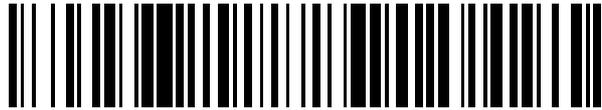


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 406 061**

51 Int. Cl.:

G01D 5/353 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.09.2009 E 09760573 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2013 EP 2340419**

54 Título: **Pala de rotor de turbina eólica que comprende un sistema de sensores de deformación insensible a la flexión del filo**

30 Prioridad:

22.09.2008 GB 0817341
22.09.2008 US 192846

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
05.06.2013

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 44
8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

OLESEN, IB

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 406 061 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

Pala de rotor de turbina eólica que comprende un sistema de sensores de deformación insensible a la flexión del filo.

5 La invención se refiere a un sistema de sensores de fibra óptica de una pala de rotor de turbina eólica y a un procedimiento para la detección de la deformación en una pala de rotor de turbina eólica, y en particular a un sistema de detección y un procedimiento que son insensibles a la flexión del filo.

10 La figura 1 ilustra una turbina eólica 1, que comprende una torre de turbina eólica 2 en la que se monta una góndola de turbina eólica 3. Un rotor de turbina eólica 4 que comprende al menos una pala de turbina eólica 5 está montado en un buje 6. El buje 6 está conectado a la góndola 3 a través de un árbol de baja velocidad (no mostrado) que se extiende desde el frontal de la góndola. La turbina eólica ilustrada en la fig. 1 puede ser un modelo pequeño destinado a consumo doméstico o a la red de alumbrado, o puede ser un gran modelo, como aquellos que son adecuados para su uso en la generación de electricidad a gran escala en un parque eólico, por ejemplo. En este último caso, el diámetro del rotor podría ser tan grande como 100 metros o más.

15 Los componentes de una turbina eólica están sujetos a deformación o alteración por un número de fuentes, tales como la acumulación de partículas como suciedad o hielo, su propio peso, y la fuerza ejercida por el propio viento. Por consiguiente, es importante que la deformación sobre los componentes sea monitorizada, para asegurar que continúan siendo aptos para funcionar durante sus vidas de servicio previstas.

20 Se conoce un número de técnicas diferentes para un sensor de medición de deformación en componentes de turbina eólica, incluyendo sensores electro-resistivos, y con más frecuentemente, sensores opto-electrónicos que comprenden fibras ópticas. Para medir la deformación en el componente en su conjunto, por lo general se utiliza una pluralidad de sensores similares, situados en diferentes puntos a lo largo de la longitud del componente. Mediante la medición de la deformación local en cada lugar, se puede calcular la deformación total en el componente.

25 A menudo es deseable monitorizar la deformación en un componente de una turbina eólica en la dirección de su dimensión más larga, ya que esta es la dirección en la que el componente es más susceptible a momentos de flexión que pueden, si son excesivos, causar un fallo estructural. En el caso de las palas de la turbina eólica, este tipo de flexión se denomina flexión en el sentido de batimiento.

30 Es deseable medir cuánto se dobla la pala en la dirección del sentido de batimiento, debido a la presión del viento o de otros factores, para evitar el fallo de la pala y para evitar que la pala golpee la torre de turbina eólica mientras gira a través del punto más bajo de su rotación. Para las palas, por lo tanto, los sensores se montan a menudo en la dirección longitudinal en el interior de la pala. Un ejemplo de disposición de sensor óptico de deformación para palas de turbina eólica es conocida del documento GB2440953 en nombre de Insensys.

35 Aunque en muchos casos es de interés la deformación sólo en una dirección particular, los sensores de deformación montados pueden verse afectados por componentes de la deformación en un número de direcciones diferentes, y dar resultados engañosos. En situaciones de viento fuerte, por ejemplo, una pala puede retorcerse o deformarse en direcciones que son perpendiculares a su longitud, tales como lateralmente, o perpendicularmente a la superficie de la pala. Esto se conoce a menudo como flexión del filo. La flexión del filo no afecta típicamente a la vida útil de la pala y por eso a menudo no es de interés para los propósitos de monitorización. Sin embargo, si no es tenida en cuenta, la flexión del filo (o más en general en esta solicitud, la flexión en la dirección no longitudinal de un componente de turbina eólica) podría indicar una deformación en la dirección de la longitud de un componente de la turbina eólica que es mayor que el valor real. La flexión del filo puede incluir por lo tanto movimientos de torsión, y puede distinguirse de la deformación pura, que es la deformación resultante de una deformación que se traduce en un aumento neto de longitud.

40 En teoría, es posible encontrar puntos ideales para el montaje de los sensores, de tal manera que cada sensor sólo medirá la deformación en ese lugar y no se verá afectado por la flexión del filo. Sin embargo, en la práctica estos puntos ideales son difíciles de encontrar y pueden diferir de pala a pala. Como resultado de ello, las medidas de deformación pueden ser poco fiables.

45 El uso de sensores de deformación de fibra óptica es conocido en otros campos. Se dan ejemplos en el documento WO03/076887 en el nombre de Light Structures A/S, y el documento WO97/15805 en el nombre de BICC PLC.

Por lo tanto, hemos apreciado que hay una necesidad de un sensor de deformación mejorado, que sea insensible a los movimientos de torsión y flexión del filo.

Sumario de la invención

De acuerdo con un aspecto preferido de la invención, se proporciona una pala de rotor de una turbina eólica, que comprende un sistema de sensores para la detección de la deformación en el sentido de batimiento en la pala de rotor, comprendiendo el sistema de sensores: una pluralidad de sensores de deformación espaciados longitudinalmente a lo largo de un eje en el sentido de batimiento de la pala de rotor de turbina eólica, en el que cada sensor de deformación comprende uno o más dispositivos de detección de deformación dispuestos en una trayectoria de sensores que encierra una región de la pala de rotor, teniendo la trayectoria de sensores una simetría rotacional de tercer orden o superior, y uno o más procesadores dispuestos para: recibir una señal desde la pluralidad de sensores de deformación; para cada sensor de deformación, calcular un valor de deformación para la región de la pala de rotor encerrada por la trayectoria de sensores, sobre la base de un cambio en la longitud de la trayectoria de sensores mientras la pala de rotor de turbina eólica se deforma; y sobre la base de la deformación calculada para cada sensor de deformación, determinar la deformación en el sentido de batimiento para la pala de rotor. La trayectoria es circular, en forma de un polígono regular, o una estrella, por ejemplo.

