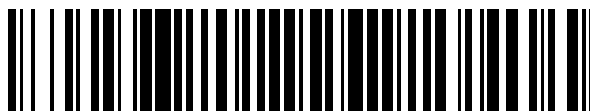


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 553 168**

51 Int. Cl.:

F03D 11/00 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.03.2008 E 08715599 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.10.2015 EP 2132437**

54 Título: **Turbina eólica con control de paso**

30 Prioridad:

30.03.2007 DK 200700504

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

04.12.2015

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**RISAGER, LARS;
SVENDSEN, RASMUS y
MIRANDA, ERIK CARL**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 553 168 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

Turbina eólica con control de paso

La presente invención se refiere a una turbina eólica con control de paso, que está dispuesta para reducir cargas que acortan la vida sobre componentes de la turbina eólica.

5 **Antecedentes**

La salida de potencia de una turbina eólica moderna puede controlarse por medio de un sistema de control para regular el ángulo de paso de las palas de rotor. La velocidad de rotación del rotor y la salida de potencia de la turbina eólica pueden de ese modo controlarse inicialmente, por ejemplo, antes de una transferencia a una red de distribución de energía eléctrica a través de medios de conversión de energía. Una ventaja de este control es una protección del rotor frente a que rote a una velocidad excesiva a altas velocidades de viento y se impidan cargas excesivas en las palas de rotor.

Especialmente para grandes diámetros de rotor, la distribución del perfil de flujo de entrada de viento puede ser no uniforme por el área del rotor, dando como resultado una carga no uniforme en cada pala de rotor en función de una rotación completa, así como cargas asimétricas fuera del plano para el conjunto de transmisión de la turbina eólica. La carga asimétrica debida al viento en el plano del rotor da como resultado que el rotor se cargue con un momento de inclinación y un momento de guiñada variables. Para una situación de flujo de entrada de viento libre, la distribución de cortadura es aproximadamente lineal y dicha carga en función de la rotación es de comportamiento casi sinusoidal con una frecuencia igual a la frecuencia de rotación del rotor. Para mantener una carga más constante sobre las palas de rotor, se han aplicado funciones de control de paso a controladores de paso de turbina eólica, en las que se ha añadido una corrección cíclica de rotor con una frecuencia igual a la rotación del rotor al ajuste de ángulo de paso global de las palas de rotor individuales.

Cualquier obstáculo dentro de una determinada distancia a barlovento de una turbina eólica crea una estela para la turbina eólica y, en consecuencia, elimina la situación de flujo de entrada de viento libre. Un ejemplo de un obstáculo pueden ser otras turbinas eólicas, ya que una turbina eólica siempre produce una estela en el sentido a sotavento.

Se sabe en el área técnica de las turbinas eólicas cómo proporcionar medios para el control de paso para las palas del rotor, es decir medios para hacer rotar cada una de las palas alrededor del eje longitudinal hasta una posición angular predeterminada para obtener un ángulo de paso de la pala que puede diferir del ángulo de paso de la otra pala o palas del rotor de la turbina eólica, con el propósito de reducir las cargas extremas así como las variaciones de carga que provocan fatiga en las palas, en particular en la raíz de las palas, y en otras partes del rotor y la transmisión. El control de paso puede ser independiente para cada pala de modo que no exista dependencia entre los ángulos de paso de las palas individuales, o el control de paso puede ser del tipo cíclico, es decir que el ángulo de paso instantáneo de una pala de rotor depende de una función del ángulo azimutal instantáneo de la pala de rotor, siendo la función al menos sustancialmente igual para todas las palas del rotor, mediante lo cual todas las palas pasan sustancialmente por la misma secuencia de ángulo de paso durante una rotación completa dependiendo del ángulo azimutal de la pala individual.

Caselitz *et al.*, "Reduction of fatigue loads on wind energy converters by advanced control methods", European Wind Energy Conference, octubre de 1997, Dublin Castle, Irlanda, da a conocer un método que reduce las cargas de fatiga analizando la carga asimétrica sobre el rotor para determinar los momentos de inclinación y guiñada inducidos de manera aerodinámica y compensar éstos mediante el paso de las palas de rotor para reducir las cargas variables sobre las palas y otras partes de la turbina eólica, en particular las variaciones de momento de flexión en el sentido del *flap*, es decir el momento que flexiona las palas fuera del plano del disco de rotor, sobre las palas que provocan fatiga.

E. A. Bossanyi "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction", Wind Energy 2003, vol. 6, comenta el uso de control de paso de palas individuales para reducir las cargas aerodinámicas asimétricas debidas a variaciones de la velocidad del viento a través del disco de rotor debido a cortadura, sombra de la torre, desalineación de guiñada y turbulencia. Se analizan las variaciones de carga sobre las palas con un periodo de una revolución de una pala y se ajusta el paso de la pala individual para compensar las cargas asimétricas, reduciendo por tanto las variaciones de carga que inducen fatiga.

Bossanyi *et al.* "Further Load Reductions with Individual Pitch Control", Wind Energy 2005, vol. 8, n.º 4 da a conocer una adición al control de paso individual, que puede reducir los picos de carga a la frecuencia de pasada de pala (3P) sobre los componentes fijos de la góndola y la torre que se producen por el paso cíclico de las palas de rotor y reduciendo de ese modo la carga de fatiga sobre la estructura. La componente 3P se controla mediante un filtro en adelanto que genera una contribución adicional a la demanda de paso individual.

Larsen *et al.* "Active load reduction using individual pitch, based on local blade flow measurements", Wind Energy 2005, vol. 8 n.º 1 se refiere a estrategias de control para reducir las cargas de fatiga del rotor de turbinas eólicas de paso de pala individual. En el artículo se comenta la conocida regulación de paso cíclico basándose en mediciones de carga así como un nuevo método para la regulación de paso individual basándose en mediciones del ángulo de

flujo de entrada local y la velocidad relativa en cada una de las palas y el ajuste de los ángulos de paso en consecuencia.

5 En el documento US 4.297.076 se da a conocer una turbina eólica en la que las partes de punta de las palas son de paso variable y se varían cíclicamente en cuanto al paso para controlar la guiñada del rotor y para aliviar los momentos de flexión sobre las palas y se varían colectivamente en cuanto al paso para aliviar los momentos de flexión sobre las palas y maximizar la salida de potencia de la turbina a una velocidad de rotor constante seleccionada.

10 En el documento EP 0 995 904 se da a conocer una turbina eólica que tiene palas con ángulos de ataque ajustables y un transductor que proporciona un parámetro de medición que facilita una medida de la carga actual sobre un elemento de la estructura de la turbina eólica. El ángulo de pala se ajusta dependiendo del parámetro de medición, que representa una aceleración o deformación del elemento estructural y facilita una medida de una fuerza o par motor. Las palas de rotor pueden ajustarse individualmente y el ajuste se realiza para reducir las fuerzas de impacto sobre el cojinete de la turbina eólica y para reducir las variaciones en las cargas de modo que se elimine la fatiga de los elementos de la turbina eólica. En el documento WO 2004/074681 se da a conocer un método similar para controlar la carga aerodinámica de una turbina eólica.

15 El tamaño de los rotores de turbina eólica y de ese modo la producción procedente de las turbinas eólicas está en constante aumento, lo que también induce como efecto secundario una carga creciente sobre todas las partes de la turbina eólica, en particular el conjunto de transmisión, incluyendo las palas, el generador, los cojinetes, una posible caja multiplicadora, etc. dando como resultado a menudo una corta vida útil para los componentes implicados a menos que se tome una acción para reducir las cargas que provocan el acortamiento de la vida útil. Las cargas aerodinámicas sobre las partes de la turbina eólica pueden controlarse al menos en cierta medida mediante un control de paso, y es un objeto de la presente invención proporcionar un control mejorado de las cargas sobre la parte de la turbina eólica que reducen su vida útil por medio del accionamiento sobre el control de paso.

Breve descripción de la presente invención

25 Se ha advertido con la presente invención que la vida útil de funcionamiento del cojinete principal de una turbina eólica puede ampliarse aliviando el cojinete principal, es decir el cojinete que soporta el rotor de la turbina eólica de manera rotacional con respecto a la góndola, reduciendo el momento de flexión medio sobre el cojinete por medio del control de paso individual de las palas del rotor de modo que se cree un momento de inclinación medio sobre el rotor por medio de fuerzas aerodinámicas sobre las palas, contrarrestando el momento de inclinación, al menos parcialmente, el momento de flexión provocado por las fuerzas de carga superiores sobre el cojinete principal debidas al peso del rotor.

Por tanto, la presente invención se refiere a una turbina eólica, según la reivindicación 1, que comprende un rotor que tiene un buje y al menos dos palas,

35 medios de cojinete principal que proporcionan un soporte rotacional del rotor sobre una parte no rotatoria de la turbina eólica,

medios de cambio de paso de pala para el ajuste individual del ángulo de cada una de las palas alrededor de sus ejes longitudinales,

medios de control para controlar el funcionamiento de los medios de cambio de paso de pala,

40 en la que los medios de control están adaptados para accionar los medios de cambio de paso de pala durante el funcionamiento habitual de la turbina eólica para realizar un ajuste del ángulo de cada una de las palas de modo que el momento de inclinación medio aerodinámico sobre el rotor contrarresta el momento de flexión sobre los cojinetes principales provocado por las fuerzas de carga superiores debidas a la atracción gravitatoria sobre la masa del rotor.

El momento de flexión provocado por las fuerzas de carga superiores se toma tal como se miden cuando el rotor está en parada o inmóvil durante una baja velocidad del viento.

