

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 975 423**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.03.2020** **PCT/EP2020/056337**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.09.2020** **WO20182806**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.03.2020** **E 20708119 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.12.2023** **EP 3938649**

54 Título: **Método de monitorización de la desalineación relativa de las palas de un rotor**

30 Prioridad:

11.03.2019 EP 19161934

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

05.07.2024

73 Titular/es:

VENTUS ENGINEERING GMBH (100.0%)
Simmeringer Hauptstraße 101/1-6/327, 3rd Floor
1110 Vienna, AT

72 Inventor/es:

LÜBKER, POUL ANKER SKAARUP;
MINGALIEV, SHAVKAT y
TOLRON, XAVIER

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ LÓPEZ-MENCHERO, Álvaro Luis

ES 2 975 423 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método de monitorización de la desalineación relativa de las palas de un rotor

5 **Campo de la invención**

Se divulga un método para monitorizar la alineación relativa del ángulo de paso de las palas de un conjunto de al menos dos palas de rotor en un dispositivo rotatorio. El dispositivo rotatorio puede ser un aerogenerador. También se divulgan esquemas operativos basados en las alineaciones relativas del ángulo de paso de las palas observadas.

10

Antecedentes de la invención

El rendimiento de los dispositivos rotatorios con palas depende del estado o condición de las palas. Una pala puede tener una inclinación o un ángulo de paso. Tal posición de inclinación o ángulo de paso puede estar alineada tal y como se espera o puede haber una discrepancia o desalineación. Esta desalineación, diferencia o discrepancia puede ser un valor absoluto de una pala individual. Así, lo que existe es una desalineación absoluta. La desalineación, diferencia o discrepancia puede ser entre dos palas. De este modo, lo que existe es una desalineación relativa.

15

El paso, alineación o desalineación de la pala es un área de importancia técnica para cualquier dispositivo rotatorio con palas. Una pala puede tener un rendimiento o eficiencia general que depende de la alineación o desalineación. El rendimiento general de un dispositivo rotatorio de este tipo puede derivar en una ineficiencia, rendimiento insuficiente o desequilibrio del dispositivo rotatorio, lo que también es de importancia técnica.

20

En un ejemplo, un aerogenerador puede ser un dispositivo rotatorio de este tipo. En ese campo técnico, la desalineación del paso de las palas se refiere a la desalineación del paso de las palas del rotor de la turbina eólica.

25

Una pala de rotor de turbina eólica puede caracterizarse por una eficiencia aerodinámica que está fuertemente correlacionada con la alineación o desalineación de la pala.

El rendimiento general del rotor puede caracterizarse como o depender de la eficiencia aerodinámica del rotor. El rendimiento general del rotor puede caracterizarse por o depender del desequilibrio aerodinámico.

30

Así pues y ejemplificado por turbinas eólicas, existe un ángulo de paso específico para cualquier velocidad del viento determinada para optimizar la potencia de salida.

35

Los ángulos de paso mayores o menores que este valor específico reducirán la potencia de salida incluso hasta el punto de rotación cero con vientos fuertes.

Los pasos de las palas suelen estar en una posición fija desde el arranque hasta el punto en el que el aerogenerador (WTG) alcanza su rendimiento máximo/salida de potencia nominal.

40

Los cambios en el paso de las palas suelen comenzar cuando la velocidad del viento alcanza los 12-13 m/s (27-29 mph), el punto donde la turbina alcanza su rendimiento máximo. Si el viento comienza a superar ese nivel, los sistemas de control de paso se activan para reducir el ángulo de ataque de la pala, obteniendo un porcentaje menor de energía del viento pero manteniendo el generador cerca del 100 % de la potencia de salida sin exceso de velocidad.

45

Cuando la velocidad del viento alcanza 25 m/s (50 mph) o más, el sistema de control de paso evita fallos en las palas de una manera que reduce las cargas del viento y hace que el rotor de la turbina deje de rotar.

El documento US8360722B2 describe un método de validación de una turbina eólica que incluye un rotor. El método incluye inducir intencionalmente un desequilibrio de carga en el rotor para analizar la señal y detectar un error.

50

Objeto de la invención

Un objeto de esta invención es mejorar la evaluación de la alineación relativa del ángulo de paso de las palas en un dispositivo rotatorio. Un objetivo adicional es mejorar el funcionamiento del dispositivo rotatorio en función de la información de la alineación relativa del paso de las palas.

55

Un objeto de esta invención es mejorar la evaluación de la alineación relativa del ángulo de paso de las palas de un aerogenerador; y mejorar el funcionamiento del aerogenerador en función de la información de la alineación relativa del paso de las palas.

60

Descripción de la invención

Un objeto según la reivindicación 1 se consigue mediante un método de monitorización de la alineación relativa del ángulo de paso de las palas de un conjunto de al menos dos palas de rotor de un dispositivo rotatorio.

65

Según la invención, existen las siguientes acciones.

- 5 Existe la acción de recopilar uno o más conjuntos de datos de un conjunto de uno o más sensores de pala configurados para detectar al menos dos palas de rotor.
- Existe la acción de calibrar un sensor de pala de un conjunto de sensores de pala respecto a al menos un sensor de pala de otro conjunto de sensores de pala.
- 10 Existe la acción de calcular un factor de corrección de calibración para los sensores de pala. Existe la acción de aplicar el factor de corrección de calibración a cada respectivo conjunto de datos.
- Existe la acción de clasificación de la alineación relativa del ángulo de paso de las palas entre los ángulos de paso de al menos una combinación de palas de rotor del conjunto de al menos dos palas de rotor.
- 15 Existe la acción de proporcionar un registro de hora a cada conjunto de datos. Esta acción permitirá sincronizar en el tiempo conjuntos de datos de los diferentes sensores.
- 20 Un sensor de pala puede ser un nodo sensor, que comprende uno o más dispositivos de detección, medios para alimentar el nodo sensor, medios para registrar la hora y almacenar la salida de detección, medios para procesar la salida de detección y medios para comunicar la salida de detección a uno o más dispositivos de recopilación de salida de detección. Un nodo sensor puede tener un microprocesador que monitorice el funcionamiento del nodo sensor, procese la salida de detección y proporcione un mecanismo de activación que controle la frecuencia de muestreo del sensor o sensores y el almacenamiento de la salida de detección factible para la comunicación. Un sensor puede ser
- 25 un único dispositivo de detección o un dispositivo de detección múltiple. Se pueden emplear indistintamente un sensor o un nodo sensor y una persona experta en la materia sabría cómo construirlos en función de las descripciones de un sensor o nodo sensor presentadas en el presente documento.
- 30 El sensor de pala generará, y opcionalmente, registrará la hora en un conjunto de datos de esa pala específica. Por lo tanto, un sensor de pala puede generar un conjunto de datos de pala. También puede haber una recopilación de sensores de pala o un conjunto de sensores de pala que genere un conjunto de datos de pala.
- 35 Un sensor puede comprender un sensor triaxial (3 ejes) que puede instalarse en dispositivos rotatorios comparables a las palas individuales de los rotores de los aerogeneradores.
- 40 En un aspecto, las acciones de recopilación y calibración se realizan con el dispositivo rotatorio en un estado de parada, es decir, un estado estático, y en donde la acción de aplicar el factor de corrección de la instalación de calibración estática se realiza en la desalineación dinámica relativa del paso de las palas del dispositivo rotatorio en una posición de parada en comparación con cuando el dispositivo rotatorio está en una posición operativa, es decir, en estado dinámico.
- 45 En un aspecto opcional, existe la acción de recopilar una salida de detección con registro de hora para calibrar los sensores que se realiza con el dispositivo rotatorio en un estado de parada.
- 50 Estos cálculos del factor de corrección de instalación estática de los sensores cuando se instalan en las palas son necesarios para poder aplicar un factor de corrección de instalación individual en la salida de detección de las palas individuales para determinar la desalineación relativa del ángulo de paso de las palas mientras la turbina eólica está en funcionamiento.
- 55 Según la invención, existe la acción de recopilar conjuntos de datos materializados como datos con registro de hora y en donde el método comprende adicionalmente la acción de sincronización de los conjuntos de datos recopilados según las fechas.
- 60 Los registros de hora pueden proporcionarse mediante un reloj local. Los registros de hora pueden proporcionarse mediante un reloj global. Los registros de hora pueden aplicarse a un procesador central o distribuirse para aplicarse a nivel de sensor. La sincronización resulta ventajosa ya que la sincronización mejora las evaluaciones y puede permitir modelos perfeccionados, datos o datos de mayor calidad que se aplicarán de manera correctiva, por ejemplo, en los datos de menor calidad o muestreados con menos frecuencia.
- 65 En un aspecto, se realiza la acción de calibración respecto a al menos otro sensor del dispositivo rotatorio.
- Esta acción de calibración resulta ventajosa para poder aplicar un factor de corrección a los resultados operativos de los resultados relativos del cálculo de paso de las palas mientras la turbina eólica está en funcionamiento. Este factor de calibración compensará cualquier error de instalación estática de los sensores de las palas y es necesario para aplicar un factor de corrección en los resultados operativos de los resultados relativos del cálculo de paso de las palas mientras la turbina eólica está en funcionamiento.

Puede haber un sensor de alta calidad con datos muy fiables o un modelo que produce datos muy fiables o datos verificados. La acción de calibración puede suponer la calibración contra o con referencia a dicho sensor o modelo de alta calidad. Aumentando así adicionalmente la fiabilidad y la calidad de las mediciones.

5 Esta acción de calibración respecto a un sensor o modelo de alta calidad resulta ventajosa para poder aplicar un factor de corrección en los resultados de funcionamiento de los resultados relativos del cálculo de paso de las palas mientras la turbina eólica está en funcionamiento. Este factor de calibración compensará cualquier diferencia entre los sensores individuales.

10 En un aspecto, la acción de recopilación se realiza con sensores de pala dispuestos sustancialmente idénticos en las palas de rotor respectivas.

15 Físicamente, los sensores no pueden disponerse de forma 100 % idéntica, pero el punto de partida es que los sensores están dispuestos sustancialmente de la misma manera o tan igual como sea posible. La instalación puede necesitar una acción de calibración. Es decir, un procedimiento de calibración cuando el rotor está parado para identificar la imprecisión en la instalación de los sensores y, mediante esta calibración, establecer un factor de corrección que compense esta imprecisión en la instalación.

20 Las instalaciones de sensores dispuestas de manera idéntica, en el sentido de lo más iguales posible, puede aumentar aún más la calidad de la evaluación del área de desalineación relativa del paso de las palas.

25 En un aspecto, las acciones se realizan en el dispositivo rotatorio que comprende tres palas de rotor (A, B, C), y en donde la acción de recopilación se realiza recopilando un conjunto de datos A durante un período de tiempo en el que el dispositivo rotatorio está en un estado operativo parado con la pala de rotor A en una posición predefinida P. Puede haber una acción de recopilación de un conjunto de datos B donde el dispositivo rotatorio esté en un estado operativo parado con la pala de rotor B en la posición predefinida P. Puede haber una acción de recopilación de un conjunto de datos C donde el dispositivo rotatorio esté en un estado operativo parado con la pala de rotor C en una posición predefinida P.

30 Para un rotor con dos palas puede haber las mismas acciones que se describen, pero solo en A y B. Para un rotor con más palas, puede haber las mismas acciones que se describen para las palas entre las que se vaya a establecer un ángulo relativo del paso de las palas.

35 En un aspecto, una acción de calibración se realiza solo en función de los conjuntos de datos A, B y C.

40 Esta acción de calibración resulta ventajosa para poder aplicar un factor de corrección a los resultados operativos de los resultados relativos del cálculo de paso de las palas mientras la turbina eólica está en funcionamiento. Este factor de calibración compensará cualquier error de instalación estática de los sensores de las palas y es necesario para aplicar un factor de corrección en los resultados operativos de los resultados relativos del cálculo de paso de las palas mientras la turbina eólica está en funcionamiento.

45 En un aspecto, se realiza una acción de clasificación en diferentes estados de los estados operativos del dispositivo de rotor, que incluyen al menos los estados de: un estado parado y un estado de rotación. En parado, el rotor tiene unas RPM de cero ($RPM = 0$). En el estado de rotación, el rotor tiene unas $RPM > 0$. Haciendo la clasificación durante los diferentes estados, el método permite la determinación del paso estático relativo de las palas a

50 En un aspecto, se realiza una acción de clasificación en diferentes estados de las distintas RPM de los estados operativos del dispositivo de rotor.

55 El rotor puede cubrir un área de barrido y el área de barrido puede dividirse en secciones. Las evaluaciones pueden hacerse en función de los datos recopilados en esas secciones. Se pueden realizar evaluaciones de las palas individuales de tales secciones. Se pueden realizar evaluaciones del rendimiento general del rotor en función de tales secciones. Así mismo, las clasificaciones pueden basarse en secciones.

Por lo tanto, un dispositivo rotatorio puede monitorizarse u operarse según las condiciones o tolerancias específicas de las secciones individuales.

60 Esta acción de monitorización de las palas individuales de las secciones individuales resulta ventajosa para poder comparar la salida de detección acumulada de las palas individuales mientras funcionan en las secciones individuales, de modo que pueda evaluarse el rendimiento de las palas individuales y el rotor en general.

65 En un aspecto, el dispositivo rotatorio es un rotor de un aerogenerador (WTG) y las palas de rotor son del aerogenerador (WTG).

Los aerogeneradores pueden beneficiarse de las evaluaciones y operaciones sugeridas aquí, ya que los

aerogeneradores deben funcionar en diferentes condiciones y durante largos períodos de tiempo. Los aerogeneradores requieren además mantenimiento y supervisión ocasionales, según sea necesario, que luego pueden emplearse como medidas correctivas durante dicho mantenimiento planificado y durante su funcionamiento. Además, pueden generarse alertas instantáneas y pueden aplicarse correcciones instantáneas.

5 Esta acción de monitorización del rendimiento de las palas individuales y el rotor en general resulta ventajoso para poder comparar el rendimiento de las palas individuales de un rotor específico y comparar el rendimiento de las palas individuales de un rotor específico con el rendimiento de las palas individuales de rotores similares. En función de esto, se puede optimizar el rendimiento de los rotores individuales. Adicionalmente, en función de esta comparación, se pueden generar alertas instantáneas y se pueden aplicar correcciones inmediatamente a través del controlador de la turbina eólica o en la siguiente visita de mantenimiento a la turbina eólica.

10 En un aspecto, existen acciones adicionales para monitorizar y clasificar la eficiencia aerodinámica y para realizar una clasificación de las eficiencias aerodinámicas relativas de las palas entre al menos una combinación en el conjunto de al menos dos palas de rotor.

