

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 823 800**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

G01P 5/14 (2006.01)

G01P 13/02 (2006.01)

G01P 5/165 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.04.2012** **E 12164472 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.07.2020** **EP 2653721**

54 Título: **Sistema de medición de turbinas eólicas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
10.05.2021

73 Titular/es:

SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY A/S
(100.0%)
Borupvej 16
7330 Brande, DK

72 Inventor/es:

ANDERSEN, JIMMI y
JENSEN, JAN MARTIN

74 Agente/Representante:

LOZANO GANDIA, José

ES 2 823 800 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

Sistema de medición de turbinas eólicas

- 5 La invención describe un sistema de medición para una turbina eólica; un cono de la hélice para una turbina eólica; una turbina eólica que comprende un sistema de medición; y un procedimiento para controlar una turbina eólica.
- 10 Una turbina eólica solo puede funcionar de manera eficiente si puede responder a las condiciones momentáneas del viento. Por ejemplo, la energía máxima solo se puede extraer del viento cuando la turbina eólica está orientada esencialmente directamente hacia el viento. En esta posición, la turbina eólica puede extraer la mayor cantidad de energía cinética del viento y convertirla en energía eléctrica. Con este fin, la mayoría de las turbinas eólicas están equipadas con un accionamiento de guiñada, por ejemplo, entre la góndola de la turbina eólica y la torre, de modo que la góndola y, por lo tanto, también el buje y las palas del rotor, se pueden hacer girar en un plano de guiñada sobre un
- 15 eje vertical que se extiende a través de la torre. Es importante que el accionamiento de guiñada se controle en respuesta a cualquier alteración en la dirección del viento. Por lo tanto, una turbina eólica, en general, también está equipada con un equipo de medición del viento, como una veleta, para medir la dirección del viento, y un sensor de velocidad del viento, como un anemómetro mecánico o sónico. Dado que estos dispositivos deben estar expuestos a un flujo de aire para generar una señal de salida, solo se pueden colocar en una parte estacionaria de la turbina eólica, como la góndola y, preferentemente, en una posición expuesta, por ejemplo, en la parte superior de la góndola. La salida de una veleta se alimenta, en general, a una unidad de accionamiento de guiñada para ajustar el ángulo de guiñada para la dirección estimada del viento.
- 20 Sin embargo, cuando se utilizan sensores colocados en la góndola, los datos del viento medidos son inexactos debido a la turbulencia generada por las palas del rotor a barlovento y su sombra cíclica del viento. Por lo tanto, dicho equipo no puede medir la dirección del viento con precisión y no se puede utilizar para generar un ángulo de guiñada preciso. Por lo tanto, utilizando el sistema de la técnica anterior, nunca se puede determinar con precisión si el cono de la hélice está orientado directamente al viento. Otros enfoques se describen en el documento WO 2005/092435 A1, que considera sensores de presión montados a una distancia del cono de la hélice para medir la presión por encima de
- 25 una capa límite; y el documento EP 2 267 301 A1, que enseña cómo medir la componente horizontal de la velocidad del aire que viaja de un lado del buje a otro a través de un canal.
- Incluso un pequeño error en la estimación de la dirección del viento da como resultado un correspondiente "error de ángulo de guiñada", y el posicionamiento relativamente ineficaz del cono de la hélice y, por lo tanto, también de las palas del rotor da como resultado una potencia de salida de la turbina eólica inferior a la óptima. El error del ángulo de guiñada se define, en general, como la diferencia entre un vector que indica la dirección media momentánea del viento y un eje longitudinal del cono de la hélice/góndola. Idealmente, el error del ángulo de guiñada es cero y la dirección media momentánea del viento coincide con el eje longitudinal del cono de la hélice/góndola.
- 35 Un error de ángulo de guiñada no es solo un problema en lo que respecta a la producción de energía de la turbina eólica. Otro problema es que los componentes de la turbina eólica, como los cojinetes y las palas del rotor, pueden estar sujetos a cargas asimétricas, de modo que la avería como resultado de la fatiga del material puede convertirse en un problema, con los consiguientes costes de mantenimiento y reparación. Por supuesto, cualquier equipo de medición ubicado en el exterior de la góndola también está expuesto a condiciones climáticas severas, por lo que también son necesarios procedimientos de mantenimiento costosos.
- 40 Por lo tanto, es un objetivo de la invención proporcionar una forma para que un controlador de un componente de turbina eólica responda con mayor precisión a las condiciones del viento.
- 45 Este objetivo se logra mediante el sistema de medición de la turbina eólica de la reivindicación 1; mediante el cono de la hélice de la reivindicación 8; mediante la turbina eólica de la reivindicación 10; y mediante el procedimiento de la reivindicación 12 de controlar una turbina eólica.
- 50 De acuerdo con la invención, el sistema de medición para una turbina eólica, que comprende una serie de palas de rotor montadas en un cono de la hélice en la parte delantera de una góndola y dispuestas para girar en un plano del rotor, se encuentra detrás de una superficie de barlovento del cono de la hélice y comprende un sensor de presión diferencial para determinar una presión en varios puntos de medición de la presión, en el que los puntos de medición de la presión están dispuestos en una superficie de barlovento del cono de la hélice en frente del plano del rotor; un módulo de análisis para generar una señal de control en base a las mediciones de presión; y medios de salida para emitir la señal de control a un controlador de la turbina eólica. El sistema de medición comprende un primer conducto hermético que va desde una abertura en un primer punto de medición de la presión hasta el sensor de presión diferencial y un segundo conducto hermético que va desde una abertura en un segundo punto de medición de la presión hasta el sensor de presión diferencial.
- 55 Utilizando la convención aceptada, "delante del plano del rotor" significa en el lado de barlovento del plano del rotor, mientras que la expresión "detrás del plano del rotor" significa a sotavento del plano del rotor, es decir, el lado de la
- 60
- 65

góndola del plano del rotor.

La "superficie de barlovento" del cono de la hélice es la superficie que está orientada hacia el viento cuando la turbina eólica está en funcionamiento. La invención se basa en la idea de que la distribución de la presión sobre la superficie de barlovento del cono de la hélice dependerá de las condiciones momentáneas del viento. El término "distribución de la presión" debe entenderse que significa que la presión ejercida por el viento en la superficie de barlovento del cono de la hélice no será uniforme, y habrá un gradiente de presión entre puntos de la superficie de barlovento del cono de la hélice.