45 El momento de inclinación medio sobre el rotor debido a las fuerzas aerodinámicas sobre las palas del rotor es, durante el funcionamiento habitual de la turbina eólica, preferiblemente de una magnitud que contrarresta al menos el 20% del momento de flexión sobre los cojinetes principales provocado por las fuerzas de carga superiores debidas a la atracción gravitatoria sobre la masa del rotor, más preferido de al menos el 30% y lo más preferido de al menos el 50% del mismo.

50 Mediante el término funcionamiento habitual de la turbina eólica se entiende al menos el funcionamiento a velocidades de viento en las que la turbina eólica produce su salida de potencia nominal, normalmente desde una velocidad de viento en el intervalo de 10-15 m/s y hasta la velocidad de viento de desconexión, en la que el funcionamiento de la turbina eólica se detiene por motivos de seguridad, normalmente a aproximadamente 25 m/s. Se prefiere que se incluya el al menos el intervalo de velocidades de viento promedio de entre 12 m/s y 18 m/s. Sin

embargo, en una realización preferida de la invención, se proporciona el momento de inclinación de contrarresto a velocidades de viento de conexión, normalmente de aproximadamente 4 m/s o sólo a velocidades de viento ligeramente superiores, tales como de desde 8 m/s.

5 Los medios de control están dispuestos para realizar un ajuste del ángulo de paso de la pala individual y preferiblemente también un ajuste general del ángulo de paso de las palas para ajustar la producción de energía eléctrica de la turbina eólica también. El ángulo de paso de la pala individual puede ajustarse para aumentar la producción de energía eléctrica de la turbina eólica en condiciones operacionales de bajas velocidades del viento, para disminuir las cargas de fatiga etc. en combinación con la provisión del momento de inclinación medio de contrarresto.

10 El ajuste individual del ángulo de paso de las palas es preferiblemente del tipo cíclico, en el que el ángulo de paso de la pala individual depende de una función determinada del ángulo azimutal instantáneo de esa pala, siendo la función determinada al menos sustancialmente igual para todas las palas del rotor. Sin embargo, la presente invención también puede aplicarse a turbinas eólicas en las que el control de paso es independiente para cada pala de modo que no existe dependencia entre los ángulos de paso de las palas individuales.

15 La turbina eólica puede comprender además preferiblemente medios de medición dispuestos para detectar datos de carga del rotor, siendo los datos de carga una medida de una carga mecánica instantánea sobre el rotor, y proporcionar una salida, en consecuencia, de dichos datos de carga a los medios de control,

20 en la que los medios de control están dispuestos además para accionar los medios de cambio de paso de pala para realizar un ajuste del ángulo de cada una de las palas en respuesta a la salida de datos de carga de los medios de medición. Los datos de carga pueden aplicarse para controlar el ángulo de paso de las palas para maximizar la salida de potencia de la turbina eólica, para minimizar las variaciones de carga y de ese modo las cargas de fatiga sobre partes de la turbina eólica, en particular de las palas, para contrarrestar oscilaciones de partes de la turbina eólica o una combinación de lo mencionado anteriormente.

25 Según una realización, los medios de medición están dispuestos para proporcionar una medida de los momentos de flexión de raíz de pala, en particular para al menos una pala del rotor, y preferiblemente sobre más de una pala, por ejemplo, dos o tres palas de la turbina eólica. También se prefiere que los momentos de flexión de raíz se midan en dos direcciones sustancialmente perpendiculares.

30 Alternativa o adicionalmente a la medición de momentos de flexión de raíz de pala, por ejemplo por medio de galgas extensiométricas, la turbina eólica puede incluir medios de medición dispuestos para proporcionar una medida del ángulo de ataque para las palas, tales como aberturas en las superficies de pala para la medición de la presión estática en diversas posiciones a lo largo del perfil aerodinámico de una sección transversal de la pala para determinar la posición de la mayor presión estática y de ese modo el ángulo de ataque en esa sección transversal particular. Las aberturas pueden estar previstas en una o más secciones transversales de la pala o palas. Conociendo el ángulo de ataque experimentado y la velocidad de rotación de la pala, puede deducirse la velocidad del viento local y de ese modo pueden calcularse las cargas sobre la pala en esa posición particular.

35 Como alternativa adicional, que puede combinarse con lo mencionado anteriormente, los medios de medición pueden estar dispuestos para proporcionar una medida de las fuerzas de carga sobre un árbol principal de turbina eólica, tal como un árbol de baja o alta velocidad, preferiblemente medidas en dos direcciones sustancialmente perpendiculares.

40 Los medios de control pueden comprender además medios de recopilación y almacenamiento de datos para recopilar y almacenar repetidamente dichos datos de carga del rotor, y medios de tratamiento de datos para tratar dichos datos de carga del rotor de la turbina eólica recopilados y determinar una función de distribución de carga para el rotor a partir de dichos datos de carga, en la que los medios de control están dispuestos para accionar los medios de cambio de paso de pala en respuesta a la función de distribución de carga determinada.

45 La presente invención se refiere además a un método, según la reivindicación 9, de reducción del momento de flexión medio sobre el cojinete principal de una turbina eólica, estando el rotor soportado de manera rotacional por dicho cojinete principal, comprendiendo el método las etapas de

50 accionar medios de cambio de paso de pala de la turbina eólica para el cambio de paso individual de las palas de rotor de la turbina eólica en respuesta a un valor predeterminado de un momento de inclinación medio aerodinámico de contrarresto ($M_{t,c}$), de modo que el momento de inclinación medio aerodinámico sobre el rotor contrarresta el momento de flexión sobre los cojinetes principales provocado por las fuerzas de carga superiores debidas a la atracción gravitatoria sobre la masa del rotor que corresponden sustancialmente a dicho valor predeterminado.

Breve descripción de las figuras

A continuación se describirá la invención con referencia a las figuras en las que

55 la figura 1 ilustra una turbina eólica moderna grande que incluye tres palas de turbina eólica en el rotor de la turbina

eólica,

la figura 2 ilustra un sistema de referencia para medir el ángulo azimutal ψ . El azimut ψ se define mediante la posición de la pala 1,

5 la figura 3a ilustra esquemáticamente un ejemplo para la dirección de mediciones de carga de pala de rotor de turbina eólica,

la figura 3b ilustra un sistema de referencia de coordenadas para medir las cargas sobre palas de rotor de turbina eólica,

la figura 4 ilustra esquemáticamente una realización de un sistema de control para controlar los ángulos de paso de las palas de turbina eólica,

10 la figura 5a ilustra las cargas de momento fuera del plano sobre las palas de rotor de una turbina eólica de 3 palas como resultado de una distribución de cortadura lineal idealizada entre una posición superior de pala de rotor ($\psi = 0$ [rad]) y una posición hacia abajo ($\psi = \pi$ [rad]) correspondiente a una situación de flujo de entrada de viento libre,

15 la figura 5b ilustra las cargas de momento transformadas, $m_{incl.}$, $m_{guiñada}$, en función del azimut para una rotación de rotor completa y como resultado de dicha distribución de cortadura lineal con regulación de paso común de las palas de rotor,

la figura 6 ilustra el error de ángulo de paso entre una función escalonada deseada y una regulación de ángulo de paso cíclico de rotor,

la figura 7 ilustra esquemáticamente la funcionalidad del sistema de paso adaptativo de la invención en una turbina eólica con paso controlado,

20 la figura 8a ilustra las cargas de momento fuera del plano sobre las palas de rotor de una turbina eólica de 3 palas como resultado de una cortadura escalonada horizontal correspondiente a una situación de flujo de entrada de media estela idealizada,

la figura 8b ilustra las cargas de momento transformadas, $m_{incl.}$, $m_{guiñada}$, en función del azimut para una rotación de rotor completa y como resultado de dicha cortadura escalonada horizontal, y

25 la figura 9 ilustra la diferencia entre cargas de momento transformadas reales $m_{incl.}$, $m_{guiñada}$ y cargas de momento filtradas $m_{incl.}^{(h)}$ y $m_{guiñada}^{(h)}$ como resultado de una cortadura escalonada horizontal correspondiente a una situación de flujo de entrada de media estela idealizada.

Las figuras adjuntas se proporcionan para ilustrar una realización de la presente invención y no pretenden limitar el alcance de protección tal como se define mediante las reivindicaciones.

30 Descripción detallada

A continuación se da a conocer un ejemplo de implementación de la presente invención para reducir el momento de flexión medio sobre el cojinete principal de una turbina eólica que tiene una disposición de control de paso del tipo de paso cíclico que usa una simulación de orden superior de las cargas sobre las palas para reducir la fatiga de las palas.

35 La figura 1 ilustra una turbina eólica moderna 1 con una torre 2 y una góndola de turbina eólica 3 situada encima de la torre.

40 El rotor de la turbina eólica, que comprende al menos una pala tal como tres palas de turbina eólica 5 según se ilustra, está conectado al buje 4 a través de mecanismos de cambio de paso 16. Cada mecanismo de cambio de paso incluye un cojinete de pala y medios de actuación de paso que permiten el cambio de paso de la pala en relación con el viento. El cambio de paso de las palas se controla para cada pala del rotor mediante un controlador de paso que se acciona con un control de paso cíclico de orden superior tal como se explicará adicionalmente más adelante.

Las palas 5 del rotor de la turbina eólica están conectadas a la góndola a través del árbol de baja velocidad 4 que se extiende fuera de la parte frontal de la góndola.