15 Para lograr el equilibrio aerodinámico del rotor, según los métodos y sistemas descritos que permiten el ajuste de todas las palas con el mismo ángulo de paso, esto se puede realizar suponiendo que no haya daños individuales, la misma torsión y flexión, etc.

20 Para lograr la máxima eficiencia del rotor, el ajuste de todas las (tres) palas en el ángulo de paso más eficiente, en el caso de un WTG, puede realizarse en el intervalo desde el arranque hasta la velocidad del viento de potencia nominal.

25 Aunque no es obligatorio de acuerdo con las acciones descritas, opcionalmente, puede ser ventajoso que una pala defina el ángulo de paso de las palas más eficiente y, así, ajustar todas las (tres) palas en este ángulo de paso óptimo de las palas.

30 En el caso de un WTG, esto puede no solo lograr el equilibrio aerodinámico del rotor, sino también maximizar la salida de potencia desde el arranque hasta la potencia nominal y, por lo tanto, maximizar la salida de potencia total.

35 Un objeto se puede conseguir haciendo funcionar un dispositivo rotatorio que comprende las acciones de proporcionar el dispositivo rotatorio y monitorizar la alineación relativa del ángulo de paso de las palas del dispositivo rotatorio según las acciones descritas anteriormente. A continuación, hay que poner en funcionamiento el dispositivo rotatorio en función de la alineación relativa clasificada del ángulo de paso.

Se ejemplificarán las acciones de optimización de la eficiencia aerodinámica.

40 Debe observarse que no es solo una cuestión de cuán cerca de cero está la desalineación dinámica relativa del paso de las palas, sino también una cuestión de ajustar las tres palas al ángulo de paso más eficiente (normalmente fijo) desde el arranque hasta la potencia nominal donde el mecanismo de paso comienza a reducir la potencia.

45 Puede haber una acción de determinar qué ángulo de paso es el más eficiente entre el arranque y desde el arranque hasta el punto donde el WTG alcanza el rendimiento máximo/salida de potencia nominal. Esto se puede observar en los datos de los sensores, cuyo ángulo de paso produce la aceleración más alta.

Puede haber una acción de ajuste de los tres pasos de las palas en esta misma posición de ángulo mientras el rotor está en funcionamiento.

50 Existe una acción para definir el ángulo de paso más eficiente en las velocidades del viento entre los arranques y hasta el punto donde el WTG alcanza el rendimiento máximo/salida de potencia nominal.

55 En un aspecto, el dispositivo rotatorio es un aerogenerador (WTG) y en donde la acción de poner en funcionamiento el dispositivo rotatorio se realiza en un modo de funcionamiento corregido si la alineación relativa del ángulo de paso de las palas monitorizada está en o por encima de un valor umbral.

60 En un aspecto, existe una acción de monitorización y clasificación que comprende adicionalmente acciones de monitorización y clasificación de las diferencias relativas en las eficiencias aerodinámicas de pala entre al menos una combinación en el conjunto de al menos dos palas de rotor; y en donde la acción de puesta en funcionamiento comprende además poner en funcionamiento el dispositivo rotatorio en función de la eficiencia aerodinámica relativa clasificada.

Una acción adicional es monitorizar y clasificar las diferencias relativas en la eficiencia aerodinámica entre las palas y los algoritmos activarán entonces diferentes modos/señales de alarma cuando se detecten eventos inusuales.

65 Un objetivo se consigue con un sistema de monitorización de la alineación del ángulo de paso de las palas que comprende un conjunto de uno o más sensores de pala y medios computacionales configurados para realizar las

acciones que se han descrito anteriormente.

Un objetivo se consigue con un producto de programa informático que comprende instrucciones para hacer que los medios computacionales, tales como un ordenador o un controlador, realicen las acciones tal y como se describe.

5 Un objetivo consigue mediante un medio legible por ordenador que se almacena en el programa informático descrito.

Ejemplos

10 A continuación, se proporcionan ejemplos de medición de la desalineación relativa del ángulo de paso de las palas empleando los datos de acelerómetro de los sensores ubicados dentro/sobre palas de turbina eólica.

Un uso habitual pueden ser los datos de aceleración de acelerómetros de 3 ejes colocados de la manera más idéntica posible en las tres palas de un mismo aerogenerador.

15 El eje dominante se definirá como el eje de acelerómetro que está a lo largo de la pala. Los otros dos ejes se usarán para hallar las orientaciones de las palas.

Como primer ejemplo del método:

20 detección de la desalineación relativa del ángulo de paso de las palas empleando matrices de rotación y ángulos de Euler.

Primera alternativa con un eje dominante

25 Entre dos vectores 3D (x, y, z), es posible calcular una matriz de rotación en 3D (3x3) que definirá la transformación necesaria de un vector a otro.

30 A partir de esta matriz de transformación, se pueden determinar los ángulos de Euler. Los ángulos de Euler son los valores de ángulo necesarios en los tres ejes para definir la rotación entre los dos vectores. Una persona experta en la materia encontrará tranquilamente ejemplos de cálculo de ángulos de Euler.

En una base ortonormal (x, y y z, estos ángulos se definen como ϕ (rotación alrededor de x, balanceo), θ (rotación alrededor de y, paso) y ψ (rotación alrededor de z, guiñada).

35 En el primer método se utilizan las siguientes acciones:
los datos se filtran con un filtro de paso bajo para filtrar el ruido y mantener solo las fluctuaciones altas de los datos de aceleración: los movimientos de la pala.

40 Existe la acción de calcular matrices de rotación n a lo largo de un número predefinido n de iteraciones, dependiendo de la cantidad de datos utilizados, empleando un vector de origen y un vector objetivo. Estos dos vectores cambiarán en cada iteración, pero el intervalo de tiempo entre un vector de origen y un vector objetivo es siempre el mismo. Con la siguiente iteración, el vector objetivo se convierte en el vector de origen.

45 Existe la acción de extraer la matriz de rotación media de todas estas n matrices de rotación calculadas. El resultado es el ángulo de Euler alrededor del canal dominante de la matriz de rotación final.

Puede ser necesario realizar ajustes para definir adecuadamente el eje para generar una matriz de rotación en la que se pueda confiar para extraer los ángulos de Euler.

50 *Segunda alternativa (sin un eje dominante)*

Esta segunda alternativa es casi la misma que la primera alternativa.

55 La diferencia es que el cálculo de la matriz de rotación en cada iteración se realiza con el canal dominante igual a cero (0). Esto significa que únicamente se calculará el cambio de valores de los otros dos ejes de interés en esta matriz.

Un segundo ejemplo del método de detección de desalineación del paso (empleando la fórmula de balanceo)

60 Con los tres sensores A, B, C, cada uno colocado en las respectivas palas A, B, C, si, por ejemplo, el canal dominante es Z, es posible calcular el ángulo de balanceo de todos los valores en el canal X y el canal Y.

Antes de este cálculo, los datos se filtran en paso bajo.

65 Con referencia a la figura 13, los resultados se dan en grados de la siguiente manera:

Figura 13A $\text{balanceo}(A) = \text{ATAN2}(Y(A), X(A))$

Figura 13B $\text{balanceo}(B) = \text{ATAN2}(Y(B), X(B))$

Figura 13C $\text{balanceo}(C) = \text{ATAN2}(Y(C), X(C))$

5 La figura 13 muestra los cálculos del ángulo de balanceo de los dos ejes de interés (es decir, los dos ejes distintos del eje dominante), en un minuto. Se puede observar a través de este ejemplo que los ángulos de balanceo medidos en la pala A y C están dentro de los mismos intervalos de ángulo mínimo y máximo. Por otro lado, el ángulo de balanceo medido en la pala B muestra valores de balanceo desplazados hacia arriba. Esta diferencia de intervalos de ángulos se resta entre sí para obtener los valores relativos.

10 Las figuras 13A, 13B y 13C muestran la detección de desalineación del paso empleando la fórmula de balanceo para los tres sensores A, B, C ubicados en tres palas. Si, por ejemplo, el canal dominante es z, calculamos el ángulo de balanceo de todos los valores del canal x y el canal y. Antes de este cálculo, los datos se filtran en paso bajo.

15 *Primera alternativa: emplear la fórmula de balanceo y minimax*

De los tres conjuntos anteriores de datos de balanceo, se realizan los siguientes cálculos:

$$20 \quad AB_{\min} = \text{ABS}(\text{ABS}(\text{MIN}(\text{BALANCEO}(A)) - \text{ABS}(\text{MIN}(\text{BALANCEO}(B))))))$$

$$AB_{\max} = \text{ABS}(\text{ABS}(\text{MÁX}(\text{BALANCEO}(A)) - \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{BALANCEO}(B))))))$$

$$CA_{\min} = \text{ABS}(\text{ABS}(\text{MIN}(\text{BALANCEO}(A)) - \text{ABS}(\text{MIN}(\text{BALANCEO}(C))))))$$

$$25 \quad CA_{\max} = \text{ABS}(\text{ABS}(\text{MÁX}(\text{BALANCEO}(A)) - \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{BALANCEO}(C))))))$$

$$BC_{\min} = \text{ABS}(\text{ABS}(\text{MIN}(\text{BALANCEO}(B)) - \text{ABS}(\text{MIN}(\text{BALANCEO}(C))))))$$

$$30 \quad BC_{\max} = \text{ABS}(\text{ABS}(\text{MÁX}(\text{BALANCEO}(B)) - \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{BALANCEO}(C))))))$$

Se obtienen intervalos de confianza de los valores mínimos y máximos medidos entre dos palas.

Segunda alternativa: emplear la fórmula de balanceo y 50_{min} valores/50_{máx} valores

35 Esta segunda alternativa proporciona más precisión que la primera. Las fluctuaciones observadas en las figuras 13A-C conducirían a errores. En lugar de adoptar un valor para min y un valor para máx, se obtiene la media, por ejemplo, de los 50 valores más pequeños registrados y la media de los 50 valores más grandes registrados en cada cálculo de balanceo.

40 La alternativa puede expresarse como:

$$AB_{\min} = \text{ABS}(\text{MIN}(\text{MEDIA}(50_{\min_val_BALANCEO}(A))) - \text{ABS}(\text{MIN}(\text{MEDIA}(50_{\min_val_BALANCEO}(B)))))$$

$$45 \quad AB_{\max} = \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{MEDIA}(50_{\max_val_BALANCEO}(A))) - \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{MEDIA}(50_{\max_val_BALANCEO}(B)))))$$

$$CA_{\min} = \text{ABS}(\text{MIN}(\text{MEDIA}(50_{\min_val_BALANCEO}(A))) - \text{ABS}(\text{MIN}(\text{MEDIA}(50_{\min_val_BALANCEO}(C)))))$$

$$50 \quad CA_{\max} = \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{MEDIA}(50_{\max_val_BALANCEO}(A))) - \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{MEDIA}(50_{\max_val_BALANCEO}(C)))))$$

$$55 \quad BC_{\min} = \text{ABS}(\text{MIN}(\text{MEDIA}(50_{\min_val_BALANCEO}(A))) - \text{ABS}(\text{MIN}(\text{MEDIA}(50_{\min_val_BALANCEO}(C)))))$$

$$BC_{\max} = \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{MEDIA}(50_{\max_val_BALANCEO}(A))) - \text{ABS}(\text{MÁX}(\text{MEDIA}(50_{\max_val_BALANCEO}(C)))))$$

60 Con esta alternativa, se obtienen intervalos de confianza de valores mínimos y máximos medidos entre dos palas.

Un tercer ejemplo del método de detección de la desalineación de paso empleando elipse de ajuste

65 Este método utiliza datos sin procesar, no se realiza preprocesamiento. Puede haber acciones (véanse las figuras 14A y B):

- para cada sensor, los dos ejes de interés (distintos del eje dominante, que es el tercer eje a lo largo de la pala) se utilizan para hallar una elipse de ajuste a partir de los datos recopilados.
- A partir de esta elipse de ajuste se toman los dos puntos más distantes.
- A partir de las coordenadas de estos dos puntos más distantes se calcula el valor de pendiente.
- Cuando se tiene un valor de pendiente para los tres sensores, se pueden calcular los ángulos entre estas pendientes y hallar el ángulo relativo entre dos conjuntos de datos de sensor, es decir, dos orientaciones de pala.

En los gráficos mostrados en las figuras 14A y 14B hay ilustraciones de este ejemplo, que trazan los datos de aceleración de dos sensores de una misma turbina. Los dos canales de aceleración X e Y de interés (los dos canales distintos del canal dominante Z) se representan entre sí con puntos (azul), la elipse de ajuste de estos puntos azules es la elipse en línea completa (roja); y los dos puntos más distantes de esta elipse son puntos sólidos (negros).

La longitud del eje mayor y menor de esta elipse de ajuste también podría usarse para calcular la orientación y posición del sensor. Por ejemplo, la relación entre la longitud del eje mayor y la longitud del eje menor da una indicación de la posición del sensor. El eje mayor de una elipse es su diámetro más largo, mientras que el eje menor de una elipse es su diámetro más corto.

Se observa que para este método podría usarse un acelerómetro de dos ejes ya que solo se emplean dos ejes.

En la figura 14A y la figura 14B se muestran ejemplos de gráficos de dos sensores ubicados en dos palas de la misma turbina. Cada uno de los dos gráficos muestra los dos ejes de interés que se trazan en azul, la elipse de ajuste en rojo y los dos puntos más distantes en negro.

Con respecto a la corrección de calibración:

en los ejemplos mencionados, el proceso de instalación y la evaluación del ángulo de error es importante. Los sensores deben montarse en las tres palas de la manera más idéntica posible. No es posible confiar en este postulado para creer en los resultados presentados en las secciones anteriores. Por lo tanto, calcular los ángulos de instalación iniciales de los sensores de las palas y compararlos de un sensor a otro mejorará los resultados.

Estos ángulos de corrección calculados se usarán junto con los datos recopilados de los sensores para prever que los sensores están montados con los mismos ángulos. Por lo tanto, se puede prever que los resultados de los algoritmos son válidos.

Un acelerómetro mide la aceleración y la fuerza gravitacional (1g) y cómo se divide en los tres canales del sensor. Esta división da la orientación del sensor.

La idea principal consiste en medir las aceleraciones con los tres sensores de las palas en posición de parada y, en función de las mismas, calcular las diferencias en los ángulos de instalación.

Por razones prácticas, la adquisición de los datos de calibración se realiza durante la instalación de los sensores, cuando los técnicos están trabajando en la turbina. La adquisición de los datos de calibración también podría realizarse, evidentemente, de forma independiente a la instalación del sensor.

Primer método de calibración/corrección de la adquisición inicial de datos en parado con una o dos vueltas de rotor durante la instalación

Si el aerogenerador que se va a inspeccionar ha detenido las tres palas exactamente en la misma posición, este es el método preferido de adquisición de datos de calibración.