Un sensor de presión diferencial toma lecturas de presión simultáneamente de dos puntos de medición para determinar una diferencia de presión entre esos dos puntos. Una ventaja del sistema de medición de acuerdo con la invención es que las mediciones recogidas por el dispositivo de medición no pueden verse afectadas por la turbulencia generada por las palas del rotor, ya que los puntos de medición de la presión se encuentran delante o a barlovento del plano del rotor. Estas mediciones se "desacoplan" de manera efectiva de cualquier influencia de las palas del rotor, y cualquier controlador que utilice estas mediciones para controlar un componente de la turbina eólica puede responder con precisión a las condiciones de viento momentáneas o predominantes. El "componente de turbina eólica" debe entenderse como cualquier componente o parte que deba responder a las condiciones del viento, y el "controlador" debe entenderse como un controlador de dicho componente, por ejemplo, el "componente" puede ser un anillo de guiñada y un "controlador" puede ser un motor paso a paso u otro dispositivo de accionamiento que haga girar el anillo de guiñada.

De acuerdo con la invención, el cono de la hélice para una turbina eólica comprende una serie de aberturas en una superficie de barlovento del cono de la hélice, en la que una abertura está conectada a un dispositivo de medición de un sistema de medición, ubicado detrás de la superficie de barlovento, para determinar una presión en esa abertura.

Una ventaja del cono de la hélice de acuerdo con la invención es que, simplemente formando una o más aberturas en su superficie de barlovento, el cono de la hélice puede servir para el propósito adicional de permitir que el sistema de medición realice mediciones de presión, de modo que se puede ahorrar el coste de montar dispositivos mecánicos o sónicos en la góndola de la turbina eólica.

De acuerdo con la invención, la turbina eólica comprende varias palas de rotor montadas en un cono de la hélice en la parte delantera de una góndola y dispuestas para girar en un plano del rotor, y comprende, además, un sistema de medición de este tipo. Por lo tanto, la turbina eólica de la invención está equipada para responder a alteraciones en las condiciones del viento, por ejemplo, alteraciones en la velocidad o en la dirección del viento, de una manera rápida y sin complicaciones, como se expone a continuación.

Una ventaja de la turbina eólica de acuerdo con la invención es que no necesita ningún dispositivo mecánico o sónico, tal como una veleta o un anemómetro montado en el exterior de la góndola para determinar la dirección del viento durante el funcionamiento de la turbina eólica, mientras que el sistema de medición de acuerdo con la invención permite que cualquier controlador responda de forma rápida y precisa a las condiciones momentáneas de viento.

De acuerdo con la invención, el procedimiento de control de una turbina eólica, con varias palas de rotor montadas en un cono de la hélice en la parte delantera de una góndola y dispuestas para girar en un plano del rotor, comprende los pasos de disponer un sistema de medición en una cavidad detrás una cara de barlovento del cono de la hélice, cuyo sistema de medición comprende un sensor de presión diferencial; usar el sensor de presión diferencial para determinar una presión en varios puntos de medición de la presión, en el que los puntos de medición de la presión están dispuestos en la superficie de barlovento del cono de la hélice en frente del plano del rotor; generar una señal de control basándose en las mediciones de presión; y emitir la señal de control a un controlador de la turbina eólica.

Una ventaja del procedimiento de acuerdo con la invención es que puede proporcionar una señal de control fiable y precisa, ya que estas se basan en mediciones de presión fiables y precisas que no se ven afectadas por ninguna turbulencia de la pala del rotor o efectos de sombra del rotor.

Los modos de realización y características de la invención particularmente ventajosos están dados por las reivindicaciones dependientes, como se revela en la siguiente descripción. Características de diferentes categorías de reivindicaciones pueden combinarse según corresponda para proporcionar otros modos de realización no descritos en el presente documento.

El cono de la hélice puede tener cualquier forma que sea adecuada para soportar las palas de rotor y para conectarse o montarse en una góndola o cubierta de una turbina eólica. Por ejemplo, un cono de la hélice puede tener una "nariz" redondeada o cónica. Sin embargo, en un modo de realización particularmente preferente de la invención, el cono de la hélice tiene forma esencialmente cilíndrica y comprende una cara frontal esencialmente plana. Este diseño tiene una serie de ventajas, ya que las aberturas o puntos de medición se pueden disponer en el mismo plano. Además, dicha forma del cono de la hélice es robusta y más fácil de transportar a la ubicación de la turbina eólica ya que es menos propensa a sufrir daños. Por tanto, en lo que sigue, sin restringir la invención de ninguna manera, se puede suponer que la superficie de barlovento del cono de la hélice es esencialmente plana, con una curvatura mínima, y la

cara frontal o superficie de barlovento es esencialmente circular o en forma de disco. En un modo de realización particularmente preferente de la invención, el dispositivo de medición del sistema de medición está dispuesto en una cavidad interior del cono de la hélice. Preferentemente, para obtener mediciones de una precisión favorable, el dispositivo de medición está dispuesto en un plano paralelo al plano de rotación del rotor. Por supuesto, si el dispositivo de medición no se puede colocar en un plano paralelo al plano de rotación del rotor, por cualquier motivo, se puede realizar una corrección o compensación adecuada en los valores de presión medidos.

Los componentes que se pueden controlar sobre la base de las mediciones del viento pueden ser cualquier unidad o módulo que esté adaptado para recibir una señal de control del sistema de medición, por ejemplo, un controlador de accionamiento de guiñada, un módulo de arranque/apagado de un controlador de la turbina eólica, un controlador de paso de pala, etc.

A continuación, sin restringir la invención en modo alguno, también se puede suponer que la presión medida en un punto de medición es la presión del viento. Un sensor de presión también puede denominarse transductor de presión, transmisor de presión, etc. Un sensor de presión puede basarse en varias técnicas de detección, por ejemplo, un sensor de presión puede comprender uno o más medidores de Bourdon, medidores de tensión piezorresistivos, etc. Tal manómetro se puede colocar en cualquier punto de medición adecuado para medir la presión frente al plano de rotación del rotor. Un sensor de presión puede ubicarse directamente detrás de un punto de medición, o puede ubicarse a cierta distancia de él. Por ejemplo, el sistema de medición puede comprender preferentemente un tubo o conducto hermético dispuesto para conducir desde una abertura en un punto de medición de la presión a un sensor de presión. Los sensores de presión o transmisores de presión existentes están ampliamente disponibles.

De acuerdo con la invención, el dispositivo de medición comprende un sensor de presión diferencial. Dicho sensor toma lecturas de presión de dos puntos de medición simultáneamente para determinar una diferencia de presión entre esos dos puntos. Los puntos de medición se pueden ubicar en cualquier punto adecuado en la superficie de barlovento del cono de la hélice. Sin embargo, en un modo de realización particularmente preferente de la invención, el primer punto de medición de la presión está dispuesto esencialmente en un centro geométrico de la superficie del cono de la hélice y el segundo punto de medición de la presión está dispuesto a una distancia alejada del primer punto de medición de la presión. Con esta disposición, el primer punto de medición permanece esencialmente estacionario cuando gira el cono de la hélice. Si se coloca exactamente en el centro del cono de la hélice, el primer punto de medición girará, de hecho, alrededor de su propio punto central. Incluso si no está ubicado exactamente en el centro, sino muy cerca del punto central geométrico, solo se desplazará ligeramente cuando el cono de la hélice gire y puede considerarse esencialmente estacionario. El segundo punto de medición, ubicado más lejos del centro, girará de manera efectiva alrededor del primer punto de medición a medida que gira el cono de la hélice. Por lo tanto, el segundo punto de medición describirá una trayectoria de recorrido esencialmente circular a medida que gira el cono de la hélice. Preferentemente, el segundo punto de medición está situado en la cara de barlovento del cono de la hélice, lo más lejos posible del primer punto de medición, es decir, cerca de un borde exterior de la cara de barlovento del cono de la hélice.