Cada uno de los sensores de deformación comprende uno o más dispositivos de detección dispuestos en una trayectoria con simetría rotacional de tercer orden o superior, tal como una trayectoria circular, una trayectoria en forma de estrella o en forma poligonal regular que encierra una región del componente. Esto significa que el efecto de un movimiento de torsión o de flexión del filo en la medición de deformación es al menos en parte promediado a lo largo de la zona simétrica de la región, y significa que se reduce el error en la medición de deformación pura o direccional. Mediante la disposición de una pluralidad de estos sensores de deformación a lo largo del eje longitudinal de la pala de la turbina eólica, la deformación en el sentido de batimiento o de envergadura en la pala de la turbina eólica se puede medir con mayor precisión, independientemente de cualquier efecto de flexión del filo.

Además la medición de la deformación sobre una amplia región del componente reduce la probabilidad de anomalías de medición, tales como que un sensor de deformación situado en una posición esté experimentando una deformación que no es característica del resto de la zona circundante del componente.

Ventajosamente, la pala de rotor está provista de sensores de deformación que comprenden un único dispositivo de detección de deformación, y el único dispositivo de detección de deformación comprende un sensor de deformación interferométrico de fibra óptica dispuesto para formar la totalidad de la trayectoria de forma circular o de polígono regular.

De esta manera, una medición de la longitud total de la trayectoria puede ser fácilmente determinada utilizando el sensor de deformación interferométrico de fibra óptica, y conociendo la longitud original de la trayectoria puede convertirse fácilmente en una medición de deformación simplificando en gran medida las etapas de procesado.

Alternativamente, la pala de rotor puede comprender sensores de deformación que incluyen más de un dispositivo de detección de deformación dispuestos para determinar la deformación entre puntos igualmente espaciados a lo largo de la trayectoria en forma circular o de polígono regular. Tales sensores no requieren sensores de deformación interferométricos de fibra óptica para operar (aunque tales sensores son ventajosamente usados), y por lo tanto pueden incluir otros tipos de sensor de deformación.

Ventajosamente, la trayectoria en forma de polígono regular es un triángulo equilátero. Esta configuración proporciona la mejora de la invención sin necesidad de una compleja disposición de sensores. Se apreciará que en una disposición triangular, al menos un dispositivo de detección de deformación se utiliza eficazmente para cancelar el efecto de flexión o torsión del filo, dejando el otro sensor para calcular la deformación pura.

Ventajosamente, el sistema de sensores de deformación comprende un único procesador dispuesto para recibir señales procedentes del uno o más sensores de deformación. De esta manera, sólo la salida sin procesar de cada uno de los sensores de deformación necesita ser transmitida al procesador, y el procesamiento se puede realizar de forma centralizada. Alternativamente, el sistema de sensores de deformación puede comprender un procesador respectivo para cada sensor de deformación.

Se proporciona un procedimiento correspondiente.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirán modos de realización preferidos de la invención, a modo de ejemplo, y con referencia a los dibujos, en los cuales:

la fig. 1 ilustra una turbina eólica conocida;

la fig. 2 es una ilustración esquemática de un elemento de superficie expuesto a la deformación;

la fig. 3 es una ilustración esquemática de un modo de realización de un sensor de deformación según la invención;

la fig. 4 es una ilustración simplificada de un primer ejemplo de un modo de realización;

la fig. 5 es una ilustración simplificada de un segundo ejemplo de un modo de realización;

la fig. 6 es una ilustración esquemática que muestra el efecto de un movimiento de torsión o de flexión del filo;

5 la fig. 7 es una ilustración esquemática que muestra deformación pura en la dirección de interés;

la fig. 8 es una ilustración esquemática de un sensor de deformación interferométrico;

la fig. 9 es una ilustración esquemática de la pala de rotor de turbina eólica de acuerdo con un ejemplo de la invención.

Descripción detallada de modos de realización preferidos

10 Un modo de realización preferido de la invención comprende una pala de rotor de turbina eólica que tiene un sistema de sensores de deformación que puede detectar con mayor precisión la deformación en la dirección de batimiento, en virtud de la eliminación total o al menos en parte de un componente no deseado de la deformación en la dirección del filo.

15 Con el fin de ilustrar adicionalmente la naturaleza de problema abordado por la invención, se hará ahora referencia a la figura 2, que es un diagrama que muestra un elemento de superficie cuadrado bajo tensión.

20 El cuadrado ABCD en la parte superior del diagrama muestra un elemento de superficie de un componente de turbina eólica. Se puede suponer para los propósitos de este análisis que la dirección de interés para la medición de la deformación es la dirección AD o CB, y que esta dirección corresponde a la dirección longitudinal en un componente de turbina eólica. La extensión o alargamiento de los lados AD o CB da como resultado un estiramiento del elemento de superficie ABCD y una deformación resultante.

25 La vista isométrica de la parte inferior de la figura 2 muestra la misma superficie cuadrada elemental ABCD, pero en la situación en la que la esquina C ha sido desplazada verticalmente hasta el punto C'. El elemento de superficie se supone que es elástico, pero no del todo. Esto significa que a medida que la esquina C se levanta, la distancia AC' aumentará de acuerdo con la fuerza aplicada y la elasticidad del material, pero también que la esquina C se curva ligeramente hacia atrás hacia la esquina A.

Como la distancia AC' aumenta, las esquinas B y D serán estiradas ligeramente hacia la línea central de la deformación que actúa a lo largo de la línea BC' y DC' y adoptarán nuevas posiciones B' y D'. Desde la parte superior la vista de la forma originalmente cuadrada ABCD será ahora una forma de diamante AB'CD'.

30 Como la distancia AC' es mayor que la distancia AC original, un sensor de deformación montado en esta dirección detectará una deformación. Sin embargo, esta deformación resulta de una fuerza de torsión que no es de interés en lo que a la monitorización de deformaciones en la dirección longitudinal del componente de la turbina eólica se refiere.

35 Los sensores de deformación perfectamente alineados con los bordes de BC y AD serían en gran medida insensibles a la deformación en la dirección AC', ya que las longitudes de BC y AD cambian sólo ligeramente en comparación con el estiramiento a lo largo de AC. Sin embargo, como en la práctica la naturaleza y dirección de cualquier desplazamiento no longitudinal no es fácil de predecir, es poco probable que los sensores de deformación se ubiquen de tal manera que sean en gran medida insensibles al componente no deseado de la deformación. Como se señaló anteriormente, la búsqueda de un lugar ideal para aislar los sensores es difícil, y es igual de probable que se orienten en un elemento de la superficie sensible a la deformación en la dirección AC'.

