar la señal óptica de salida medida desde el detector espectral 15 en una unidad de control, es posible determinar la longitud de onda W1s en la que la señal óptica de salida tiene una potencia óptica mínima. Al comparar la longitud de onda determinada W1s con la longitud de onda nominal W1 que representa la longitud de onda de muesca cuando el sensor de FBG no está deformado, puede determinarse la diferencia de longitud de onda DW y, por tanto, la deformación real en la ubicación del sensor 9a. Obviamente, determinando diferencias de longitud de onda DW a diferentes longitudes de onda desplazadas W1s - W6s, pueden determinarse los valores de deformación en las ubicaciones de los sensores de deformación 9a-9f correspondientes.
- 20

- El procesamiento de la señal óptica de salida medida desde detector espectral 15 puede realizarse mediante un procesador solidario con el detector 15 o mediante un procesador, por ejemplo un ordenador, conectado al detector 15. La determinación de longitudes de onda desplazadas W1s de muescas 412 puede realizarse analizando matemáticamente muestras de datos del perfil espectral 411, 431, por ejemplo determinando un valor de intensidad mínima, calculando el promedio de valores de intensidad, o usando ajuste de curva.
- 25

- El intervalo de funcionamiento espectral del uno o más sensores de red 9a-9f comprendidos por una fibra 10 corresponde al intervalo espectral abarcado por las longitudes de onda nominales W1-Wn de sensores de FBG. El intervalo de funcionamiento espectral de, por ejemplo, cuatro sensores 9a-9d puede ser, como ejemplo, un intervalo de desde 1120 nm hasta 1180 nm, en el que las longitudes de onda nominales de sensores individuales son equidistantes dentro del intervalo de funcionamiento espectral.
- 30

La señal de entrada debe ser una señal óptica de banda ancha con una distribución espectral que es más amplia que un intervalo de funcionamiento espectral de los sensores 9a-9f en una aplicación dada. Por tanto, cuando el intervalo de funcionamiento espectral es de desde 1120 nm hasta 1180 nm, la fuente de entrada de banda ancha 12 puede tener un intervalo espectral de desde, por ejemplo, 1000 nm hasta 1300 nm.

- 35 La diferencia de longitud de onda DW entre deformación cero y deformación máxima para un sensor puede ser, como ejemplo, de 2 nm. La anchura de una muesca de intensidad 412 puede ser, como ejemplo, de 0,1 nm.

Con el fin de medir varias muescas de intensidad 412 de una distribución de intensidad espectral 431, el detector de luz 15 debe tener un intervalo de detección espectral que cubra, al menos, el intervalo de funcionamiento espectral de los sensores 9a- 9f.

- 40 La figura 4C muestra un ejemplo de la luz de entrada que tiene un espectro de intensidad 420 que no es plano a lo largo del intervalo de funcionamiento espectral de los sensores debido a las variaciones 421 de la intensidad. Tales variaciones de intensidad 421 de la luz de entrada pueden detectarse de manera errónea como una muesca de intensidad 412 desde un sensor, o pueden afectar a la determinación de ubicaciones espectrales de muescas de intensidad 412. Sin embargo, comparando la intensidad luminosa medida de la señal óptica de salida transmitida con una intensidad luminosa medida de la señal óptica de entrada, es posible, al menos parcialmente, eliminar el efecto negativo de variación de intensidad de entrada 421 sobre la precisión de los resultados de deformación.
- 45

- Como ejemplo, la comparación de la señal óptica de salida y la señal óptica de entrada puede comprender calcular la razón de la intensidad de la señal óptica de salida a una longitud de onda dada frente a la intensidad de la señal óptica de entrada a la misma longitud de onda. De esta manera, el efecto negativo de una variación de intensidad de entrada 421 se cancela dado que la variación de intensidad de entrada 421 está presente tanto en las señales ópticas de entrada como en las de salida. La medición de la distribución de intensidad espectral de la luz de entrada puede determinarse midiendo una fracción de la luz de entrada ramificando parte de la luz de la fuente de entrada 12, por ejemplo, usando un divisor de fibras, antes de que la luz se transmita a través de los sensores 9a-9f. Alternativamente, la distribución de intensidad espectral de la luz de entrada puede medirse mediante el detector de salida 15 en un estado en el que los sensores de FBG sólo se ven débilmente afectados por tensiones mecánicas. En otra alternativa, la distribución de intensidad espectral de la luz de entrada se mide sólo una vez, por ejemplo durante la fabricación de la fuente de luz de entrada 12, y se almacena como un archivo digital para usarse por la
- 50
- 55

unidad de control para calcular la razón de la señal óptica de salida y la señal óptica de entrada almacenada.

La característica de transmisión de filtro 411 de un sensor de FBG se crea mediante variaciones alternas o periódicas en el índice de refracción de la fibra 10. Por tanto, el sensor de FBG 9a puede concebirse como varias secciones de la fibra 10 que tienen valores variables del índice de refracción. Con el fin de obtener un sensor de FBG con una longitud de onda de transmisión mínima W1 de, por ejemplo, 1500 nm, la distancia entre secciones de fibra adyacentes con diferentes índices de refracción debe satisfacer una condición de Bragg dada. Suponiendo un índice de refracción de aproximadamente 1,5 de una de las secciones, la distancia entre secciones consecutivas, o de manera equivalente, el periodo de variaciones periódicas en el índice de refracción, es de aproximadamente 500 nm, es decir, aproximadamente un tercio de la longitud de onda W1.