Cuando el viento impacta en la superficie de barlovento del cono de la hélice, se ve obligado a desviarse hacia afuera en todas las direcciones. Por lo tanto, la presión medida en el primer punto de medición en el centro de la superficie del cono de la hélice será esencialmente la presión más alta, mientras que la presión en el segundo punto de medición será menor. La diferencia de presión, o "diferencial de presión", será más notoria cuanto más lejos del centro se coloque el segundo punto de medición.

Con esta disposición, la presión medida en el primer punto de medición permanecerá esencialmente constante, incluso si el cono de la hélice se alejara de la dirección real del viento, es decir, en el caso de un error del ángulo de guiñada. Esto puede ocurrir si el viento cambia de dirección, por ejemplo.

Para una superficie de barlovento del cono de la hélice que es esencialmente vertical, la diferencia de presión entre el primer y el segundo puntos de medición permanecerá esencialmente constante cuando el cono de la hélice esté orientado directamente hacia el viento, y puede visualizarse como una línea recta cuando se representa la diferencia de presión con respecto al ángulo para una rotación completa (de 0° a 360°) del segundo punto de medición. Esto se denomina a continuación "diferencial de presión de referencia" para la cara del cono de la hélice vertical.

Los autores de la invención se han dado cuenta de que el gradiente de presión, o la distribución de las zonas de presión, sobre la superficie de barlovento del cono de la hélice cambiará, dependiendo de si el cono de la hélice está orientado directamente hacia el viento o no. Por lo tanto, en un modo de realización particularmente preferente de la invención, el módulo de análisis se realiza para determinar una diferencia de presión entre el primer punto de medición y el segundo punto de medición. La diferencia de presión medida entre el primer y el segundo puntos de medición se puede utilizar, por ejemplo, para determinar cuánto o en qué grado el cono de la hélice se aleja de la dirección media ideal del viento.

Cuando un cono de la hélice está orientado hacia el viento en un ángulo desplazado de la dirección media del viento, la distribución de presión sobre la superficie de barlovento del cono de la hélice se desplaza ligeramente hacia un lado. Para una cara del cono de la hélice vertical, la diferencia de presión ya no será constante, sino que exhibirá una ligera

oscilación en relación con la diferencia de presión de referencia a medida que el segundo punto de medición se mueve a través del gradiente de presión a lo largo de su trayectoria de recorrido.

Sin embargo, para la mayoría de los diseños de turbinas eólicas grandes, el eje de rotación del cono de la hélice se inclina hacia arriba unos 6° desde la horizontal para proporcionar un espacio de seguridad entre las puntas de las palas largas del rotor y la torre. Para un cono de la hélice inclinado hacia arriba de este tipo, la diferencia de presión entre el primer y el segundo puntos de medición oscilará ligeramente cuando el cono de la hélice esté orientado directamente hacia el viento, ya que la presión en una región exterior más alta de la superficie de barlovento del cono de la hélice será algo menor que la presión en una región exterior inferior de la superficie de barlovento del cono de la hélice. La oscilación en la diferencia de presión se puede visualizar como una fase de una onda sinusoidal cuando la presión diferencial se representa con respecto al ángulo para una rotación completa (de 0° a 360°) del segundo punto de medición. Esta oscilación se denomina en lo sucesivo "oscilación de referencia" para el cono de la hélice inclinado hacia arriba. Para una cara del cono de la hélice inclinado hacia arriba, la diferencia de presión exhibirá un desplazamiento de fase y un desplazamiento de amplitud en relación con la oscilación de referencia a medida que el segundo punto de medición se mueve a través del gradiente de presión a lo largo de su trayectoria de recorrido.

El desarrollo de la diferencia de presión medida entre el primer punto de medición en el centro de la cara de barlovento del cono de la hélice y el segundo punto de medición se puede utilizar para determinar cuánto se aleja el cono de la hélice de una dirección ideal, es decir, la dirección media del viento. Por tanto, en un modo de realización particularmente preferente de la invención, el módulo de análisis comprende un módulo de corrección del ángulo de guiñada, en el que una señal de control generada por el módulo de corrección del ángulo de guiñada comprende una señal de corrección del ángulo de guiñada para una unidad de accionamiento de guiñada de la turbina eólica, cuya señal de corrección del ángulo de guiñada se genera sobre la base de la diferencia de presión entre el primer punto de medición y el segundo punto de medición. Por ejemplo, la diferencia de presión se puede comparar con una oscilación de referencia para un cono de la hélice inclinado hacia arriba. El desplazamiento de fase y/o el desplazamiento de amplitud se pueden determinar para estimar el error del ángulo de guiñada. El módulo de corrección del ángulo de guiñada puede entonces calcular una señal de corrección del ángulo de guiñada para que la utilice la unidad de accionamiento de guiñada para corregir el ángulo de guiñada.

Por lo general, este paso correctivo se puede realizar de forma iterativa. Por ejemplo, se puede emitir una señal de corrección del ángulo de guiñada a la unidad de accionamiento de guiñada. El módulo de análisis continúa monitorizando el diferencial de presión y comparándolo con la referencia. Si, después de una primera corrección del accionamiento de guiñada, todavía queda una diferencia notable entre la oscilación de referencia y la diferencia de presión medida, se puede emitir otra señal de corrección del ángulo de guiñada.

Para un control seguro y eficiente de una turbina eólica, también es importante controlar la velocidad del viento. La velocidad del viento se utiliza para determinar cuándo detener o arrancar la turbina eólica. A altas velocidades del viento, las palas del rotor deben estar plegadas o inclinadas "fuera del viento" para evitar dañar las palas, el generador, evitar el exceso de velocidad, etc. También es importante asegurarse de que la velocidad de la punta de la pala se mantenga dentro de límites seguros. Además, para una turbina eólica que se apagó debido a una velocidad del viento insuficiente, las mediciones de la velocidad del viento se pueden analizar durante un período de tiempo para determinar si la turbina eólica debe ponerse en marcha nuevamente. Este puede ser el caso una vez que la velocidad media del viento excede un cierto mínimo, mientras que puede considerarse preferente dejar la turbina eólica apagada siempre que la velocidad media del viento sea demasiado baja.