40 En el ejemplo del modo de realización preferido de la invención se aborda este problema y se proporciona un sensor de deformación que es insensible a la torsión o flexión del filo. Haciendo referencia a la figura 3, el sensor de ejemplo comprende una disposición triangular 10 de componentes del sensor de deformación 11 que se extienden entre los puntos de conexión del sensor 12. Los puntos de conexión del sensor comprenden medios de conexión adecuados para fijar los componentes del sensor a la superficie interna o externa del componente de turbina eólica, tal como soportes para recibir tornillos, puntas u otros elementos de sujeción, o sitios para la recepción de adhesivo. Los puntos de conexión del sensor forman las esquinas del triángulo ABC, y los componentes del sensor de deformación son idénticos en longitud, de modo que el triángulo es por lo tanto equilátero.

Los componentes del sensor 11 pueden ser cualquier dispositivo de detección de deformación adecuado para la medición de la deformación a lo largo de los lados individuales AB, BC y CA del triángulo, o a lo largo de la longitud

total de la periferia ABC. Sensores de deformación adecuados incluyen dispositivos mecánicos, electro-resistivos, ópticos y opto-electrónico aunque los sensores de deformación interferométricos ópticos son más ventajosos como se describirá a continuación.

5 Los sensores de deformación ópticos y opto-electrónicos comprenden fibras ópticas montadas en el componente de tal manera que la deformación del componente en una dirección de interés da como resultado un cambio en la longitud de la fibra óptica. La luz entra en un extremo de la fibra y se detecta en un extremo o el otro por un detector de luz. El cambio en la longitud óptica de la fibra óptica se puede determinar mediante la medición de las variaciones en la salida de luz de la fibra, y convertir esto en una indicación de la deformación. Aunque se conoce un número de diferentes sensores de deformación de fibra óptica, se prefieren sensores interferométricos en este caso, ya que
10 proporcionan más precisión de la medición.

En los sensores interferométricos, la luz que viaja en la fibra óptica se divide en dos trayectorias ópticas, una de las cuales está aislada de la deformación y una que no. La luz se recombina posteriormente e interfiere de forma constructiva o destructiva de acuerdo a la diferencia de fase entre las dos señales de luz. Variando ligeramente la longitud de onda de la luz de entrada, se producen variaciones en la intensidad y se puede tener en cuenta para dar
15 una indicación de la variación en la longitud de la trayectoria óptica. Un análisis más detallado se da en la solicitud en trámite 0812037.0 del solicitante, una sección de la cual se repite a continuación como referencia. Se pueden usar sensores interferométricos para dar una medición directa de la longitud entre dos puntos.

Un ejemplo preferido de la invención se describirá ahora con referencia a las figuras 4 y 5. La figura 4 muestra un modo de realización del caso general que se muestra en la figura 3, en el que los componentes del sensor de deformación 11 son proporcionados por una sola fibra óptica 13 que se enrolla alrededor de los puntos de conexión 12 para formar la trayectoria triangular. La luz entra por un extremo de la fibra óptica 13 mediante un dispositivo emisor de luz 14, tal como LED, láser, halógeno o fuente de haluros metálicos, y se detecta en el otro utilizando un dispositivo colector de luz 15, tal como un fotosensor. El dispositivo emisor de luz 14 está conectado a un extremo del cable de fibra óptica 13 para la entrada de luz en la fibra 13, y el dispositivo de medición de luz 15 está conectado al otro para recibir la luz transmitida a lo largo de la fibra 13. Un controlador 16, que también puede procesar los resultados, está conectado a ambos dispositivos de emisión de luz 14 y dispositivo de medición de luz 15. En la práctica, la fibra 13 puede estar enrollada alrededor del perímetro triangular definido por los puntos ABC varias veces con el fin de aumentar la sensibilidad de la fibra óptica a pequeños cambios en la longitud.

Una disposición alternativa se muestra en la figura 5, en la que cada uno de los componentes del sensor 4 comprende una fibra óptica separada 13, 17 y 18, con su respectivo dispositivo emisor de luz 14, detector de luz 15 y controlador 16. Una vez más, las fibras ópticas separadas se pueden enrollar alrededor de los puntos de conexión AB, BC y CD varias veces con el fin de aumentar su sensibilidad a pequeños cambios en la longitud.

El funcionamiento del sensor se describirá ahora con más detalle. Los sensores que se muestran en ambas figuras 4 y 5 están configurados para determinar las respectivas longitudes de los lados del triángulo ABC. El cambio total de las longitudes de los lados da un valor que es indicativo de la deformación en el área cerrada de la superficie. Por otra parte, este valor es en gran medida insensible a la torsión o flexión del filo. Esto puede ser entendido a partir de la figura 2, donde se apreciará que si el área está expuesta a la deformación en la dirección AD y BC, el área aumentará, mientras la torsión proporcionará un cambio muy pequeño en el área, en tanto que los otros puntos de la superficie del elemento se mueven y compensan.

40 La figura 6 muestra el efecto de la torsión o la flexión del filo en la disposición de sensor triangular de las figuras 4 y 5 con más detalle. La línea punteada indica la configuración original, y la línea continua el resultado después de un desplazamiento no longitudinal. En el primer ejemplo, las esquinas A y C se muestran sujetas a un desplazamiento no longitudinal que hace que se desplacen en direcciones opuestas alrededor de un punto intermedio. La ubicación de este punto es irrelevante y puede estar en la línea de AC o no. Como se puede ver en el diagrama, el resultado es que el lado AC no cambia significativamente en longitud, a no ser que el desplazamiento de los puntos A y C sea muy grande, y la disposición triangular se vuelve menos equilátera.

En el segundo ejemplo, las esquinas A y B son desplazadas en una dirección, mientras que la esquina C se desplaza en otra. Las longitudes de AC y CB se harán respectivamente ligeramente más corta y ligeramente más larga por el desplazamiento, pero se cancelarán en gran medida entre ellas mientras que el triángulo equilátero permanece. La longitud AB no se verá afectada de manera significativa por el desplazamiento.

Ambos ejemplos muestran que cuando se mide la suma de la longitud de los lados, un desplazamiento no longitudinal provoca muy poca perturbación. Por otro lado, la figura 7 muestra el efecto sobre el sensor de deformación de un desplazamiento puro. En el primer ejemplo, una esquina B se aleja de las otras esquinas. Esto da como resultado que BC y AB se vuelvan significativamente más largos, mientras que el lado de AC se mantiene sin cambios. Esta deformación se traducirá en un cambio en la suma de los tres lados.