45 Tal como se ilustra en la figura, el viento por encima de un determinado nivel activará el rotor y permitirá que rote en una dirección perpendicular al viento. El movimiento de rotación se convierte en energía eléctrica que habitualmente se suministra a la red de transmisión tal como conocerán los expertos en el área.

La figura 2 ilustra cómo se mide el ángulo azimutal ψ como el ángulo entre una línea vertical virtual a través del centro del árbol de baja velocidad 4 y una línea virtual definida por los dos puntos finales: a, el centro del árbol de

baja velocidad 4a, y b, el punto de la punta de la pala de rotor 7. El ángulo azimutal se mide para una pala de rotor de referencia, por ejemplo, la pala 1 en función del tiempo y la posición.

La figura 3a ilustra una pala de rotor 5 de una turbina eólica conectada a la góndola 3 a través del árbol de baja velocidad 4 que se extiende fuera de la parte frontal de la góndola.

- 5 La pala de rotor está cargada por una fuerza del viento $F_{carga}(t)$ dependiente de, por ejemplo, la dirección del viento con relación a la pala de rotor, el área de la pala de rotor, el paso de la pala de rotor, etc. Dicha fuerza del viento que literalmente trata de separar la góndola de la torre o la cimentación produce un momento de flexión de carga m_x en el árbol de baja velocidad 4 y en la raíz de pala del rotor 10 alrededor de su línea central 8.

- 10 La figura 3b ilustra un diagrama formalizado de las fuerzas *in situ* que actúan sobre una pala de rotor, ilustra el punto central del árbol de baja velocidad 4a, la línea central horizontal del árbol de baja velocidad 8a, la línea central vertical de la pala de rotor a través del punto central del árbol de baja velocidad 4, una fuerza del viento resumida $F_{carga}(t)$ y la dirección del momento de flexión de carga (o momento fuera del plano) m_x del número de pala x.

La figura 4 ilustra esquemáticamente una realización preferida de un sistema de control para controlar los ángulos de paso de las palas de turbina eólica.

- 15 Se miden datos de la turbina eólica 1 con medios de sensor 11 tales como sensores de posición de paso, sensores de carga sobre pala, sensores de azimut etc. Los datos de sensor medidos se suministran a medios de computación 12 para convertir los datos en una señal de retroalimentación. La señal de retroalimentación se usa en el sistema de control de paso 13 para controlar el ángulo de paso estableciendo valores de control para controlar dicha al menos una pala de turbina eólica 5.

- 20 Los medios de computación 12 incluyen preferiblemente un microprocesador y medios de almacenamiento informáticos para el control continuo de dicha señal de retroalimentación.

- 25 Mediante la medición de manera continua de los valores de los momentos de carga presentes sobre las palas de rotor, el cálculo de una función de ajuste de ángulo de paso óptimo deseada para las palas dependiente de la posición del ángulo azimutal instantáneo de la pala de modo que disminuyan las cargas de fatiga sobre las palas y la alimentación de esta información al sistema de control de paso en un lazo de retroalimentación cerrado, es posible optimizar los valores de control para (sustancialmente) controlar el rotor en los límites de diseño de la turbina eólica y especialmente los límites de diseño de las palas de turbina eólica. Mediante la combinación de este lazo de retroalimentación del tipo de paso cíclico para reducir las cargas de fatiga variables sobre la turbina eólica y en particular sobre las palas con un lazo de control independiente para controlar el ángulo de paso de las palas para producir un momento de inclinación medio aerodinámico del rotor para contrarrestar el momento de flexión sobre los cojinetes de rotor según la presente invención, se obtiene un sistema de control que equilibra una reducción de las cargas de fatiga y del momento de cojinete medio que acorta la vida sobre los cojinetes de rotor para aumentar la vida útil global de los componentes de la turbina eólica.

- 35 Ahora se describe un ejemplo de la técnica anterior para controlar cargas de momento fuera del plano sobre palas de turbina eólica de una turbina eólica.

Las cargas de raíz de pala $M_R = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ sobre las palas de rotor de una turbina eólica de 3 palas se definen como resultado de una distribución de cortadura lineal dada entre una posición superior de pala de rotor ($\psi = 0$) y una posición hacia abajo ($\psi = \pi$) correspondientes muy aproximadamente a una situación de flujo de entrada de viento libre idealizada.

- 40 La figura 5a ilustra una imagen típica de dichos momentos para condiciones de flujo de entrada libre.

Transformando M_R en un sistema de coordenadas definido por las direcciones equivalentes de inclinación, guiñada y empuje, las cargas de momentos $m_{incl.}$, $m_{guiñada}$, m_{suma} respectivas pasan a ser:

$$m_{incl.} = m_1 \cdot \cos(\Psi) + m_2 \cdot \cos\left(\Psi + \frac{4}{3}\pi\right) + m_3 \cdot \cos\left(\Psi + \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$m_{guiñada} = -m_1 \cdot \sin(\Psi) - m_2 \cdot \sin\left(\Psi + \frac{4}{3}\pi\right) - m_3 \cdot \sin\left(\Psi + \frac{2}{3}\pi\right)$$

- 45
$$m_{suma} = m_1 + m_2 + m_3$$

Para las cargas ilustradas en la figura 5a, dichas cargas de momento transformadas, $m_{incl.}$, $m_{guiñada}$, se ilustran en la figura 5b en función de una rotación completa del rotor con regulación de paso común, es decir que el ángulo de paso es igual para cada pala del rotor. Para este ejemplo idealizado de una técnica anterior, $m_{incl.}$, $m_{guiñada}$ son constantes.

El comportamiento próximo al sinusoidal de M_R tal como se ilustra en la figura 5a dará como resultado cargas de fatiga sobre las palas de rotor. Una técnica para compensar parcialmente estas cargas variantes sobre las palas de rotor puede ser, por tanto, controlar individualmente las palas de rotor durante una rotación completa de una pala para nivelar la distribución de fuerzas del viento, es decir, se cambia menos el paso de una pala de rotor para situarla en contra del viento en la parte superior que en la parte inferior del movimiento de rotación realizado por el rotor que incluye las palas.

Debido a esta relación estrecha entre M_R y el control deseado del ángulo de paso, la señal de control de paso deseada es también una función del ángulo acimutal, es decir, una función sinusoidal en una frecuencia igual a la frecuencia de rotación del rotor. Esta técnica se denomina paso cíclico o cíclico de rotor de primer orden de las palas de turbina eólica, es decir, un cambio cíclico del ángulo de paso durante una rotación completa de una pala y dependiendo de una función sinusoidal en una frecuencia igual a la frecuencia de rotación del rotor.

Cuando la pala de rotor entra en una estela, está expuesta a una fuerza cortante de tipo escalonado. Esto se ha confirmado mediante mediciones reales en turbinas eólicas. Todavía para mantener una carga constante sobre las palas de rotor en esta condición, puede aplicarse dicho control de paso cíclico de rotor dando como resultado una optimización básica de la carga. Pero como la carga afectada es de comportamiento de tipo escalonado y dicho control de paso cíclico de rotor es de comportamiento sinusoidal, siempre se producirá una carga alternante no despreciable sobre las palas de rotor.

Esto se ilustra en la figura 6 para dicha situación de media estela idealizada. La curva 14 ilustra un cambio abrupto deseado en el control de ángulo de paso y la curva 15 ilustra un control de ángulo de paso corrector real aplicado por dicha técnica de paso cíclico de rotor. Debido a la diferencia entre las dos curvas, se introduce un error de ángulo 16 que todavía da como resultado la posibilidad de un aumento de las cargas de fatiga sobre las palas de rotor.

Ahora se describe un ejemplo de la presente invención para controlar cargas de momento fuera del plano sobre palas de turbina eólica de una turbina eólica.

La figura 7 ilustra para la presente invención una realización preferida de dicho sistema de control para controlar los ángulos de paso de las palas de turbina eólica.

Las cargas de momento $M_R = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ sobre las palas de rotor y el ángulo azimutal ψ se miden mediante los medios de sensor y se alimentan a los medios informáticos. M_R se transforma en un sistema de coordenadas definido por la dirección equivalente de inclinación, guiñada y empuje $M_F = [m_{incl.} \ m_{guiñada} \ m_{suma}]^T = T \cdot M_R$

donde:

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos\left(\Psi + \frac{4}{3}\pi\right) & \cos\left(\Psi + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\text{sen}(\Psi) & -\text{sen}\left(\Psi + \frac{4}{3}\pi\right) & -\text{sen}\left(\Psi + \frac{2}{3}\pi\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

La relación inversa viene dada por: $M_R = T^{-1} \cdot M_F$

M_F son datos tratados mediante un filtro (H) para $M_F^{(h)}$, que deriva y trata una pluralidad de funciones armónicas sobre diferentes número enteros múltiplos de la frecuencia del rotor (ω_{nom}) para adaptar el sistema de control del ángulo de paso para reducir las fluctuaciones sobre los datos de carga medidos de tal manera que la variación de las cargas sobre las palas de rotor se reducen para reducir las cargas de fatiga sobre las palas.

Alternativamente, sólo se deriva una función armónica de la frecuencia del rotor (ω_{nom}) mediante el tratamiento de datos, dando como resultado un sistema de control más sencillo, el sistema de control de paso cíclico de rotor mencionado anteriormente, que también podría aplicarse con la presente invención.

Una realización preferida de dicho filtro de tratamiento de datos (H) es un estimador de mínimos cuadrados recursivos (RLS) con olvido exponencial. Esta es una técnica de optimización matemática que intenta hallar un ajuste óptimo para un conjunto de datos intentando minimizar la suma de los cuadrados de la desviación entre un conjunto de datos observados y un conjunto de datos esperados.