La presión dinámica del flujo de aire del viento entrante es la diferencia entre la presión de estancamiento (en el primer punto de medición) y una presión estática o total medida usando un valor de presión ambiental. Con este fin, en un modo de realización particularmente preferente de la invención, el sistema de medición comprende una entrada adicional de medición de la presión ambiental, por ejemplo, que parte de un punto en cualquier lugar del cono de la hélice y está conectada al sensor de presión. Preferentemente, el sensor de presión puede entregar un valor de presión dinámica usando estas entradas. Conociendo la presión dinámica, la velocidad del viento se puede calcular usando la fórmula:

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

donde q es la presión dinámica en pascales, ρ es la densidad del aire en kg/m³ y v es la velocidad del viento. El valor calculado de la velocidad del viento se puede utilizar, como se indicó anteriormente, para determinar cuándo arrancar o detener la turbina eólica. En otro modo de realización preferente de la invención, por lo tanto, el módulo de análisis comprende un módulo de determinación del límite de velocidad del viento, en el que una señal de control generada por el módulo de determinación del límite de velocidad del viento comprende una señal de arranque/parada para un controlador de la turbina eólica, cuya señal de arranque/parada se genera sobre la base del valor de la velocidad del viento obtenido de la presión dinámica.

Los cálculos para calcular un diferencial de presión, una velocidad del viento, un desplazamiento de una referencia o una señal de control de salida se realizan preferentemente como un producto de programa informático para llevar a

cabo las etapas del procedimiento de acuerdo con la invención cuando se carga el producto del programa informático en una memoria de un dispositivo programable del sistema de medición.

Los componentes del sistema de medición se pueden colocar donde estén alojados de manera óptima. Sin embargo, en un modo de realización particularmente preferente de la invención, el sistema de medición está dispuesto esencialmente en su totalidad dentro del cono de la hélice de la turbina eólica. Dado que el cono de la hélice es, en general, hueco con una cavidad relativamente grande, el sistema de medición se puede alojar fácilmente por completo dentro del cono de la hélice. De esta manera, el sistema de medición se puede disponer esencialmente en su totalidad delante del plano del rotor. Cualquier sensor de presión, conducto o tubo, etc. se puede montar en el interior del cono de la hélice y puede rotar eficazmente con el cono de la hélice. Se puede realizar que los sensores de presión transmitan sus señales de salida de manera inalámbrica a un módulo de análisis, que se puede colocar cerca en una ubicación estacionaria. De forma alternativa, todo el sistema de medición puede girar con el cono de la hélice, mientras que las señales de salida para los controladores podrían transmitirse a los receptores apropiados por medio de un anillo colector, por ejemplo, o de manera inalámbrica.

Como se mencionó anteriormente, se puede usar un diferencial de presión de referencia o una oscilación de referencia para determinar un ángulo de desplazamiento entre un eje longitudinal del cono de la hélice y la dirección media del viento. Por lo tanto, en un modo de realización particularmente preferente de la invención, el procedimiento comprende un paso de calibración para establecer una relación de referencia entre una presión medida en un primer punto de medición de la presión y una presión medida en un segundo punto de medición de la presión mientras que un flujo de aire se dirige al cono de la hélice giratorio de manera que la dirección del flujo de aire sea esencialmente paralela a un eje longitudinal del cono de la hélice. Una calibración de este tipo se puede realizar, por ejemplo, en un túnel de viento antes del montaje del cono de la hélice en una góndola o cubierta de la turbina eólica. De forma alternativa, la calibración podría realizarse en el sitio después de montar el cono de la hélice en la góndola, por ejemplo, usando un bucle de control iterativo para llevar el cono de la hélice a una posición orientada directamente al viento. El propio sistema de guiñada también se puede utilizar para calibrar el sistema. Al guiñar en cada dirección varias veces, se puede encontrar la calibración óptima basándose en la producción de energía de la turbina eólica. Cuando la turbina eólica está orientada hacia el viento con una desviación de cero grados, un sistema de control de la turbina eólica puede detectar esto, ya que esta posición permite que la turbina eólica funcione de manera más eficiente.

Mientras una turbina eólica está apagada, tiempo durante el cual su cono de la hélice ya no gira, es posible que el viento cambie de dirección de manera que el viento ya no se mueva hacia el cono de la hélice. En un modo de realización preferente de la invención, el sistema de medición puede configurarse para responder a una situación en la que el sensor o sensores de presión informan de una condición de "sin presión" o "presión negativa". Puede ser que no haya viento, o que el cono de la hélice no esté orientado al viento. En tal situación, el módulo de análisis se puede configurar para emitir señales de control de accionamiento de guiñada que alteran gradualmente el ángulo de guiñada. Si hay viento, esto se detectará en algún momento cuando el cono de la hélice vuelva a estar expuesta al viento y se registre una presión de viento positiva. De lo contrario, después de media rotación o una rotación completa del accionamiento de guiñada, el módulo de análisis puede concluir que las condiciones del viento son insuficientes para justificar la puesta en marcha de la turbina eólica. De forma alternativa o adicionalmente, una turbina eólica de acuerdo con la invención puede comprender un instrumento meteorológico convencional, como una veleta, para estimar la dirección del viento cuando la turbina eólica no está operativa. Esto podría resultar ventajoso para evitar situaciones, por ejemplo, durante los procedimientos de mantenimiento, cuando la turbina eólica se coloca 180 grados fuera del viento. En tal situación, un dispositivo de medición de barlovento en el cono de la hélice de la turbina eólica no podría determinar la dirección del viento. Por supuesto, en lugar de o además de las soluciones dadas anteriormente, la turbina eólica también podría recibir una señal de control de guiñada inicial de un piloto del parque, para poder conducir el anillo de guiñada para orientar la turbina eólica nuevamente hacia el viento, en cuyo punto el sistema de medición de acuerdo con la invención puede asumir el control.

Otros objetos y características de la presente invención se harán más evidentes a partir de las siguientes descripciones detalladas, consideradas conjuntamente con los dibujos adjuntos. Se ha de entender, sin embargo, que los dibujos están diseñados solamente para fines de ilustración, y no como una definición de los límites de la invención.

La Fig. 1 muestra una representación esquemática de una vista, en planta, de una turbina eólica en una posición no ideal con respecto al viento;

la Fig. 2 muestra distribuciones de presión sobre una superficie del cono de la hélice;

la Fig. 3 muestra una vista frontal de un cono de la hélice de acuerdo con un modo de realización de la invención;

la Fig. 4 muestra la sección transversal a través del cono de la hélice de la Fig. 3;

la Fig. 5 muestra un gráfico de las diferencias de presión entre dos posiciones de medición en el cono de la hélice de la Fig. 3;

la Fig. 6 muestra una representación esquemática de una vista, en planta, de una turbina eólica de acuerdo con un

modo de realización de la presente invención.

En los diagramas, los números similares se refieren a objetos similares en toda la descripción. Los objetos en los diagramas no están necesariamente dibujados a escala.

