

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 446 715**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.08.2010 E 10750037 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.11.2013 EP 2486270**

54 Título: **Control de pala de rotor basado en la detección de turbulencia**

30 Prioridad:

06.08.2009 GB 0913739
09.08.2009 US 231858 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
10.03.2014

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 2 446 715 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

Control de pala de rotor basado en la detección de turbulencia.

La presente invención se refiere a un sistema de control de pala de rotor para una turbina eólica, y en particular un sistema de control de pala que controla un parámetro aerodinámico de la pala, tal como ángulo de paso, basándose en una medición de turbulencia.

La figura 1 ilustra una turbina eólica 1, que comprende una torre de turbina eólica 2 en la que está montada 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 la parte frontal de la góndola. La turbina eólica ilustrada en la figura 1 puede ser un modelo pequeño destinado para uso doméstico o de utilidad ligera, o puede ser un modelo grande, tal como los que son adecuados para su uso en generación de electricidad a gran escala en una granja eólica por ejemplo. En este último caso, el diámetro del rotor puede ser de hasta 100 metros o más.

En la generación de energía mediante turbina eólica, la eficiencia energética de la turbina depende en gran medida de dos factores, el ángulo de paso y la relación de la velocidad periférica. El ángulo de paso θ es el ángulo en el que está orientada la pala de rotor con respecto al plano del rotor, es decir, el sentido en el que está girando la pala de rotor. La orientación de la pala se evalúa con respecto a la cuerda de pala que conecta el borde de ataque y de salida. Esto se ilustra en más detalle en la figura 2.

El ángulo de paso no es el mismo que el ángulo de ataque (AOA), que es el ángulo realizado entre el sentido del viento incidente en la pala y el ángulo de paso. El viento incidente se indica mediante un vector V , y una componente de giro a medida que la pala se mueve a través del aire se indica mediante un vector ωR . Esto da como resultado un sentido de viento relativo de V_r . La elevación L proporcionada por la pala es en ángulos rectos con respecto al sentido de viento relativo V_r .

El funcionamiento de una turbina eólica puede clasificarse a grandes rasgos como o bien de carga parcial o bien de carga total. En funcionamiento de carga parcial, las palas de la turbina eólica están girando y se está produciendo energía, pero debido a las bajas velocidades del viento la energía generada es menor que el valor de energía nominal o máximo posible para la turbina. En tales casos, es deseable maximizar la energía que puede extraerse inclinando la turbina eólica completamente en el viento y, para turbinas eólicas de control de paso, cambiando el ángulo de paso de las palas para maximizar la elevación en la pala. Para funcionamiento de carga total, o a velocidades de viento que son demasiado altas, la turbina eólica tiene que controlarse cuidadosamente de modo que se evite el daño a la turbina eólica.

En turbinas eólicas de control por pérdida aerodinámica, sin paso, las palas están conectadas al buje del rotor en un ángulo fijo, pero se conforman aerodinámicamente de modo que cuando la velocidad del viento incidente supera un valor predeterminado se crea turbulencia en el lado de sotavento de la pala. La turbulencia da como resultado que la elevación experimentada por la pala, y por consiguiente la energía generada, se limite a un intervalo que depende de la forma aerodinámica elegida.

Para turbinas eólicas de control de paso, a velocidades de viento que están dentro del intervalo de velocidades de funcionamiento seguro para generación de energía, la manera en la que se aumenta el paso de las palas es en gran medida la misma para todos los diseños, concretamente se les aumenta el paso en el viento todo lo posible con el fin de extraer la máxima energía del viento incidente. Sin embargo, si se aumenta demasiado el paso de las palas, provocarán una pérdida aerodinámica en el flujo de viento alrededor de las palas. Este principio se usa en turbinas eólicas de control por pérdida aerodinámica activa para proteger el generador de sobrecargas provocadas por velocidades de viento excesivas. Sin embargo, durante el funcionamiento normal no se deseable una condición de pérdida aerodinámica ya que quiere decir que la turbina eólica no está funcionando eficazmente.

En funcionamiento de carga total, las palas de turbina eólica están girando y se está produciendo energía, pero la energía generada está en este caso en un máximo y existe el peligro de sobrecargar el generador o en la red de suministro. En tales casos, las palas o la propia turbina pueden inclinarse con respecto al viento para reducir la velocidad periférica y reducir la energía generada. En las turbinas eólicas de control de paso por ejemplo, puede reducirse deliberadamente el paso de las palas, inclinándolas hacia fuera del viento con el fin de reducir la energía extraída y evitar sobrecargar el generador. En las turbinas eólicas de pérdida aerodinámica activa, se aumenta adicionalmente el paso de las palas de manera activa en el viento, y se les aumenta el paso en exceso hasta tal punto de que se introducen deliberadamente condiciones de tipo de pérdida aerodinámica para reducir la energía extraída del viento. En efecto, la eficiencia se adapta para cumplir con la energía nominal máxima.

El documento US 2009/00907976 A1 describe una atenuación activa de palas de turbina eólica que incluye un sensor dispuesto aguas arriba de un borde de salida de una pala de turbina eólica para medir una característica de flujo de aire cerca de una superficie de una pala.

El documento US 2008/0317598 A1 describe una reducción de pérdida de potencia en viento turbulento para una turbina eólica usando detección y control localizados con el fin de reducir el efecto de la desviación de ángulo de

ataque.

Por tanto, existe la necesidad de un control para garantizar que las palas responden rápidamente a cambios en el sentido y la velocidad del viento para mantener el paso óptimo y evitar condiciones de pérdida aerodinámica indeseables. Esto es particularmente importante a bajas velocidades de viento, por ejemplo entre 3 m/s y 15 m/s, cuando la turbina está funcionando en condiciones de carga parcial por debajo de su energía nominal máxima, y por tanto es crucial extraer la máxima potencia disponible del viento. Además, el funcionamiento y la eficiencia general de una pala de turbina eólica dependen en gran medida de la calidad del flujo de aire sobre el lado de sotavento o succión de la pala. Sería deseable poder monitorizar esto más estrechamente por consideraciones de funcionamiento, mantenimiento y control.

10 Sumario de la invención

Según una realización preferida de la invención, se proporciona un sistema de control de pala de rotor de turbina eólica que comprende: una pluralidad de sensores para detectar flujo de aire turbulento a lo largo de una superficie de pala de rotor; un controlador para recibir datos desde la pluralidad de sensores y basándose en la detección de flujo de aire turbulento controlar un parámetro aerodinámico de la pala de rotor. Cada uno de la pluralidad de sensores comprende: una membrana de sensor para detectar la turbulencia de flujo de aire a través de una superficie de la pala de turbina eólica, y en el que la membrana de sensor es solidaria con la superficie y cubre al menos parte de una cavidad en la pala de turbina eólica; una fuente de luz ubicada en la cavidad para iluminar la superficie de la membrana de sensor dentro de la cavidad; un detector de luz ubicado en la cavidad para detectar luz reflejada desde la superficie de la membrana y para proporcionar una salida a un procesador, determinando el procesador a partir de la salida un valor de turbulencia para el flujo de aire a lo largo de la membrana de sensor.

Por tanto, la invención permite monitorizar en tiempo real la interacción aerodinámica de la pala con el flujo de aire y ajustarla según se desee basándose en una medida de turbulencia.

La invención proporciona un sistema de sensor sensible debido al hecho de que pueden detectarse pequeños desplazamientos de la membrana de sensor usando la fuente de luz y el detector. Además, el sensor es relativamente fácil de instalar y puede colocarse en la pala de turbina eólica para su protección y para garantizar que la presencia del sensor no interfiere con la medición. Dado que hay pocas partes móviles, el sensor es resistente a cambios extremos de temperatura.