El proceso puede comprender las siguientes acciones:

- bloquear la turbina con una pala orientada directamente hacia abajo;
- instalar el primer sensor con el canal dominante predefinido y la distancia desde el centro a lo largo de una pala distinta de la que mira hacia abajo;

Esta es la hora en la que se usarán los datos del primer sensor de la primera pala como datos de calibración;

- rotar el rotor 1/3 de rotación para que la segunda pala alcance la posición en la que se realizará la segunda instalación; para que coincida con la mayor precisión posible, la posición óptima es donde estaba la primera pala antes de la rotación;

- instalar el segundo sensor con el mismo canal dominante predefinido a lo largo de la segunda pala;

Esta es la hora en la que se usarán los datos del segundo sensor de la segunda pala como datos de calibración;

- 5 - rotar el rotor 1/3 de rotación para que la tercera pala alcance la posición en la que se realizará la tercera instalación; para que se reproduzca con la mayor precisión posible, la posición óptima es donde estaban la primera y la segunda palas antes de las rotaciones;

- 10 - instalar el tercer sensor con el mismo canal dominante predefinido a lo largo de la pala;

esta es la hora en la que se usarán los datos del tercer sensor de la tercera pala como datos de calibración.

Primer método de instalación: cálculos de ángulo de corrección

- 15 El primer método de instalación comprende un proceso con las siguientes acciones:

- después de la instalación de los sensores en las palas, recuperar los registros de hora con las correspondientes posiciones conocidas de las palas;

- 20 - extraer un minuto de datos de todas las aceleraciones en estas posiciones en parado y promediarlas canal por canal para obtener un valor medio de posición a lo largo del tiempo (un valor para cada canal de cada sensor);

- calcular matrices de rotación entre estos datos de sensor promediados. Tres sensores dan tres vectores 3D y, por lo tanto, tres matrices de rotación;

- 25 - extraer el ángulo de Euler alrededor del eje dominante para lograr el error de ángulo de sensor inicial;

- este error de ángulo de sensor se usa como la condición inicial (ángulo de error debido a la instalación);

- 30 - estos ángulos de error se restarán o sumarán en consecuencia a los resultados finales de los métodos presentados anteriormente.

Segundo método de calibración/corrección del estado parado inicial sin giros del rotor durante la instalación

- 35 Si no es posible detener las tres palas exactamente en la misma posición al inspeccionar el aerogenerador, este es un método de adquisición de datos de calibración que se puede usar en su lugar. Este es el escenario del peor de los casos con respecto a la adquisición de datos de calibración. Este método se diferencia del primer método (cálculos de ángulo de corrección) ya que emplea una acción de comparación de los valores medidos con los valores teóricos esperados. Este método sigue siendo fiable, pero puede generar más errores que el primer método.

- 40 El segundo método de calibración/corrección en estado parado inicial comprende un proceso con las siguientes acciones:

- bloquear la turbina con una pala orientada directamente hacia abajo;

- 45 - instalar los tres sensores en esta posición del rotor de la misma manera en las tres palas: mismo eje dominante a lo largo de las palas y misma distancia desde el centro del rotor.

Esta es la hora en la que se usarán los datos de los tres sensores de las tres palas como datos de calibración.

- 50 *Segundo método de instalación: cálculos de ángulo de corrección*

En este caso, se conocen las posiciones teóricas de los sensores y estos valores de aceleración teóricos pueden usarse para construir las matrices de rotación con las aceleraciones reales.

- 55 Se supone que el canal dominante del sensor es z, el tercero, y la pala hacia abajo es la a. Los vectores de aceleración teóricos que deberían medirse en esta posición en parado son:

- 60 A - pala orientada hacia abajo, canal dominante tomando mediciones de toda la aceleración
B - pala orientada hacia la derecha, (la pala tiene un ángulo de 30° con el plano horizontal)
C - pala orientada hacia la izquierda, (la pala tiene un ángulo de 150° con el plano horizontal)

Así, en el sistema de coordenadas de referencia:

- 65 $\cos(30) = 0,866$, $\sin(30) = 0,5$, $\cos(150) = -0,866$, $\sin(150) = 0,5$.

Como ejemplo, aquí están las aceleraciones medidas con este tipo de datos de calibración:

A_{teo} : [0, 0, -1]
 B_{teo} : [0,8660, 0, 0,5]
 C_{teo} : [-0,8660, 0, 0,5]

A: [0,0309, -0,0971, -0,9936]
 B: [0,8647, 0,0251, 0,4899]
 C: [-0,8606, 0,0171, 0,5020]

La aceleración de la fuerza gravitacional se mide en m/s^2 .

El segundo método de instalación comprende un proceso con las siguientes acciones:

- después de la instalación de los sensores en las palas, recuperar los registros de hora con las correspondientes posiciones conocidas de las palas;
- extraer un minuto de datos de todas las aceleraciones en estas posiciones en parado y promediarlas canal por canal para obtener un valor medio de posición a lo largo del tiempo (un valor para cada canal de cada sensor);
- calcular las matrices de rotación entre estos datos de sensor promediados y los datos teóricos. Tres sensores dan tres vectores 3D y, por lo tanto, tres matrices de rotación;
- extraer el ángulo de Euler alrededor del eje dominante proporciona la desalineación relativa del paso de las palas en comparación con el valor teórico esperado;
- comparar los valores de ángulo entre palas para obtener el error de ángulo de sensor inicial;
- este error de ángulo de sensor se usa como la condición inicial (ángulo de error debido a la instalación);

Estos ángulos se restarán o sumarán en consecuencia a los resultados finales de los métodos presentados anteriormente.

Presentación de los resultados del método

A continuación, se expone una presentación de la desalineación relativa del ángulo de paso de las palas entre los resultados de medición de las tres palas (pala A, B y C).

Resultado; ejemplo para una turbina eólica de tres palas:

B (método de la elipse)	C	D = B - C
$\Delta(A, B)$: -0,593°	$\Delta(A, B)$: 0,089 °	$\Delta(A, B)$: -0,683 °
$\Delta(A, C)$: -4,187 °	$\Delta(A, C)$: -3,223 °	$\Delta(A, C)$: -0,963 °
$\Delta(B, C)$: -3,593 °	$\Delta(B, C)$: -3,001 °	$\Delta(B, C)$: -0,591 °

Se podrían usar varios métodos para obtener estas desalineaciones relativas del ángulo de paso de las palas entre los resultados de las tres palas (palas A, B y C). En este documento se han presentado dos métodos adicionales (usando matrices de rotación y fórmulas de balanceo), pero también podrían usarse otros métodos.

Se puede realizar una corrección adicional para obtener una desalineación dinámica relativa del paso de las palas del rotor en posición de parada en comparación con cuando el rotor está en una posición operativa.

Para obtener la desalineación relativa total y real del paso de las palas entre las palas individuales mientras el rotor está en funcionamiento, se realiza una acción de

- añadir (corregir) al resultado (D) del método de elipse cualquier desalineación estática relativa del paso de las palas medida mientras el rotor está parado (A).

La corrección puede realizarse como se muestra en la siguiente tabla:

A	B	C	D = B - C	E = A + D
Desalineación estática relativa del paso de las palas medida en el rotor parado: se recomienda sincronización para obtener el resultado total correcto (E) → medición realizada al mismo tiempo por pala específica a medida que se mide el ángulo de error de instalación de sensor individual (C)	Método de elipse	La desalineación dinámica relativa del paso de las palas del rotor está en posición de parada en comparación con cuando el rotor está en posición operativa. Ángulo de error de instalación de sensor individual medido en el rotor en parado: sincronización recomendada para obtener el resultado total correcto (E) → calibración realizada al mismo tiempo por pala específica ya que la medición es la desalineación estática relativa del paso de las palas (A)	Esta es la desalineación dinámica relativa del paso de las palas del rotor en posición de parada en comparación con cuando el rotor está en una posición operativa	La desalineación relativa del paso de las palas entre las palas individuales mientras el rotor está en funcionamiento
$\Delta (X, Y): +1,593^\circ$	$\Delta (A, B): -0,593^\circ$	$\Delta (A, B): 0,089^\circ$	$\Delta (A, B): -0,683^\circ$	$\Delta (A, B): +0,910^\circ$
$\Delta (A, C): -2,187^\circ$	$\Delta (A, C): -4,187^\circ$	$\Delta (A, C): -3,223^\circ$	$\Delta (A, C): -0,963^\circ$	$\Delta (A, C): -3,150^\circ$
$\Delta (B, C): +5,593^\circ$	$\Delta (B, C): -3,593^\circ$	$\Delta (B, C): -3,001^\circ$	$\Delta (B, C): -0,591^\circ$	$\Delta (B, C): +5,002^\circ$

Método de optimización de la eficiencia aerodinámica

- 5 Los ejemplos y acciones mencionados anteriormente pueden aplicarse adicionalmente para optimizar la eficiencia aerodinámica del rotor, reducir las cargas y, después de esta optimización, monitorizar el rotor.

Por ejemplo, se pueden realizar las acciones descritas a continuación:

- 10 - realizar una comprobación visual de las palas en busca de daños en las palas (si se encuentran daños importantes, deben repararse);
- medir la desalineación relativa del paso de las palas mientras el rotor está en posición de parada;
- 15 - medir (monitorizar) la desalineación dinámica relativa del paso de las palas desde el rotor en posición de parada hasta el rotor en una posición operativa;
- ajustar el ángulo dinámico relativo del paso de las palas con el ángulo de paso óptimo durante el funcionamiento y verificar visualmente que las correcciones son las esperadas.

20 Para optimizar la eficiencia aerodinámica, una pregunta importante es, obviamente, ¿qué ángulo de paso de las palas es el más eficiente entre la velocidad de arranque y la potencia nominal donde el aerogenerador comienza a inclinarse para reducir a la potencia nominal máxima y, en última instancia, hasta el arranque?

- 25 Una opción es un ángulo de paso de acuerdo con un enfoque teórico. Otra opción es que el ángulo de paso sea igual al ángulo de paso de la turbina eólica más eficiente en el parque eólico.

30 Según las acciones y procedimientos ejemplificados anteriormente para obtener información acerca de la desalineación, un método alternativo y mejorado es aplicar la información obtenida sobre la desalineación a la información midiendo la eficiencia aerodinámica de las palas y el rotor mientras están en funcionamiento y aplicar esas mediciones al funcionamiento real mejorado.

35 Suponiendo que no haya daños en la pala y que todavía haya un desequilibrio en la eficiencia aerodinámica de la pala individual supervisada, entonces esto se deberá a una diferencia estructural entre las palas, tal como, por ejemplo, flexión, torsión y peso. Un ajuste final del paso relativo de las palas en funcionamiento corregirá este problema y el rotor funcionará ahora en un modo de equilibrio aerodinámico óptimo.

Después de este proceso de ajuste, las acciones y sistemas divulgados permitirán monitorizar la vida útil restante de

la pala individual y la eficiencia aerodinámica del rotor y evaluar en tiempo real y proporcionar un aviso instantáneo cuando sea necesario, tal como:

- 5 - aviso de daño en pala (por ejemplo, daño por rayo, faltan las franjas en pérdida, generador de vórtices y flaps de Gurney, etc.);
- aviso de desalineación de guiñada del rotor, en cuyo caso no hay necesidad de LiDAR;
- evento de formación de hielo en la pala;
- aviso de erosión del borde de ataque de la pala;
- 10 - aviso de intensidad de turbulencia;
- aviso de sobrevelocidad del rotor;
- orientación del rotor en alarma de posición detenida; o
- el conducto de puesta a tierra del sistema de rayos de los cojinetes de paso y el cojinete del eje principal (monitoreado una vez, digamos cada hora, según sea necesario).

15 El efecto de aplicar las acciones mencionadas anteriormente para optimizar la eficiencia aerodinámica del rotor y la optimización se ilustra en las figuras 15A y 15B, que ilustran ejemplos de dos generadores de turbina eólica de paso regulado.

20 La figura 15A muestra el ángulo de paso de pala promedio relacionado con la velocidad del viento promedio medida promediada durante un período de 10 minutos por el sistema SCADA en dos turbinas eólicas diferentes del mismo tipo (sitio 1 y sitio 2). Idealmente, los ángulos de paso promedio de las palas deberían ser similares para las dos turbinas eólicas en comparación con la velocidad promedio del viento.

25 La figura 15B muestra el ángulo de paso promedio de las palas relacionado con la velocidad de rotor promedio medida, promediada durante un período de 10 minutos por el sistema SCADA en dos turbinas eólicas diferentes del mismo tipo (sitio 1 y sitio 2). Idealmente, los ángulos de paso promedio de las palas deberían ser similares para las dos turbinas eólicas en comparación con la velocidad de rotor promedio.

30 La velocidad del viento frente a las rpm de turbina deseadas determina el paso de pala. Existe un ángulo de paso específico para cualquier velocidad del viento determinada para optimizar la potencia de salida. Los ángulos de paso mayores o menores que este valor reducen la potencia de salida, incluso hasta el punto de rotación cero con vientos fuertes.

35 Los cambios en el paso de las palas suelen comenzar cuando la velocidad del viento alcanza los 12-13 m/s (27-29 mph), el punto donde la turbina alcanza su máximo rendimiento. Si el viento comienza a superar ese nivel, los sistemas de control de paso se activan para reducir el ángulo de ataque de la pala, obteniendo un porcentaje menor de energía del viento para mantener el generador cerca del 100 % de producción sin exceso de velocidad.

40 Cuando la velocidad del viento alcanza 25 m/s (50 mph) o más, el sistema de control de paso protege las palas contra los fallos de una manera que reduce la carga del viento y detiene la rotación del rotor de la turbina.

Descripción de los dibujos

Las realizaciones de la invención se describirán en las figuras, en donde:

- 45 la figura 1 ilustra un método de monitorización de la alineación relativa del ángulo de paso;
- la figura 2 ilustra una acción adicional de calibración;
- 50 la figura 3 ilustra un método para poner en funcionamiento un dispositivo rotatorio que supone la alineación relativa del ángulo de paso;
- la figura 4 ilustra las definiciones de ángulos de paso relativos de un dispositivo rotatorio;
- 55 la figura 5 ilustra un dispositivo rotatorio; en este caso, un aerogenerador;
- la figura 6 ilustra una disposición de detección sobre las palas de un dispositivo rotatorio;
- la figura 7 ilustra aspectos adicionales de la disposición de detección en un dispositivo rotatorio;
- 60 la figura 8 ilustra las múltiples opciones de disposición del nodo sensor e ilustra las disposiciones de los sensores en las palas;
- la figura 9 ilustra un dispositivo rotatorio con alineación relativa del ángulo de paso de las palas en interacción
- 65 con un sistema de funcionamiento/monitorización remoto/basado en la nube;

- la figura 10 ilustra los aspectos de la eficiencia aerodinámica en comparación con la figura 11,
- la figura 11 ilustra los aspectos de la eficiencia aerodinámica en función del área de barrido,
- 5 la figura 12 ilustra la clasificación basada en secciones de la eficiencia aerodinámica,
- la figura 13 ilustra un ejemplo de análisis de datos en función de un método de tipo "balanceo";
- la figura 14 ilustra un ejemplo de análisis de datos en función de un tipo de método de "elipse de ajuste"; y
- 10 la figura 15 ilustra los aspectos de la eficiencia aerodinámica de la pala con y sin alineación relativa del ángulo de paso de las palas.