La Fig. 1 muestra una representación esquemática de una vista, en planta, de una turbina eólica de la técnica anterior en una posición no ideal con respecto al viento. Vista desde arriba, una góndola 100 puede hacerse girar mediante un accionamiento de guiñada 102 (indicado por la línea discontinua) con la intención de alinear un eje longitudinal L de la góndola 100 y el cono de la hélice 103 con la dirección momentánea v_w del viento W. Un controlador del accionamiento de guiñada 102 actúa en respuesta a las mediciones proporcionadas por una veleta 101 montada en la parte superior de la góndola 100. Las palas de rotor 104 describen un "disco de rotor" virtual o un "plano de rotor" P_R a medida que giran, indicado aquí por la línea discontinua (por lo que el plano de rotor P_R es perpendicular al plano del dibujo). Debido a que la veleta 101 está situada detrás del plano del rotor P_R , y las palas del rotor 104 causan una cierta cantidad de turbulencia W_T detrás del plano del rotor, las mediciones entregadas por la veleta 101 no pueden describir de manera precisa y confiable la dirección del viento v_w . Como resultado, el controlador del accionamiento de guiñada puede provocar erróneamente que la góndola 100 y el cono de la hélice 103 se orienten en una dirección desplazada de la dirección ideal del viento. Este desplazamiento o error de ángulo de guiñada se muestra aquí como un ángulo α entre el eje longitudinal L y la dirección del viento v_w . Debido al error del ángulo de guiñada α y al desequilibrio de cargas resultante, cualquier componente principal de la turbina eólica puede verse afectado negativamente. Por ejemplo, las palas del rotor 104 y los cojinetes, tales como cojinetes de cabeceo o cojinetes del rotor o del eje principal del generador pueden estar sujetos a cargas de fatiga no deseadas.

La Fig. 2 muestra las distribuciones de presión sobre la superficie de un cono de la hélice 2 plano en una primera y segunda posiciones del cono de la hélice 2. Aquí, se supone que el cono de la hélice 2 es de forma circular y está montado en una turbina eólica de manera que está inclinado hacia arriba en un pequeño ángulo de aproximadamente 6° por las razones dadas anteriormente. En el lado izquierdo del diagrama, el cono de la hélice 2 está orientado directamente al viento. La distribución de la presión sobre una cara del cono de la hélice plano, cuando está inclinado ligeramente hacia arriba, es tal que una presión más alta está presente en una primera zona de presión P_0 ligeramente desplazada en una dirección hacia abajo del centro geométrico de la cara del cono de la hélice circular. La presión cae al aumentar la distancia desde la región de mayor presión P_0 , y esto se indica, en aras de la simplicidad, por zonas de presión discretas P_1 , P_2 , P_3 de presión decreciente, por lo que la zona de presión P_3 en el borde más externo del cono de la hélice exhibe la presión más baja. Por supuesto, la presión no cae de manera discreta, sino que cae suavemente en todas las zonas de presión P_0 , P_1 , P_2 , P_3 desde el centro hasta el perímetro de la cara del cono de la hélice. Las zonas de presión P_0 , P_1 , P_2 , P_3 se establecen esencialmente de forma simétrica alrededor de un eje vertical que pasa por el centro de la cara delantera del cono de la hélice cuando esta está orientada directamente hacia el viento.

La distribución de la presión permanece igual mientras el cono de la hélice gira (indicado por la flecha), de modo que un primer punto 21 permanece esencialmente dentro de la primera zona de presión P_0 , mientras que un segundo punto 22 describe una trayectoria de recorrido circular 220 que lo lleva a través de dos zonas de presión exterior P_2 , P_3 . Por lo tanto, mientras que la presión en el primer punto 21 permanece esencialmente constante, la presión que actúa sobre el segundo punto 22 aumenta y disminuye de manera cíclica a medida que el cono de la hélice 2 gira y el segundo punto 22 entra y sale de las diferentes zonas de presión P_2 , P_3 en su trayectoria de recorrido circular desde 0° en su acimut o punto más alto en la cara frontal del cono de la hélice hasta 180° en su punto más bajo en la cara frontal del cono de la hélice. Por lo tanto, un punto de presión más baja $p_{\min}$ se encuentra en el punto más alto de la trayectoria de recorrido 220, ya que está más lejos del punto de presión de estancamiento 21; mientras que la presión más alta $p_{\max}$ se experimenta en el punto más bajo de la trayectoria de recorrido, ya que este punto es el más cercano al punto de presión de estancamiento 21. Los puntos de presión más alta y más baja $p_{\max}$, $p_{\min}$ son diametralmente opuestos con respecto al primer punto 21.

En el lado derecho del diagrama, el cono de la hélice 2 ya no está orientado directamente hacia el viento, sino que está orientado hacia el viento con un desplazamiento del ángulo de guiñada perjudicial. El efecto de este error del ángulo de guiñada es que las zonas de presión ya no están dispuestas simétricamente alrededor de un eje vertical sobre la cara frontal del cono de la hélice. En cambio, las zonas de presión P_0' , P_1' , P_2' , P_3' ahora también están "desplazadas" y algo distorsionadas. Como resultado, el primer punto 21 puede encontrarse ahora dentro de una zona de presión más baja P_1' a medida que gira el cono de la hélice 2, y el segundo punto 22 entra y sale ahora de varias zonas de presión P_1' , P_2' , P_3' . En esta posición desplazada de error de guiñada, por lo tanto, la presión más baja y más alta $p_{\min_ye}$, $p_{\max_ye}$ experimentadas en el segundo punto de medición 22 serán ligeramente más bajas que las presiones correspondientes $p_{\min}$, $p_{\max}$ experimentadas en el segundo punto de medición 22 en el posición no desplazada (de nuevo, los puntos de presión más alta y más baja $p_{\max}$, $p_{\min}$ están diametralmente opuestos alrededor del primer punto 21, indicado aquí por la línea de trazos inclinada que pasa a través de estos puntos).

Este efecto es aprovechado por la invención, como se muestra mediante un cono de la hélice 10 de acuerdo con un modo de realización de la invención y se muestra en la Fig. 3. Aquí, el cono de la hélice 10 tiene dos aberturas 41, 42 o puntos de medición 41, 42 dispuestos de tal manera que una primera abertura 41 está situada esencialmente en el centro geométrico de la cara frontal 11 del cono de la hélice, y una segunda abertura 42 está situada relativamente

cerca de un borde exterior de la cara frontal 11 del cono de la hélice. Como se describió anteriormente con la ayuda de la Fig. 2, se experimentará una presión esencialmente invariable o estancada en la primera abertura 41 o en el punto de medición 41 cuando el cono de la hélice 10 gira en la dirección mostrada, mientras que el segundo punto de medición 42 experimentará una presión que cambia cíclicamente a medida que pasa repetidamente por regiones de mayor y menor presión. El punto de presión más baja $p_{\min}$ ahora está desplazado hacia un lado, mientras que el punto de presión más alta $p_{\max}$ está desplazado hacia el otro lado.