El algoritmo de tratamiento RLS se basa en algunos operadores clave y puede implementarse en una rutina informática tras el siguiente algoritmo:

Rutina:

$$\varphi(t) = [1 \quad \cos(\omega_{nom} t) \quad \sin(\omega_{nom} t) \quad \cos(2\omega_{nom} t) \quad \sin(2\omega_{nom} t) \quad \cos(3\omega_{nom} t) \quad \sin(3\omega_{nom} t) \quad \cos(4\omega_{nom} t) \quad \sin(4\omega_{nom} t)]^T$$

$$\theta = [a_0 \ a_1 \ b_1 \ a_2 \ b_2 \ a_3 \ b_3 \ a_4 \ b_4]^T$$

R = matriz de 9x9 inicializada con elementos cero

5 G = vector de 9x1 inicializado con elementos cero

$$\mu = 1/k_0$$

para p = 1..N (p se expresa como número escalonado de rutina, 1, 2, 3..)

$$t = p \cdot T_s$$

10 para i=1..3 (iteración sobre m_{incl.}, m_{guiñada} y m_{suma})

$$G^{(i)} = (1 - \mu) G^{(i-1)} + \mu \varphi(t) M_F^{(i)}$$

$$R^{(i)} = (1 - \mu) R^{(i-1)} + \mu \varphi(t) \varphi(t)^T$$

$$\theta^{(i)} = (R^{(i)})^{-1} G^{(i)}$$

$$M_F^{(h)(i)} = \varphi(t)^T \theta^{(i)}$$

15 fin

fin

En el ejemplo anterior de simulación informática:

ω_{nom} = la frecuencia de rotor cíclica nominal

φ = el vector de análisis de armónicos (incluyendo en este caso componentes hasta el 4º armónico)

20 θ = las amplitudes de armónico

R = es una matriz de 9x9, inicializada con elementos cero

G = es un vector de 9x1, inicializado con elementos cero

T_s = el tiempo de escalón de simulación

μ = un factor de olvido

25 k_0 = un número entero positivo que define el factor de olvido

Cabe destacar que dicho filtro RLS es adaptativo, lo que produce que la salida del filtro cambie como una respuesta a un cambio en la entrada.

30 Una versión aplicada práctica del tratamiento de datos comprende medios de computación para la adquisición digital de datos, análisis de armónicos, computación con filtro RLS, almacenamiento de datos y conversión D/A, de manera continua o durante un periodo de tiempo predeterminado.

Debido a retardos temporales en los medios de sensor, en los medios informáticos y en el sistema de control de paso, la señal de control de ángulo de paso correctora se desfasa en el tiempo en relación con las cargas sobre las palas medidas M_R . Para corregir esto, $M_{FS}^{(h)}$ se desfasa en el tiempo de manera equivalente para la sincronización,

es decir $M_{FS}^{(h)} = \text{desfase temporal}(M_F^{(h)})$

35 Un desfase temporal general de una suma de señales armónicas puede realizarse tal como sigue:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t) + b_i \sin(\omega_i t)$$

así

$$s(t + \tau) = \sum_{i=1}^n P^{(i)T} C^{(i)}(t) Q^{(i)}(\tau) \quad , (1 \times 2) \times (2 \times 2) \times (2 \times 1) = (1 \times 1)$$

donde:

5 $P^{(i)} = [a_i \ b_i]^T$

$$C^{(i)}(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) & -\sin(\omega_i t) \\ \sin(\omega_i t) & \cos(\omega_i t) \end{bmatrix}$$

$$Q^{(i)}(\tau) = [\cos(\omega_i \tau) \ \sin(\omega_i \tau)]^T$$

La señal filtrada y desfasada en el tiempo $M_{FS}^{(h)}$ se transforma del sistema de referencia fijo de vuelta al sistema de sistema de referencia rotatorio mediante $M_R^{(h)} = T^{-1} \cdot M_{FS}^{(h)}$.

- 10 Se multiplica la señal $M_R^{(h)}$ por una ganancia para la conversión a radianes, es decir, $\beta_{dem}^{(h)} = \text{Ganancia } M_R^{(h)}$ y se suma a la señal de demanda de paso colectiva $\beta_{dem}^{(c)}$.

La figura 8a ilustra como ejemplo cargas de momento $M_R = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ sobre las palas de rotor de una turbina eólica de 3 palas como resultado de una cortadura escalonada horizontal correspondiente a una situación de flujo de entrada de media estela idealizada.

- 15 Transformando M_R en un sistema de coordenadas definido por la dirección equivalente de inclinación, guiñada y empuje, las respectivas cargas de momentos $m_{incl.}$, $m_{guiñada}$, m_{suma} pasan a ser:

$$m_{incl.} = m_1 \cdot \cos(\Psi) + m_2 \cdot \cos\left(\Psi + \frac{4}{3}\pi\right) + m_3 \cdot \cos\left(\Psi + \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$m_{guiñada} = -m_1 \sin(\Psi) - m_2 \sin\left(\Psi + \frac{4}{3}\pi\right) - m_3 \cdot \sin\left(\Psi + \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$m_{suma} = m_1 + m_2 + m_3$$

- 20 $m_{incl.}$, $m_{guiñada}$, se ilustran en la figura 8b en función de una rotación completa del rotor.

Las funciones periódicas como las funciones ilustradas en la figura 8b pueden resolverse como una suma infinita de senos y cosenos denominada una serie de Fourier y puede expresarse en este caso generalmente como:

$$m(\Psi) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\Psi) + b_1 \sin(\Psi) + a_2 \cos(2\Psi) + b_2 \sin(2\Psi) + a_3 \cos(3\Psi) + b_3 \sin(3\Psi) \dots$$

donde:

25 $a_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} m(\Psi) \cos(i\Psi) d\Psi$

$$b_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} m(\Psi) \sin(i\Psi) d\Psi \quad \text{para } i = 0, 1, 2, 3, \dots$$

La computación de la serie de Fourier se conoce como análisis de armónicos.

Puede observarse a partir de la ecuación de $m(\psi)$ que la serie de Fourier consiste en una componente no alternante, componentes que alternan según el parámetro básico ψ y una pluralidad de funciones periódicas de diferentes múltiplos de números enteros de la frecuencia básica. Los coeficientes de Fourier ponderados a_i , b_i determinan la amplitud de cada frecuencia armónica en la señal original.

- 5 Dichos datos de estimador RLS tratan un número truncado de funciones periódicas derivadas mediante el análisis de armónicos, por ejemplo, los cuatro primeros armónicos múltiplos de la frecuencia de rotor básica. El propósito del estimador RLS es producir una señal de salida que se alimenta al sistema de control de paso para minimizar la energía en la señal de carga M_R , es decir, minimizar las cargas fluctuantes sobre las palas de rotor.

Para este ejemplo idealizado, las señales de entrada 17, 19 que representan los momentos de las cargas $m_{incl.}$ y

- 10 $m_{guiñada}$ de MF respectivamente se ilustran en la figura 9. Las señales de salida $m_{incl.}^{(h)}$ y $m_{guiñada}^{(h)}$ de $M_F^{(h)}$ se representan mediante 18, 20 respectivamente. Dicho filtro RLS ha tratado los cuatro primeros armónicos múltiplos de la frecuencia básica.

La señal filtrada $M_F^{(h)}$ se desfasa en el tiempo para dar una señal $M_{FS}^{(h)}$ y se transforma del sistema de referencia fijo de vuelta al sistema de referencia rotatorio mediante $M_R^{(h)} = T^{-1} \cdot M_{FS}^{(h)}$

- 15 donde:

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos\left(\Psi + \frac{4}{3}\pi\right) & \cos\left(\Psi + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\text{sen}(\Psi) & -\text{sen}\left(\Psi + \frac{4}{3}\pi\right) & -\text{sen}\left(\Psi + \frac{2}{3}\pi\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Finalmente la señal filtrada $M_R^{(h)}$ se ajusta en ganancia para obtener una señal de control de ángulo de paso $\beta_{dem}^{(h)}$.

- 20 Para producir el momento de inclinación medio de contrarresto $M_{t,c}$ predeterminado de un tamaño correspondiente a la parte del momento de flexión provocado por las fuerzas de carga superiores según se mide cuando el rotor está inactivo o inmóvil durante una baja velocidad del viento que pretende que se contrarreste mediante las fuerzas aerodinámicas sobre el rotor, por ejemplo el 20-50% de las mismas, pero de manera teórica hasta el 100% del momento de flexión, se proporciona un circuito de control independiente. El momento de inclinación medio de contrarresto $M_{t,c}$ predeterminado se proporciona a una unidad de control C, donde se transforma del sistema de
- 25 referencia fijo al sistema de referencia rotatorio mediante la función T^{-1} y la unidad de control determina la señal de

control de ángulo de paso $\beta_{dem}^{(t,c)}$ que contiene el cambio de ángulo de paso para cada ángulo azimutal para las palas de rotor para producir el momento de inclinación medio de contrarresto $M_{t,c}$, es decir para aumentar generalmente la carga aerodinámica horizontal sobre la pala cuando está en la mitad superior del plano del rotor y disminuir la carga aerodinámica horizontal sobre la pala cuando está en la mitad inferior del plano del rotor.