Descripción detallada de la invención

15

Elemento	N.º
Dispositivo rotatorio	10
Aerogenerador (WTG)	12
Rotor	14
Área de barrido	16
Sección de rotor	18
Conjunto de palas de rotor	20
Pala/pala de rotor	22
Conjunto de datos	30
Datos con registro de hora	32
Registro de hora	34
Conjunto de sensores de pala	40
Sensor de pala	42
Sistema de monitorización de la alineación del paso	50
Medios computacionales	60
Controlador	62
Nube/conexión	70
Sistema operador	74
Dispositivo móvil	76
Servidor del cliente	77
Base de datos/almacenamiento	80
Método de monitorización de la alineación relativa del ángulo de paso de las palas	100
Alineación relativa del ángulo de paso de las palas	102
Ángulo de paso	104
Combinación de palas de rotor	106
Recopilación	110
Calibración	120
Cálculo	130
Aplicación	140
Clasificación	150
Eficiencias aerodinámicas relativas de las palas	154
Factor de corrección	132
Sincronización	160
Método de funcionamiento de un dispositivo rotatorio	200
Provisión	210
Funcionamiento	220
Modo de funcionamiento corregido	225

La figura 1 ilustra un método 100 para monitorizar la alineación relativa del ángulo de paso 102.

20 El método 100 de monitorización de la alineación relativa del ángulo de paso de las palas 102 de un conjunto de 20 al menos dos palas de rotor 22 en un dispositivo rotatorio 10 se ilustrará o ejemplificará en las figuras 4-6.

El método 100 comprende acciones que implican:

una acción de recopilar 110 uno o más conjuntos de datos 30 de un conjunto 40 de uno o más sensores de pala 42 configurados para detectar al menos dos palas de rotor 22 respectivas.

25

Existe la acción de calibrar 120 un sensor de pala 42 de un conjunto 40A de sensores de pala 42 respecto a al menos un sensor de pala 42 de otro conjunto 40B de sensores de pala 42.

Existe la acción de calcular 130 un factor de corrección de calibración 132 para los sensores de pala 42.

Existe la acción de aplicar 140 el factor de corrección de calibración 132 a cada respectivo conjunto de datos 30.

5 Existe la acción de clasificar 150 la alineación relativa del ángulo de paso de las palas 102 entre los ángulos de paso 104 de al menos una combinación de palas de rotor 106 en el conjunto de al menos dos palas de rotor 22.

10 La figura 2 ilustra la acción adicional de sincronización 160. El método 100 se refiere de nuevo a los ejemplos e implantaciones mostrados en las figuras 4-6.

En vista del método 100 descrito ilustrado en la figura 1, la acción de recopilar conjuntos de datos 110 se realiza como datos con registro de hora 32 y el método comprende adicionalmente la acción de sincronizar 160 los conjuntos de datos 30 recopilados según los registros de hora 34.

15 La sincronización 160 puede realizarse por medios computacionales 60. La sincronización 160 puede realizarse en el nivel del nodo sensor 42. El registro de hora 34 puede obtenerse de un reloj local o de un reloj global y aplicarse en los datos muestreados para generar datos con fecha 32.

20 Existe la acción de clasificar 150 la alineación relativa del ángulo de paso de las palas 102 entre los ángulos de paso 104 de al menos una combinación de palas de rotor 106 en el conjunto de al menos dos palas de rotor 22.

La figura 3 ilustra un método 200 para poner en funcionamiento un dispositivo rotatorio 10 que implica una alineación relativa del ángulo de paso 102.

25 El método 200 de puesta en funcionamiento de un dispositivo rotatorio 200 comprende las acciones ilustradas.

Existe la acción de proporcionar 210 el dispositivo rotatorio 10.

30 Existe la acción de monitorizar 100 la alineación relativa del ángulo de paso de las palas 102 del dispositivo rotatorio 10.

Existe la acción de poner en funcionamiento 220 el dispositivo rotatorio 10 en función de la alineación relativa clasificada del ángulo de paso 102.

35 La figura 4 ilustra las definiciones de ángulos de paso relativos de un dispositivo rotatorio 10.

El dispositivo rotatorio 10 comprende un conjunto de palas de rotor 20. El conjunto de palas de rotor 20 comprende dos palas de rotor 22.

40 En las figuras 4A, 4B, 4C y 4D se divulga el dispositivo rotatorio 10 con cuatro posiciones de las palas de rotor 22.

Para cada una de las cuatro posiciones se muestran las proyecciones 10P del dispositivo rotatorio 10.

45 Cada pala de rotor 22 se coloca en un ángulo de paso (ϕ_i y ϕ_j) 104. Los ángulos de paso (ϕ_i y ϕ_j) 104 se miden usando un conjunto de sensores de pala 40 (no mostrados) de cada pala de rotor 22. El conjunto de sensores de pala 40 comprende uno o más sensores de pala 42.

50 La alineación relativa del ángulo de paso 102 se define como la diferencia ($\Delta\phi_{ij}$) entre los ángulos de paso (ϕ_i y ϕ_j) 104 de las dos palas de rotor 22:

$$\Delta\phi_{ij} = \phi_i - \phi_j$$

55 La alineación relativa del ángulo de paso ($\Delta\phi_{ij}$) 102 es igual a cero si los ángulos de paso (ϕ_i y ϕ_j) 104 de las dos palas de rotor 22 son iguales.

La alineación relativa del ángulo de paso ($\Delta\phi_{ij}$) 102 es distinta de cero si los ángulos de paso (ϕ_i y ϕ_j) 104 de las dos palas de rotor 22 son diferentes entre sí.

60 En la figura 4A, los ángulos de paso (ϕ_i y ϕ_j) 104 son iguales a cero y, por lo tanto, la alineación relativa del ángulo de paso ($\Delta\phi_{ij}$) 102 es igual a cero.

En la figura 4B, los ángulos de paso (ϕ_i y ϕ_j) 104 son iguales entre sí ($\phi_i = \phi_j$) y, por lo tanto, la alineación relativa del ángulo de paso ($\Delta\phi_{ij}$) 102 es igual a cero.

65 En la figura 4C, el ángulo de paso (ϕ_i) 104 es igual a cero y el ángulo de paso (ϕ_j) 104 es distinto a cero y, por lo tanto,

la alineación relativa del ángulo de paso ($\Delta\phi_{ij}$) 102 no es cero.

En la figura 4D, el ángulo de paso (ϕ_i) 104 y el ángulo de paso (ϕ_j) 104 no son cero. El ángulo de paso (ϕ_i) 104 es numéricamente mayor que el ángulo de paso (ϕ_j) 104, es decir $\phi_i > \phi_j$. Por lo tanto, la alineación relativa del ángulo de paso ($\Delta\phi_{ij}$) 102 es diferente de cero.

Los principios se aplican a una combinación de (dos) palas de rotor 106 (no mostradas) para dispositivos rotativos con tres o n palas de rotor. En el ejemplo, un dispositivo rotatorio con tres palas, (1,2,3) o (A, B, C) tendrá la combinación de palas de rotor 106 $ij = (12, 13, 23)$, $ij = (AB, AC, BC)$.

La figura 5 ilustra un dispositivo rotatorio 10; en este caso, un aerogenerador 12. El dispositivo rotatorio 10 comprende un rotor 14 con un conjunto de palas de rotor 20. El conjunto de palas de rotor 20 comprende tres palas de rotor 22A, 22B, 22C.

La figura 6 ilustra una disposición de detección en las palas 22A, 22B, 22C de un dispositivo rotatorio 10.

El dispositivo rotatorio 10 es un aerogenerador (WTG) 12 con un rotor 14. Las palas 22A, 22B, 22C son un conjunto de palas de rotor 20. Cada pala 22A, 22B, 22C comprende un conjunto de sensores de pala 40A, 40B, 40C. En el presente caso, cada conjunto de sensores de pala 40A, 40B, 40C comprende un sensor de pala 42A, 42B, 42C.

Un sensor 42 está configurado para estar en comunicación con un controlador 62 o medios computacionales 60. La comunicación puede ser alámbrica o inalámbrica, tal y como se ilustra aquí.

Los sensores 42 pueden implantarse como un nodo sensor que comprende medios esenciales de procesamiento y configuración.

La figura 7 ilustra aspectos adicionales de la disposición de detección en un dispositivo rotatorio 10.

El dispositivo rotatorio 10 es un aerogenerador (WTG) 12 con un rotor 14. El dispositivo rotatorio 10 comprende un conjunto de palas de rotor 20. El conjunto de palas de rotor 20 es de tres palas de rotor 22A, 22B, 22C.

Cada pala 22A, 22B, 22C comprende un conjunto de sensores de pala 40A, 40B, 40C. En el presente caso, cada conjunto de sensores de pala 40A, 40B, 40C comprende un sensor de pala 42A, 42B, 42C.

Se muestra un sensor adicional 42. En esta realización, el sensor adicional es un sensor rotatorio (sensor de RPM o sensor de vibración) tal como un sensor de alta velocidad de muestreo que mide la velocidad de rotación. El sistema puede configurarse para una acción de calibración 120, como se muestra en la figura 1, y basándose en los sensores 42ABC, que se realiza respecto a al menos otro sensor 42 del dispositivo rotatorio 10.

Los medios computacionales 60 o el controlador 62 pueden ser una sola unidad o estar distribuidos como se ilustra aquí.

La figura 8 ilustra las múltiples opciones de disposición del nodo sensor e ilustra las disposiciones de los sensores 42A, 42B, 42C en las palas 22A, 22B, 22C.

La figura ilustra un dispositivo rotatorio 10 que es un aerogenerador (WTG) 12 que tiene un rotor 14.

El dispositivo rotatorio 10 comprende un conjunto de palas de rotor 20. El conjunto de palas de rotor 20 es de tres palas de rotor 22A, 22B, 22C.

Cada pala 22A, 22B, 22C comprende un conjunto de sensores de pala 40A, 40B, 40C. En el presente caso, cada conjunto de sensores de pala 40A, 40B, 40C comprende tres sensores de pala 42A, 42B, 42C.

Un conjunto de sensores 40 puede entenderse como un nodo sensor con uno o más sensores 42. Tal nodo sensor puede comprender procesadores o medios para configurar, recopilar, almacenar y procesar los datos de sensor generados. Un nodo sensor puede disponer de medios de comunicación para comunicarse con un controlador (no mostrado) u otros nodos sensor. Un nodo sensor puede tener medios para sincronizar 160 (como se ilustró anteriormente) dichos datos de los sensores 42A, 42B y 42C.

La figura 9 ilustra un dispositivo rotatorio 10 con un sistema de monitorización de la alineación del paso de las palas 50 con una alineación relativa del ángulo de paso de las palas 102 (no mostrada) en interacción con un sistema de operación/monitorización remoto/basado en la nube 70.

El dispositivo rotatorio 10 es un aerogenerador (WTG) 12 con un rotor 14. El dispositivo rotatorio 10 comprende un conjunto de palas de rotor 20.

El conjunto de palas de rotor 20 es de tres palas de rotor 22A, 22B, 22C.

Cada pala 22A, 22B, 22C comprende un conjunto de sensores de pala 40A, 40B, 40C. En el presente caso, cada conjunto de sensores de pala 40A, 40B, 40C comprende un conjunto de sensores de pala 42A, 42B, 42C.

Los conjuntos de datos 30 son procesados a través de medios computacionales 60 en o por el controlador de turbina eólica 62. El controlador 62 puede tener un reloj para generar un registro de hora 34. En este caso, el registro de hora se sincroniza adicionalmente y se "entrega" desde un servidor de tiempo global 34. Por lo tanto, los conjuntos de datos 30 pueden ser datos con registro de hora 32. Como alternativa, cada nodo sensor 42 puede sincronizarse y el registro de hora 34 puede aplicarse a nivel del nodo sensor.

El sistema 50 puede interactuar con un sistema operador 74, un dispositivo móvil 76, un servidor de cliente 77 y un almacenamiento o base de datos 80 a través de un servicio de nube/conexión 70. El acceso adicional o la replicación o monitorización pueden estar disponibles a través de la nube 70 para una monitorización a largo plazo, alertas o programas de servicio.

Los métodos y la acción divulgados en el presente documento 100 pueden realizarse en un único dispositivo procesador o distribuirse.

La figura 10 ilustra los aspectos de la eficiencia aerodinámica relativa 154 de diferentes secciones del rotor 18I-IV, es decir, como una función del área de barrido 16. El área de barrido 16 se divide aquí en cuatro secciones 18 por las líneas de puntos.

En el ejemplo de la figura 11, el área de barrido 16 del rotor 14 se divide en ocho secciones de igual tamaño 18I-VIII, cada una de 45°, por las cuatro líneas de puntos, aunque puede ser relevante cualquier otra división del área de barrido 16 del rotor 14 en secciones de igual tamaño. La diferencia relativa entre la eficiencia aerodinámica de la pala específica 22 en una sección concreta 18I del área de barrido 16 del rotor 14 puede monitorizarse a lo largo del tiempo comparando la aceleración y los movimientos triangulares en el rotor y en las palas individuales en el período de tiempo en el que esta pala específica (2) se ubica/opera en esta sección específica del área de barrido.

Las figuras 12A y B ilustran una clasificación adicional de la monitorización del paso relativo de las palas y/o la eficiencia aerodinámica relativa en diferentes circunstancias operativas o secciones 18.

En la 12A, la monitorización del desequilibrio relativo en la eficiencia aerodinámica de las palas que puede deberse a daños en alguna de ellas, etc., monitorizar a lo largo del tiempo y comparar los movimientos triangulares de aceleración en el rotor y en las palas individuales cada vez que la pala 22A, B y C está funcionando en el área de puntos o sección 18 del área de barrido 16.

La figura 12B ilustra la asimetría de monitorización en una zona de bloqueo delante del rotor 14. Es decir, monitorizar a lo largo del tiempo y comparar los movimientos triangulares de aceleración en el rotor 14 y las palas individuales 22 cada vez que la pala 22A (o B o C) esté funcionando en/área discontinua/sección 18I y en área discontinua/sección 18II.

Las figuras 13 a 15 se refieren a los ejemplos descritos.