La Fig. 4 muestra una sección transversal lateral X-X' a través del cono de la hélice 10 de la Fig. 3, e indica esquemáticamente un sistema de medición 4 dispuesto en una cavidad detrás de la cara frontal 11 del cono de la hélice 10. El sistema de medición 4 comprende un sensor de presión diferencial 40 conectado a las aberturas 41, 42 por medio de los conductos 410, 420. El sensor de presión diferencial 40 genera una señal eléctrica 400, que se puede transmitir a través de un cable y un anillo colector, o mediante una señal inalámbrica, que indica la diferencia de presión entre las aberturas 41, 42. La salida 400 del sensor de presión diferencial 40 es recibida por una unidad de análisis 43. En este modo de realización, la unidad de análisis 43 comprende un módulo 44 de corrección del ángulo de guiñada que puede determinar el error de ángulo de guiñada real sobre la base de la salida 400 del sensor de presión y/o puede generar señales de control 440 para que un accionamiento de guiñada corrija el error del ángulo de guiñada. Un sensor de presión 40 muy preciso puede permitir que el accionamiento de guiñada reaccione rápidamente incluso a cambios muy leves en la dirección media del viento, de modo que la turbina eólica a la que está acoplado este cono de la hélice 10 pueda optimizar su salida eléctrica. La unidad de análisis 43 comprende, además, un módulo de determinación del límite de velocidad del viento 45 que puede determinar la velocidad del viento, por ejemplo, una velocidad media del viento, sobre la base de la salida 400 del sensor de presión y/o puede generar una señal de arranque/parada 450 para un controlador de la turbina eólica.

La Fig. 5 muestra un gráfico de la diferencia de presión (ΔP), frente al grado de rotación ($^{\circ}$), entre un primer punto de medición 41 y un segundo punto de medición 42 en una superficie de barlovento del cono de la hélice.

Para un cono de la hélice vertical, es decir, un cono de la hélice no inclinado con respecto a la horizontal, una curva de referencia $D_{\text{ref_vs}}$ representada para las mediciones tomadas a lo largo de una rotación completa cuando el cono de la hélice está orientado directamente al viento, idealmente comprendería una línea plana simple como se muestra aquí (línea discontinua). Una "rotación completa" se mide desde 0° , correspondiente a la posición más alta del segundo punto de medición 42 en la cara frontal del cono de la hélice, hasta 360° de regreso al punto de partida. Cuando ese cono de la hélice vertical está inclinado alejado del viento con un error de guiñada, por ejemplo, unos pocos grados, el diferencial de presión $D_{\text{ye_vs}}$ se manifestará como un ciclo de una onda sinusoidal, como lo muestra la línea de puntos. La amplitud de la onda sinusoidal y la cantidad que está desplazada dependerán del tamaño del error de guiñada.

Para un cono de la hélice inclinado hacia arriba, una curva de referencia $D_{\text{ref_ts}}$ comprendería idealmente un ciclo de una onda sinusoidal, como se muestra aquí. La curva de referencia $D_{\text{ref_ts}}$ muestra un gráfico de la diferencia de presión medida entre la primera abertura 41 y la segunda abertura 42 cuando el cono de la hélice inclinado hacia arriba se mueve a través de una rotación completa mientras está orientado directamente al viento. El pico de la curva de referencia $D_{\text{ref_ts}}$ corresponde a la mayor diferencia de presión, medida cuando el segundo punto de medición 42 está más lejos de la zona de presión más alta o estancada. El valle de la curva de referencia $D_{\text{ref_ts}}$ corresponde a la diferencia de presión más baja, medida cuando el segundo punto de medición 42 está más cerca de la zona de presión de estancamiento. En este caso, la presión más baja se mide cuando el segundo punto de medición 42 alcanza el punto más bajo en su trayectoria de recorrido 220 sobre la superficie de barlovento del cono de la hélice, a aproximadamente 180° .

Otra curva $D_{\text{ye_ts}}$ muestra un gráfico de la diferencia de presión medida entre la primera abertura 41 y la segunda abertura 42 a medida que el cono de la hélice inclinado hacia arriba se mueve a lo largo de una rotación completa sin estar orientado directamente al viento, sino en un ángulo de desplazamiento de la dirección ideal o media del viento. Aquí, el segundo punto de medición 42 se mueve a través de varias zonas de presión vecinas como se ilustra en el lado derecho de la Fig. 2. Como resultado, la diferencia de presión es significativamente mayor cuando el segundo punto de medición 42 pasa por el punto de presión más baja, que se indicó como el punto $p_{\min}$ en la Fig. 2. La diferencia de presión más pequeña se mide cuando el segundo punto de medición 42 pasa por su punto de mayor presión en su trayectoria de recorrido sobre la cara de barlovento del cono de la hélice, cuyo punto se indicó como el punto $p_{\max}$ en la Fig. 2. El desplazamiento de amplitud y el desplazamiento de fase entre la curva de referencia $D_{\text{ref_ts}}$ y la curva de error de guiñada $D_{\text{ye_ts}}$ se pueden determinar y analizar para deducir el error de guiñada real y generar una señal de corrección para un controlador de accionamiento de guiñada. Una señal de corrección de este tipo puede, por ejemplo, indicar al controlador de accionamiento de guiñada que "gire $4,5^{\circ}$ el anillo de guiñada en el sentido horario", "gire $1,8^{\circ}$ el anillo de guiñada en sentido antihorario", etc. De forma alternativa, la señal de control solo puede especificar un sentido de rotación (lenta) para el controlador de la unidad de guiñada, por ejemplo, "horario", y puede continuar midiendo el desplazamiento de amplitud y de fase hasta que ya no sean significativos, momento en el que una señal de control puede indicarle al controlador de accionamiento de guiñada que detenga la rotación y mantenga esa posición.

La Fig. 6 muestra una representación esquemática de una vista, en planta, de una turbina eólica de acuerdo con un

modo de realización de la presente invención. Esta turbina eólica tiene un cono de la hélice 10 de acuerdo con la invención, con un sistema de ajuste del ángulo de guiñada 1 dispuesto en el cono de la hélice 10 y conectado mediante una salida 430 a un controlador de un accionamiento de guiñada (indicado por la línea discontinua). El sistema de ajuste del ángulo de guiñada 1 puede monitorizar continuamente las diferencias de presión en los puntos de medición para detectar cualquier error del ángulo de guiñada. Dado que las mediciones se realizan utilizando información recopilada en la cara frontal 11 del cono de la hélice, estas mediciones están libres de cualquier inexactitud que se introduciría por un flujo de aire turbulento W_T detrás del plano del rotor de las palas 104 del rotor. Por lo tanto, el sistema de ajuste del ángulo de guiñada 1 siempre puede actuar para poner el cono de la hélice 10 en línea con la dirección media momentánea del viento v_w , como se muestra aquí, de modo que la salida de potencia de la turbina eólica pueda optimizarse.