Por consiguiente, el periodo de red de las variaciones periódicas en el índice de refracción está relacionado con la longitud de onda de filtro nominal W1 de un sensor de FBG y, por tanto, con la longitud de onda de la señal óptica de entrada de banda estrecha. Las longitudes de onda de la señal óptica de entrada pueden oscilar entre 300 nm y 6000 nm o preferiblemente entre 600 nm y 2000 nm. Dado que el periodo de red depende del índice de refracción de la fibra y de otros factores, tales como características de filtro deseadas, el periodo de red para sensores de FBG usados según realizaciones de esta invención puede oscilar entre 100 nm y 5000 nm. Pueden usarse periodos de red en el intervalo de desde 100 nm hasta 5000 nm con longitudes de onda de la señal óptica de entrada que oscilan entre 300 nm y 15000 nm, tal como se explicó anteriormente.

El sensor de FBG y, por tanto, el periodo de red, puede realizarse mediante diferentes procesamientos de una fibra. Por ejemplo, la fibra puede iluminarse con luz UV para formar redes. Por consiguiente, pueden seleccionarse diferentes periodos de red según el procesamiento de red de una fibra. Por ejemplo, diferentes sensores de FBG en una fibra pueden tener diferentes periodos de red generados por el procesamiento de la fibra.

Por tanto, en una realización de un método para detectar deformación y una realización de un sistema óptico de detección de deformación, el periodo de red de variaciones periódicas en el índice de refracción de un sensor de red de Bragg puede estar dentro del intervalo de desde 100 nm hasta 5000 nm, preferiblemente dentro del intervalo de desde 100 nm hasta 1000 nm o más preferiblemente dentro del intervalo de desde 200 hasta 700 nm.

La señal óptica de salida transmitida se ve influida por el uno o más sensores de FBG, en respuesta a la señal óptica de entrada. Por tanto, la influencia de los sensores de FBG sobre la señal óptica de salida se determina, al menos en parte, por el periodo de red de un sensor de FBG. El periodo de red puede seleccionarse para mejorar la detección por el detector ubicado aguas abajo con respecto al uno o más sensores de FBG, por ejemplo adaptando la anchura de muesca de una muesca 412 a la anchura espectral ( $W_{ib}$  menos  $W_{ia}$ ) de la señal óptica de entrada, es decir haciendo que la anchura de muesca sea lo suficientemente pequeña como para que tenga espacio para un mayor número de muescas no solapantes 412 dentro de la anchura espectral de la señal de entrada.

La detección mediante el detector aguas abajo también puede mejorarse por ejemplo seleccionando el periodo de red para minimizar la transmisividad mínima de un sensor de FBG a la longitud de onda W1. Por tanto, si existe una gran diferencia entre la transmisividad mínima y la transmisividad fuera de la muesca de filtro, puede realizarse la detección de luz transmitida con mayor precisión.

Por tanto, el periodo de red de los sensores de FBG puede seleccionarse, en particular, para mejorar la detección por un detector aguas abajo 15, 15a-c según métodos para detectar deformación y sistemas ópticos de detección de deformación de la invención.

En un método para detectar deformación y un sistema de detección de deformación, en los que una intensidad luminosa de la señal óptica de salida se mide con el detector de luz a lo largo de una banda de frecuencia seleccionada según los sensores de red, la banda de frecuencia puede darse según el intervalo de longitudes de onda que cubre diferentes longitudes de onda de muescas L1 de diferentes sensores de FBG. Por consiguiente, los diferentes periodos de red pueden seleccionarse para coincidir con una banda de frecuencia dada del detector de luz 15, 15a-c.

En un método para detectar deformación y un sistema de detección de deformación, la intensidad luminosa mínima de al menos una muesca de la señal óptica de salida se determina, al menos en parte, por el periodo de red de al menos un sensor de FBG. Por tanto, la intensidad luminosa mínima de una muesca puede determinarse seleccionando un periodo de red dado con el fin de obtener un perfil de transmisión particular 411.

La figura 5 muestra una realización de la invención en la que la señal óptica de salida desde dos o más fibras 510-512 se mide usando un único detector de espectro óptico 15. Las señales ópticas de salida desde la pluralidad de fibras ópticas 510-512 se combinan en una única señal óptica de salida que puede medirse con un único detector 15. La combinación de las señales ópticas desde las fibras ópticas 510-512 en una única señal óptica puede lograrse usando un elemento de acoplamiento de fibra N:1 502 u otro medio de acoplamiento óptico 502 tal como una lente para enfocar los haces de salida ópticos en un único detector 15. Con el fin de distinguir la señal de salida óptica de una primera fibra 510 de la señal de salida óptica de una segunda fibra 511, las señales ópticas de entrada introducidas en las fibras ópticas 510-512 pueden introducirse, de manera alternativa, usando división de tiempo. La división de tiempo de las señales ópticas de entrada puede lograrse usando un conmutador óptico 501, que conmuta

la luz desde la fuente de entrada 12 a la primera fibra 510 durante un primer intervalo de tiempo T1, y conmuta la luz desde la fuente de entrada 12 a la segunda fibra 511 durante un intervalo de tiempo posterior T2, y así sucesivamente. Alternativamente, la división de tiempo de las señales ópticas de entrada puede lograrse usando fuentes ópticas de entrada controlables individuales 12 conectadas de manera operativa a cada fibra 510-512 y encendiendo de manera alternativa las fuentes de entrada 12. Al sincronizar de manera temporal la división de tiempo de la señal óptica de entrada con el detector 15 o con una unidad de control usada para procesar la señal óptica de salida, pueden determinarse, de manera alternativa, valores de deformación de fibras individuales 510-512.