Lo mismo es cierto para el caso que se muestra en el segundo ejemplo, en el que las esquinas C y B, y por lo tanto el lado CB, se alejan de la esquina A. Como resultado, ambos lados AC y BC se vuelven un poco más largos, mientras el lado AB paralelo a la tensión se vuelve mucho más largo.

5 Como se señaló anteriormente, se puede usar cualquier sensor de deformación para medir la longitud de los lados del triángulo, o para medir la deformación a lo largo de los lados. Un ejemplo de un modo de realización de un sensor interferométrico que puede ser utilizado en las disposiciones de las figuras 4 y 5 se describirá ahora con referencia a la figura 8. Este sensor se analiza en nuestra solicitud 0812037.0 junto con formas de realización alternativas que también pueden ser utilizadas con la presente invención.

10 El sensor de fibra óptica interferométrico del ejemplo comprende un dispositivo divisor de luz 20 y un dispositivo de adición de luz 22 situados en la trayectoria de la fibra óptica 13. La fibra óptica 13 está conectada a las porciones de entrada y salida de los dispositivos de división de luz 20 y de adición 22, y en consecuencia se compone de porciones separadas de fibras ópticas 13a, 13b, 13c y 13d. Aunque estas porciones son fibras ópticas separadas, es útil pensar en ellas como formando un solo elemento de fibra 13 a los efectos del presente análisis.

15 La fibra óptica 13b se extiende alrededor de los puntos de conexión 6 y es la parte de la fibra sometida a la deformación en el componente. Por lo tanto, es mucho más larga que las porciones 13a, 13c y 13d que conectan el divisor 20 y el sumador 22 al dispositivo emisor de luz 14 y al dispositivo de medición de luz 15. Se supone que las longitudes de las fibras 13a, 13c y 13d dan como resultado un retardo esencialmente insignificante en la luz recibida desde la fuente óptica 14.

20 El sensor de deformación interferométrico opera para detectar la longitud de la fibra óptica. El dispositivo emisor de luz 14 da entrada a luz que tiene una longitud de onda única uniforme en la fibra óptica 13a. La primera parte 13a conecta el dispositivo emisor de luz 14 al terminal de entrada del dispositivo divisor de luz 20 o divisor óptico. El divisor óptico 20 divide la luz recibida en su terminal de entrada en dos señales de salida iguales. La segunda porción de fibra óptica 13b está conectada a un terminal de salida del divisor 20 y por lo tanto recibe una señal de luz 25, que tiene una primera fase, desde el dispositivo emisor de luz 14 y la parte 13a de la fibra. La segunda porción 25 13b de fibra óptica se extiende alrededor de los soportes 6, y es la porción de la fibra sujeta a la deformación en el componente. Su otro extremo se conecta al terminal de entrada del dispositivo de adición de luz 22. Se apreciará que el divisor óptico y el sumador se podrían proporcionar en un solo acoplador óptico, y se muestran por separado para mayor claridad.

30 El otro terminal de entrada del dispositivo de adición de luz 22 está conectado a la fibra óptica 13c, que a su vez está conectada al otro terminal de salida del divisor 20. En un terminal, el dispositivo de adición óptico por lo tanto recibe la señal de luz 25, y en el otro se recibe la señal de luz 26, que tiene una segunda fase. La segunda fase es diferente a la primera fase, ya que la señal de luz 26 ha viajado a lo largo de la parte más larga de la fibra óptica 13b. En el dispositivo de adición de luz 22, se suman entre sí las dos señales de luz 25 y 26, y la señal de luz resultante 27 se envía al dispositivo de medición de luz 15, a través de fibra óptica 13d conectada al terminal de salida del sumador 35 22.

El dispositivo de medición de luz detecta la intensidad de la señal de la luz 27 recibida en su terminal de entrada. La intensidad de la luz recibida 27 dependerá de la fase relativa de las dos señales de luz 25 y 27, y si sus fases relativas dan como resultado una interferencia constructiva o destructiva.

40 Cuando la fibra óptica 13b está en un estado no deformado, se determina la intensidad de la luz recibida en la entrada de luz del detector 15. Esta intensidad puede ser considerada un valor cero o de reposo con el fin de calibrar el sensor. Además, como la fase relativa de las dos señales de luz 25 y 26 es una función de la longitud de onda de la luz y la longitud de la trayectoria óptica a lo largo de la fibra 13b, y en menor medida de las fibras 13c y 13d, el valor de la intensidad en reposo del sensor puede ser sintonizado a un valor deseado mediante el ajuste de la longitud de onda de la señal de luz de entrada 25.

45 El controlador puede determinar la longitud de la fibra mediante el control del dispositivo emisor de luz 14, para variar lentamente la longitud de onda de la señal de luz de entrada 25. Se prefiere que la variación total en la longitud de onda durante el proceso de detección sea pequeña, digamos 1.000 partes por millón, o 0,1%. Mientras se varía la longitud de onda, el controlador monitoriza la intensidad en el detector de luz 15, y detecta la variación cíclica en la intensidad causada por el cambio de fase. El controlador cuenta el número de veces que la fase relativa de las dos 50 señales 25 y 26 cambia en 360 grados, un ciclo completo. El controlador 15, puede contar cada ciclo de la fase determinando la cantidad de veces que se alcanza el máximo (o mínimo) de la intensidad.

Después de que el controlador 12 haya completado la variación de la longitud de onda, se utiliza el número total de ciclos de fase detectados para determinar la longitud de la fibra óptica. Por ejemplo, si variando la longitud de onda de la luz de entrada 25 en un 0,1% resulta en la detección de 500 ciclos completos de fase, entonces la longitud de

la fibra se puede determinar, con un grado razonable de exactitud, como:

$$\begin{aligned} \text{Longitud} &= \text{número de ciclos de fase} \times (\text{variación})^{-1} \times \text{longitud de onda} \\ &= 500 \times (0,001)^{-1} \times \text{longitud de onda} \end{aligned}$$

Longitud = longitud de las fibras que son medidas;

5 Número de ciclos de fase = número de ciclos de fase detectados;

Variación = porcentaje de cambio en la longitud de onda de entrada de la luz con fines de medición; y

Longitud de onda = longitud de onda inicial de la luz sujeta a variación.