REIVINDICACIONES

1. Un método (100) de monitorización de la alineación relativa del ángulo de paso de las palas (102) de un conjunto de (20) al menos dos palas de rotor (22) en un dispositivo rotatorio (10); comprendiendo el método las siguientes acciones:
5
- recopilar (110) uno o más conjuntos de datos (30) de un conjunto (40) de uno o más sensores de pala (42) configurados para detectar las respectivas al menos dos palas de rotor (22);
10 - calibrar (120) un sensor de pala (42) de un conjunto (40A) de sensores de pala (42) respecto a al menos un sensor de pala (42) de otro conjunto (40B) de sensores de pala (42);
- calcular (130) un factor de corrección de calibración (132) de los sensores de pala (42);
- aplicar (140) el factor de corrección de calibración (132) a cada respectivo conjunto de datos (30); y
- clasificar (150) la alineación relativa del ángulo de paso de las palas (102) entre el ángulo de paso (104) de al menos una combinación de palas de rotor (106) en el conjunto de al menos dos palas de rotor (22), **caracterizado**
15 **por que** la acción de recopilar conjuntos de datos (110) se realiza como datos con registro de hora (32) y en donde el método comprende además la acción de sincronizar (160) los conjuntos de datos recopilados (30) según los registros de hora (34).
2. El método (100) de la reivindicación 1, en donde las acciones de recopilación (110) y calibrado (130) se realizan con el dispositivo rotatorio (10) en un estado parado, es decir, el estado estático, y en donde la acción de aplicar (140) el factor de corrección de calibración estática (132) se realiza en la desalineación dinámica relativa del paso de las palas del dispositivo rotatorio (10) en una posición de parada en comparación con cuando el dispositivo rotatorio (10) está en una posición operativa, es decir, en estado dinámico.
20
3. El método (100) de una o más de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la acción de calibrado (120) se realiza respecto a al menos otro sensor (42) del dispositivo rotatorio (10).
25
4. El método (100) de una o más de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la acción de recopilación (110) se realiza con sensores de pala (42) dispuestos sustancialmente de igual manera en las palas de rotor (22) respectivas.
30
5. El método (100) de una o más de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde las acciones se realizan en el dispositivo rotatorio (10) que comprende tres palas de rotor (A, B, C), y en donde la acción de recopilación (110) se realiza:
35
- recopilando (110) un conjunto de datos A (30A) durante un período de tiempo en el que el dispositivo rotatorio (10) está en un estado operativo parado con la pala de rotor A (22A) en una posición predefinida P;
- recopilar (110) un conjunto de datos B (30B) donde el dispositivo rotatorio (10) está en un estado operativo parado con la pala de rotor B (22B) en la posición predefinida P; y
40 - recopilar (110) un conjunto de datos C (30C) donde el dispositivo rotatorio (10) está en un estado operativo parado con la pala de rotor C (22C) en una posición predefinida P.
6. El método (100) según la reivindicación 5, en donde la acción de calibrado (120) se realiza solo en función de los conjuntos de datos recopilados A, B y C (30A, 30B, 30C).
45
7. El método (100) de una o más de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la acción de clasificación (150) se realiza en diferentes estados de los estados operativos del dispositivo de rotor (10) que incluyen al menos los estados de:
50
- un estado de parada [cero rpm]; o
- un estado de rotación [ciertas rpm de rotación].
8. El método (100) de una o más de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la acción de clasificación (150) se realiza en diferentes estados de los estados operativos del dispositivo de rotor (10) con distintas RPM.
55
9. El método (100) según una o más de las reivindicaciones 1 a 8, en donde el dispositivo rotatorio (10) es un rotor (14) de un aerogenerador (WTG) y las palas de rotor (22) son palas (22) del aerogenerador (WTG).
10. El método (100) según la reivindicación 9, que comprende además las acciones de monitorizar y clasificar la eficiencia aerodinámica y para clasificar las eficiencias aerodinámicas relativas de las palas entre al menos una combinación del conjunto de al menos dos palas de rotor (22).
60
11. Un método para poner en funcionamiento un dispositivo rotatorio (200), que comprende las acciones de:
65
- proporcionar (210) el dispositivo rotatorio (10);
- monitorizar (100) la alineación relativa del ángulo de paso de las palas (102) del dispositivo rotatorio (10) según

una o más de las reivindicaciones 1 a 9; y

- poner en funcionamiento (220) el dispositivo rotatorio (10) en función de la alineación relativa clasificada del ángulo de paso (102).

- 5 12. El método (200) de la reivindicación 11, en donde el dispositivo rotatorio (10) es un aerogenerador (WTG) y en donde la acción de poner en funcionamiento el dispositivo rotatorio (220) se realiza en un modo de funcionamiento corregido (225) si la alineación relativa monitorizada del ángulo de paso de las palas (102) es o está por encima de un valor umbral.
- 10 13. El método de la reivindicación 12, en donde la acción de monitorización (100) y clasificación (150) comprende además las acciones de monitorizar y clasificar las diferencias relativas en las eficiencias aerodinámicas de las palas (154) entre al menos una combinación del conjunto de al menos dos palas de rotor (20); y en donde la acción de funcionamiento (220) comprende además poner en funcionamiento (220) el dispositivo rotatorio (10) en función de la eficiencia aerodinámica relativa clasificada (154).
- 15 14. Un sistema de monitorización de la alineación del ángulo de paso de las palas (50), que comprende un conjunto (40) de uno o más sensores de pala (42) y medios computacionales (60) configurados para realizar el método de una o más de las reivindicaciones 1 a 11.