En lugar de usar un único detector 15 para una pluralidad de fibras 510-512 también es posible usar un detector 15 para cada fibra 510-512. Sin embargo, en este caso no es necesario usar división de tiempo de la señal óptica de entrada.

La figura 6 muestra una realización de un sistema de detección de deformación en el que la luz de la fuente óptica 12 se divide en tres fibras 10, 510 usando un divisor de fibras 17. En el otro extremo de las fibras, tres detectores de luz espectral 15a-15c conectados de manera óptica a los extremos de las fibras 10, 510, miden las distribuciones de intensidad espectral 431 de luz emitida desde las fibras. Las fibras 10, 510 que comprenden sensores de deformación de FBG 9a-9f están fijadas a un componente de turbina eólica 4, por ejemplo a tres palas de turbina.

La unidad de control 16 procesa las medidas proporcionadas por los detectores 15a-15c para determinar las ubicaciones espectrales de muescas de intensidad 412 y valores de deformación de sensores de FBG unidos a diferentes lugares en las tres palas de turbina. La unidad de control 16 no necesita conectarse a la fuente de entrada 12. Sin embargo, si se usa una sincronización entre la unidad de control 16 y un conmutador óptico 501, puede proporcionarse una conexión entre la unidad de control 16 y el conmutador o controlador de entrada 501 para permitir la sincronización.

Cuando una pala de turbina se dobla o se estira por ejemplo debido a efectos del viento, la longitud de la fibra montada 510, 10 y los sensores 9a-9f cambia, mediante lo cual la ubicación espectral de muescas de intensidad 412 de luz transmitida cambia. El detector de luz 15 mide los cambios espectrales de la luz transmitida y proporciona a la unidad de control 16 muestras de datos del perfil de intensidad espectral medido para determinar valores de deformación.

En una realización de la invención, el ancho de banda del sistema de detección de deformación debe ser lo suficientemente amplio como para determinar vibraciones estructurales de las palas de turbina eólica. Dependiendo de los modos de vibración de las palas, el ancho de banda del sistema de detección de deformación debe ser mayor de 5 Hz, preferiblemente mayor de 10Hz o mayor de 20 Hz. Con el fin de determinar vibraciones estructurales de mayores frecuencias y/o con mayor precisión, si puede ser deseable para el sistema de detección de deformación con un ancho de banda de 25 Hz o incluso de 50 Hz. Por tanto, si el ancho de banda del sistema de detección de deformación es mayor de 20 Hz, pueden determinarse vibraciones estructurales con una frecuencia de vibración de al menos 10 Hz. Un sistema de detección de deformación con un ancho de banda elevado, por ejemplo mayor de 20 Hz, puede obtenerse usando detectores 15 que tienen una sensibilidad óptica elevada o usando una fuente de entrada óptica 12 que tiene una potencia óptica de salida elevada. Una fuente de luz de entrada 12 que tiene una potencia óptica de 100 nW (0,1 microvatios) puede ser suficiente para determinar valores de deformación con un ancho de banda razonable. Sin embargo, el aumento de la potencia de entrada también permite diseñar un sistema de detección de deformación con un ancho de banda mayor y, por tanto, puede requerirse una potencia de entrada de 10 ó 100 microvatios para sistemas de ancho de banda elevado.

Los valores de deformación de la unidad de control 16 pueden usarse en el control de turbina eólica global con el fin de disminuir los costes de mantenimiento de los componentes y aumentar la fiabilidad de la turbina eólica como tal. Por ejemplo, si los valores de deformación se aproximan a un nivel demasiado alto, la turbina eólica puede controlarse para reducir los valores de deformación, o incluso detener la turbina eólica.