- 30 Estas dos señales de control de ángulo de paso $\beta_{dem}^{(t,c)}$ y $\beta_{dem}^{(h)}$ se añaden a una señal de control de ángulo de paso global $\beta_{dem}^{(c)}$ definida por un controlador de velocidad de turbina eólica y la señal de control resumida β_{dem} se alimenta al controlador de paso que efectúa las acciones deseadas.

- 35 En una realización alternativa, el momento de inclinación medio de contrarresto $M_{t,c}$ predeterminado se alimenta a los medios de computación como valor de referencia que define un desplazamiento de momento de inclinación que va a obtenerse por el sistema de control de paso, donde los medios de computación originales funcionan con un valor de referencia de momento de inclinación de cero. Por tanto, el momento de inclinación medio de contrarresto $M_{t,c}$ predeterminado puede alimentarse, por ejemplo, al módulo de ganancia donde se transforma del sistema de referencia fijo al sistema de referencia rotatorio mediante la función T^{-1} y se determina la señal de control de ángulo

de paso $\beta_{dem}^{(h)}$ para minimizar las desviaciones entre la función de carga real de las palas y la función de carga deseada, lo que proporciona el momento de inclinación medio de contrarresto $M_{t,c}$ predeterminado del rotor así como un momento de guiñada nulo, dando como resultado una disminución de las cargas de fatiga sobre las palas así como una disminución del momento de inclinación medio sobre los cojinetes principales, dando como resultado una prolongación de la vida útil de los cojinetes principales.

La invención se ha ejemplificado anteriormente con referencia a ejemplos específicos de una turbina eólica con un sistema de control para controlar las palas de turbina eólica mediante mecanismos de cambio de paso. Sin embargo, debe entenderse que la invención no se limita a los ejemplos particulares descritos anteriormente sino que puede diseñarse y alterarse en una multitud de variedades dentro del alcance de la invención según se especifica en las reivindicaciones, por ejemplo, usando otras fórmulas y/o datos de medición como complemento.

Lista de referencias

En los dibujos, los siguientes números de referencia se refieren a:

- 1. Turbina eólica o sistema de turbina eólica
- 2. Torre de turbina eólica
- 15 3. Góndola de turbina eólica
- 4. Árbol de baja velocidad
- 4a. Punto central del árbol de baja velocidad
- 5. Pala de rotor de turbina eólica
- 6. Rotor de turbina eólica con al menos una pala
- 20 7. Punto de la punta de una pala de rotor de turbina eólica
- 8. Línea central del árbol de baja velocidad
- 8a. Línea central formalizada del árbol de baja velocidad
- 9. Línea central vertical de la pala de rotor a través del punto central del árbol de baja velocidad
- 10. Raíz de pala de rotor de turbina eólica'
- 25 11. Medios de sensor
- 12. Medios de computación
- 13. Sistema de control de paso
- 14. Ejemplo de un ángulo de paso escalonado deseado
- 15. Ejemplo de una corrección cíclica de rotor real del ángulo de paso
- 30 16. Error de ángulo - corrección de ángulo cíclica de rotor
- 17. m_{incl} . idealizado
- 18. m_{incl} . filtrado
- 19. $m_{guiñada}$ idealizado
- 20. $m_{guiñada}$ filtrado
- 35 21. Error de ángulo - corrección armónica de ángulo
- 22. Ejemplo de una corrección armónica real del ángulo de paso
- ψ . Ángulo azimutal para la pala de rotor 1 con relación a una posición de referencia vertical fija

REIVINDICACIONES

1. Turbina eólica (1) que comprende
un rotor (6) que tiene un buje (4) y al menos dos palas (5),
medios de cojinete principal que proporcionan un soporte rotacional del rotor en una parte no rotatoria (3) de la turbina eólica,
medios de cambio de paso de pala (16) para el ajuste individual del ángulo de cada una de las palas alrededor de sus ejes longitudinales, y
medios de control (13) para controlar el funcionamiento de los medios de cambio de paso de pala,
caracterizada por que los medios de control están adaptados para accionar los medios de cambio de paso de pala durante el funcionamiento habitual de la turbina eólica para realizar un ajuste del ángulo de cada una de las palas de modo que el momento de inclinación medio aerodinámico ($m_{incl.}$) sobre el rotor contrarresta el momento de flexión sobre los medios de cojinete principal provocado por las fuerzas de carga superiores debidas a la atracción gravitatoria sobre la masa del rotor.
2. Turbina eólica según la reivindicación 1, en la que el momento de inclinación medio sobre el rotor contrarresta al menos el 20% del momento de flexión sobre los medios de cojinete principal provocado por las fuerzas de carga superiores debidas a la atracción gravitatoria sobre la masa del rotor, preferiblemente al menos el 30% y lo más preferido al menos el 50% de dicho momento de flexión.
3. Turbina eólica según la reivindicación 1 ó 2, en la que el funcionamiento habitual de la turbina eólica incluye el funcionamiento de la turbina eólica a velocidades de viento promedio de entre 12 m/s y 18 m/s.
4. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además medios de medición (11) adaptados para detectar datos de carga del rotor, siendo los datos de carga una medida de una carga mecánica instantánea sobre el rotor, y proporcionan una salida en consecuencia de dichos datos de carga a los medios de control,
en la que los medios de control están adaptados además para accionar los medios de cambio de paso de pala para realizar un ajuste del ángulo de cada una de las palas en respuesta a la salida de datos de carga de los medios de medición.
5. Turbina eólica según la reivindicación 4, en la que los medios de control están adaptados para determinar una función de paso cíclico común y accionar los medios de cambio de paso de pala según dicha función de paso cíclico común dependiendo del ángulo azimutal instantáneo de la pala individual.
6. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 4 y 5, en la que dichos medios de medición están adaptados para proporcionar una medida de los momentos de flexión de raíz de pala.
7. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 4-6, en la que dichos medios de medición están adaptados para proporcionar una medida del ángulo de ataque para las palas.
8. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 4-7, en la que los medios de control comprenden medios de recopilación y almacenamiento de datos para recopilar y almacenar repetidamente dichos datos de carga del rotor, y medios de tratamiento de datos (12) para tratar dichos datos de carga recopilados del rotor de la turbina eólica y determinar una función de distribución de carga para el rotor a partir de dichos datos de carga, en la que los medios de control están adaptados para accionar los medios de cambio de paso de pala en respuesta a la función de distribución de carga determinada.
9. Método de reducción del momento de flexión medio sobre los medios de cojinete principal de una turbina eólica, estando el rotor soportado de manera rotacional por dichos medios de cojinete principal, caracterizado por que el método comprende las etapas de
accionar medios de cambio de paso de pala de la turbina eólica para el cambio de paso individual de las palas de rotor de la turbina eólica en respuesta a un valor predeterminado de un momento de inclinación medio aerodinámico de contrarresto ($M_{t.c.}$), de modo que el momento de inclinación medio aerodinámico sobre el rotor contrarresta el momento de flexión sobre los medios de cojinete principal provocado por las fuerzas de carga superiores debidas a la atracción gravitatoria sobre la masa del rotor que corresponden sustancialmente a dicho valor predeterminado.
10. Método según la reivindicación 9, en el que el momento de inclinación medio predeterminado sobre el rotor corresponde a una contrarresto de al menos el 20% del momento de flexión sobre los medios de cojinete principal provocado por las fuerzas de carga superiores debidas a la atracción gravitatoria sobre la masa del rotor, preferiblemente al menos el 30% y lo más preferido al menos el 50% de dicho momento de flexión.

11. Método según la reivindicación 9 ó 10, en el que el funcionamiento habitual de la turbina eólica incluye el funcionamiento de la turbina eólica a velocidades de viento promedio de entre 12 m/s y 18 m/s.
12. Método según cualquiera de las reivindicaciones 9-11, que comprende además las etapas de recopilar y almacenar repetidamente datos de carga del rotor,
5 determinar una función de distribución de carga para el rotor a partir de dichos datos almacenados, y accionar los medios de cambio de paso de pala de la turbina eólica para el cambio de paso individual de las palas de rotor de la turbina eólica en respuesta a la función de distribución de carga determinada.
13. Método según la reivindicación 12, en el que dichos datos de carga del rotor se obtienen por medio de medios de medición dispuestos para proporcionar una medida de los momentos de flexión de raíz de pala.
- 10 14. Método según la reivindicación 12 ó 13, en el que dichos datos de carga del rotor se obtienen por medio de medios de medición dispuestos para proporcionar una medida del ángulo de ataque para las palas.
15. Método según cualquiera de las reivindicaciones 12-14, en el que la función de distribución de carga para el rotor comprende una medida de la función de momento de inclinación del rotor.