Por lo tanto, para luz roja en la fibra con una longitud de onda de 700 nm, la longitud de la fibra puede determinarse como:

$$\begin{aligned} 10 &= 500000 \times 7 \times 10^{-7} \\ &= 0,35 \text{ m} \end{aligned}$$

15 Otras técnicas pueden ser usadas para medir la longitud de la fibra óptica 13b. En un ejemplo, un pulso de luz puede entrar en la fibra óptica 13a, y es registrado el tiempo que tarda el pulso en viajar a lo largo de las dos trayectorias ópticas para el sensor. Una aplicación adicional es introducir luz blanca en la fibra óptica 13a, y utilizar un interrogador para analizar el patrón de interferencia. La longitud de la trayectoria óptica recorrida por la luz en una fibra óptica será diferente según la longitud de onda de la luz. Diferentes longitudes de onda de luz se recibirán por lo tanto en el detector a diferentes fases de acuerdo a la trayectoria recorrida y se interferirán entre sí de manera constructiva o destructiva. El efecto es similar a un patrón de interferencia de una sola longitud de onda de luz, y tiene una forma sinusoidal. Sin embargo, es el resultado de la interferencia de diferentes longitudes de onda.

20 Aunque se ha descrito en los ejemplos anteriores una formación triangular de los dispositivos de detección de deformación, se apreciará que esta formación es un simple caso de una formulación más general en el que la trayectoria podría ser cualquier trayectoria con simetría rotacional de tercer orden o superior, tal como trayectorias circulares, formas poligonales regulares, tales como triángulos, cuadrados, pentágonos, hexágonos, etc, o estrellas. La ruta puede ser convexa o cóncava.

25 Se apreciará que en una disposición triangular, al menos uno de los dispositivos de detección de deformación se utiliza efectivamente para anular el efecto de un desplazamiento no longitudinal o torsión dejando el otro sensor para calcular la deformación pura.

30 Todas las trayectorias poligonales regulares tienen lados de igual longitud. Este es un punto clave, ya que si los lados de la trayectoria no fueran de igual longitud sería difícil separar los componentes de flexión del filo o de movimiento de torsión experimentado por cada uno de los respectivos lados de detección. Si se utilizara una forma rectangular, por ejemplo, entonces el sensor sería más susceptible a un desplazamiento que actuara en una dirección paralela a la de los lados más largos. Con un sensor cuadrado, las longitudes iguales de los lados significan que el cambio en la longitud de los lados no paralelos a la fuerza del desplazamiento no longitudinal se compensa al menos en parte por los cambios en la longitud de los lados que son paralelos. Se apreciará que el círculo representa un polígono regular en el cual la longitud de los lados tiende a cero, y el número de lados tiende a infinito.

40 La figura 9 ilustra un sistema de sensores de deformación de una pala de rotor de una turbina eólica de acuerdo con un ejemplo de un modo de realización de la invención. El sistema de detección de deformación comprende uno o más sensores situados en diferentes posiciones longitudinales en una pala de rotor de una turbina eólica. La trayectoria de sensores puede estar dispuesta en la superficie exterior o interior de la pala de rotor de turbina eólica, o incrustada en el interior del laminado del propio componente, para encerrar una región del componente en donde se va a medir la deformación.

45 El sistema de sensores comprende al menos un procesador para recibir las medidas de deformación y analizar los resultados. En la figura 9, un procesador es proporcionado en el buje del rotor o cerca del pie de la pala para recibir datos desde la pluralidad de sensores. Las mediciones pueden ser mediciones de la deformación real, o pueden ser mediciones que indican un aumento en la longitud. Cuando las mediciones indican un aumento en la longitud, las mediciones de los respectivos dispositivos de detección de deformación simplemente se pueden agregar para dar la longitud total de la periferia de la trayectoria. Si se utilizan sensores de red de fibra de Bragg, se apreciará que las mediciones de cada uno de los lados de la trayectoria poligonal regular serán de la longitud de onda de la luz

5 reflejada (o transmitida) por la red de Bragg. Para utilizar estas mediciones, es ventajoso convertir las longitudes de onda de los sensores individuales en indicaciones de longitud, de manera que puedan ser fácilmente sumadas entre sí. Lo mismo es cierto para las mediciones de deformación basadas en resistividad. Por lo tanto, los procesadores pueden estar provistos en la ubicación de cada sensor y conectados entre sí, y, opcionalmente, a un procesador central, para la manipulación de los resultados, o, alternativamente, puede ser proporcionado un solo procesador para recibir los datos en bruto.

10 La invención se ha descrito con referencia a ejemplos de implementaciones, puramente en aras de la ilustración. La invención no está limitada por estos, ya que al experto en la técnica se le podrían ocurrir otras tantas modificaciones y variaciones. La invención ha de entenderse a partir de las reivindicaciones que siguen.

REIVINDICACIONES

1. Una pala de rotor de turbina eólica que comprende un sistema de sensores para la detección de la deformación en el sentido de batimiento en la pala de rotor, comprendiendo el sistema de sensores:
5 una pluralidad de sensores de deformación (10) espaciados longitudinalmente a lo largo de un eje del sentido de batimiento de la pala de rotor de turbina eólica,
en el que cada sensor de deformación (10) comprende uno o más dispositivos de detección de deformación (11) dispuestos en una trayectoria de sensores que encierra una región de la pala de rotor, teniendo la trayectoria de sensores una simetría rotacional de tercer orden o superior; y
uno o más procesadores (16) dispuestos para:
10 recibir una señal desde la pluralidad de sensores de deformación (10);
para cada sensor de deformación (10), calcular un valor de deformación para la región de la pala de rotor encerrada por la trayectoria de sensores, sobre la base de un cambio determinado en la longitud de la trayectoria de sensores mientras la pala de rotor de turbina eólica se deforma; y
15 en base a la deformación calculada para cada sensor de deformación, determinar la deformación en el sentido de batimiento de la pala de rotor.
en el que la trayectoria de sensores es circular, o es en la forma de un polígono regular o una estrella, y en el que la trayectoria es convexa o cóncava.
2. La pala de rotor de la reivindicación 1, en la que los sensores de deformación (10) comprenden un único dispositivo de detección de deformación, y donde el único dispositivo de detección de deformación comprende
20 un único sensor de deformación interferométrico de fibra óptica (13) dispuesto para formar la totalidad de la trayectoria circular o en forma de polígono regular.
3. La pala de rotor de las reivindicaciones 1 o 2, en la que los sensores de deformación (10) comprenden más de un dispositivo de detección de deformación (11) dispuestos para determinar la deformación entre puntos igualmente espaciados (12) a lo largo de la trayectoria en forma circular o de polígono regular.
- 25 4. La pala de rotor de cualquier reivindicación precedente, donde la trayectoria en forma de polígono regular es un triángulo equilátero.
5. La pala de rotor de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende un único procesador (16) dispuesto para recibir señales procedentes de uno o más sensores de deformación (10).
- 30 6. La pala de rotor de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende un procesador respectivo para cada sensor de deformación.
7. Una turbina eólica que comprende las palas de rotor de cualquier reivindicación anterior.
8. Un procedimiento de detección de la deformación en el sentido de batimiento en una pala de rotor de turbina eólica, que comprende:
35 recibir una señal en uno o más procesadores (16) desde una pluralidad de sensores de deformación (10) montados en posiciones espaciadas longitudinalmente a lo largo del sentido de batimiento de la pala de rotor de turbina eólica, en el que cada sensor de deformación comprende uno o más dispositivos de detección de deformación (11) dispuestos en una trayectoria de sensores que encierra una región de la pala de rotor, y la trayectoria de sensores tiene una simetría rotacional de tercer orden o superior;
40 para cada sensor de deformación (10), calcular un valor de deformación para la región de la pala de rotor encerrada por la trayectoria de sensores, sobre la base de un cambio determinado en la longitud de la trayectoria de sensores mientras la pala de rotor de turbina eólica se deforma; y
en base a la deformación calculada para cada sensor de deformación, determinar la deformación en el sentido de batimiento de la pala de rotor.
45 en el que la trayectoria de sensores es circular, o es en la forma de un polígono regular o de estrella, y en el que la trayectoria es convexa o cóncava.