Los valores de deformación pueden usarse para controlar el cabeceo de al menos una pala de turbina eólica y/o en el control de generación de potencia de la turbina eólica. Por tanto, es posible reducir la deformación de un componente de turbina eólica por ejemplo realizando el cabeceo de una pala de turbina eólica más o menos fuera del viento y reduciendo la generación de potencia de la turbina eólica durante un periodo de ráfagas de viento significativas. De manera similar, el control de cabeceo puede usarse para optimizar la generación de potencia ajustando el cabeceo hasta que se ha conseguido una determinada presión en una o más palas de turbina, en el que la presión se determina a partir de valores de deformación medidos.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para detectar deformación en un componente en una turbina eólica (1) que comprende un sistema de sensor óptico (19), comprendiendo dicho método las etapas de:
  - 5 introducir una señal óptica de entrada en una pluralidad de fibras ópticas (10, 510-512) de dicho sistema de sensor, comprendiendo cada una de dichas fibras ópticas una pluralidad de sensores de red de Bragg de fibra
  - 10 medir una distribución de intensidad espectral (22) de una señal óptica de salida transmitida influida por dicho uno o más sensores, en respuesta a la señal óptica de entrada, con una pluralidad de detectores de luz (15, 15a-c), estando dichos detectores de luz conectados de manera operativa a las fibras ópticas con detectores primero y segundo conectados a las fibras primera y segunda respectivas, y estando dichos detectores primero y segundo ubicados aguas abajo con respecto a dicho uno o más sensores de dichas fibras primera y segunda respectivas, y
  - 15 procesar la señal óptica de salida medida en una unidad de control con el fin de establecer un valor de una deformación en el componente, caracterizado porque la señal óptica de entrada es una señal óptica de banda ancha con una distribución espectral que es más amplia que un intervalo de funcionamiento espectral de la pluralidad de sensores de red.
2. Método para detectar deformación según la reivindicación 1, en el que la señal óptica de salida comprende al menos una muesca (24, 412) que representa una intensidad luminosa mínima, y en el que el valor de deformación se establece determinando una ubicación espectral de una muesca de intensidad en la distribución de intensidad espectral medida.
3. Método para detectar deformación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, en el que la distribución de intensidad espectral de la señal óptica de salida se mide con el detector de luz a lo largo de un intervalo espectral que cubre un intervalo de funcionamiento espectral del uno o más sensores de red.
4. Método para detectar deformación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la al menos una fibra óptica está conectada de manera operativa al componente de la turbina eólica.
5. Método para detectar deformación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que una intensidad luminosa de la señal óptica de salida transmitida se compara con una intensidad luminosa de la señal óptica de entrada.
6. Método para detectar deformación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la señal óptica de entrada se introduce alternativamente en una de al menos dos fibras ópticas usando división de tiempo, y en el que las señales ópticas de salida de las al menos dos fibras ópticas se combinan en una única señal óptica de salida.
7. Método para detectar deformación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que dicho valor de la deformación se suministra a un controlador de turbina eólica.
8. Método para detectar deformación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que dicho valor de la deformación se usa en el control de cabeceo de al menos una pala de turbina eólica (5) y/o en el control de generación de potencia de la turbina eólica.
9. Sistema óptico de detección de deformación (19) para un componente de turbina eólica, comprendiendo el sistema de detección de deformación
  - 40 una pluralidad de fibras ópticas (10, 510-512) que están conectadas de manera operativa a dicho componente de turbina y comprendiendo cada fibra óptica una pluralidad de sensores de red de Bragg de fibra (9a-9f),
  - 45 una fuente de señal óptica de entrada (12) conectada a dichas fibras ópticas en una ubicación aguas arriba de dicho uno o más sensores,
  - 50 una pluralidad de detectores de luz espectral (15, 15a-c) conectados de manera operativa a las fibras ópticas con detectores primero y segundo conectados a fibras primera y segunda respectivas, y estando dichos detectores primero y segundo ubicados en una ubicación aguas abajo del uno o más sensores de dichas fibras primera y segunda respectivas, estando dichos detectores de luz dispuestos para medir señales ópticas de salida transmitidas influidas por uno o más de dichos sensores de dichas fibras, y
  - al menos una unidad de control (16) para procesar las señales ópticas de salida medidas con el fin de establecer un valor de una deformación en el componente, caracterizado porque la señal óptica de entrada es una señal óptica de banda ancha con una distribución espectral que es más amplia que un intervalo de funcionamiento espectral de la pluralidad de sensores de red.

10. Sistema de detección de deformación según la reivindicación 9, en el que el componente de turbina eólica comprende al menos palas de turbina primera y segunda (5) y en el que las fibras primera y segunda están fijadas a las palas de turbina primera y segunda respectivas.
- 5 11. Sistema de detección de deformación según la reivindicación 9, que comprende medios para implementar un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.
12. Sistema de detección de deformación según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en el que el sistema comprende medios de almacenamiento de datos para conservar un registro de las deformaciones en el componente de turbina eólica con el fin de estimar la condición de trabajo segura restante del componente.
- 10 13. Uso de un método o un sistema de detección de deformación según cualquiera de las reivindicaciones anteriores en un componente de turbina eólica tal como una pala de turbina eólica (5), una torre (2), un árbol, un soporte y/o una caja de engranajes con el fin de detectar deformación.
14. Turbina eólica (1) que comprende un sistema de detección de deformación según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12.