En una realización, el parámetro aerodinámico es el ángulo de paso de la pala de rotor. Esto ofrece un mecanismo de control de paso de pala de rotor sensible y afinado con precisión basado en ambos casos en las condiciones aerodinámicas inmediatas de la pala de rotor. Si el ángulo de pala es demasiado grande, los sensores de turbulencia detectan la condición de pérdida aerodinámica resultante y el controlador de paso reduce el paso. Esto conduce a un régimen de generación de electricidad mejorado.

Ventajosamente, el sistema de control comprende un sensor de potencia para detectar la potencia de salida de la turbina eólica y emitir una señal hacia el controlador de paso, en el que el controlador de paso controla adicionalmente el paso de las palas de rotor basándose en la detección de potencia de salida de turbina eólica. La combinación de dos señales de control quiere decir que puede usarse control de potencia de salida para facilitar un control basto sobre el paso de pala y pueden usarse los sensores de turbulencia para proporcionar un control refinado. El controlador de paso controla preferiblemente el paso de las palas de rotor para minimizar la turbulencia y maximizar la potencia de salida de turbina eólica.

Para detectar condiciones de tipo de pérdida aerodinámica, la pluralidad de sensores están ubicados ventajosamente en la superficie de succión de la pala e incluso más ventajosamente están ubicados en mayor número hacia el borde de salida del lado de succión de la pala que en otras zonas.

Preferiblemente, el controlador reduce el paso de la pala de rotor en el viento cuando un número predeterminado de sensores indican flujo de aire turbulento.

En realizaciones alternativas, el parámetro aerodinámico es la forma de la pala de rotor o es el flujo de aire a través de la pala. La provisión de mecanismos adecuados para cambiar la forma de la pala o ajustar el flujo de aire a través de la pala puede realizarse entonces basándose en la salida del sensor para garantizar que, en la medida de lo posible, se mantienen condiciones de funcionamiento según intervalos o valores deseados preestablecidos.

En una realización, la fuente de luz y el detector de luz en la cavidad son fibras ópticas conectadas a una fuente de luz optoelectrónica. Esto permite que se evite el uso de componentes eléctricos en el sensor y quiere decir que el sensor será resistente a rayos. Éstos son especialmente comunes para palas de turbina eólica. Cualquier componente eléctrico para el sensor puede alojarse en parte de la turbina eólica que está protegida eléctricamente.

Preferiblemente, el sensor comprende un sumador para sumar luz reflejada desde la superficie de la membrana a una señal de luz de referencia para dar un patrón de interferencia que indica desplazamiento de la membrana. El uso de un patrón de interferencia proporciona la forma más precisa de interpretar el desplazamiento de la membrana, dado que pueden usarse pequeños desplazamientos de la membrana para dar grandes variaciones de

intensidad. Para mayores desplazamientos, se produce un patrón de intensidad sinusoidal, lo que quiere decir que puede obtenerse información sobre la velocidad a la que se produce el desplazamiento así como el sentido del desplazamiento a partir del análisis de la frecuencia sinusoidal y la tasa de aparición.

5 En una realización, el sumador comprende un espejo parcial ubicado en la cavidad del sensor para reflejar una parte de la luz desde la fuente de luz hasta el detector de luz y proporcionar la señal de luz de referencia. Por tanto, todos los componentes del sensor se proporcionan localmente dentro de la cavidad para facilidad de sustitución y mantenimiento.

10 En una realización adicional, la cavidad del sensor está sellada. Esto permite que el entorno de la cavidad se mantenga a niveles de humedad y temperatura que garantizan el buen funcionamiento de la membrana de sensor. Además, la cavidad puede rellenarse con un gas distinto del aire, tal como un gas inerte.

En una realización, la membrana de sensor puede estar formada de un material diferente del que está formada la superficie del componente de turbina eólica. Esto permite que se adapte de manera más precisa a su función como sensor, en cuanto a la tensión y sensibilidad. Dependiendo de la instalación, la membrana de sensor puede estar formada alternativamente por la propia superficie de pala.

15 En una realización, el sensor de turbulencia comprende un procesador para analizar las variaciones sinusoidales en el patrón de interferencia a lo largo de un periodo de tiempo predeterminado para determinar si el flujo de aire es turbulento. El procesador puede analizar el patrón usando técnicas estadísticas o de reconocimiento de patrón y dar una determinación con un nivel de confianza asociado. Un análisis durante un periodo de tiempo más largo puede dar un grado de confianza mayor en la salida del sensor.

20 En una realización adicional, el sistema de control comprende una memoria para almacenar datos de la pluralidad de sensores y generar un registro de condiciones de flujo de aire sobre la superficie de la pala de turbina eólica. Esto permite monitorizar y registrar el rendimiento en tiempo real de la pala de rotor para los fines de mejora del diseño de pala.

También se proporciona un método y producto de programa informático correspondientes.

25 **Breve descripción de los dibujos**

A continuación se describirán realizaciones preferidas de la invención en más detalle, a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos en los que:

La figura 1 ilustra una turbina eólica;

30 La figura 2 es una sección transversal esquemática a través de una pala de rotor de turbina eólica que indica principios y terminología útiles;

La figura 3 ilustra un primer ejemplo de un sensor de turbulencia según la invención;

La figura 4 ilustra un segundo ejemplo de un sensor de turbulencia según la invención;

La figura 5 ilustra un ejemplo de sistema de sensor que incorpora sensores tales como los mostrados en las figuras 3 ó 4;

35 La figura 6 es una ilustración de un ejemplo de patrón de intensidad desarrollado a partir de las señales del sensor;

La figura 7 es un alzado longitudinal de una pala de turbina eólica que muestra un ejemplo de disposición de los sensores de turbulencia en un sistema de control de paso;

La figura 8 es una vista en sección transversal a través de la línea A-A en la figura 7 en condiciones de tipo sin pérdida aerodinámica;

40 La figura 9 es una vista en sección transversal a través de la línea A-A en la figura 7 en condiciones de tipo de pérdida aerodinámica;

La figura 10 es una ilustración esquemática de una tabla de resultados del sensor usada en un sistema de control y alarma.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

45 La figura 3 ilustra un primer ejemplo de un sensor de turbulencia según una realización preferida de la invención. El sensor de turbulencia se muestra *in situ* integrado en la pala de un rotor de turbina eólica u otro componente.