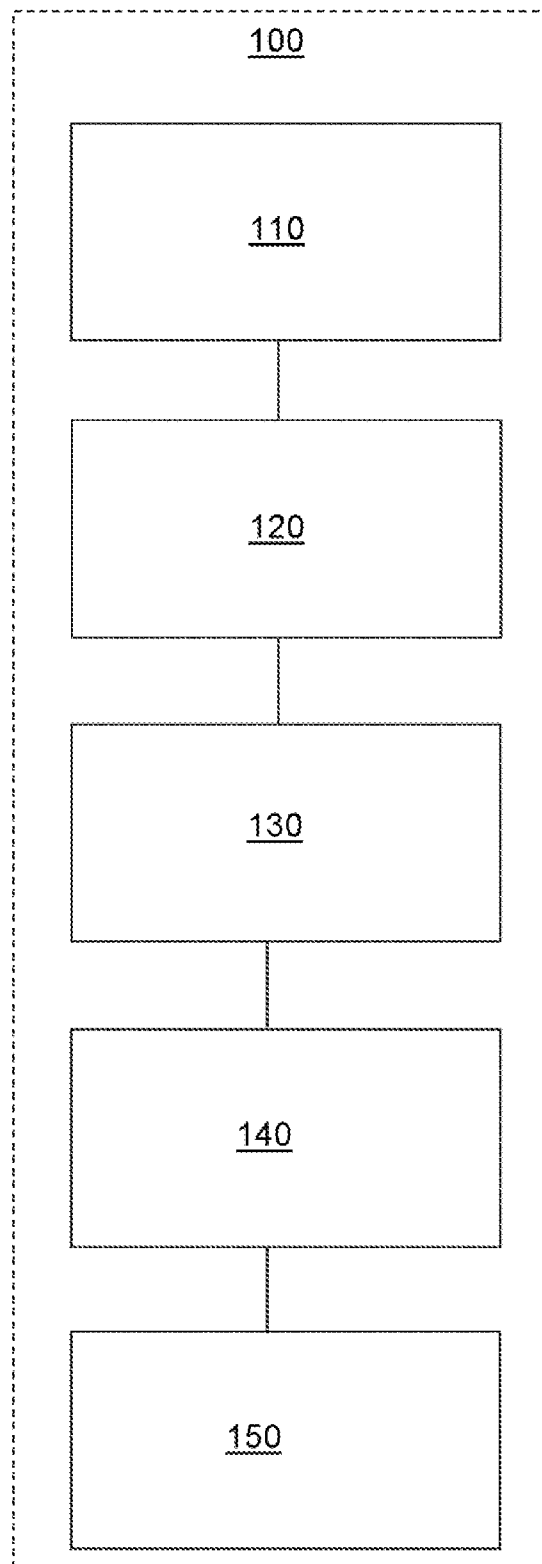


FIG. 1

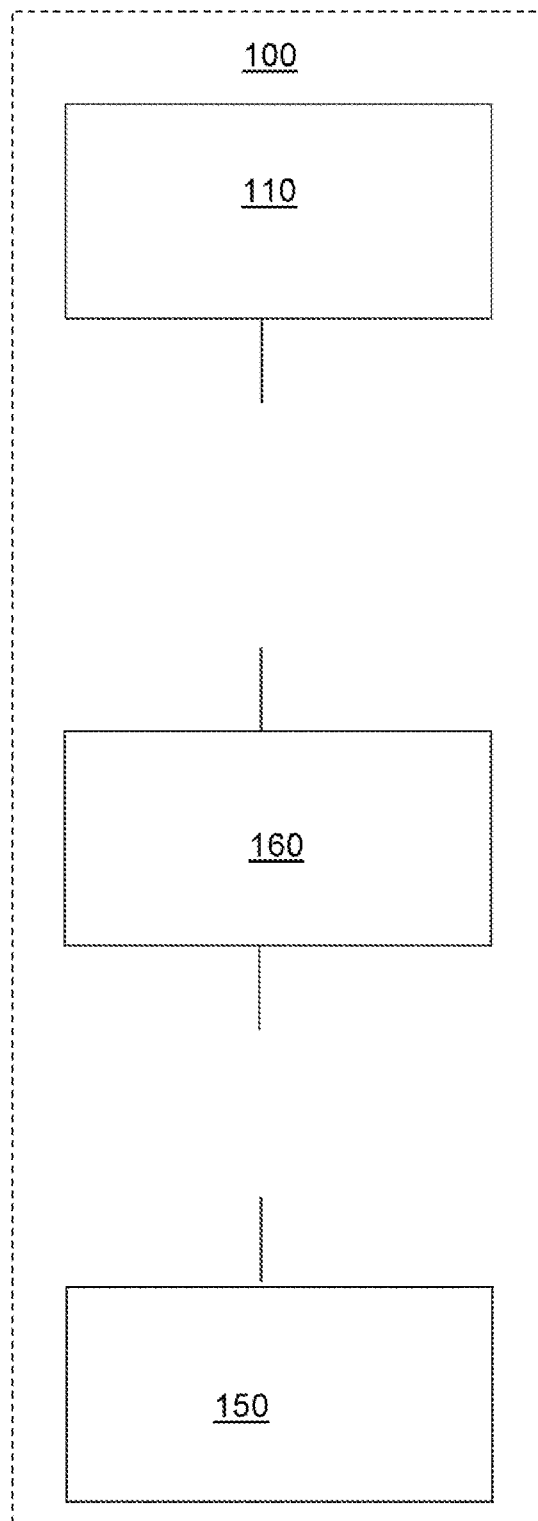


FIG. 2

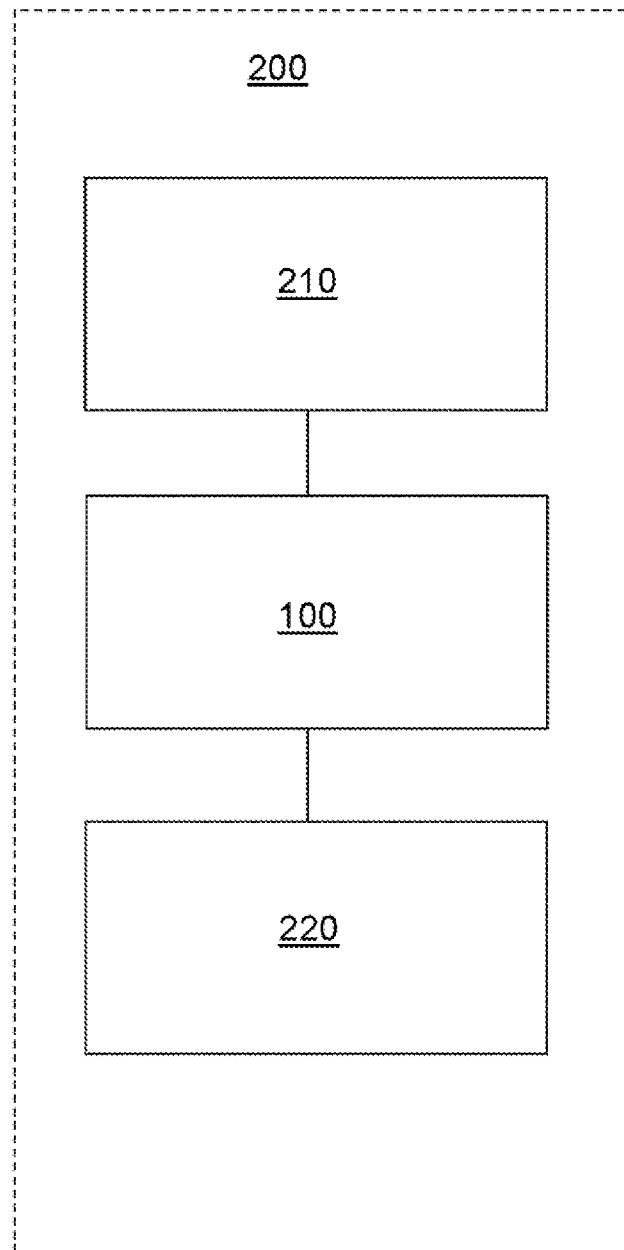


FIG. 3

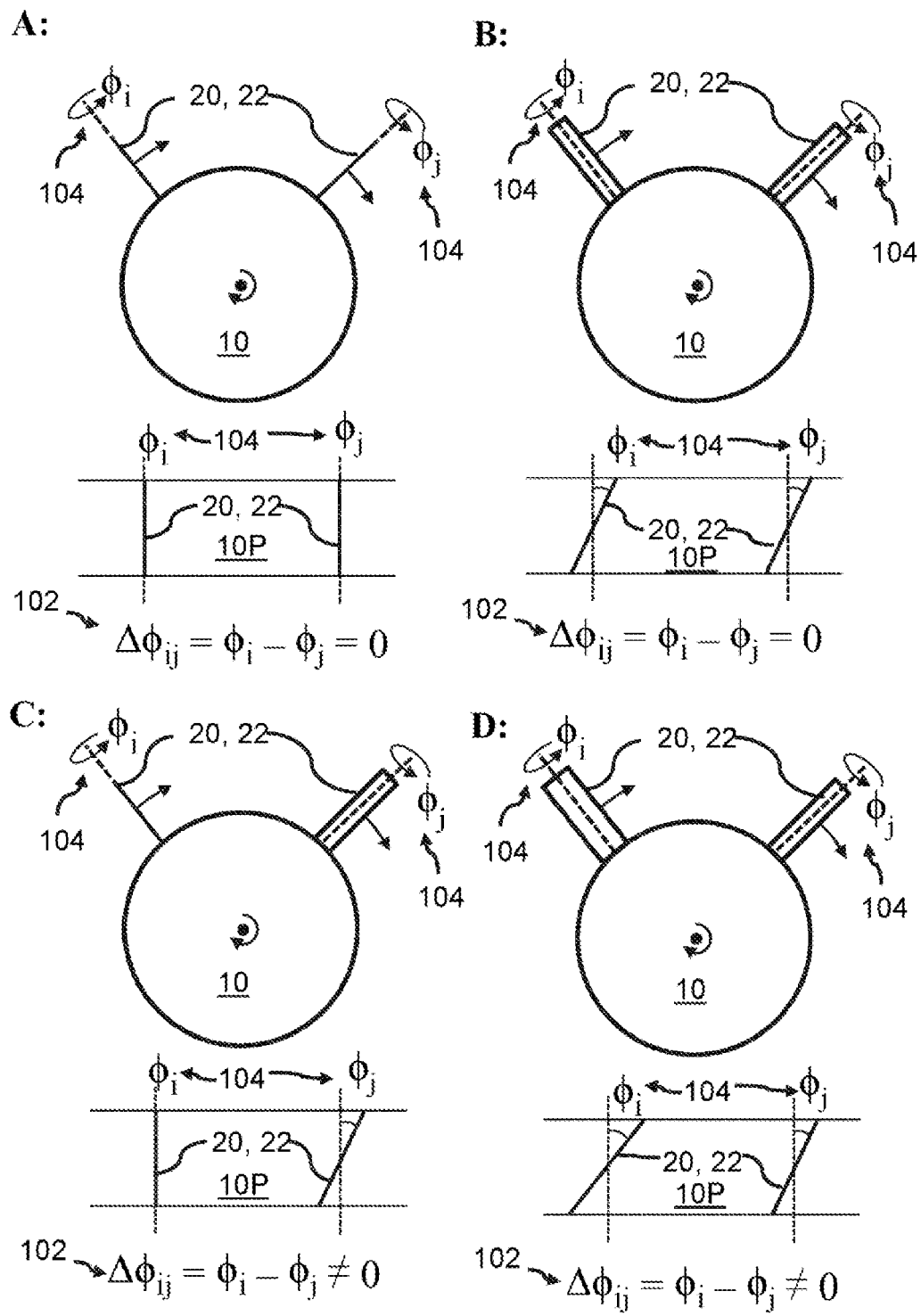


FIG. 4

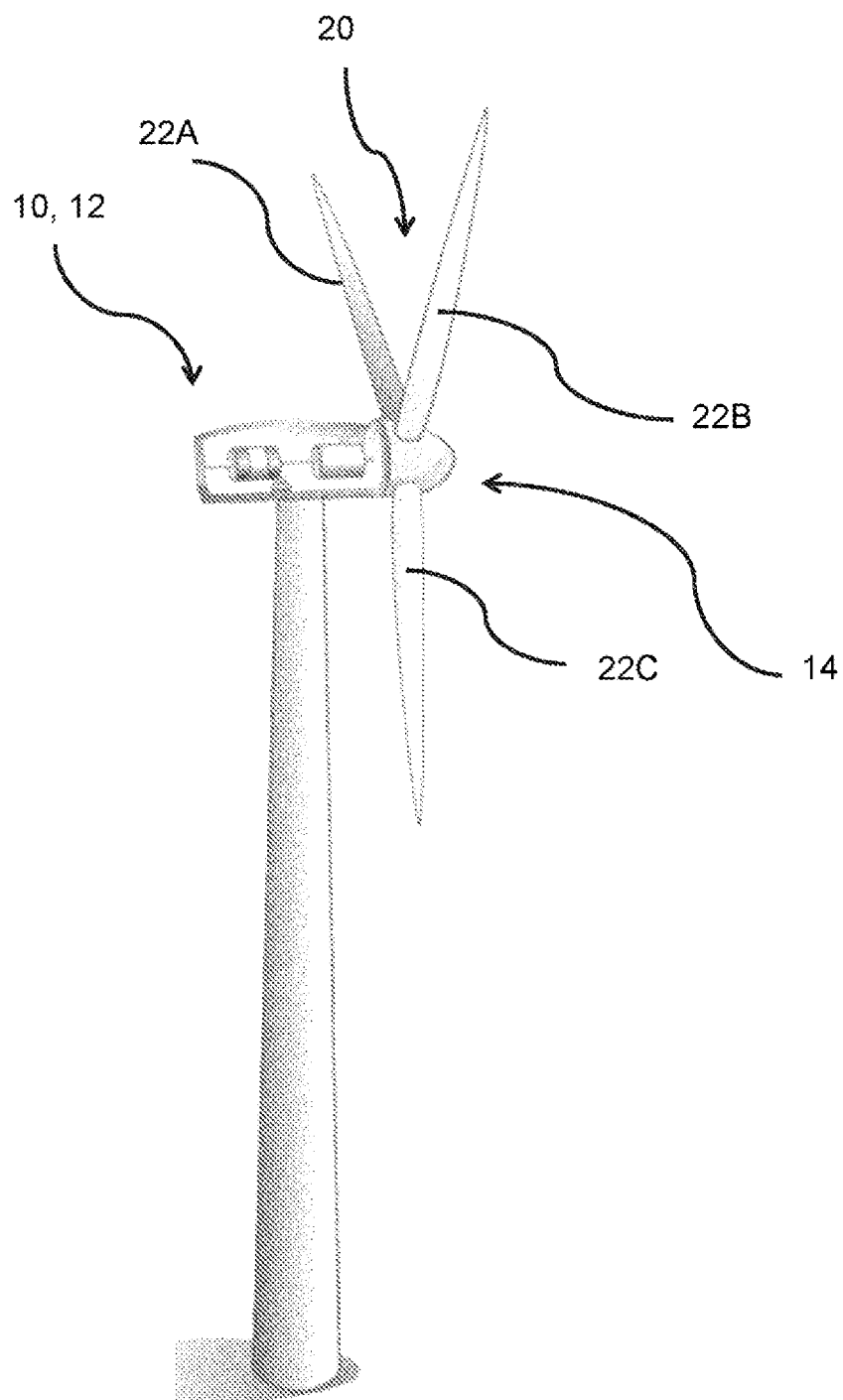


FIG. 5