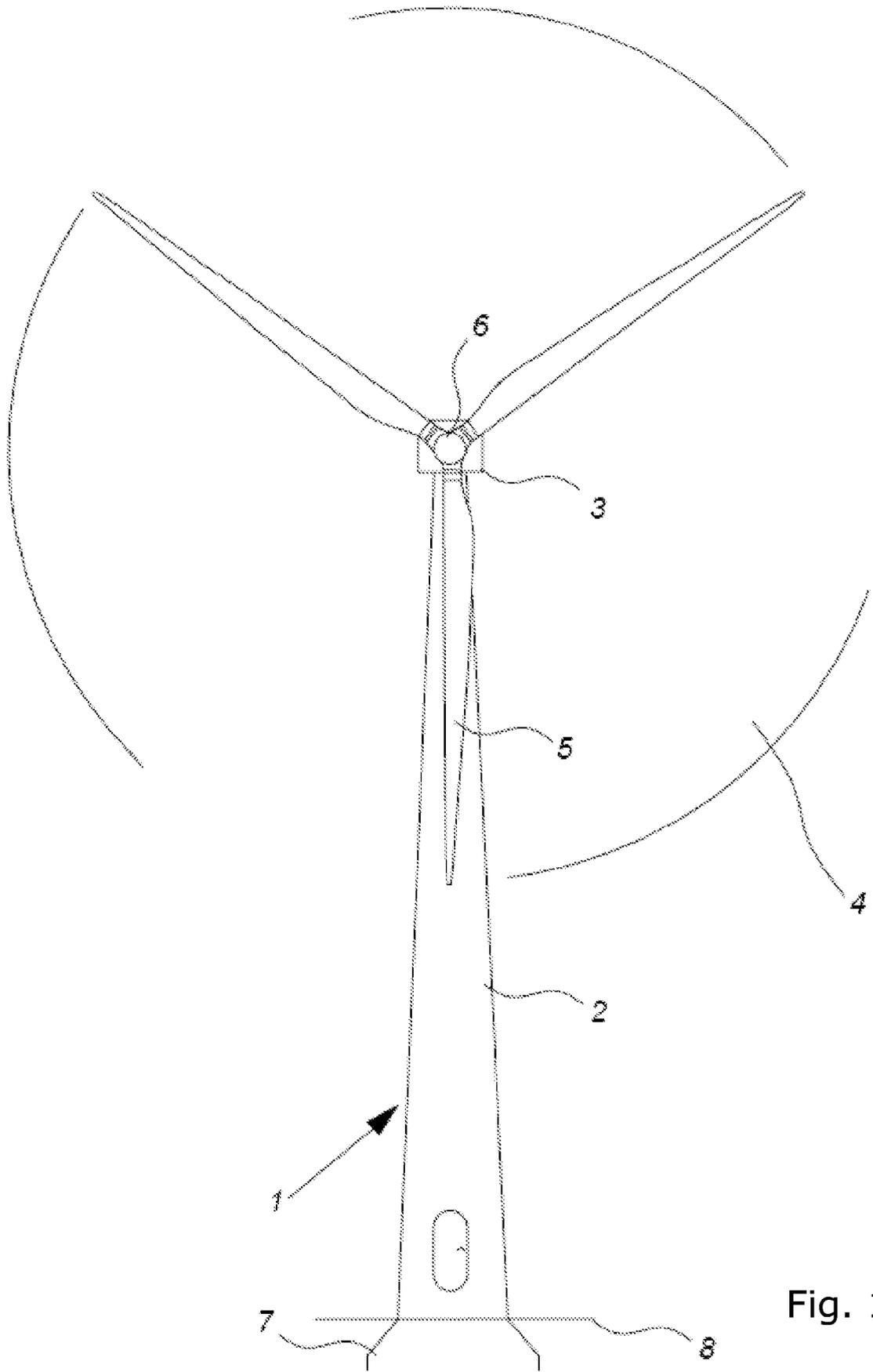


Fig. 1

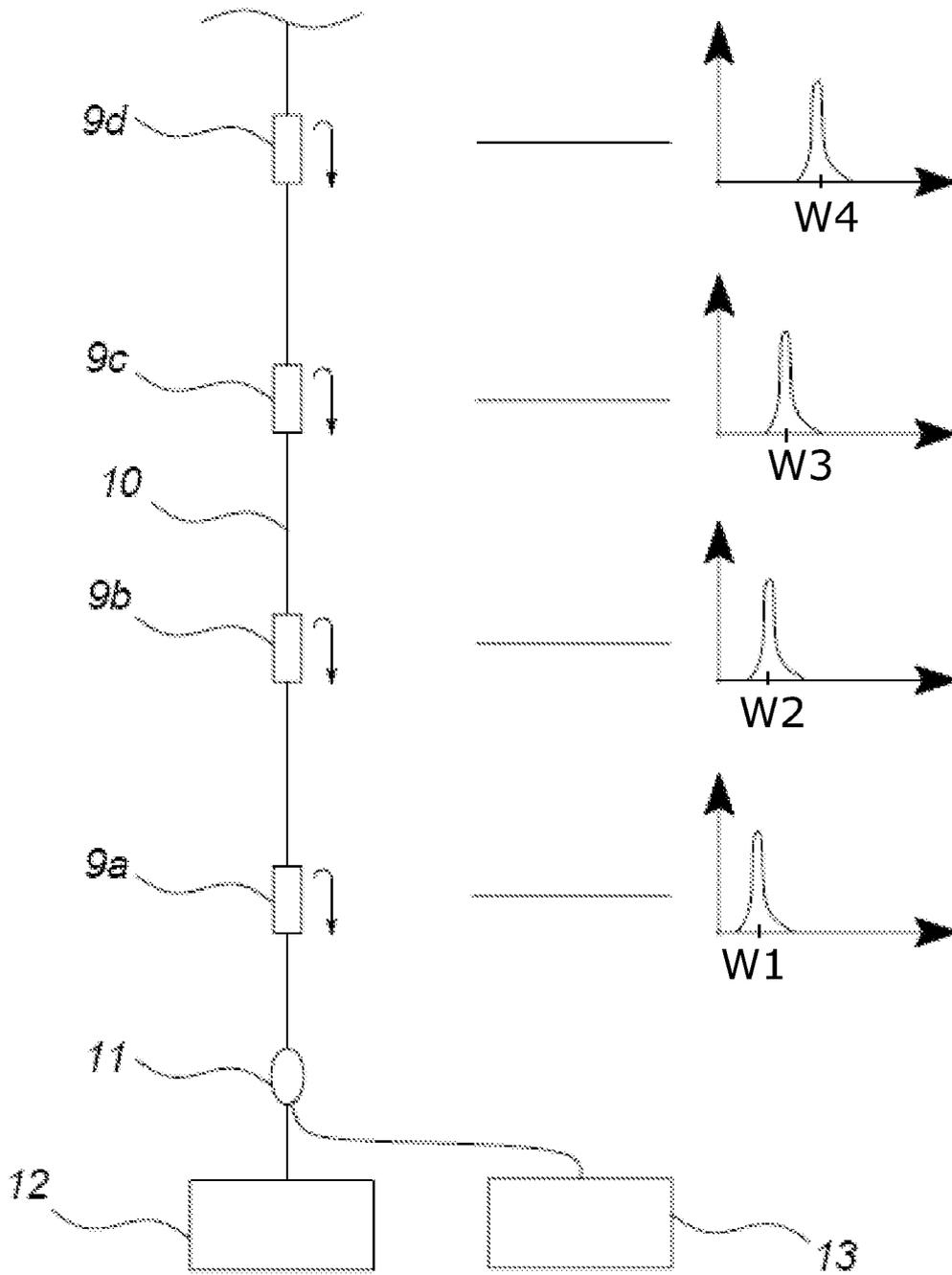


Fig. 2A