El sensor 10 comprende un alojamiento de sensor 11, que tiene paredes laterales 12 que definen una cavidad 13. En la cavidad 13 está situado un aparato de sensor, denotado generalmente mediante el número de referencia 14. Una superficie del alojamiento de sensor 11 está dotada de una membrana de sensor 15. En la práctica, el sensor

- 10 se monta en la pala de manera que la membrana de sensor 15 separa la cavidad 13 del aire exterior y de manera que la membrana 15 está en contacto con el flujo de aire a lo largo de la superficie de la pala. La cavidad está completamente sellada frente al entorno externo mediante las paredes laterales 12 y la membrana 15, de modo que el movimiento de la superficie de la membrana puede considerarse completamente atribuible a variaciones en el flujo de aire a lo largo de la superficie de la pala. El sellado de la cavidad también actúa para mantener la superficie interna de la membrana limpia y permite regular el entorno interno de la cavidad para evitar acumulación de humedad que podría afectar a la membrana de sensor 15 y al aparato 14. La cavidad 13 puede rellenarse, por ejemplo, con un gas inerte.
- Preferiblemente, la superficie de la pala y la membrana 15 se disponen de modo que forman una superficie de pala uniformemente continua. Es indeseable tanto para las propiedades aerodinámicas de la pala como para la sensibilidad del sensor si la conexión entre la membrana 15 y la superficie de la pala no es continua, ya que esto puede introducir obstrucciones o impedimentos en el flujo de aire.
- La membrana 15 se dispone de manera que es sensible a cambios en flujo de aire en la superficie del componente de turbina eólica. Por tanto, es relativamente fina, en algunas realizaciones de entre 0,5 y 2 mm, y está tensada de modo que el flujo de aire turbulento sólo dará como resultado un pequeño movimiento de la superficie de la membrana. Se produce un patrón de interferencia iluminando con luz la membrana con el fin de medir el desplazamiento de la membrana. Por tanto, en la práctica se ha encontrado ventajoso un intervalo de movimiento de la membrana del orden de varios μm , debido a la longitud de onda de la luz usada. La elección del material de la membrana es crítica para garantizar que es adecuada para la medición. Un material que es demasiado ligero y flexible será demasiado sensible a cambios en el flujo de aire incluso en condiciones laminares y no será adecuado para distinguir flujo turbulento y laminar. Por tanto, preferiblemente, el material es lo bastante fuerte y rígido para garantizar que sólo fuertes vibraciones (en el intervalo de 10 a 100 Hz) del flujo de aire turbulento dan una señal de interferencia suficiente.
- Es posible usar la superficie externa de la propia pala de rotor como la membrana 15. En este caso, el aparato de sensor 14 puede instalarse en la pala de rotor debajo de la superficie exterior, creando o no el alojamiento de sensor 11 una cavidad sellada para el aparato. Si el sensor 10 se instala en la pala de rotor u otro componente de turbina eólica, tal como una unidad separada, entonces se han encontrado adecuado un orificio de 30 a 100 mm de diámetro para albergar el alojamiento de sensor 11 y el aparato 14.
- A continuación se explicará en más detalle la construcción interna del aparato de sensor 14. El aparato de sensor 14 comprende una fuente de luz 16 dirigida a la membrana 15. Cuando es posible, es ventajoso evitar el uso de componentes eléctricos en palas de rotor dado que son más susceptibles a resultar dañados por rayos. Por tanto, la fuente de luz 16 comprende preferiblemente una fibra óptica 17 conectada a una fuente de luz optoelectrónica, tal como un fotodiodo o un láser, ubicada de manera remota en el buje de pala de rotor. En esta realización la fuente de luz 16 constituye el extremo expuesto de la fibra óptica 17 y una montura adecuada para soportar la fibra en la cavidad del sensor y garantizar que está dirigida correctamente a la membrana 15.
- En la figura 3, la fuente de luz 16 que comprende la fibra óptica 17 también actúa como receptor para luz que se refleja de vuelta desde la membrana 15. Por tanto, la fuente de luz 16 está dispuesta en perpendicular a la membrana 15 de modo que al menos una parte de la luz reflejada desde la membrana incidirá en el extremo abierto de la fibra óptica. El aparato 14 comprende opcionalmente una o más lentes 18 previstas entre la fibra óptica 17 y la membrana 15. De esta manera, un haz de luz 19 emitido desde la fibra 17 puede concentrarse en un haz más estrecho incidente sobre la membrana y el haz reflejado de vuelta puede concentrarse al menos parcialmente en el extremo de la fibra 17.
- El aparato 14 también puede comprender un espejo parcialmente reflectante 20, ubicado entre la membrana y la fibra óptica 17. De esta manera, la fibra óptica recibirá luz reflejada de vuelta tanto desde el plano del espejo 20 como también desde el plano de la membrana 15. Si se instalan una o más lentes 18, el espejo parcialmente reflectante 20 puede ubicarse ventajosamente entre la membrana 15 y las una o más lentes 18. El aparato 14 puede fijarse dentro de la cavidad 13 mediante conexiones adecuadas a las paredes del alojamiento 12.
- Se apreciará que algunas reflexiones internas de la luz en la fibra óptica 17 se producirán en la superficie de contacto de la fibra con el aire en la fibra 17. Como resultado, incluso sin el espejo parcial 20, puede producirse un patrón de interferencia usando únicamente la fibra óptica 17 y la superficie de la membrana 15. Sin embargo, la cantidad de luz sometida a reflexión interna es tan sólo de alrededor del 4% del total. Aunque esto es suficiente para producir una señal de referencia útil para interferir con la señal del sensor de la membrana 15, en algunas realizaciones es útil proporcionar una señal de referencia no reflejada más fuerte. Dado que la reflexión desde el espejo parcial es de alrededor del 40 al 50%, y la reflexión desde la membrana 15 de un orden de magnitud similar, el espejo parcial proporciona una señal de referencia y de sensor de magnitud similar. También permite usar fuentes de luz que no son especialmente potentes, haciendo así que el sensor sea más económico de producir. En este caso, la interferencia más significativa se produce en el espejo parcial, aunque como antes, todavía se producirá interferencia en la superficie de contacto de la fibra con el aire.
- Ubicar el espejo parcialmente reflectante 20 en la cavidad del sensor 13 es ventajoso, dado que quiere decir que

todos los componentes que es probable que requieran instalación y mantenimiento están ubicados juntos en la misma ubicación que el componente. Alternativamente, el espejo parcialmente reflectante puede omitirse de la cavidad y ubicarse en su lugar en el trayecto de la fibra óptica 17, tal como se describirá a continuación. Esto puede ser útil si se desea ahorrar espacio en la cavidad del sensor 13.

5 En el sensor descrito anteriormente con referencia a la figura 3, se usa una única fibra óptica 17 para formar un único par sensor de receptor y fuente de luz. La interferencia puede producirse en la cavidad 13 tal como se ha descrito anteriormente, o bien en el espejo o bien en la superficie de contacto de la fibra, o incluso en una ubicación alejada de la cavidad, si la señal devuelta se interfiere con una señal de luz de referencia.

10 A continuación se describirá una realización alternativa con referencia a la figura 4. En la figura 4 el aparato de sensor 14 comprende una fibra óptica de fuente de luz 21 y 23 y una fibra óptica de recepción de luz 22 y 24. Las fibras ópticas están normalmente inclinadas de modo que el haz de una fibra 21 se refleja por la membrana 15 e incide posteriormente en la otra fibra 22. Tal como antes, la luz que incide en la membrana 15 experimenta un cambio en la longitud de trayecto como resultado del movimiento de la membrana con respecto a la cavidad del sensor. Esta luz se recibe entonces por la otra fibra 22 y se interfiere con una parte no reflejada o de referencia de la luz, con el fin de producir un patrón de interferencia. En la figura 4, la luz se transmite hacia y desde la cavidad del sensor por medio de las diferentes fibras ópticas 23 y 24.

Pueden implementarse otras disposiciones de sensor adecuadas y se le ocurrirán al experto.

20 Los sensores de turbulencia mostrados en las figuras 3 ó 4 son parte de un sistema de control y detección de turbina eólica 40 más grande tal como se muestra en la figura 5. El sistema de control y detección de turbina 40 comprende una o más fuentes de luz 41, tal como un láser o fotodiodos, acopladas a uno o más mezcladores ópticos 42. El mezclador óptico por ejemplo puede usarse para proporcionar mezclado de la luz de señal reflejada y luz de referencia no reflejada en casos en los que no se usa el espejo parcial 20 en la cavidad del sensor.