9. El procedimiento de la reivindicación 8, en el que los sensores de deformación (10) comprenden un solo dispositivo de detección de deformación, y en el que el único dispositivo de detección de deformación comprende un único sensor de deformación interferométrico de fibra óptica (13) dispuesto para formar la totalidad de la trayectoria de forma circular o de polígono regular.
- 5 10. El procedimiento de las reivindicaciones 8 o 9, en el que los sensores de deformación comprenden más de un dispositivo de detección de deformación (11) dispuestos para determinar la deformación entre puntos igualmente espaciados a lo largo de la trayectoria en forma circular o de polígono regular.
11. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 8, 9 o 10, en el que la trayectoria en forma de polígono regular es un triángulo equilátero.
- 10 12. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, que comprende proporcionar un único procesador (16) dispuesto para recibir señales procedentes de uno o más sensores de deformación.
13. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, que comprende proporcionar un procesador respectivo para cada sensor de deformación.
- 15 14. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 8 a 13, que comprende el montaje de la pluralidad de sensores de deformación en posiciones espaciadas longitudinalmente a lo largo del sentido de batimiento de la pala de rotor de turbina eólica.

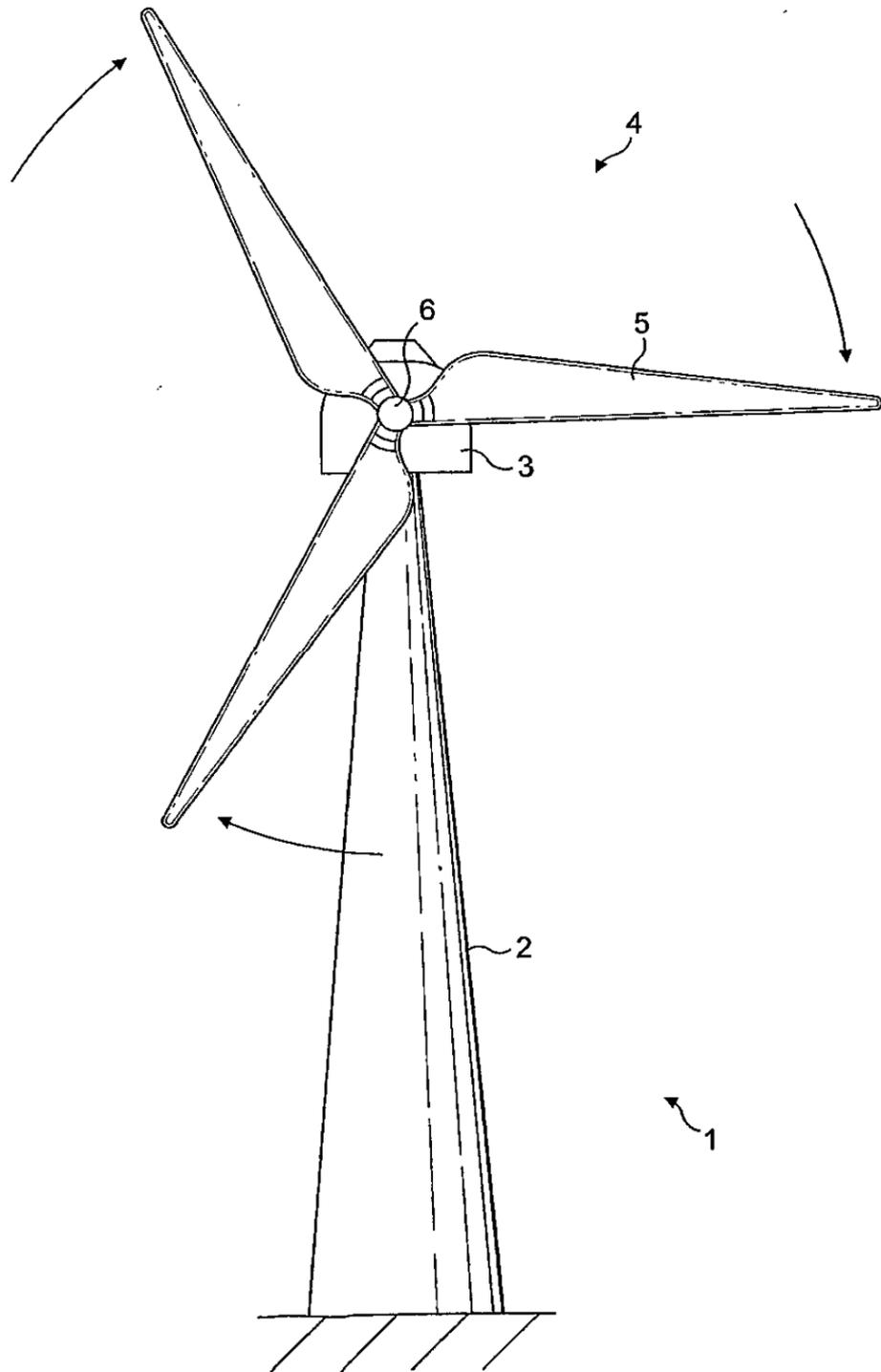


FIG. 1

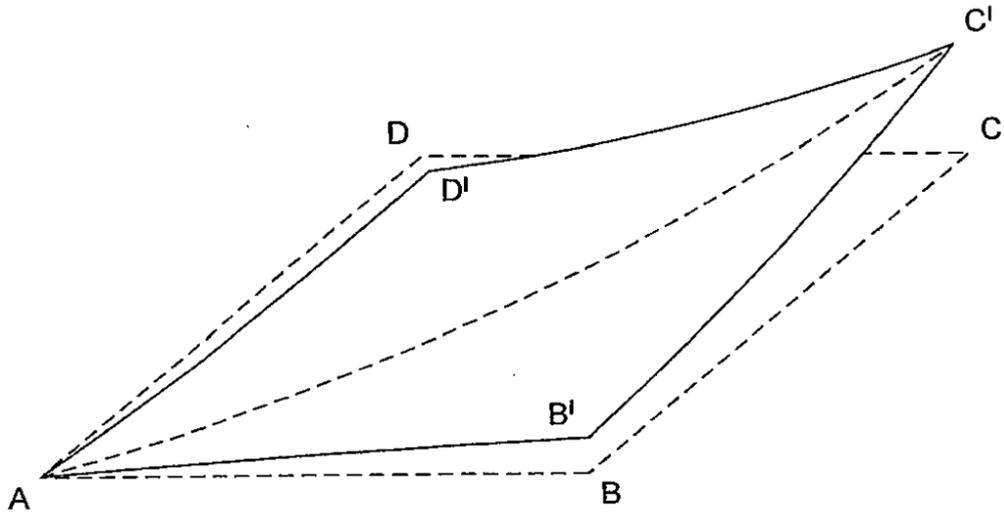
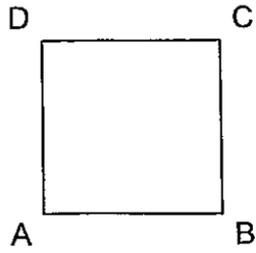