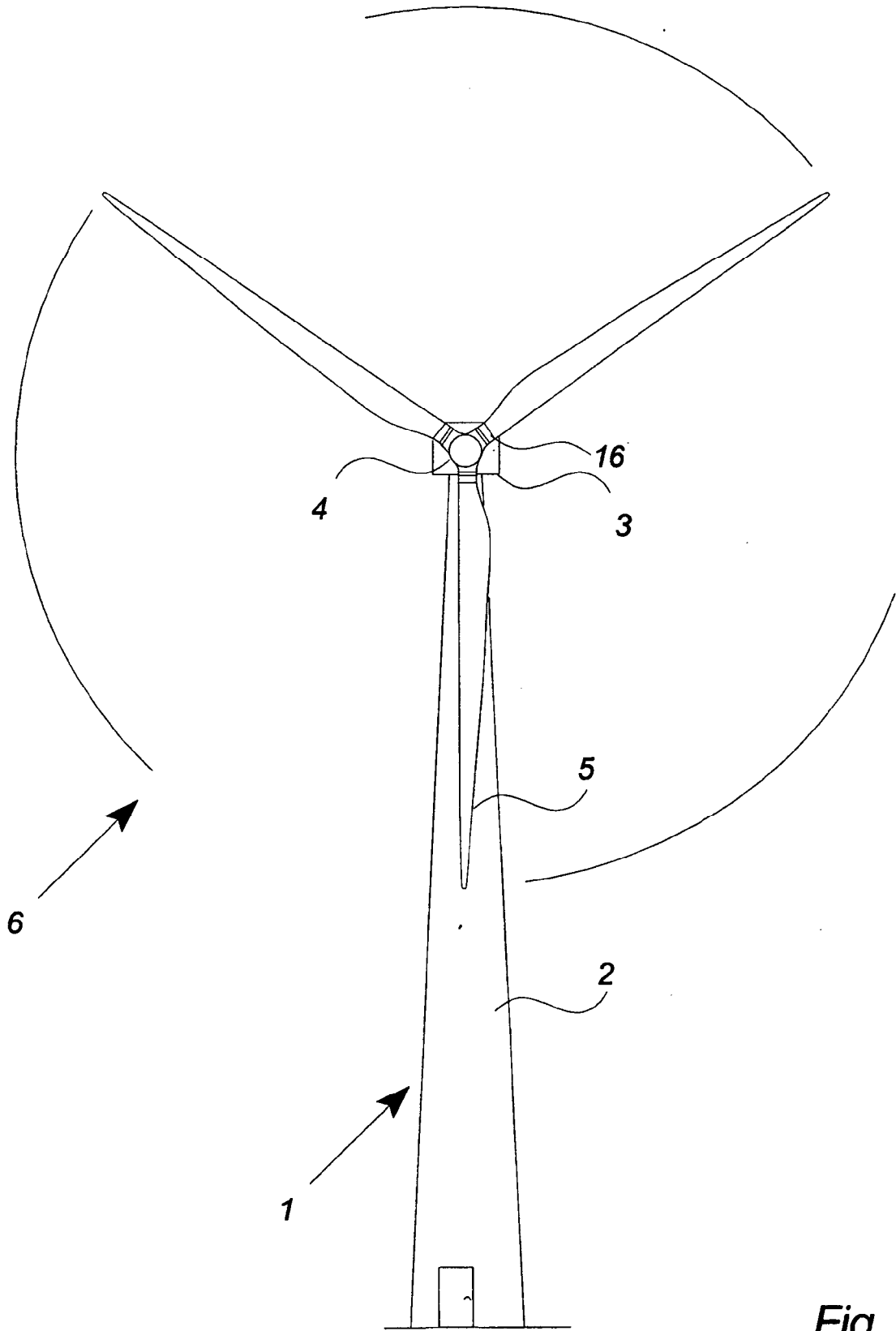


Fig. 1

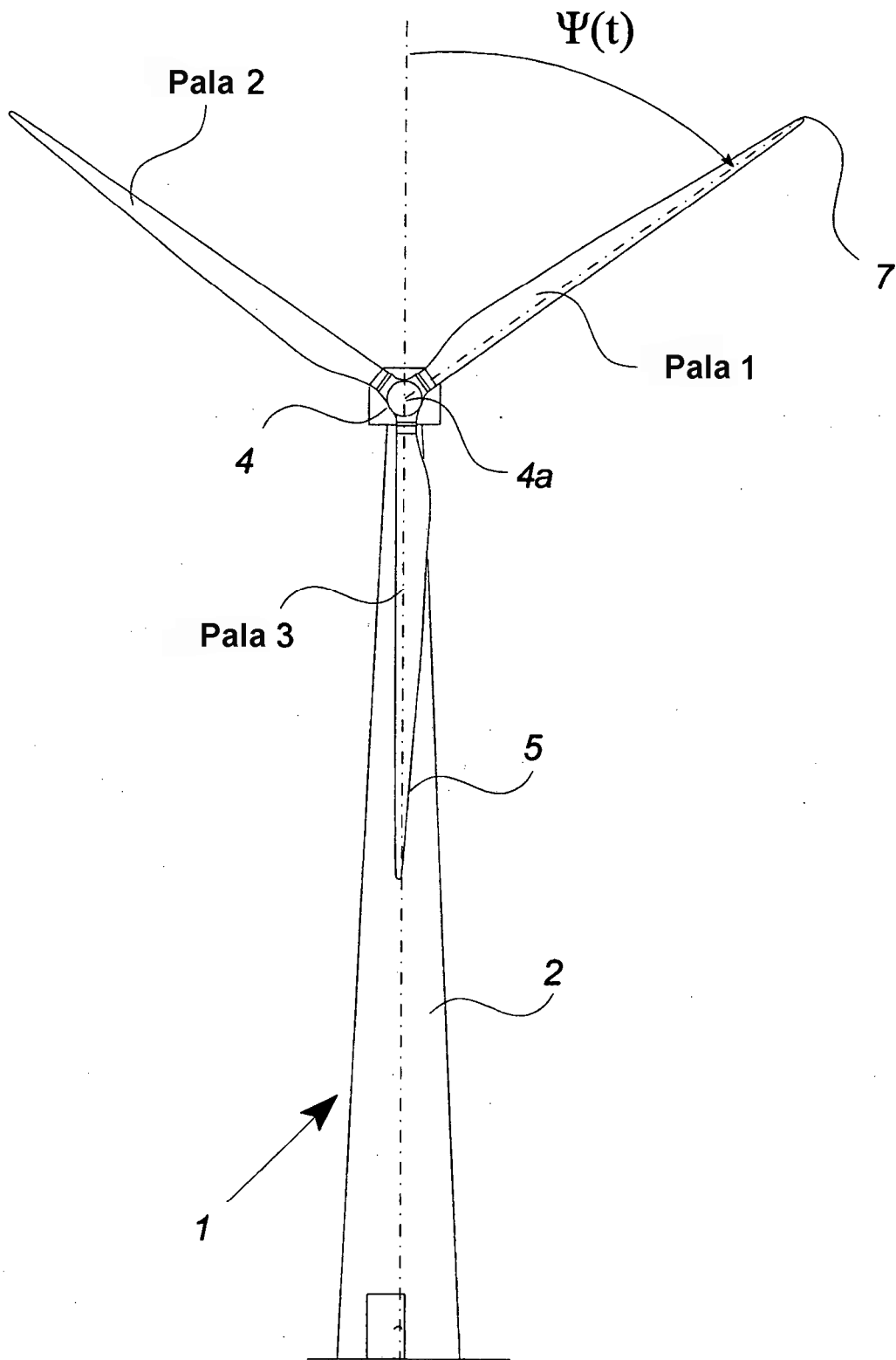


Fig. 2

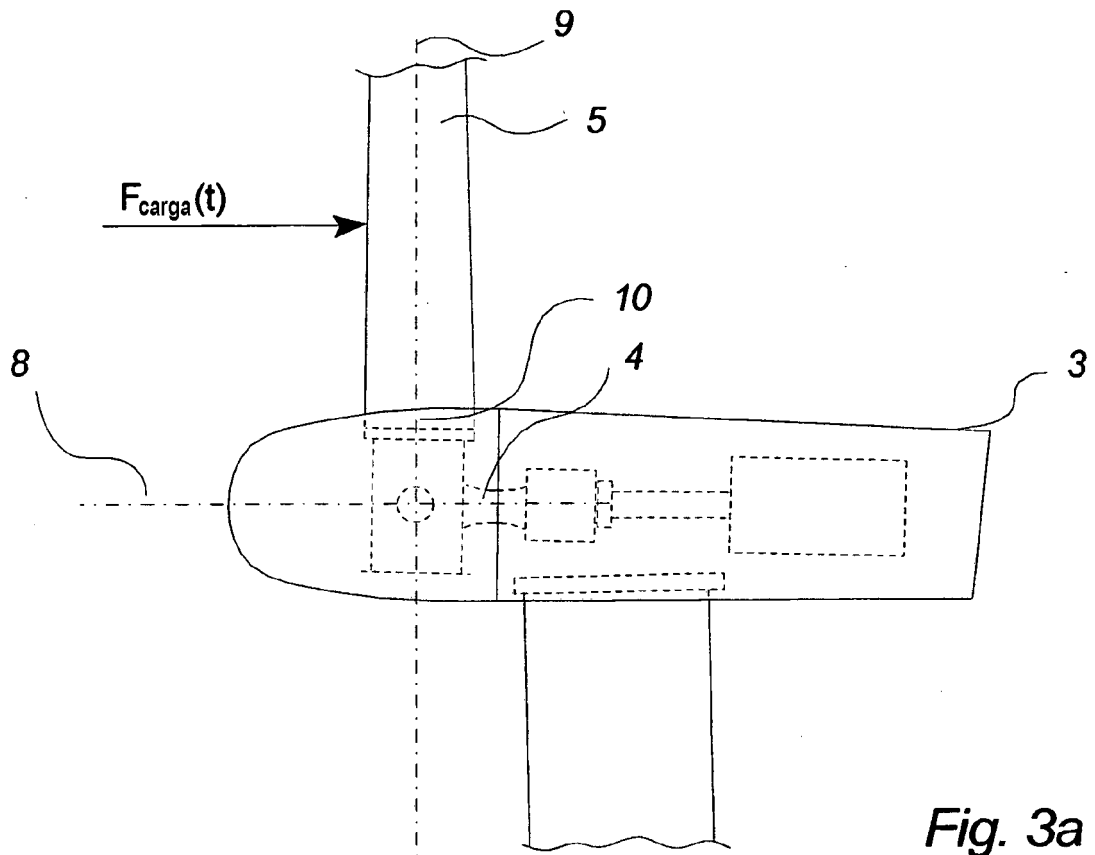


Fig. 3a

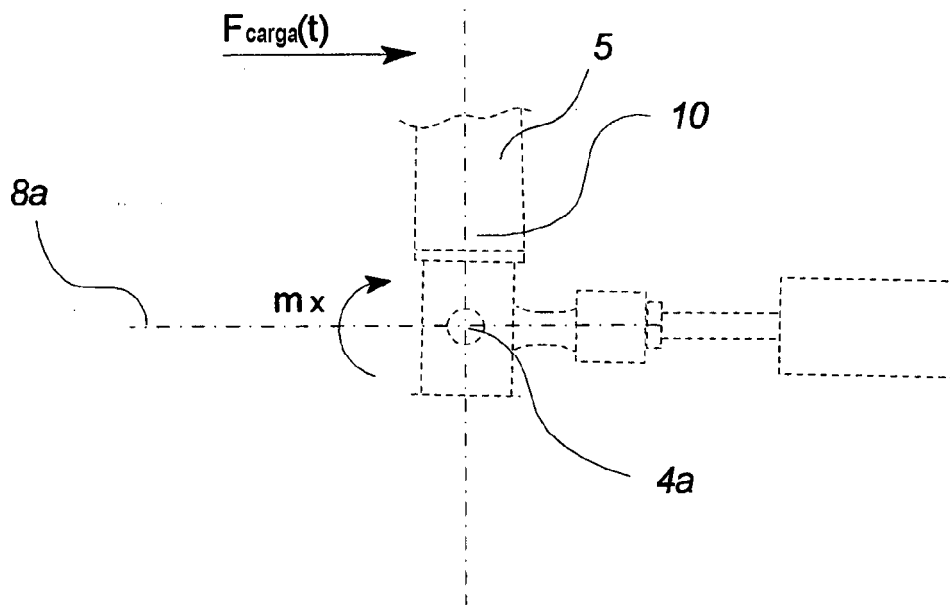