25 Se conectan fibras ópticas 43 entre los uno o más mezcladores ópticos 42 y sensores de turbulencia 44 respectivos. Los sensores de turbulencia 44 pueden ser, por ejemplo, los ilustrados en las figuras 3 y 4 anteriores, en cuyo caso las fibras 43 corresponden a las fibras 17, 23 y 24 tal como se muestra en las figuras. Adicionalmente, las fibras 43 llevan señales de luz reflejadas desde los sensores de turbulencia de vuelta hasta el mezclador óptico 42.

30 Tal como se muestra en la figura 5, una pluralidad de sensores 44 están distribuidos preferiblemente en varias ubicaciones diferentes a lo largo de las superficies de sotavento o barlovento de las palas de turbina eólica. El número de sensores por pala puede ser de tres o mayor, por superficie de pala, por ejemplo. De esta manera, el flujo de aire sobre la superficie de la pala puede detectarse de manera precisa y usarse para controlar el paso de pala en tiempo real. Esto se explicará en más detalle a continuación.

35 El mezclador óptico 42 está acoplado a un dispositivo de detección de luz 45. Para cada sensor de turbulencia, el dispositivo de detección de luz recibe al menos dos señales de luz, siendo la primera una señal de luz que se ha reflejado desde la membrana 15 y siendo la segunda una señal que se ha reflejado, no por la membrana 15, sino por el espejo parcialmente reflectante 20, o bien en la cavidad del sensor 13 o bien en el trayecto óptico entre la fuente de luz 41 y el sensor de luz 45. Una ubicación adecuada es por supuesto el mezclador óptico 42, en el que en lugar de un espejo, una parte de la luz de la fuente de luz puede simplemente desviarse directamente al sensor de luz 45.

40 El sensor de luz 45 está conectado a su vez a un convertidor analógico-digital (ADC) 46 que está conectado a un procesador 47 para procesar los resultados. El procesador 47 tiene preferiblemente acceso a una unidad de temporizador 48 y una memoria 49. El procesador 47 también puede estar conectado a un controlador de paso de pala de turbina 50.

45 Muchas turbinas eólicas, especialmente las instaladas en parques eólicos, se monitorizan y controlan mediante sofisticados sistemas de control, tales como el sistema de adquisición de datos y control supervisor SCADA. Por tanto, se apreciará que en la práctica, el procesador 47 estará normalmente conectado a un sistema de control mayor y puede tener acceso a datos o información recopilados en la turbina eólica distintos de los recibidos del sensor de turbulencia. Sin embargo, no se necesita que esto sea siempre así, tal como cuando las turbinas se instalan como unidades individuales autónomas.

50 Preferiblemente la fuente de luz 41, el sensor de luz 45, el ADC 46 y el procesador 47 se alojan por separado de la pala de rotor, o bien en el buje de pala de rotor o bien en la góndola, donde pueden protegerse frente a rayos mediante una disposición adecuada de conductores de rayos o protección eléctrica.

55 Se apreciará que la fase de la señal recibida desde el espejo parcialmente reflectante estará determinada solamente por la fase de la fuente de luz 41 y que, por tanto, puede usarse como señal de referencia. Sin embargo, la fase de la señal que se ha reflejado por la membrana variará según la longitud de trayecto óptico entre las fibras ópticas emisoras y receptoras 17, 23 ó 24 en la cavidad del sensor 13. A su vez, esta longitud de trayecto se ve afectada por movimiento o vibración de la membrana 15 provocado por el flujo de aire a través de la superficie exterior de la pala. Por tanto, permitiendo que las dos señales interfieran entre sí y detectando cambios en la fase de las dos señales, puede generarse información sobre la calidad del flujo de aire.

En condiciones de funcionamiento ideales, el flujo de aire a lo largo de la superficie de la pala de rotor será laminar, dando como resultado poca o ninguna alteración de la membrana 15. El flujo de aire turbulento provocado por el paso de la pala que induce condiciones de tipo de pérdida aerodinámica dará como resultado un movimiento repentino e impredecible de la membrana 15 y cambios asociados en la fase de la luz reflejada de vuelta desde la membrana con respecto a la fase de referencia.

La figura 6 es un gráfico lineal que ilustra esquemáticamente una señal de sensor desarrollada por el procesador 47 a lo largo del tiempo, basándose en la interferencia entre las señales de luz de referencia y del sensor. Comenzando a la izquierda del diagrama, la región plana del gráfico corresponde a períodos en los que la membrana no se está moviendo. Por tanto, la diferencia de fase entre la señal del sensor y la señal de referencia es constante y el gráfico lineal es plano. Un movimiento moderado de la membrana bajo la influencia de presión atmosférica externa se reflejará mediante pequeños cambios en la fase y cambios asociados en la intensidad de la señal de luz resultante debido a la interferencia.

Si la membrana se mueve adicionalmente, entonces la fase entre la señal de referencia y la señal del sensor cambiará y dará como resultado cambios adicionales en la intensidad. Si la magnitud del movimiento de la membrana es suficientemente grande, se observará una variación sinusoidal en la intensidad de la luz a medida que la diferencia de fase aumenta a través de oscilaciones de fase completas. La variación sinusoidal continuará durante el período en el que la membrana está moviéndose, e invertirá el sentido a medida que se invierte el sentido de movimiento de la membrana. El tiempo que le lleva a la intensidad variar de pico a pico indica adicionalmente el tiempo que le lleva a la membrana moverse la mitad de la distancia indicada por la longitud de onda de la señal de luz.

Por tanto, el gráfico de intensidad de la figura 6 que se desarrolla mediante el procesador puede usarse para dar una indicación de las condiciones de flujo de aire a lo largo de la superficie de la pala. Un flujo de aire turbulento dará como resultado sacudidas de la pala y la membrana de sensor, y el gráfico correspondiente de intensidad indicará movimientos caóticos y frecuentes de la membrana. Esto estará caracterizado porque ocurren muchas variaciones sinusoidales de la señal y relativamente pocos períodos en los que la intensidad esencialmente no está cambiando o está cambiando lentamente. Además, es probable que las propias variaciones sinusoidales tengan mayores frecuencias de oscilación, que indican un movimiento de la membrana más rápido que en otros momentos.

Por otro lado, un flujo de aire laminar o condiciones de fondo no turbulentas darán como resultado poco o menos movimiento de la membrana. Por tanto, el gráfico de intensidad estará caracterizado por más períodos más largos de líneas planas, variaciones moderadas o períodos en los que aunque se observa una variación sinusoidal, ésta tiene una longitud de onda larga que indica que está ocurriendo de manera relativamente lenta.

Las regiones lineales planas del gráfico que representan la ausencia de movimiento de la membrana pueden o no indicar siempre la misma intensidad de luz. En la práctica, aunque la posición de reposo de la membrana puede determinarse en gran medida al menos en parte mediante la tensión de la membrana y el material del que está hecha la membrana, la fuerza instantánea ejercida por el flujo de aire determinará en última instancia la posición instantánea.

El procesador 47 analiza la intensidad de las señales de luz recibidas en el ADC 46, para determinar la calidad presente de flujo de aire a lo largo de la pala. Puede realizar esto usando técnicas de procesamiento matemáticas adecuadas para determinar la cantidad de variación en la señal de luz, tal como la mostrada en la figura 5. En otras realizaciones, puede usar técnicas de red neurológica para desarrollar una memoria del aspecto visual de los patrones de intensidad para flujo de aire turbulento y laminar, y determinar las condiciones actuales de flujo de aire mediante la comparación con patrones modelo previamente desarrollados. Tales patrones pueden almacenarse en una memoria 49.