FIG. 2

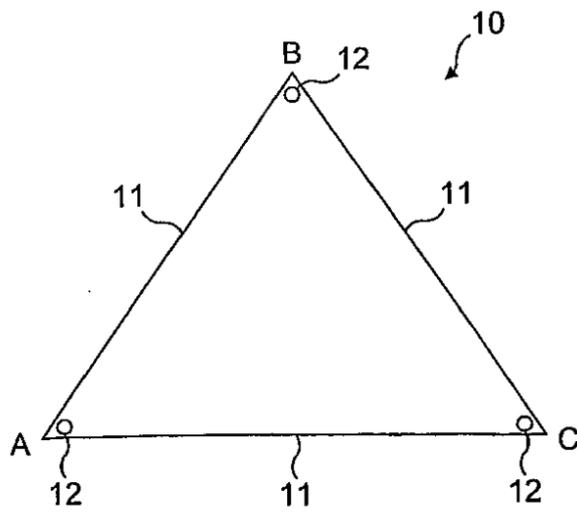


FIG. 3

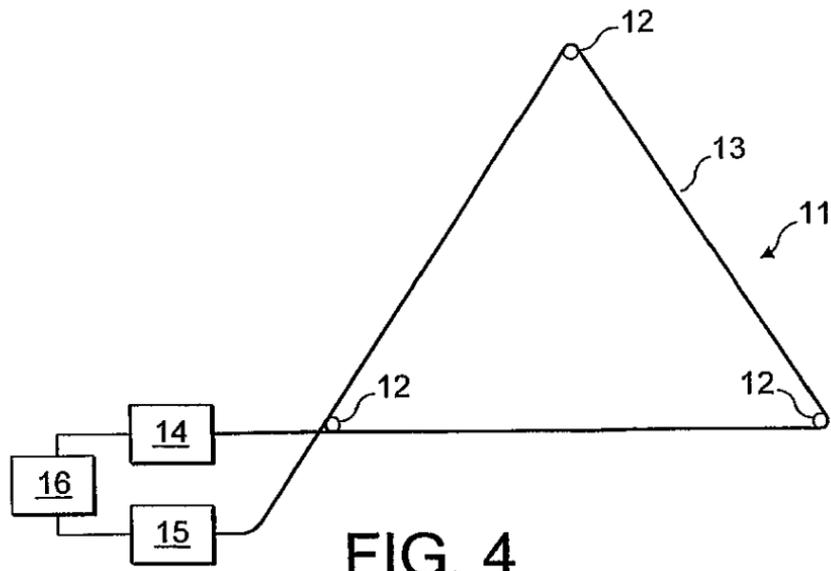


FIG. 4

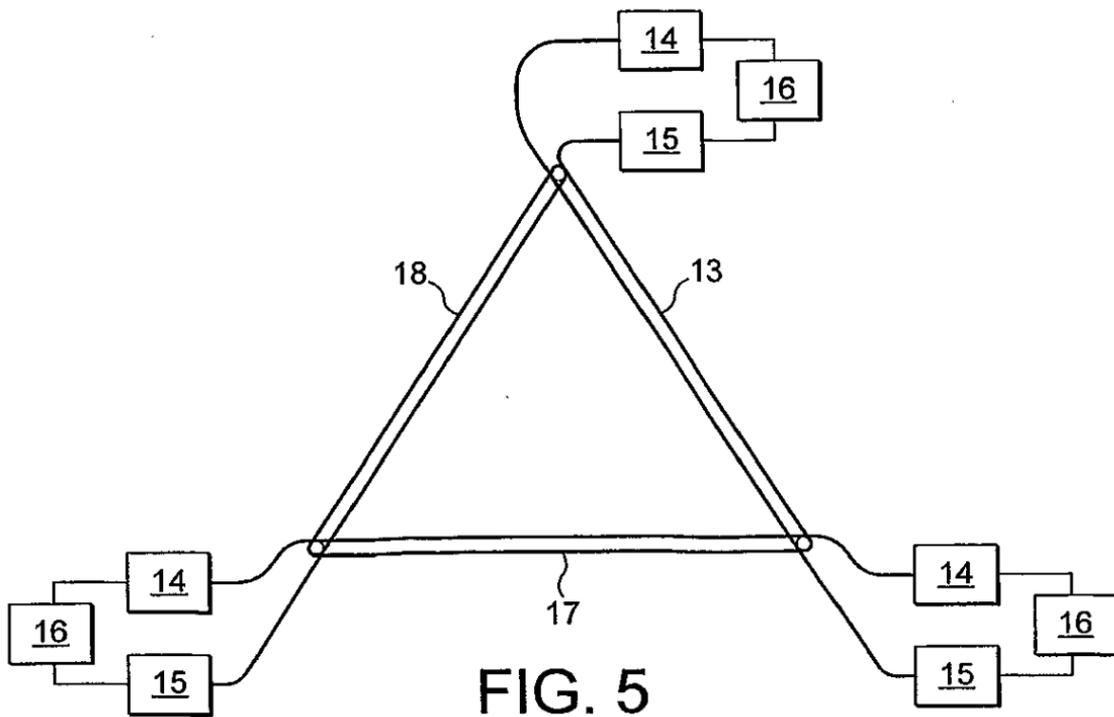