Aunque la presente invención se ha divulgado en forma de modos de realización preferentes y variaciones de los mismos, se entenderá que podrían realizarse numerosas modificaciones y variaciones adicionales sin apartarse del alcance de la invención.

Por motivos de claridad, debe entenderse que el uso de "un" o "una" en esta solicitud no excluye una pluralidad, y "que comprende" no excluye otros pasos o elementos. La referencia a una "unidad" o "módulo" no excluye el uso de más de una unidad o módulo.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un sistema de medición (4) para una turbina eólica que comprende varias palas (104) de rotor montadas en un cono de la hélice (10) en la parte delantera de una góndola (100) y dispuestas para girar en un plano del rotor, cuyo sistema de medición (4) está situado detrás de una superficie de barlovento (11) del cono de la hélice (10) y comprende
10 - un sensor de presión diferencial (40) para determinar una presión en varios puntos de medición de la presión (41, 42), en el que los puntos de medición de la presión (41, 42) están dispuestos delante del plano del rotor (P_R);
15 - un primer conducto (410) que va desde una abertura (41) en un primer punto de medición de la presión (41) en el cono de la hélice (10) hasta el sensor de presión diferencial (40), y un segundo conducto (450) que va desde una abertura (42) en un segundo punto de medición de la presión (42) en el cono de la hélice (10) al sensor de presión diferencial (40);
20 - un módulo de análisis (43) para generar una señal de control (440, 450) sobre la base de las mediciones de presión; y
- unos medios de salida para emitir la señal de control (440, 450) a un controlador de la turbina eólica.
2. Un sistema, según la reivindicación 1, dispuesto en una cavidad detrás de la cara frontal (11) de un cono de la hélice (10) esencialmente cilíndrico.
25 3. Un sistema según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el primer punto de medición de la presión (41) está dispuesto esencialmente en un centro geométrico de la superficie (11) del cono de la hélice, y el segundo punto de medición de la presión (42) está dispuesto a una distancia alejada del primer punto de medición de la presión (41).
30 4. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el módulo de análisis (43) está realizado para determinar un valor de la presión de estancamiento y/o un valor de la presión dinámica sobre la base de la presión medida en los puntos de medición (41, 42).
35 5. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el módulo de análisis (43) comprende un módulo de corrección del ángulo de guiñada (44), y en el que una señal de control (440) generada por el módulo de corrección del ángulo de guiñada (44) comprende una señal de corrección del ángulo de guiñada (440) para una unidad de accionamiento de guiñada (102) de la turbina eólica, cuya señal de corrección del ángulo de guiñada (440) se genera sobre la base de una diferencia entre una presión medida en el primer punto de medición (41) y una presión medida en el segundo punto de medición (42).
40 6. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el módulo de análisis (43) comprende un módulo de determinación del límite de la velocidad del viento (45), y en el que una señal de control (450) generada por el módulo de ajuste del paso (45) comprende una señal de arranque/parada (450) para un controlador de la turbina eólica, cuya señal de arranque/parada (450) se genera basándose en el valor de la presión dinámica.
45 7. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de medición (4) está dispuesto esencialmente en su totalidad dentro del cono de la hélice (10) de la turbina eólica.
50 8. Un conjunto para una turbina eólica, que comprende un cono de la hélice (10) que tiene varias aberturas (41, 42) en una superficie de barlovento (11) del cono de la hélice (10); y
un sistema de medición (4) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7;
en el que una de dichas aberturas (41, 42) está conectada a un dispositivo de medición del sistema de medición para determinar una presión en esa abertura (41, 42).
55 9. Un conjunto según la reivindicación 8, en el que la superficie de barlovento (11) del cono de la hélice (10) comprende una superficie en forma de disco esencialmente plana (11).
60 10. Una turbina eólica que comprende un conjunto según la reivindicación 8 o la reivindicación 9 y varias palas de rotor (104) montadas en el cono de la hélice (10).
65 11. Una turbina eólica según la reivindicación 10, que comprende un controlador de accionamiento de guiñada adaptado para recibir una señal de control (440) del sistema de medición (4) y/o un controlador del paso de la pala adaptado para recibir una señal de control (450) del sistema de medición (4).

12. Un procedimiento para controlar una turbina eólica que comprende una serie de palas (104) de rotor montadas en un cono de la hélice (10) en la parte delantera de una góndola (100) y dispuestas para girar en un plano del rotor (P_R), cuyo procedimiento comprende los pasos de

- 5 - disponer un sistema de medición (4) en una cavidad detrás de una cara de barlovento (11) del cono de la hélice (10), cuyo sistema de medición (4) comprende un sensor de presión diferencial (40), un primer conducto (410) que va de una abertura (41) en un primer punto de medición de la presión (41) en el cono de la hélice (10) al sensor de presión diferencial (40), y un segundo conducto (450) que va desde una abertura (42) en un segundo punto de medición de la presión (42) en el cono de la hélice (10) al sensor de presión diferencial (40);
- 10 - usar el sensor de presión diferencial (40) para determinar una presión en varios puntos de medición de la presión (41, 42), en el que los puntos de medición de la presión (41, 42) están dispuestos en la superficie de barlovento (11) del cono de la hélice (10) delante del plano del rotor (P_R);
- 15 - generar una señal de control (440, 450) sobre la base de las mediciones de presión; y
- emitir la señal de control (440, 450) a un controlador correspondiente de un componente de la turbina eólica.

13. Un procedimiento según la reivindicación 12, que comprende el paso de analizar las mediciones de presión para determinar una diferencia de presión entre un par de puntos de medición (41, 42) y/o para determinar una presión dinámica y/o una presión de estancamiento sobre la base de las mediciones de presión.

14. Un procedimiento según la reivindicación 12 o la reivindicación 13, que comprende un paso de calibración para establecer una relación de referencia (D_{ref}) entre una presión medida en un primer punto de medición de la presión (41) y una presión medida en un segundo punto de medición de la presión (42) mientras un flujo de aire (W) se dirige al cono de la hélice (10) giratorio de manera que la dirección del flujo de aire (v_W) es esencialmente paralela a un eje longitudinal (L) del cono de la hélice (10).