Así como identificar si los resultados de un sensor 44 individual indican turbulencia, el procesador 47 tiene la función adicional de evaluar el rendimiento de funcionamiento actual de las palas de turbina eólica basándose en los resultados recogidos de la pluralidad de sensores 44 a lo largo del tiempo. Se apreciará que puede proporcionarse un procesador separado para este fin, pero que por motivos de simplicidad en la presente descripción, se supondrá que el procesador 47 realiza ambas funciones.

Haciendo referencia a la figura 7, se describirá a continuación el sistema de control de paso previsto en un ejemplo de la presente invención. La figura 7 muestra una vista del lado de sotavento de una pala de turbina eólica. Hay sensores de turbulencia 44 tal como se describieron anteriormente dispuestos a lo largo de la superficie de la pala en una pluralidad de ubicaciones. Aunque es posible en algunas realizaciones proporcionar los sensores en ubicaciones separadas uniformemente a lo largo de la superficie de la pala, en la práctica es suficiente si se disponen para dar al menos alguna cobertura en las direcciones longitudinal y lateral. Por tanto, tal como se muestra en la figura 7 los sensores se proporcionan en al menos una disposición lineal a lo largo del borde de salida de la pala y en varias disposiciones lineales laterales dispuestas a lo largo de la longitud de la pala. La figura 8 ilustra una vista en sección transversal a través de una de las disposiciones lineales laterales que muestra sensores ubicados tanto en el lado de sotavento como en el de barlovento.

Los sensores se muestran como estando en general separados uniformemente, dado que esto permitirá recoger datos sobre el flujo de aire alrededor de toda la superficie de pala. Sin embargo, se apreciará que para detectar condiciones de tipo de pérdida aerodinámica, la zona de más interés es el lado de salida de sotavento de la pala. Por esta razón pueden montarse más sensores en esa región.

5 La figura 8 muestra una pala de turbina eólica en condiciones que representan flujo de aire esencialmente laminar, mientras que la figura 9 muestra el perfil de pala de la figura 8 en condiciones de tipo de pérdida aerodinámica. La zona sombreada mostrada encima y detrás de la pala es una zona de aire turbulento, no laminar resultante del paso mayor que el óptimo de la pala de turbina eólica en el flujo de aire. La salida de sensor procesada de los sensores en el lado de sotavento (superior) de la pala se muestra en la figura 10. Los sensores que indican turbulencia se indican mediante cruces en la tabla.

10 El procesador 47 se comunica con la unidad de control de paso 50 del sistema de control de turbina eólica e indica unas instrucciones de control de paso basándose en el número de sensores 44 que indican flujo de aire turbulento. El sistema de control de paso 50 también recibe una entrada desde un monitor de potencia (no mostrado) que mide la potencia de salida que se está generando mediante la turbina. En uso normal, el controlador de paso aumenta el paso al que se inclinan las palas en el viento con el fin de maximizar la potencia de salida y evita hacer que el paso sea demasiado grande e inducir una condición de pérdida aerodinámica.

15 Un control de paso de pala basado solamente en la potencia de salida puede ser lento en responder a cambios en la velocidad y el sentido del viento. Sin embargo, la entrada desde el procesador 47 proporciona un nivel de control más fino, más sensible, basándose en la condición de viento inmediata en la pala. Por tanto, cuando el número de sensores que indican turbulencia sobrepasa un valor predeterminado y sigue haciéndolo durante un período de tiempo predeterminado, el procesador 47 da instrucciones al controlador de paso 50 para reducir el paso hasta que el número de sensores de turbulencia que indican turbulencia disminuye por debajo del número predeterminado. De esta manera, puede controlarse el paso de la pala en tiempo real y ser sensible a la turbulencia medida del flujo de aire a lo largo de la pala.

20 En ejemplos adicionales, los datos de la pluralidad de sensores montados en la superficie de la pala pueden usarse para monitorizar el rendimiento de una pala de turbina eólica en tiempo real desde la perspectiva del diseño aerodinámico de las palas. Transmitiendo datos desde turbinas diferentes hasta un almacén central para su análisis, pueden recogerse suficientes datos sobre el rendimiento del flujo de aire de las palas de turbina eólica, permitiendo que se mejoren en futuros rediseños.

25 En aplicaciones alternativas, el sensor de turbulencia descrito anteriormente puede aplicarse al control de parámetros aerodinámicos de pala de rotor de turbina eólica adicionales tales como forma de pala de rotor y flujo de aire de pala de rotor. Esto se describirá brevemente a continuación.

30 La forma de una pala de rotor puede ajustarse dinámicamente usando una variedad de técnicas. Hasta cierto punto esto cambiará las propiedades del flujo de aire a lo largo de la pala y afectar directamente a la elevación experimentada por la pala también afectará a la potencia generada. Tales técnicas pueden usarse tanto con turbinas eólicas de control de paso como de control por pérdida aerodinámica según se desee. A continuación se analizan varias técnicas:

35 1) Flaps y alerones son regiones articuladas de la pala que pueden ajustarse según se necesite para cambiar el flujo de aire sobre la superficie de la pala. Aunque normalmente éstos están ubicados en el borde de salida de la pala de turbina, también pueden ubicarse en otras partes de la pala según se necesite. En este caso su efecto será más similar al de un deflector que actúa para reducir la elevación.

40 2) Micro-lengüetas son elementos accionable ubicados en la pala o en la superficie que pueden extenderse rápidamente en el flujo de aire para cambiar sus propiedades dinámicas. Pueden usarse para reducir el esfuerzo en la pala, amortiguar vibraciones así como aumentar la elevación.

45 3) Pueden usarse ranuras y aletas (slats) en la pala de la misma manera que en 1) y 2) anteriores. En otros diseños, también pueden activarse protuberancias cóncavas o convexas en la superficie de la pala para cambiar flujo de aire.

50 4) Pueden usarse huecos o cavidades rellenas de fluido dentro de la pala para cambiar la forma de la pala a medida que se rellenan con fluido o se vacían. En algunos diseños, puede aspirarse aire hacia el interior de la pala o expulsarse desde la misma para cambiar el flujo de aire. Los generadores de vórtice variables en la pala entran dentro de esta categoría.

5) también puede lograrse deformación de la forma de la pala o variación en la envergadura de pala mediante el control de los soportes estructurales subyacentes.

El sensor de turbulencia óptico descrito anteriormente puede usarse con cualquiera de los mecanismos de control descritos anteriormente.

55 El sensor descrito anteriormente es relativamente económico de producir y fácil de montar. Por tanto, pueden

instalarse sistemas de sensor que comprenden un gran número de sensores de manera relativamente sencilla tanto en turbinas nuevas como existentes. Además, la membrana puede pintarse del mismo color que la superficie de componente que la rodea para garantizar que el aspecto visual de la turbina eólica no se ve afectado.

5 Los ejemplos anteriores de la invención se refieren al control de las propiedades aerodinámicas de pala de turbina eólica. Se apreciará que el sistema de sensor también puede usarse para detectar la acumulación de hielo u otro material acumulado sobre la superficie de la pala. En este caso, los sensores estarán ubicados a lo largo de la superficie de la pala en una pluralidad de ubicaciones. Dado que el hielo, por ejemplo, tiende a acumularse en el borde de ataque de la pala de turbina eólica, pueden ubicarse más sensores a lo largo del borde de ataque que en otro lugar. Esto es contrario a la disposición de sensores ilustrativa mostrada en la figura 7. No sería problemático tener una membrana de sensor que siga la curva del borde de ataque. Dado que el hielo se acumula sobre los sensores de turbulencia ubicados en el borde de ataque, la membrana de sensor ya no podrá vibrar bajo la influencia del aire pasante y por tanto parecerá que la señal del sensor producida a partir de ese sensor está apantallada o es invariable. Por tanto, el procesador puede monitorizar cambios en la salida del sensor para tales cambios y usar esto para identificar una probable condición de acumulación de hielo. Además, dado que la acumulación de hielo en el borde de ataque afectará a la forma aerodinámica de la pala y es probable que lleve a un aumento de la turbulencia hacia el borde de salida, puede ser posible identificar acumulación de hielo a partir de diferentes respuestas de sensores en ubicaciones diferentes.