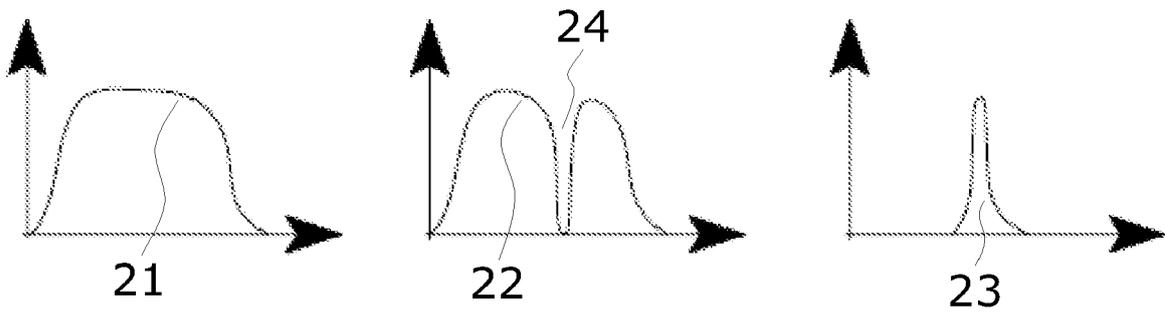


Fig. 2B

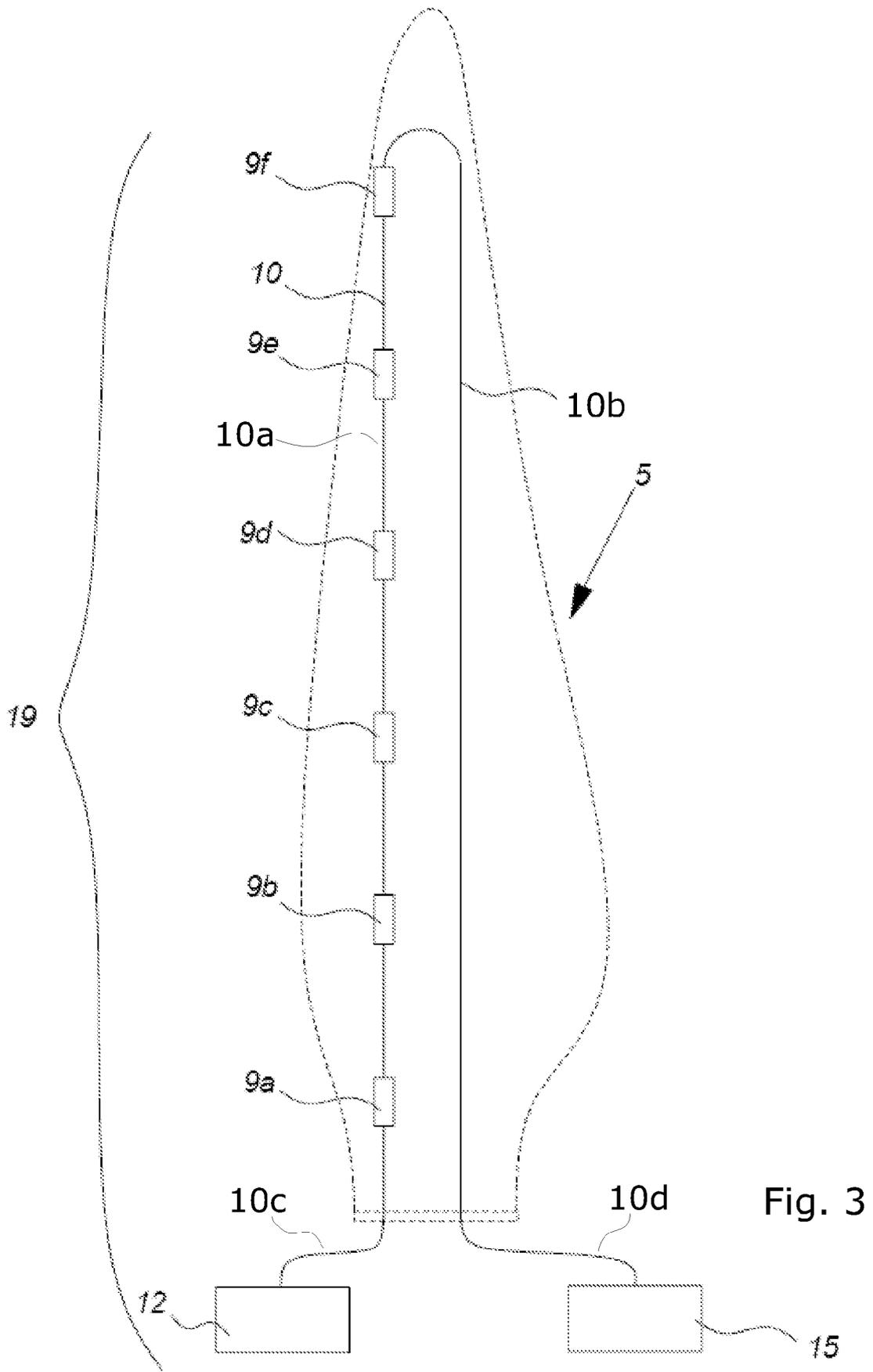


Fig. 3

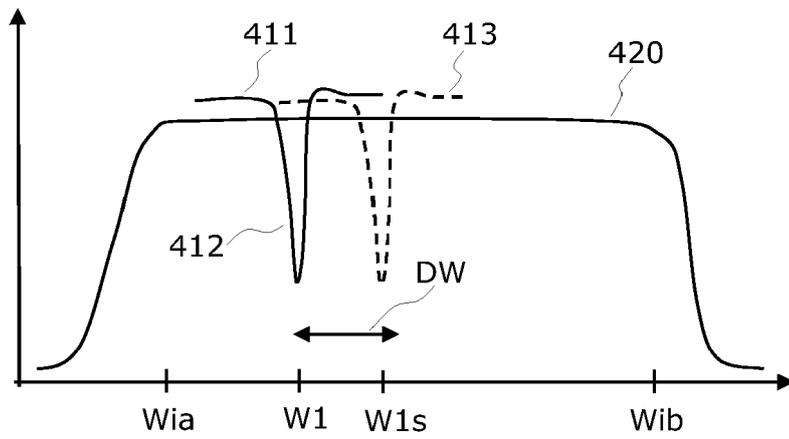