FIG 1

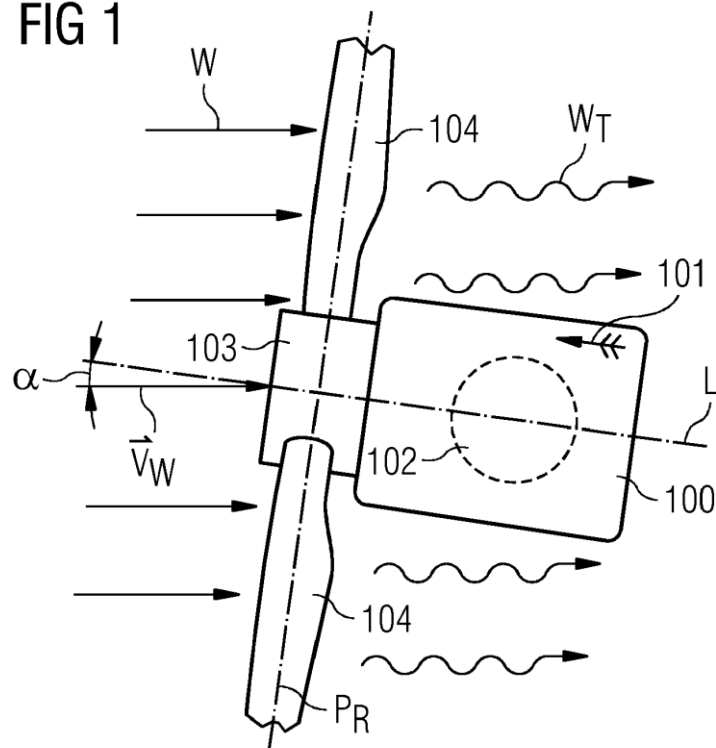


FIG 2

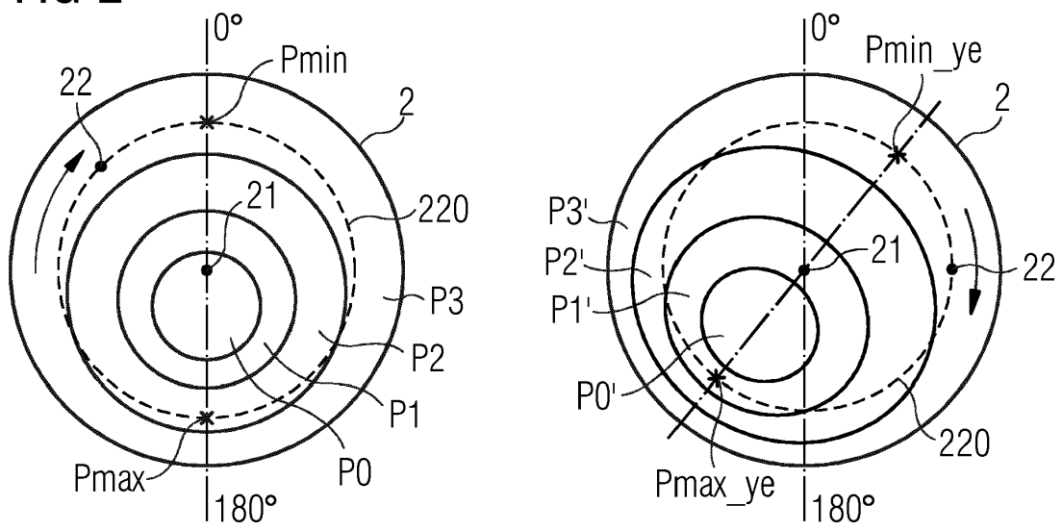


FIG 3

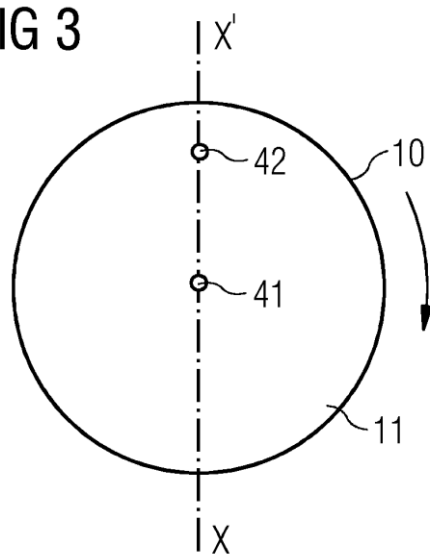


FIG 4

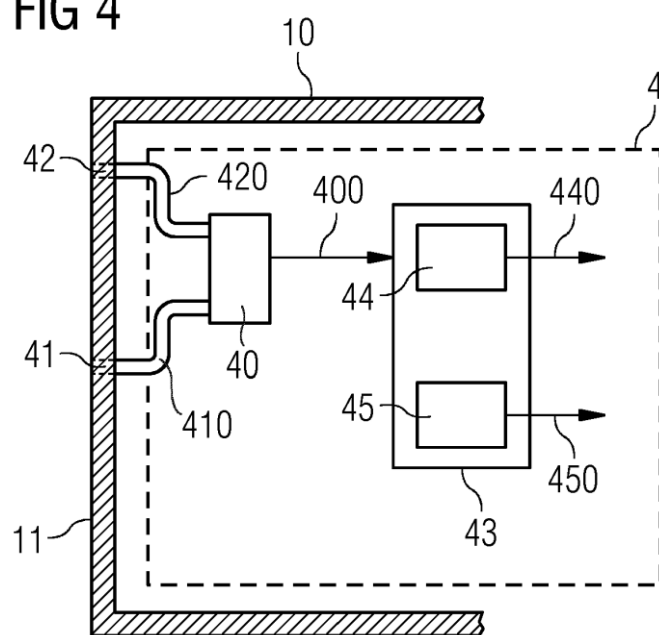


FIG 5

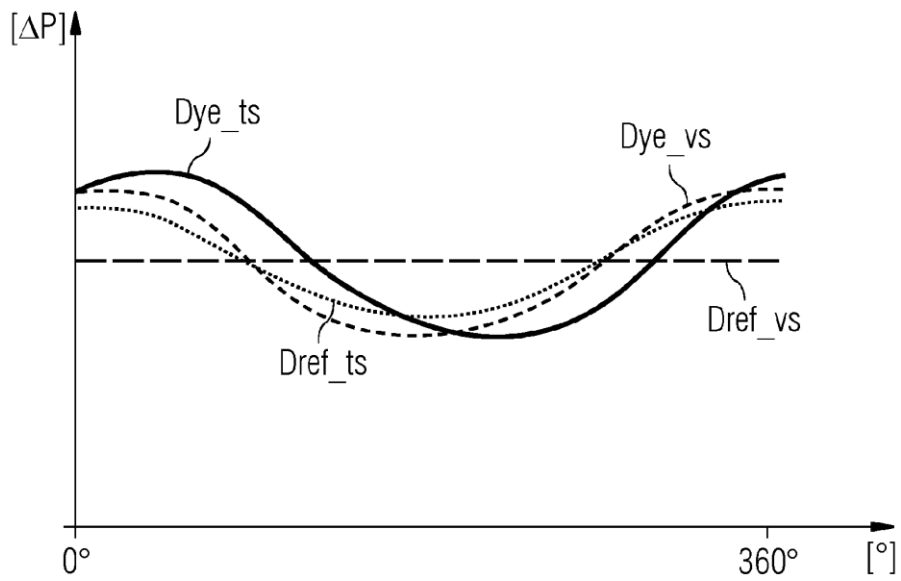


FIG 6