20 La descripción anterior sólo pretende ser ilustrativa de la invención definida por las reivindicaciones. Al experto en la técnica se le ocurrirán técnicas alternativas para implementar la invención. En una realización alternativa, el ADC 46 y la parte de detección de turbulencia del procesador puede sustituirse por un filtro analógico que pasa las altas frecuencias asociadas con deflexión rápida de la membrana 15 y un circuito que activa una salida si la cantidad de señal dentro de esas frecuencias sobrepasa un determinado límite o tasa de aparición.

25 Dado que las palas de rotor son propensas a recibir rayos, el dispositivo preferido emplea fibras ópticas como fuente de luz y como detector de luz en el alojamiento de sensor. Sin embargo, en realizaciones alternativas pueden usarse dispositivos optoelectrónicos tales como diodos emisores de luz y fotodetectores directamente dentro del alojamiento de sensor, con conexiones eléctricas y de señalización apropiadas a un controlador y fuente de potencia. Por supuesto, en determinadas realizaciones puede resultar apropiado instalar la electrónica de control y los sistemas de potencia localmente o en el propio sensor.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de control de pala de rotor de turbina eólica (40), que comprende:
una pluralidad de sensores (44) para detectar flujo de aire turbulento a lo largo de una superficie de pala de rotor;
- 5 un controlador (47) para recibir datos desde la pluralidad de sensores (44) y basándose en la detección de flujo de aire turbulento controlar un parámetro aerodinámico de la pala de rotor, caracterizado por que cada uno de la pluralidad de sensores (44) comprende:
una membrana de sensor (15) para detectar la turbulencia de flujo de aire a través de una superficie de la pala de turbina eólica (5), y en el que la membrana de sensor (15) es solidaria con la superficie y cubre al menos parte de una cavidad (13) en la pala de turbina eólica (5);
- 10 una fuente de luz (16) ubicada en la cavidad para iluminar la superficie de la membrana de sensor (15) dentro de la cavidad;
un detector de luz (16) ubicado en la cavidad para detectar luz reflejada desde la superficie de la membrana y para proporcionar una salida a un procesador, determinando el procesador a partir de la salida un valor de turbulencia para el flujo de aire a lo largo de la membrana de sensor (15).
- 15 2. Sistema de control (40) según la reivindicación 1, en el que el parámetro aerodinámico es el ángulo de paso de la pala de rotor.
3. Sistema de control (40) según la reivindicación 2, que comprende:
un sensor de potencia para detectar la potencia de salida de la turbina eólica y emitir una señal hacia el controlador de paso (50), en el que el controlador de paso (50) controla adicionalmente el paso de las palas de rotor basándose en la detección de potencia de salida de turbina eólica.
- 20 4. Sistema de control (40) según la reivindicación 3, en el que el controlador de paso (50) controla el paso de las palas de rotor para minimizar la turbulencia y maximizar la potencia de salida de turbina eólica.
5. Sistema de control (40) según cualquier reivindicación anterior, en el que el controlador reduce el paso de la pala de rotor en el viento, cuando un número predeterminado de sensores indican flujo de aire turbulento.
- 25 6. Sistema de control (40) según la reivindicación 1, en el que el parámetro aerodinámico es la forma de la pala de rotor.
7. Sistema de control (40) según la reivindicación 1, en el que el parámetro aerodinámico es el flujo de aire a través de la pala.
- 30 8. Sistema de control (40) según cualquier reivindicación anterior, en el que la pluralidad de sensores 44 están ubicados en la superficie de succión de la pala.
9. Sistema de control (40) según la reivindicación 8, en el que la pluralidad de sensores (44) están ubicados en mayor número hacia el borde de salida del lado de succión de la pala que en otras zonas.
- 35 10. Sistema de control (40) según cualquier reivindicación anterior, en el que la fuente de luz (16) y el detector de luz (16) en la cavidad son fibras ópticas (17) conectadas a una fuente de luz optoeléctrica.
11. Sistema de control (40) según cualquier reivindicación anterior, que comprende un sumador para sumar luz reflejada desde la superficie de la membrana (15) a una señal de luz de referencia para dar un patrón de interferencia que indica desplazamiento de la membrana.
- 40 12. Sistema de control (40) según la reivindicación 11, en el que el sumador comprende un espejo parcial (20) ubicado en la cavidad del sensor (13) para reflejar una parte de la luz desde la fuente de luz (16) hasta el detector de luz (16) y proporcionar la señal de luz de referencia.
13. Sistema de control (40) según cualquier reivindicación anterior, en el que la cavidad (13) está sellada.
14. Sistema de control (40) según la reivindicación 13, en el que la cavidad (13) está rellena con un gas distinto del aire.
- 45 15. Sistema de control (40) según cualquier reivindicación anterior, en el que la membrana de sensor (15) está formada de un material diferente del que está formada la superficie del componente de turbina eólica.
16. Sistema de control (40) según la reivindicación 11, que comprende un procesador (47) para analizar las variaciones sinusoidales en el patrón de interferencia a lo largo de un periodo de tiempo predeterminado