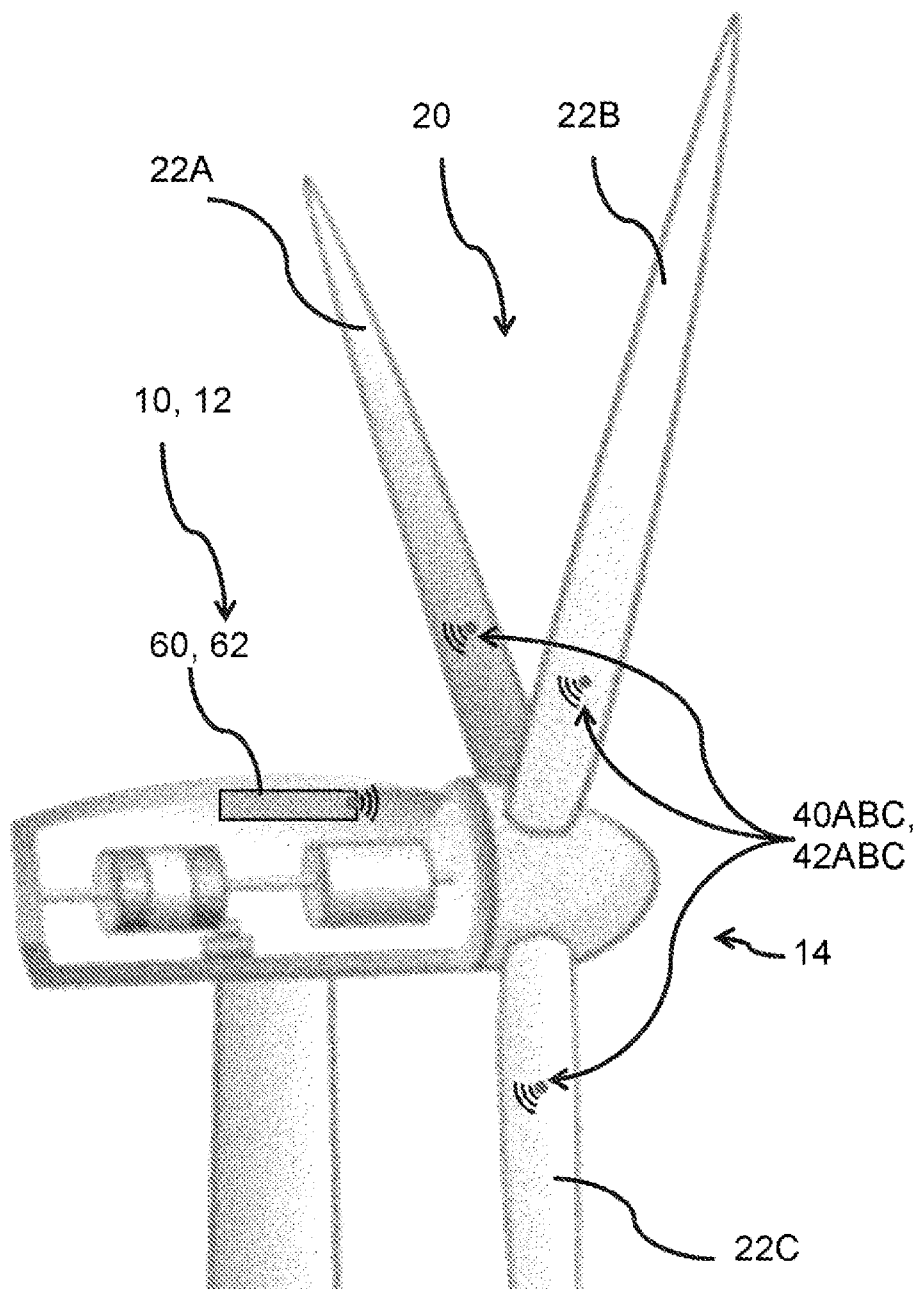


FIG. 6

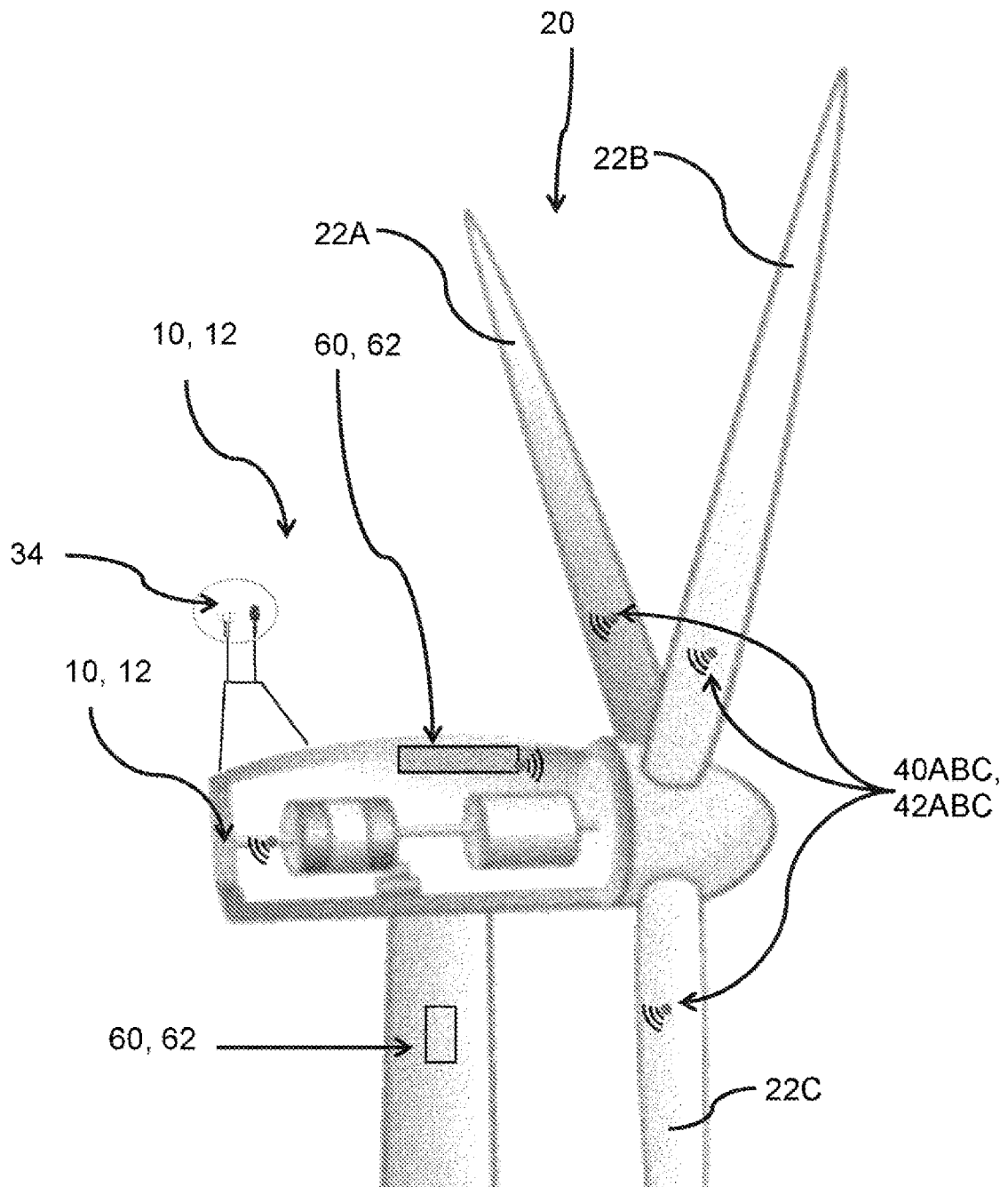


FIG. 7

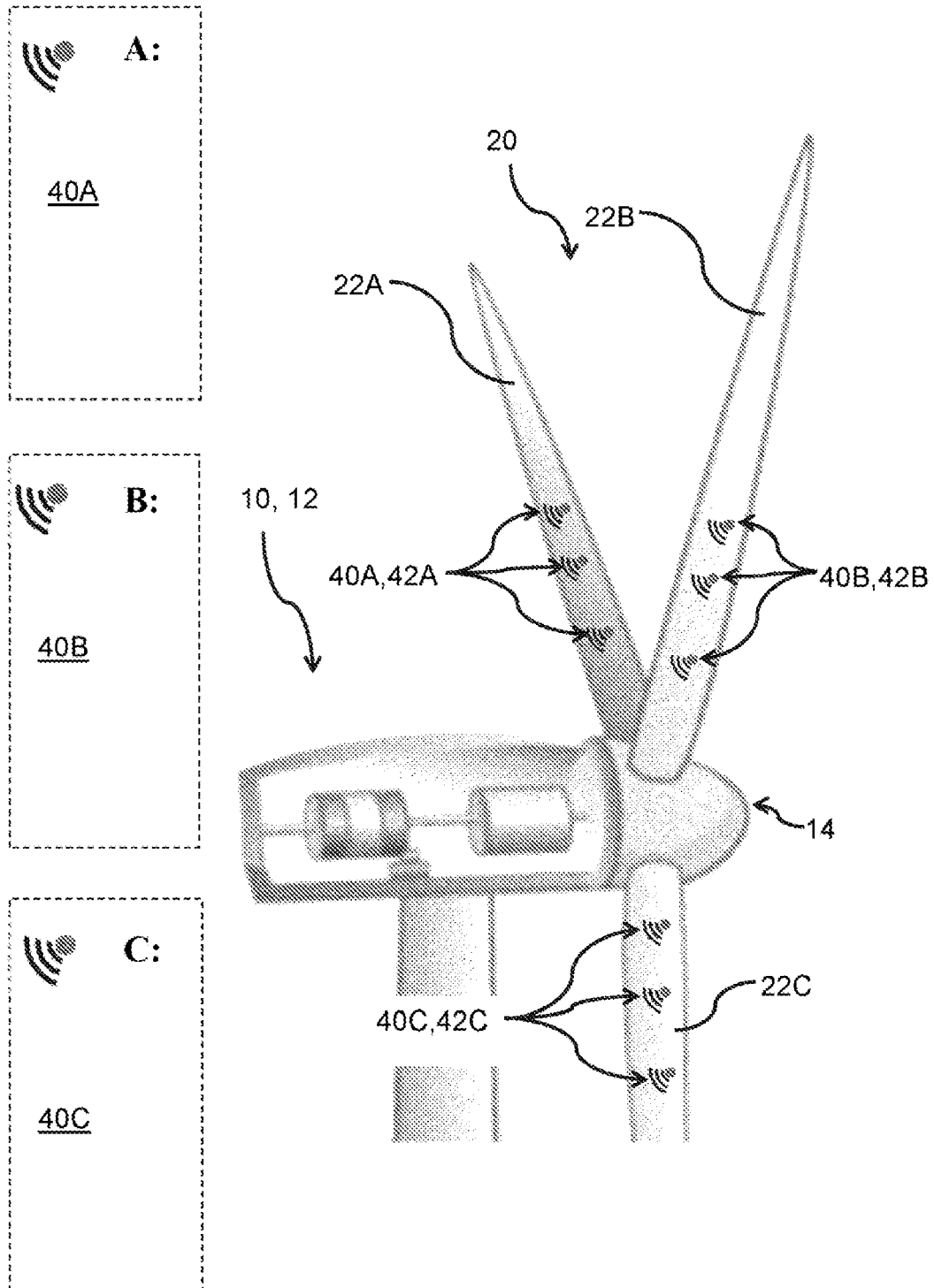


FIG. 8

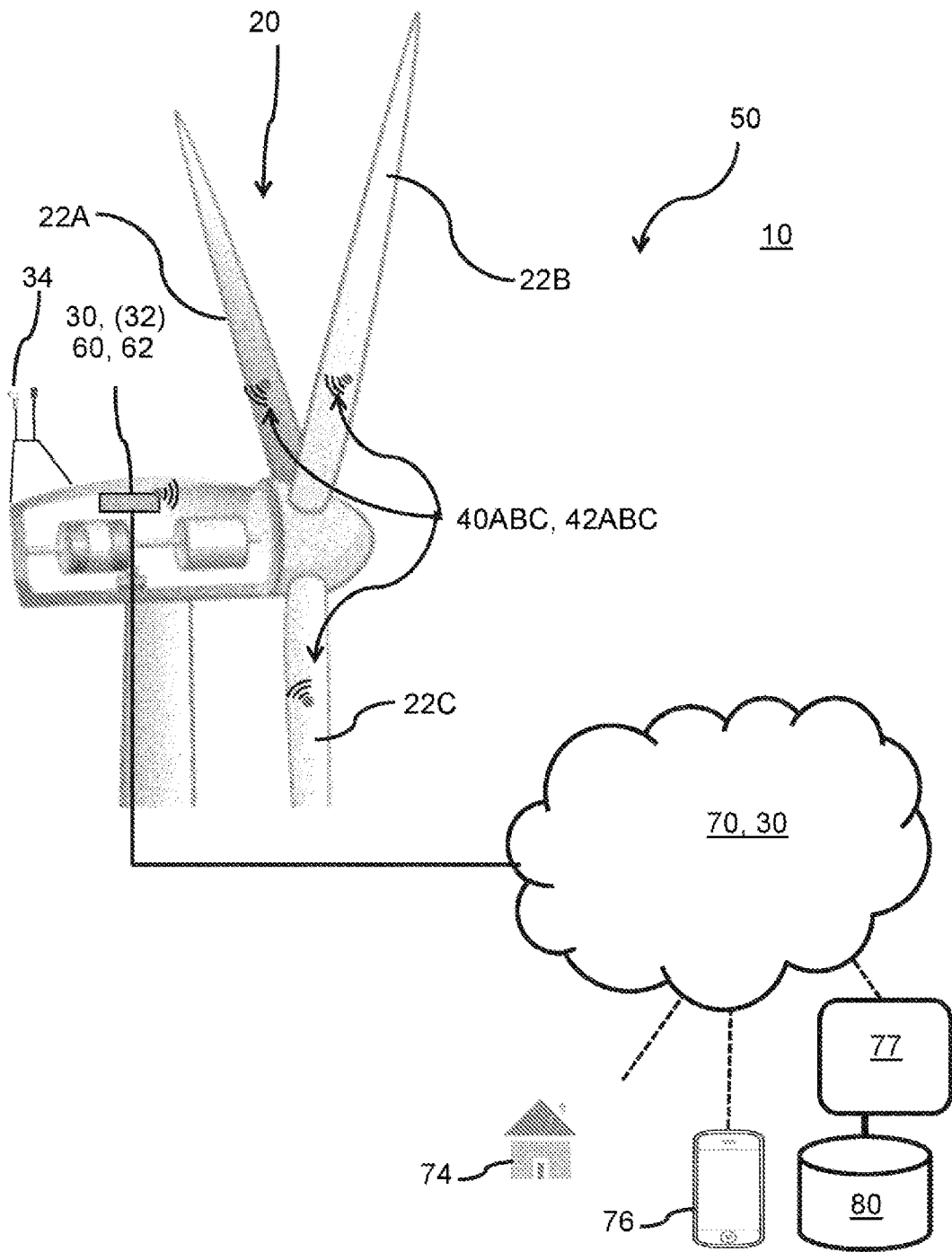


FIG. 9

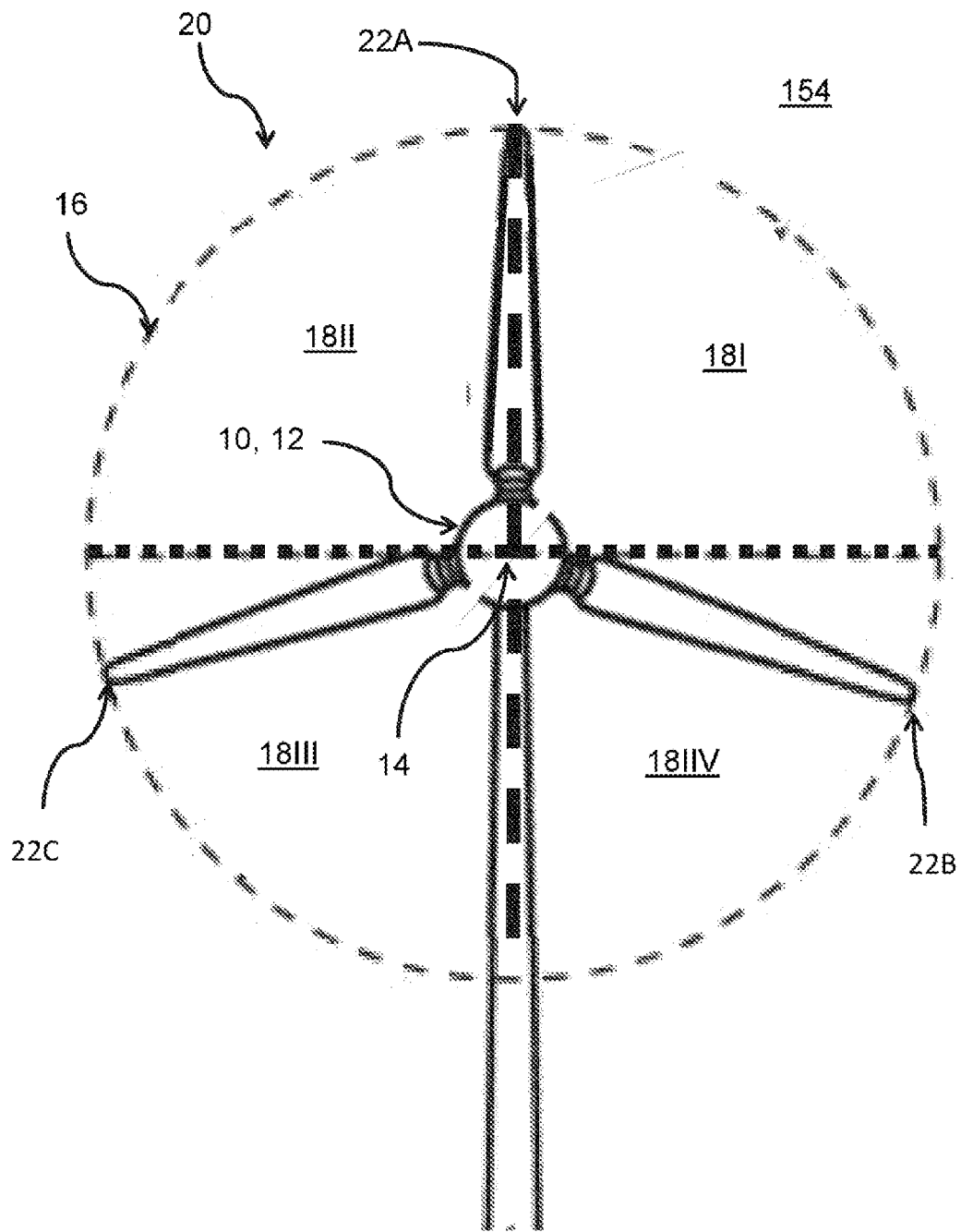


FIG. 10