Fig. 3b

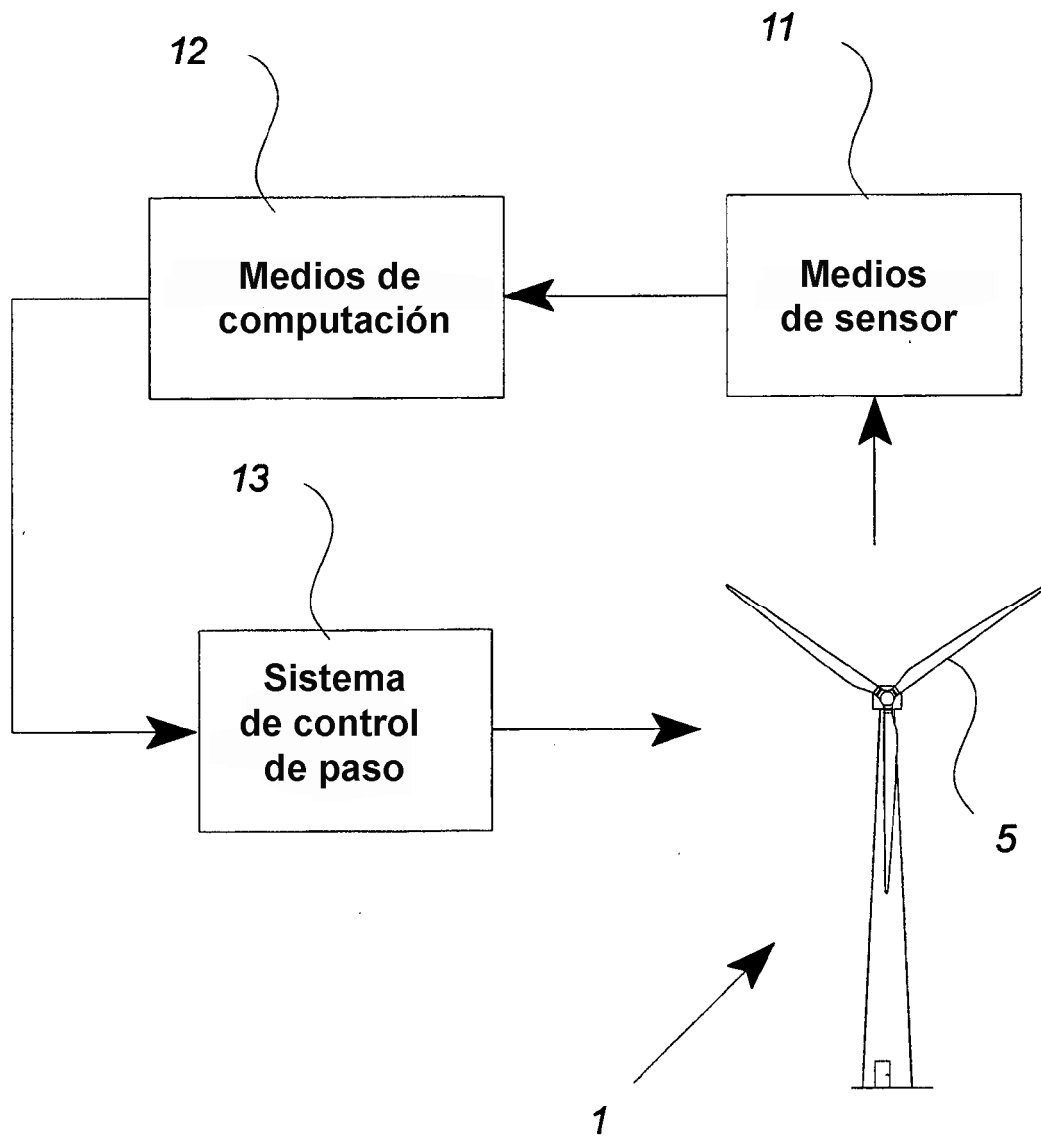


Fig. 4

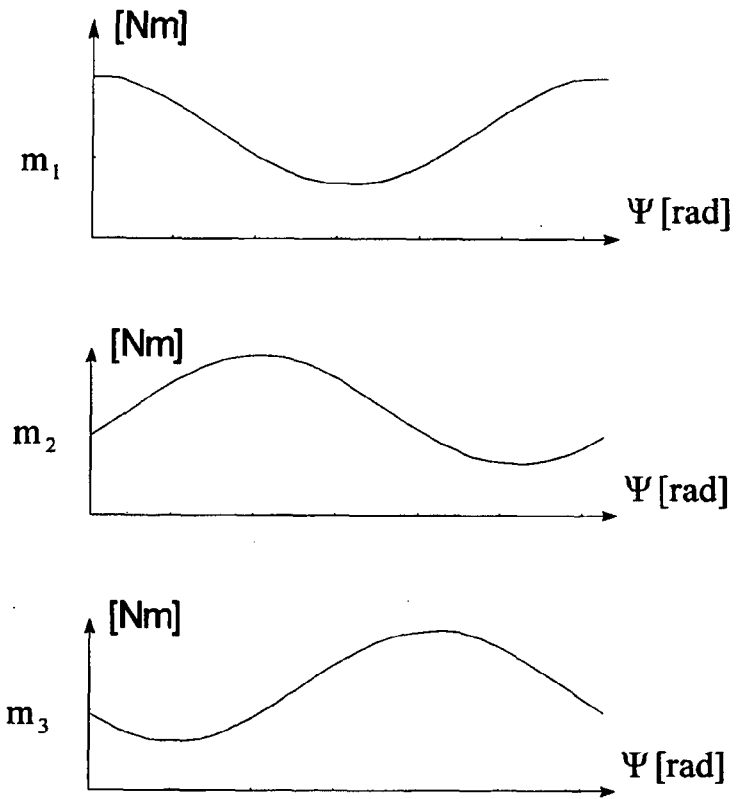


Fig. 5a

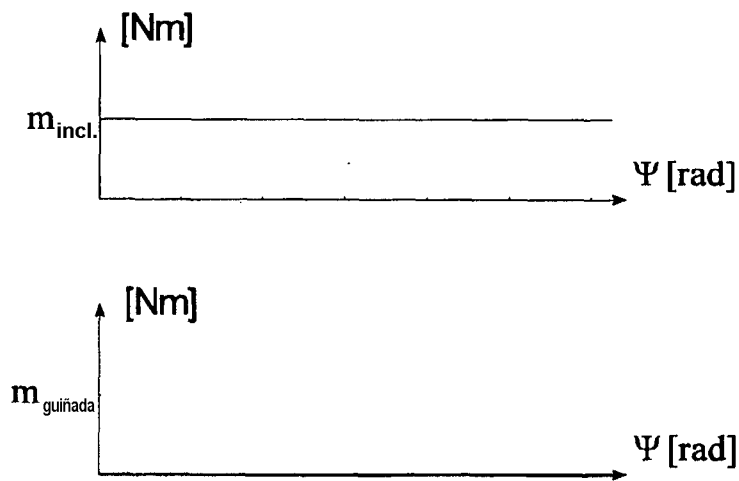
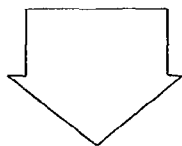