- para determinar si el flujo de aire es turbulento.
17. Sistema de control (40) según cualquier reivindicación anterior, que comprende una memoria (49) para almacenar datos de la pluralidad de sensores (44) y generar un registro de condiciones de flujo de aire sobre la superficie de la pala de turbina eólica.
- 5 18. Turbina eólica que comprende el sistema de control (40) según cualquier reivindicación anterior.
19. Método implementado en ordenador para controlar una pala de rotor de turbina eólica, que comprende:
- a) recibir datos desde una pluralidad de sensores (44) que detectan flujo de aire turbulento a lo largo de una superficie de pala de rotor;
- 10 b) basándose en los datos de los sensores (44), controlar un parámetro aerodinámico de las palas de rotor, caracterizado por que cada uno de la pluralidad de sensores comprende:
- una membrana de sensor (15) para detectar la turbulencia de flujo de aire a través de una superficie de la pala de turbina eólica, y en el que la membrana de sensor (15) es solidaria con la superficie y cubre al menos parte de una cavidad (13) en la pala de turbina eólica;
- 15 una fuente de luz (16) ubicada en la cavidad (13) para iluminar la superficie de la membrana de sensor (15) dentro de la cavidad (13);
- un detector de luz (16) ubicado en la cavidad (13) para detectar luz reflejada desde la superficie de la membrana (15) y para proporcionar una salida a un procesador, determinando el procesador a partir de la salida un valor de turbulencia para el flujo de aire a lo largo de la membrana de sensor (15).
- 20 20. Método según la reivindicación 19, que comprende controlar la salida de la fuente de luz y analizar la salida del detector de luz.
21. Método según la reivindicación 19 ó 20, que comprende:
- c) detectar la potencia de salida de la turbina eólica y emitir una señal; en el que la etapa b) comprende adicionalmente controlar el paso de las palas de rotor basándose en la detección de potencia de salida de turbina eólica.
- 25 22. Método según la reivindicación 19, en el que la etapa b) comprende controlar el paso de las palas de rotor para minimizar la turbulencia y maximizar la potencia de salida de turbina eólica.
23. Producto de programa informático que comprende un medio legible por ordenador en el que se almacena código informático, en el que cuando se ejecuta el código informático mediante un procesador (47) se provoca que el procesador realice las etapas de:
- 30 a) recibir datos desde una pluralidad de sensores (44) para detectar flujo de aire turbulento a lo largo de una superficie de pala de rotor; y
- b) basándose en los datos de los sensores (44) controlar un parámetro aerodinámico de las palas de rotor, caracterizado por que cada uno de la pluralidad de sensores comprende:
- 35 una membrana de sensor (15) para detectar la turbulencia de flujo de aire a través de una superficie de la pala de turbina eólica, y en el que la membrana de sensor (15) es solidaria con la superficie y cubre al menos parte de una cavidad (13) en la pala de turbina eólica;
- una fuente de luz (16) ubicada en la cavidad (13) para iluminar la superficie de la membrana de sensor (15) dentro de la cavidad (13);
- 40 un detector de luz (16) ubicado en la cavidad (13) para detectar luz reflejada desde la superficie de la membrana (15) y para proporcionar una salida a un procesador, determinando el procesador a partir de la salida un valor de turbulencia para el flujo de aire a lo largo de la membrana de sensor (15).
24. Producto de programa informático según la reivindicación 23, en el que cuando se ejecuta el código informático mediante un procesador, se provoca que el procesador realice las etapas de controlar la salida de la fuente de luz y analizar la salida del detector de luz.
- 45 25. Producto de programa informático según la reivindicación 23 ó 24, en el que cuando se ejecuta el código informático mediante un procesador, se provoca además que el procesador:
- c) detecte la potencia de salida de la turbina eólica y emita una señal; y en el que la etapa b) comprende adicionalmente controlar el paso de las palas de rotor basándose en la detección de potencia de salida de turbina eólica.

26. Producto de programa informático según la reivindicación 23, en el que la etapa b) comprende controlar el paso de las palas de rotor para minimizar la turbulencia y maximizar la potencia de salida de turbina eólica.

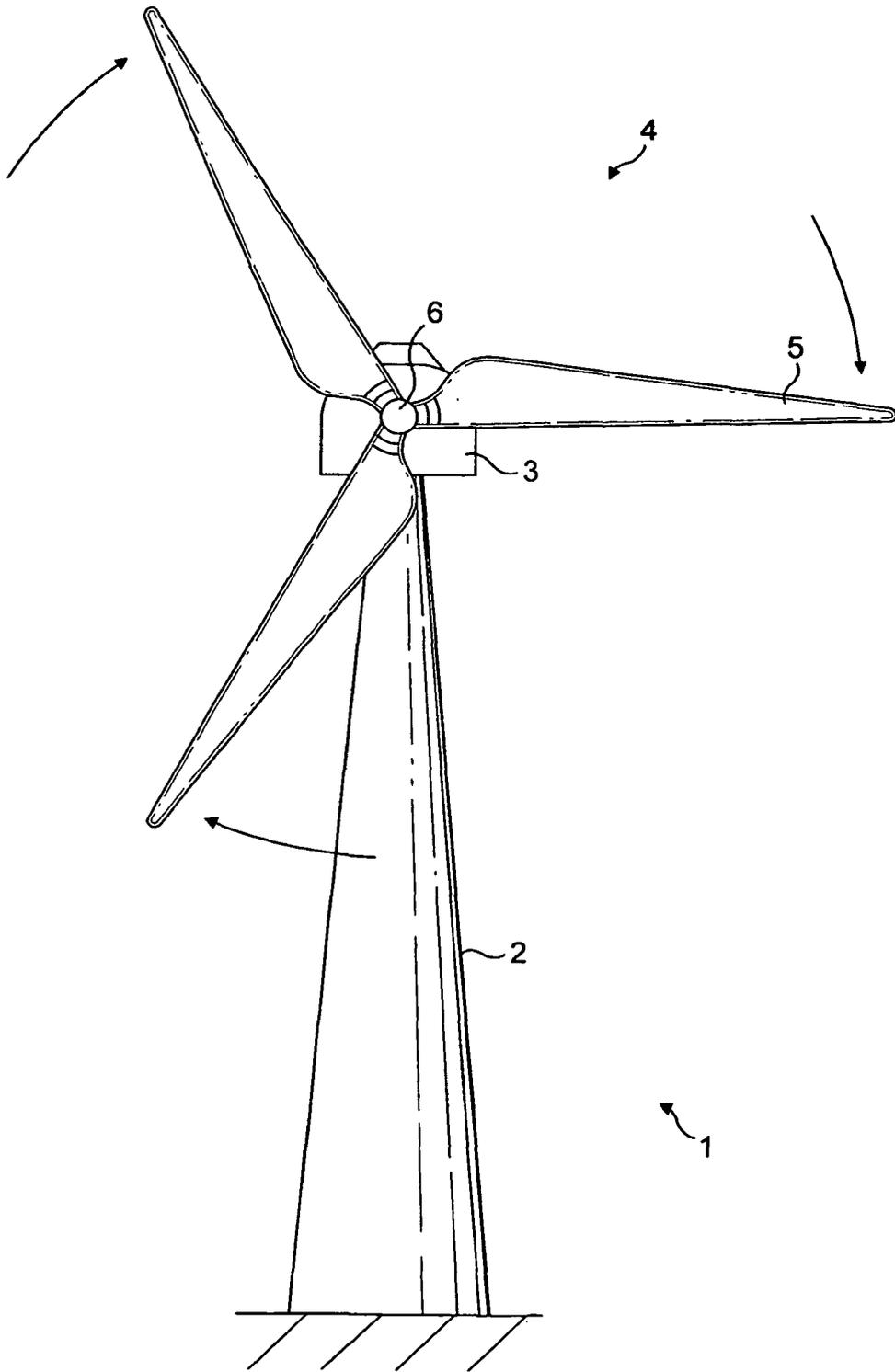
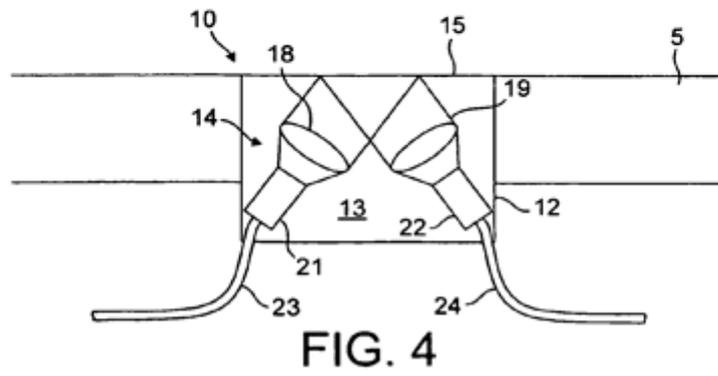
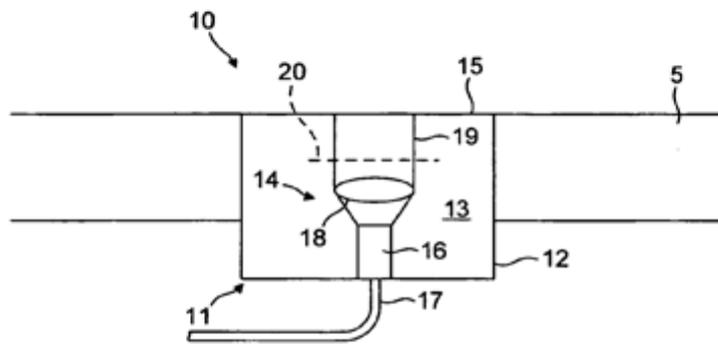
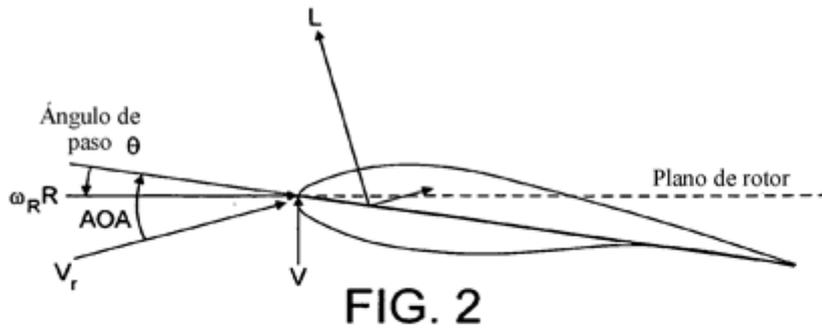