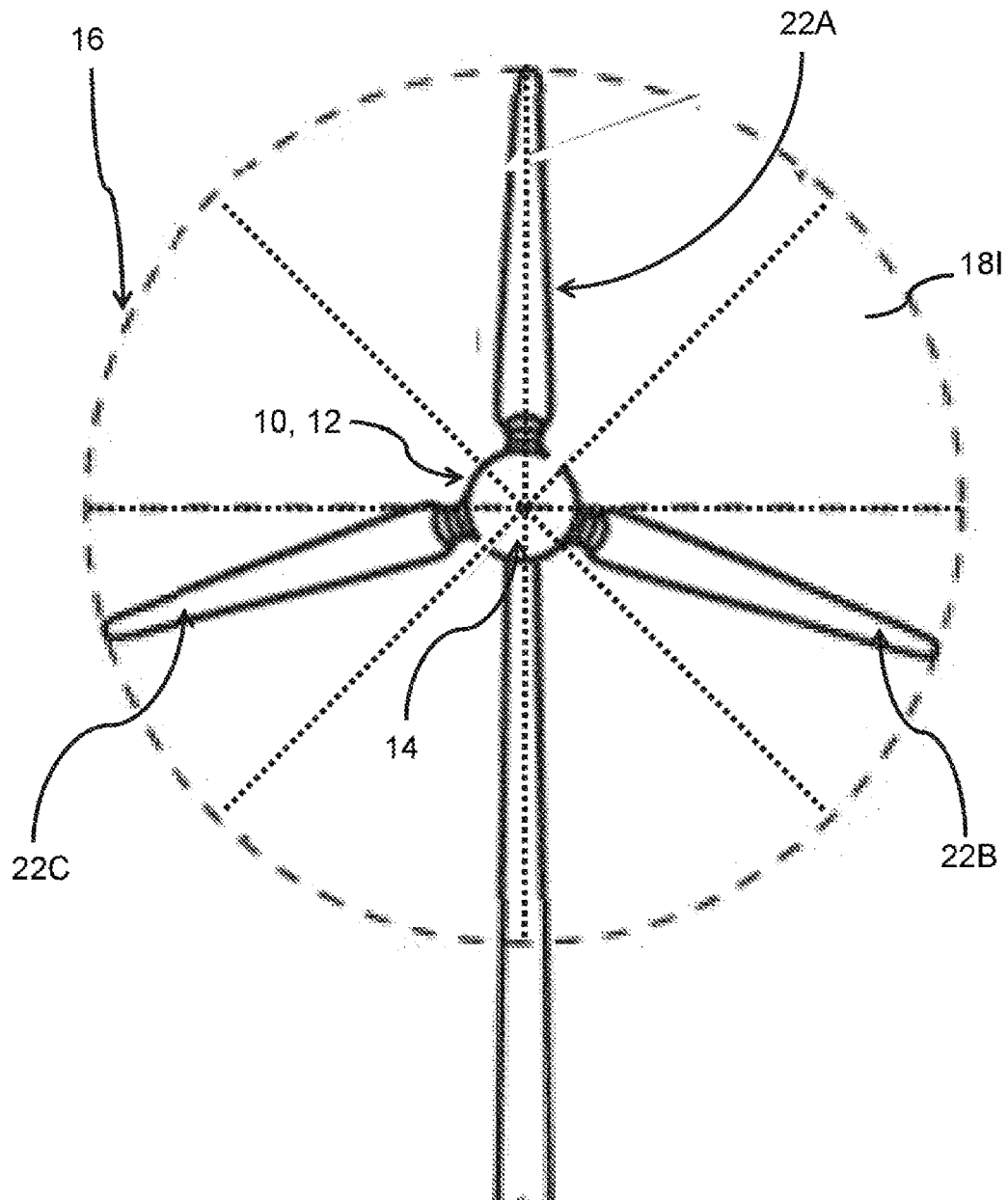


FIG. 11

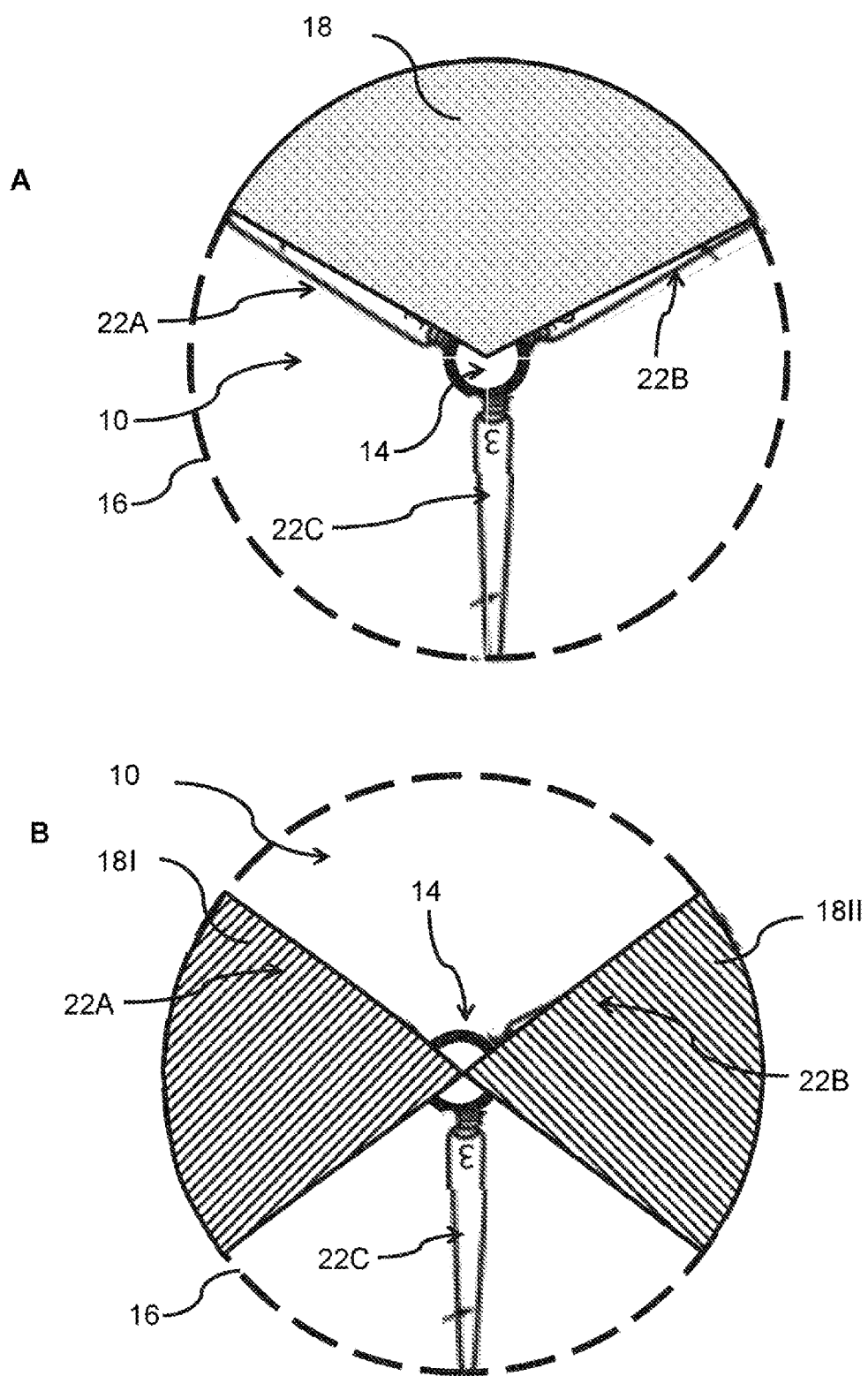


FIG. 12

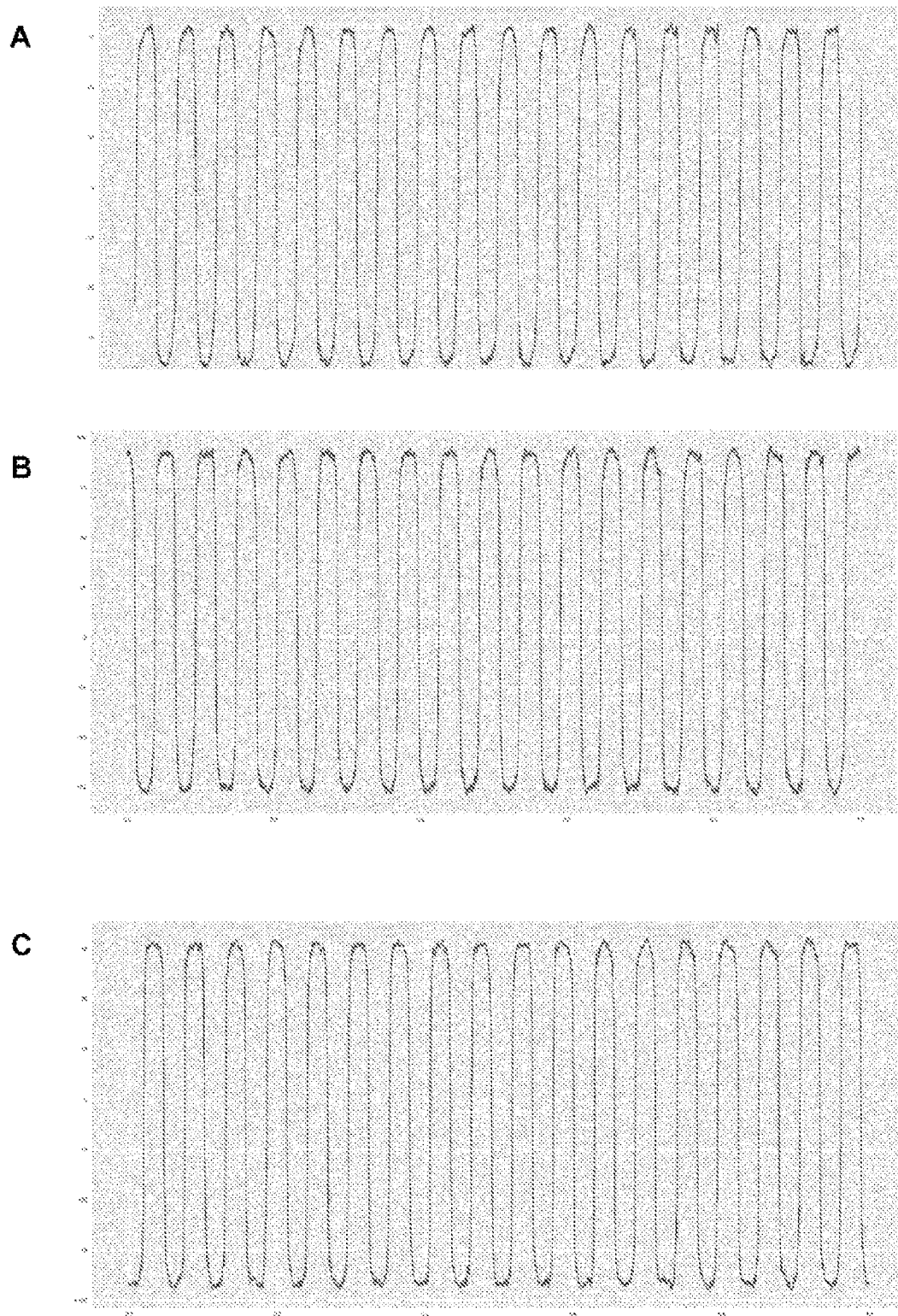


FIG. 13

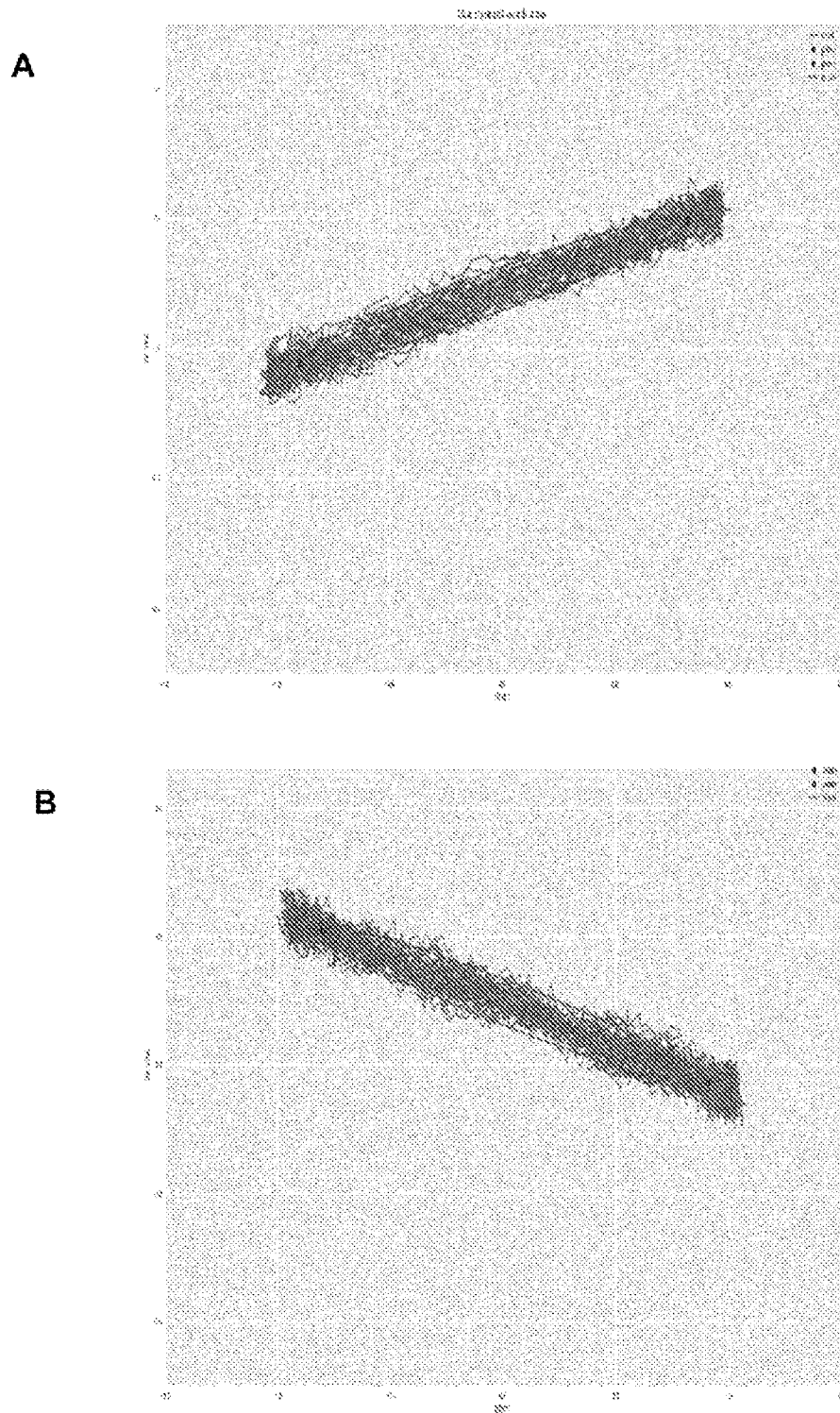


FIG. 14

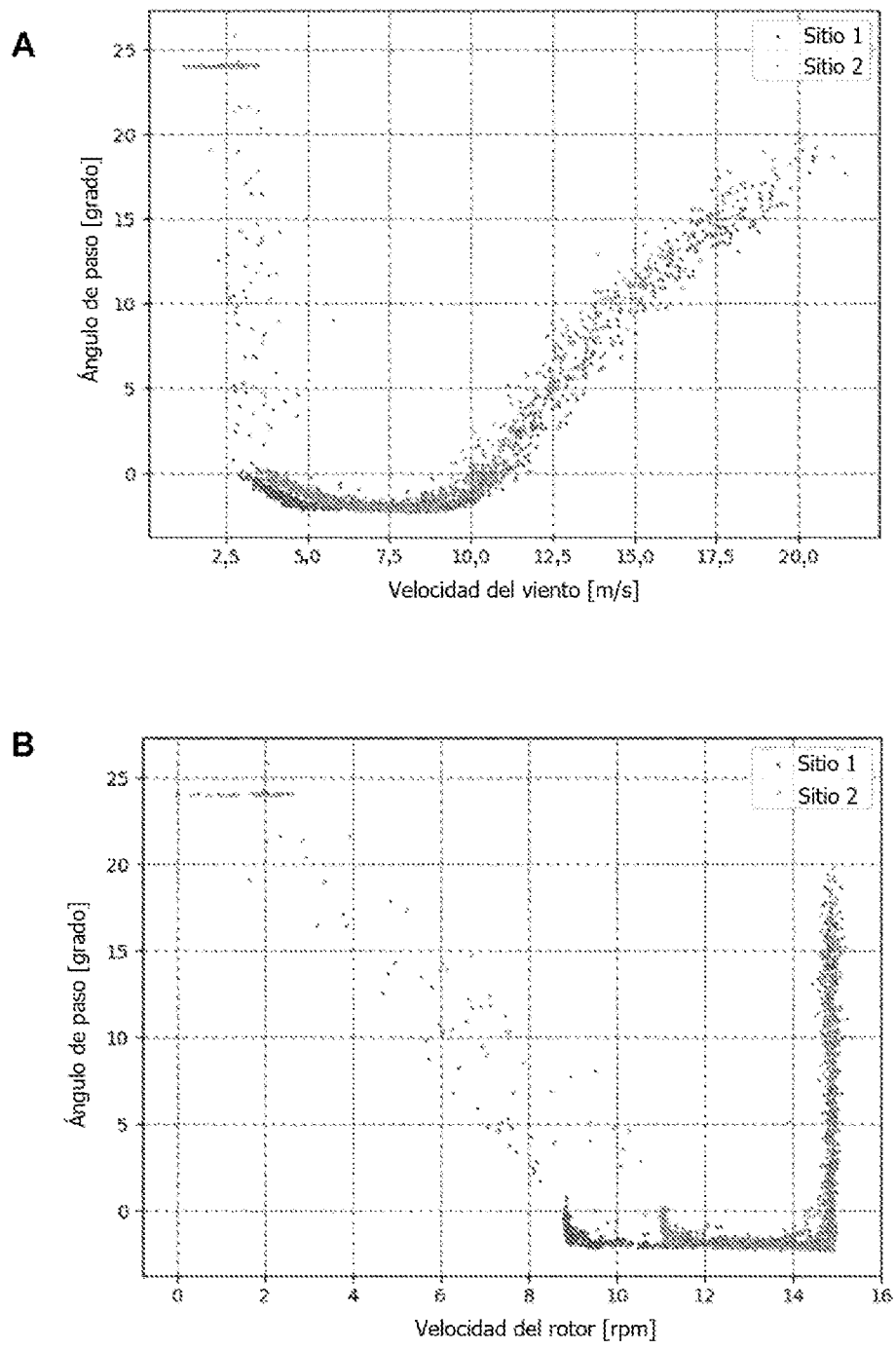


FIG. 15