Fig. 4A

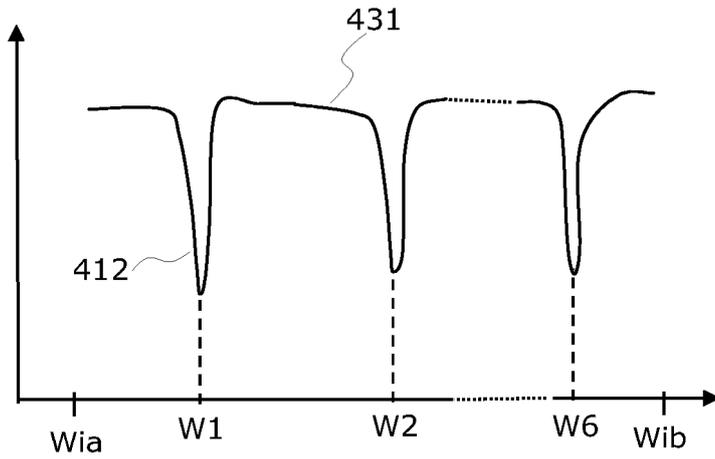


Fig. 4B

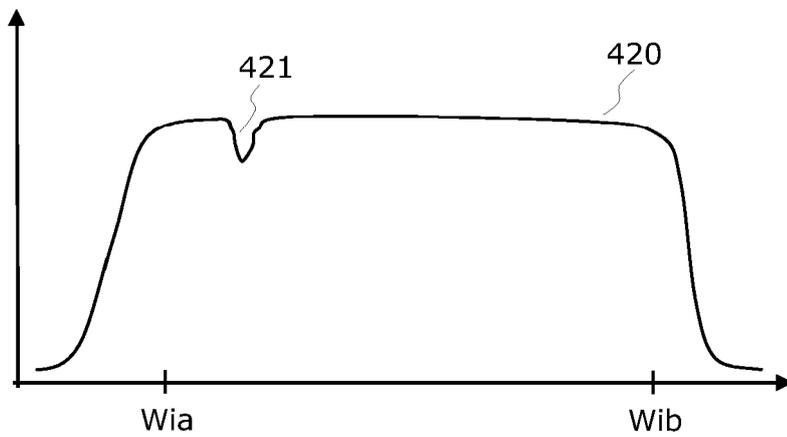