FIG. 1



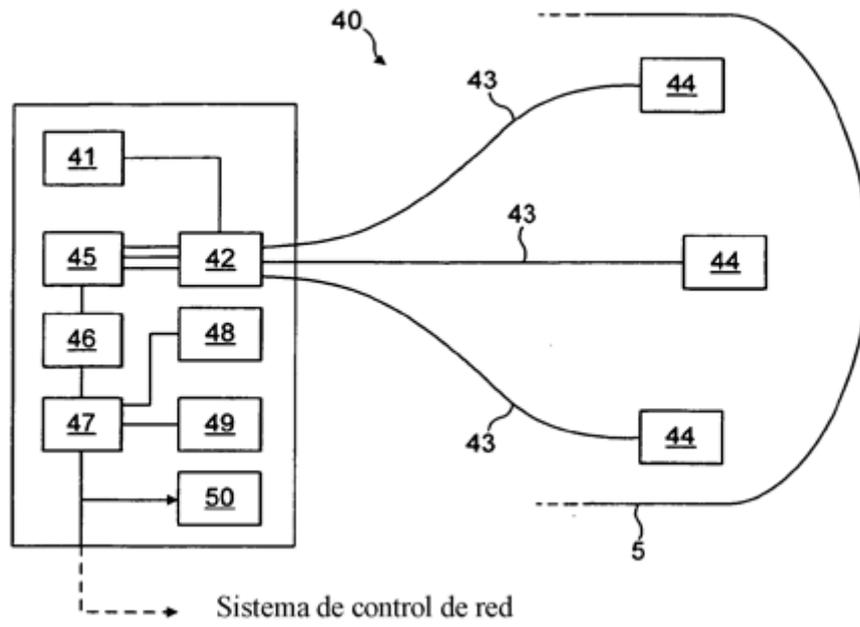


FIG. 5

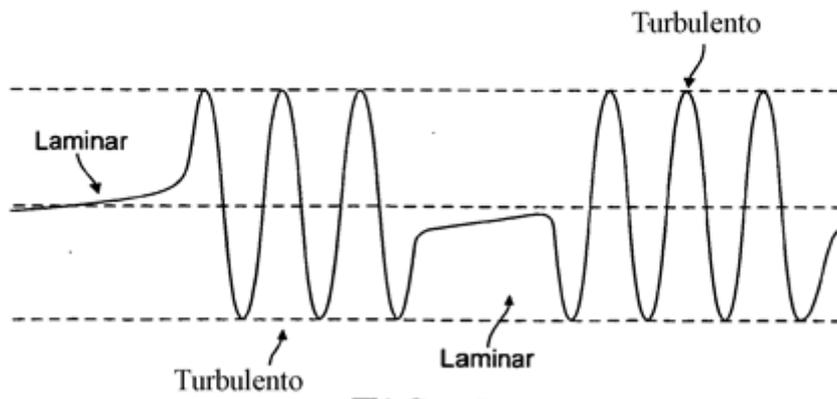


FIG. 6

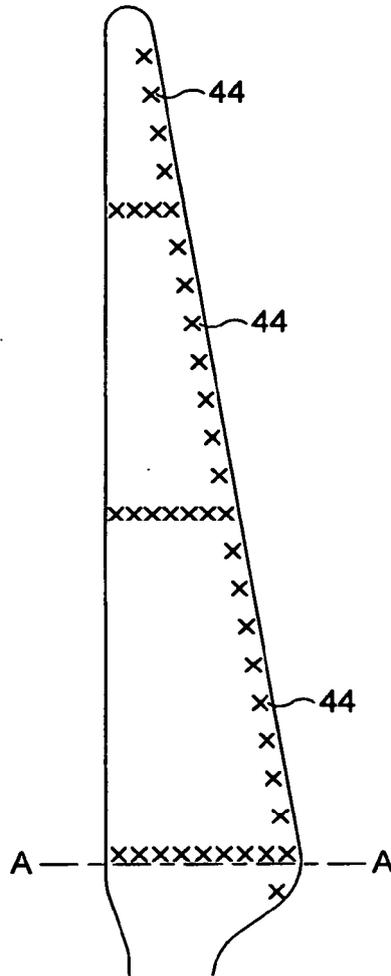


FIG. 7

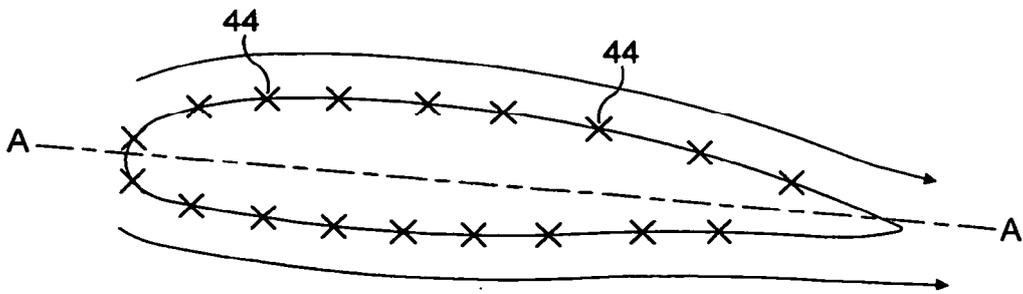


FIG. 8

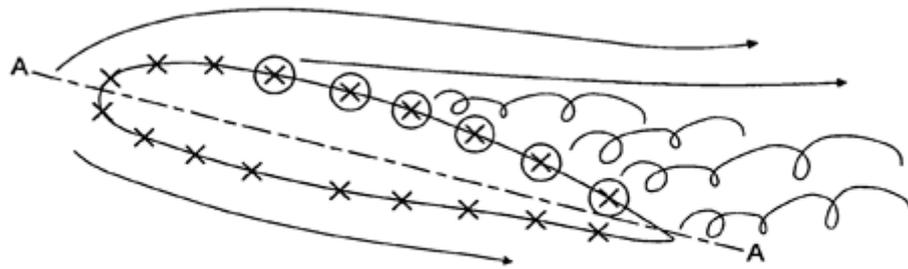
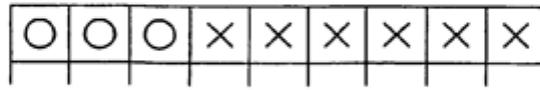


FIG. 9



O Laminar
X Turbulento

FIG. 10