Fig. 5b

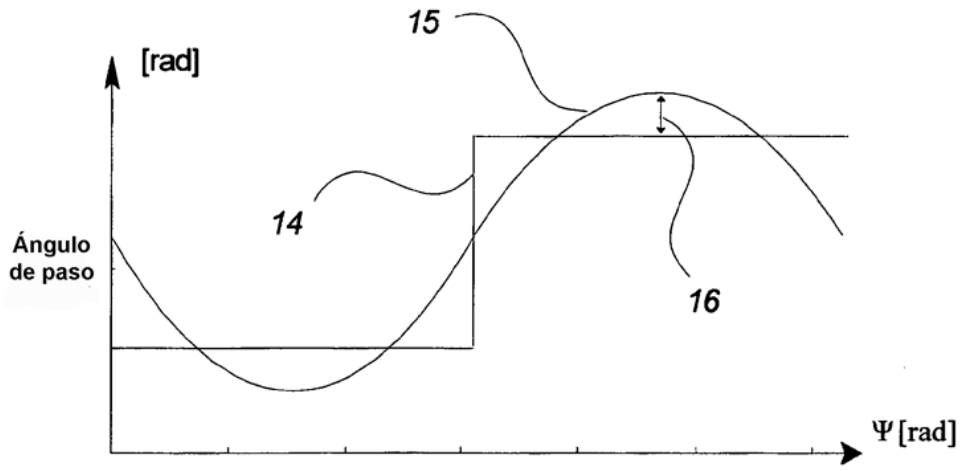


Fig. 6

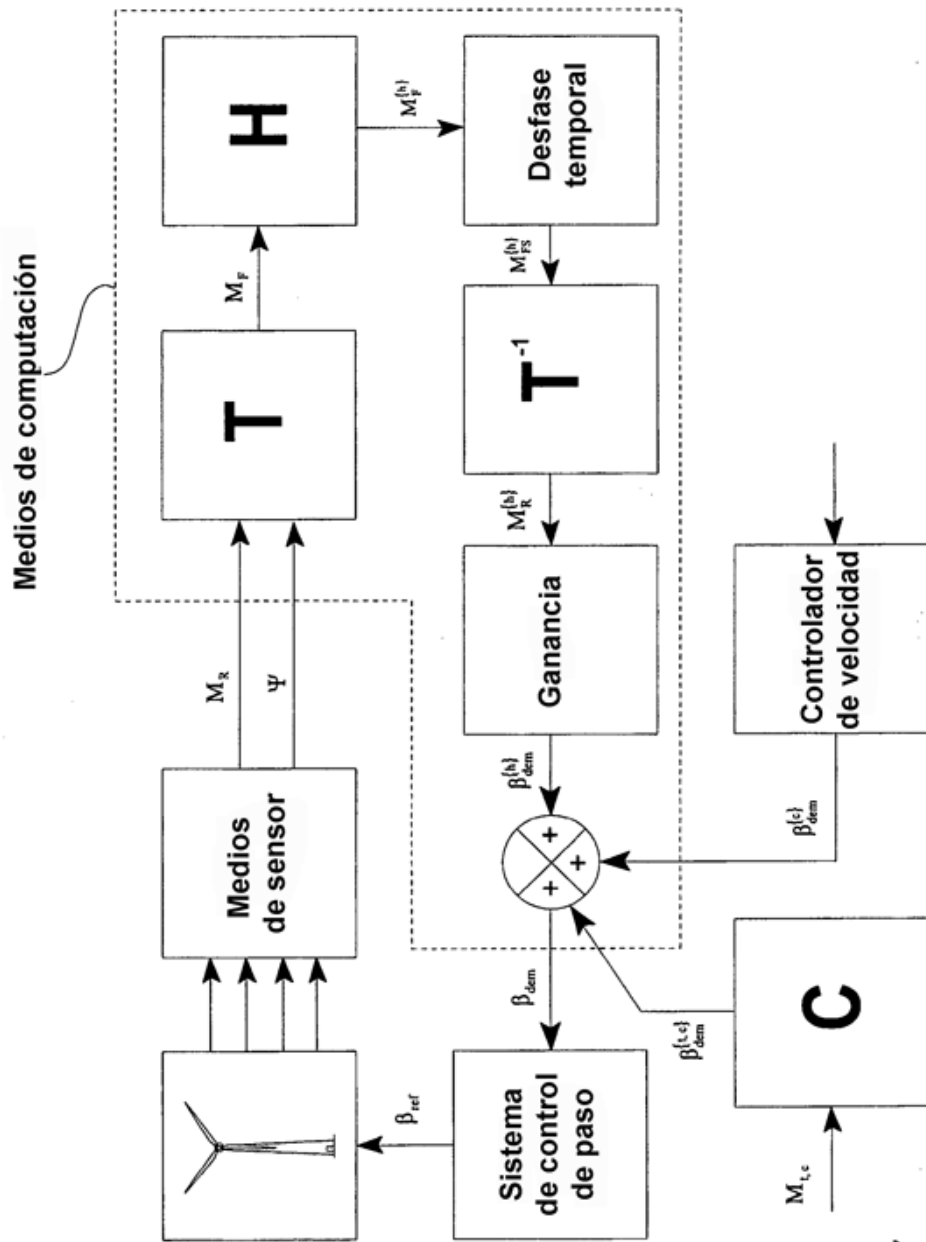


Fig. 7

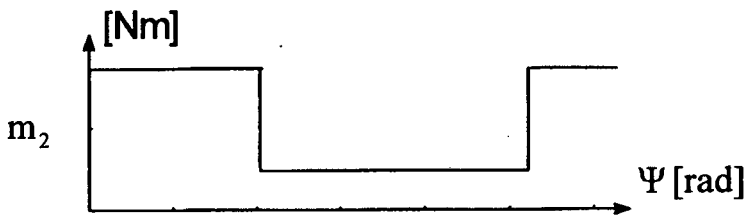
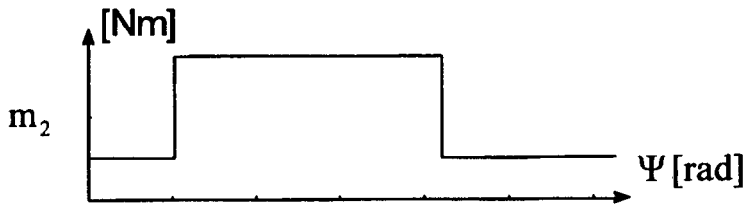
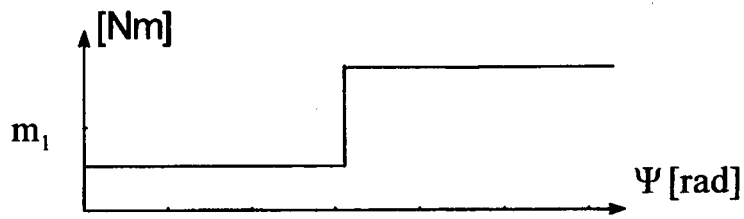


Fig. 8a

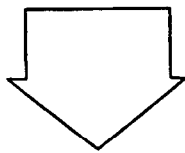


Fig. 8b

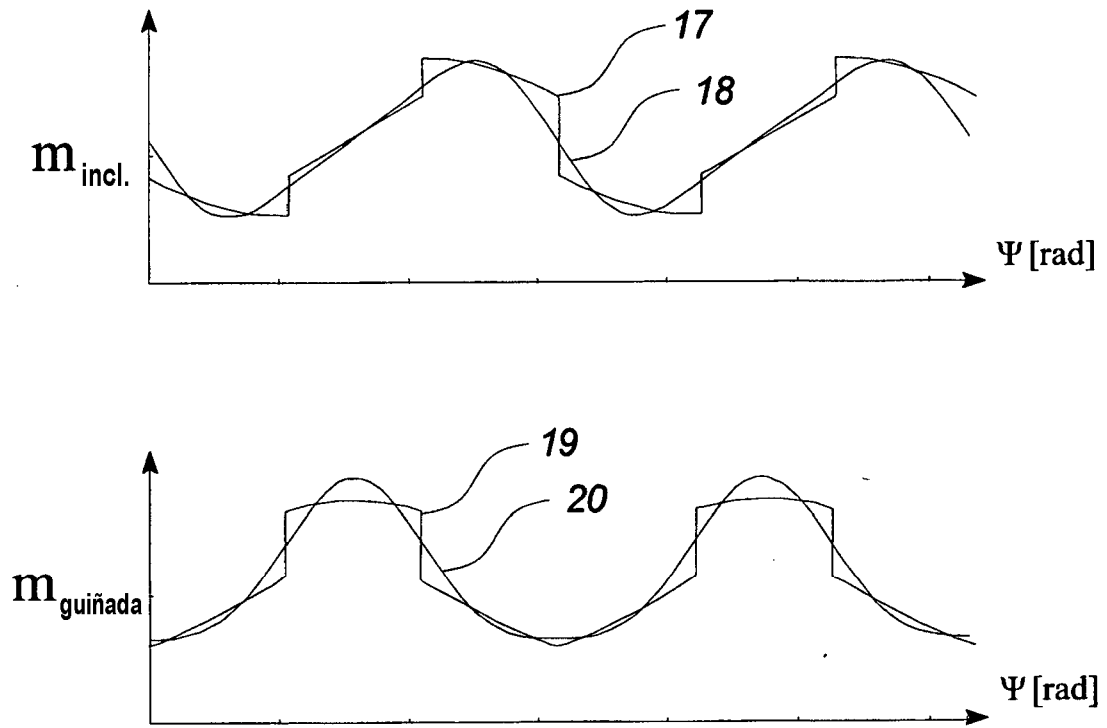


Fig. 9