Fig. 4C

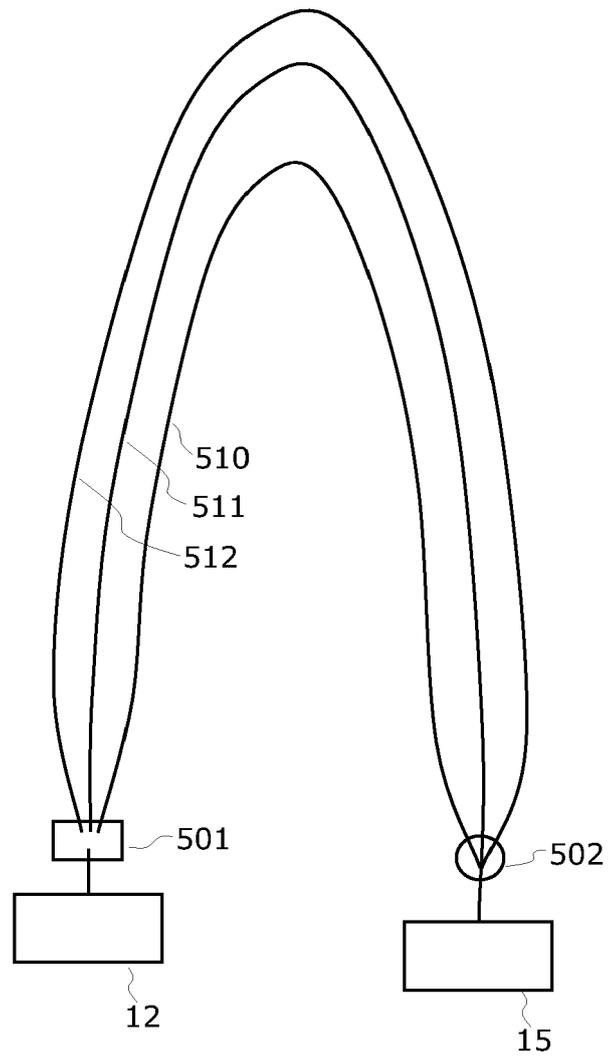


Fig. 5

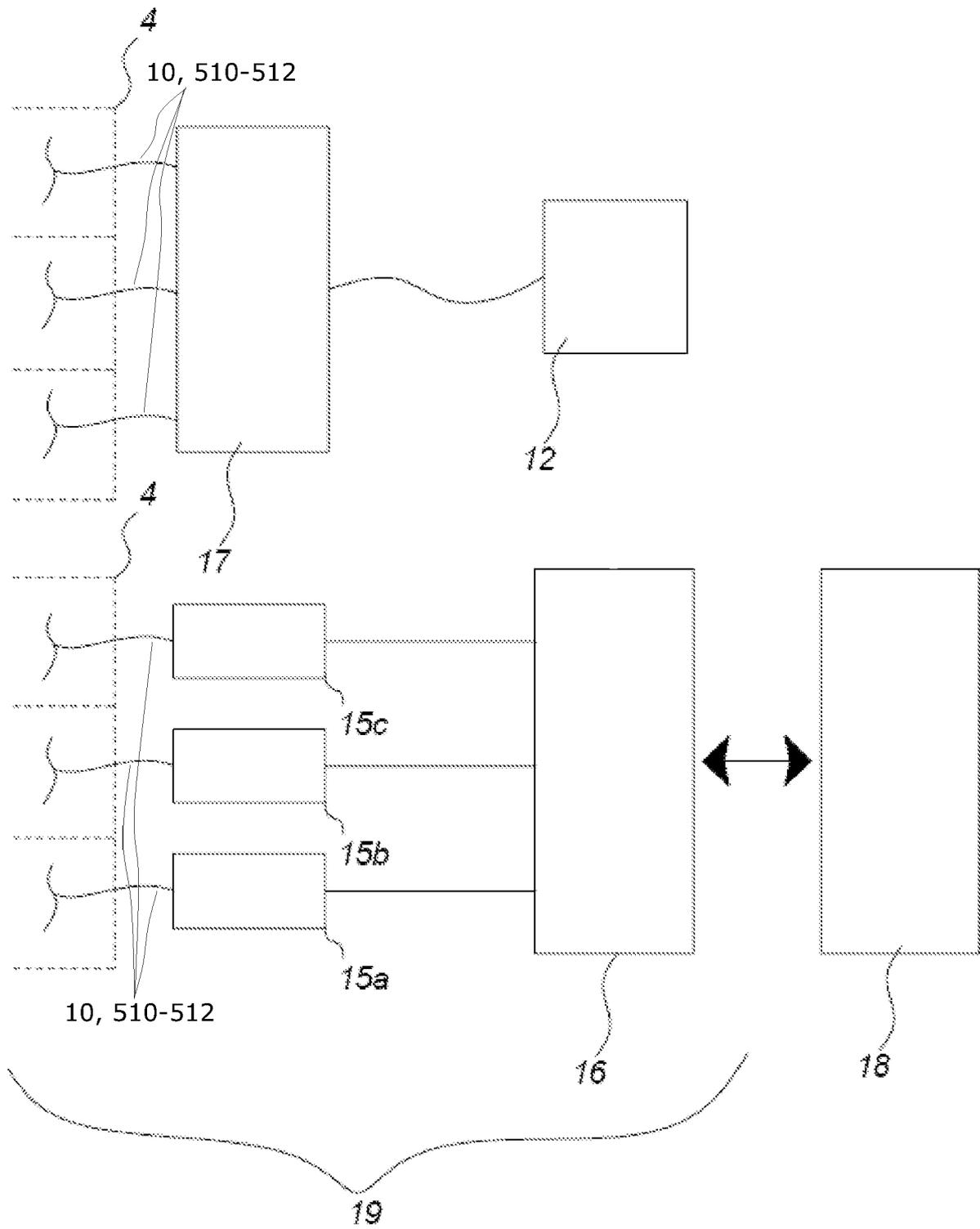


Fig. 6