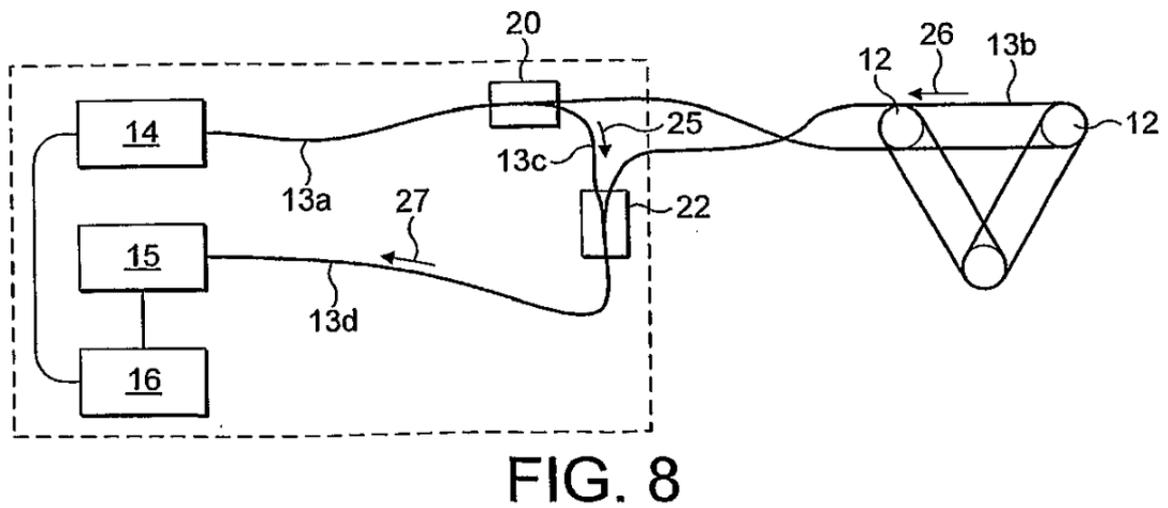
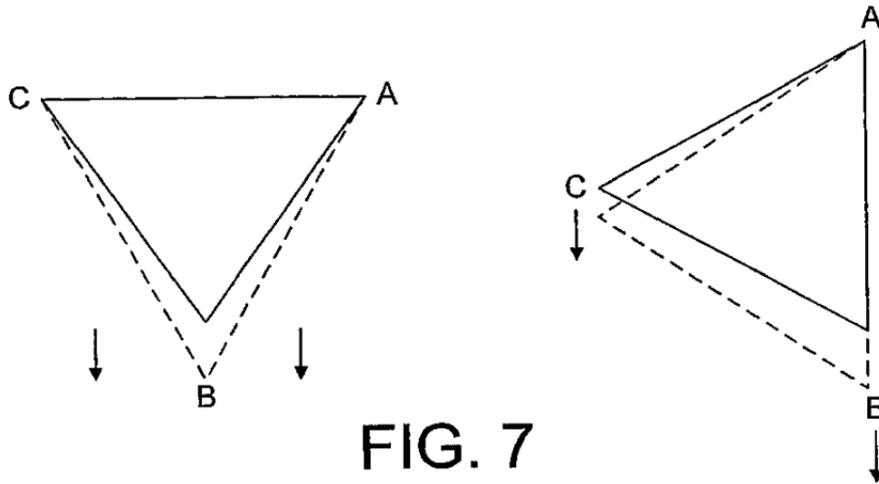
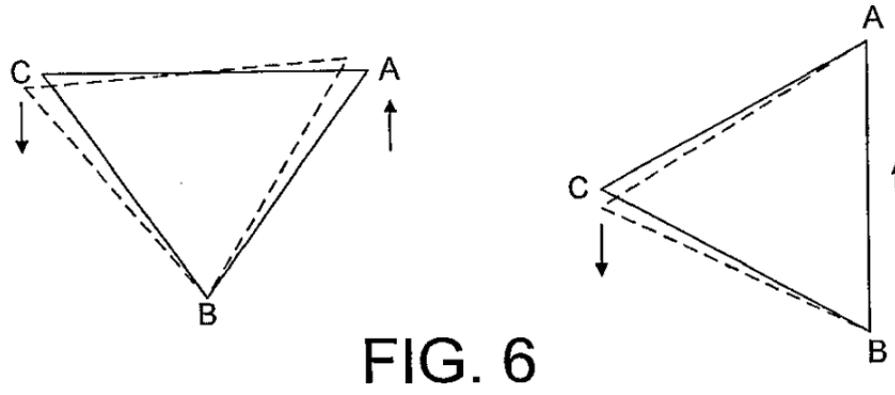


FIG. 5



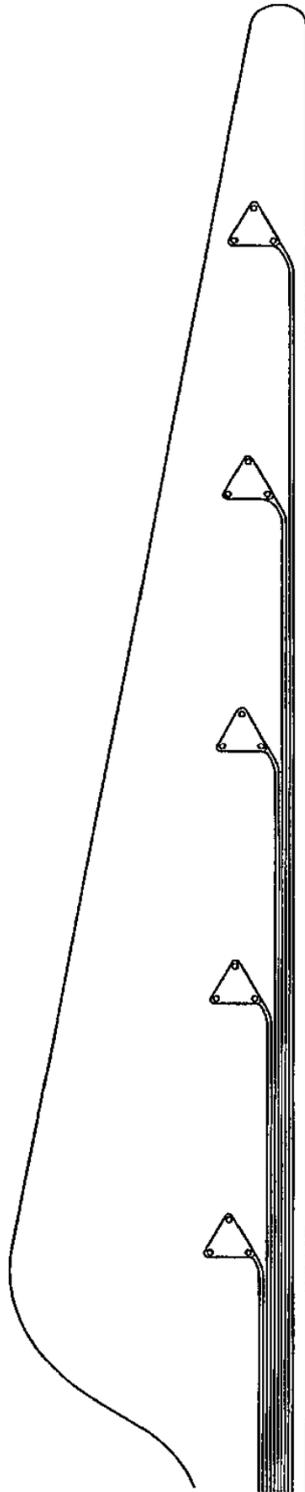


FIG. 9