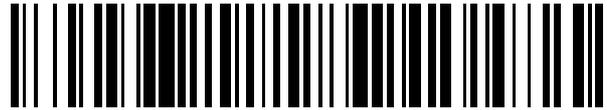


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 414 093**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.03.2006 E 06706123 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2013 EP 1994281**

54 Título: **Un procedimiento y un sistema de control para la reducción de las cargas de fatiga en los componentes de una turbina eólica sometida a una carga asimétrica del plano de rotor**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.07.2013

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

PEDERSEN, BO, JUUL

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 414 093 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

Un procedimiento y un sistema de control para la reducción de las cargas de fatiga en los componentes de una turbina eólica sometida a una carga asimétrica del plano de rotor

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para la reducción de cargas de fatiga en los componentes de una turbina eólica, un sistema de control para la reducción de las cargas de fatiga en los componentes de la turbina eólica sometidos a una carga asimétrica del plano del rotor, una turbina eólica y un parque eólico. Tal procedimiento, sistema de control y una turbina eólica correspondiente son el tema de P. Caselite et al., "Reduction of fatigue loads on wind energy converters by advanced control methods", (1997 - 10).

10 Descripción de la técnica relacionada

Los controladores de turbinas eólicas han sido empleados en turbinas eólicas durante años con el propósito de controlar la potencia de salida total.

15 La potencia de salida de una turbina eólica moderna puede ser controlada por medio de un sistema de control para regular el ángulo de cabeceo de las palas del rotor. La velocidad de rotación del rotor y la potencia de salida de la turbina eólica pueden ser controladas inicialmente por este medio, por ejemplo antes de una transferencia a una red de suministro eléctrico, a través de medios de conversión de potencia. Una ventaja de este control es proteger al rotor de girar a una velocidad excesiva a velocidades de viento altas y evitar cargas excesivas a las palas del rotor.

20 Especialmente para grandes diámetros de rotor, la distribución del perfil de flujo de entrada de viento puede no ser uniforme sobre el área del rotor, dando como resultado una carga no uniforme en cada pala del rotor como función de una rotación completa, así como cargas asimétricas no coplanares para el tren de accionamiento de la turbina eólica. Para una situación de flujo libre de entrada de viento, la distribución de la cizalla del viento es aproximadamente lineal y dicha carga como función de la rotación presenta un comportamiento casi senoidal con una frecuencia igual a la frecuencia de rotación del rotor. Con el fin de mantener una carga más constante sobre las palas del rotor, han sido aplicadas funciones de control de cabeceo a los controladores de cabeceo de la turbina eólica, donde se ha añadido a la configuración del ángulo de cabeceo general de la palas individuales del rotor una corrección cíclica con el rotor con una frecuencia igual a la rotación del rotor.

Cualquier obstáculo dentro de cierta distancia en contra del viento a una turbina eólica crea una estela para la turbina eólica y por lo tanto elimina la situación de flujo libre de entrada de viento. Un ejemplo de un obstáculo puede ser otras turbinas eólicas, ya que una turbina eólica siempre emite una estela en la dirección a favor del viento.

30 Especialmente en parques eólicos este hecho puede influir significativamente en el flujo de entrada en turbinas eólicas situadas en la dirección a favor del viento. Esto da como resultado una distribución más compleja de la cizalla del viento en comparación con una situación de flujo libre de entrada de viento. Dicho perfil complejo de distribución de viento puede provocar turbulencias del viento y a su vez cargas de fatiga fluctuantes en los componentes de la turbina eólica. De modo que para evitar demasiadas turbulencias del viento alrededor de las turbinas, las turbinas eólicas posteriores están relativamente más separadas, dando como resultado parques eólicos que ocupan mucha superficie.

Por lo tanto, es un objetivo de la presente invención proporcionar un procedimiento y una técnica que permitan una estrategia de control mejorada de la turbina eólica en relación con una distribución más compleja de la cizalla del viento.

40 La invención

La invención proporciona un procedimiento para la reducción de cargas de fatiga en los componentes de una turbina eólica sometida a carga asimétrica de su rotor, que comprende las etapas de:

recoger y almacenar repetidamente los datos de carga del rotor,

determinar una función de distribución de carga para el rotor a partir de dichos datos almacenados,

45 derivar una pluralidad de funciones periódicas a partir de dicha función de distribución de carga,

determinar acciones para los medios de control de la turbina eólica para reducir la carga de fatiga de los componentes de la turbina eólica a partir de dicha pluralidad de funciones periódicas derivadas, e

implementar dichas acciones determinadas en los medios de control de la turbina eólica.

50 Por este medio es posible reducir las cargas fluctuantes en los componentes de la turbina eólica, lo que facilita un menor desgaste mecánico de las partes más expuestas a carga de la turbina eólica, lo que a su vez se traduce en una menor necesidad de mantenimiento, menos paradas y una prolongación de la vida útil para la turbina eólica.

Alternativamente, por este medio es posible aumentar la captura de energía de la turbina eólica y mantener una baja carga en el rotor o combinaciones de los mismos.

5 En un aspecto de la invención, dicha pluralidad de funciones periódicas derivadas son funciones senoidales y/o cosenoidales. Mediante el uso de funciones senoidales y/o cosenoidales derivadas, es posible aproximar una corrección de cabeceo muy cercana de la deseada.

10 En otro aspecto de la invención, las frecuencias de dicha pluralidad de funciones periódicas son una serie limitada de diferentes múltiplos enteros de la frecuencia del rotor, por ejemplo hasta cuatro veces la frecuencia del rotor, tal como cualquiera de los múltiplos primero, segundo, tercero y cuarto de la frecuencia del rotor o combinaciones de al menos dos de dichos múltiplos. Mediante el uso de una serie limitada de funciones periódicas es posible establecer rápidamente una corrección de cabeceo muy cercana de la deseada, sin necesidad de una potencia de cálculo significativa.

15 En otro aspecto de la invención, al menos un componente de amplitud y un componente de fase son determinados para cada una de dichas funciones periódicas derivadas. La determinación de dichos componentes de amplitud y fase facilita el procesamiento de datos general en los medios de cálculo y facilita la vinculación en tiempo y ubicación de acimut entre la carga asimétrica del rotor y la acción de corrección de cabeceo.

En otro aspecto de la invención, dicha pluralidad de funciones periódicas incluye al menos una función con una frecuencia igual a la frecuencia del rotor. Mediante la inclusión de funciones periódicas con una frecuencia igual a la frecuencia del rotor, es posible aproximar una corrección de cabeceo cercana a la deseada, simplificada en una situación de flujo libre o casi libre de entrada del viento.

20 En otro aspecto de la invención, dicha pluralidad de funciones periódicas incluye al menos una función con una frecuencia igual a cuatro veces la frecuencia del rotor. Mediante la inclusión de funciones periódicas con una frecuencia igual a cuatro veces la frecuencia del rotor, es posible aproximar una corrección de cabeceo cercana a la deseada, simplificada en una situación de estela completa o parcial.

25 En otro aspecto de la invención, dicha pluralidad de funciones periódicas se derivan por medio de una transformación discreta de Fourier aplicada a la función de distribución de carga. Utilizar la transformación discreta de Fourier para derivar dicha pluralidad de funciones periódicas permite utilizar técnicas de programación bien conocidas, rápidas y fiables para implementar el código de programa en los medios de cálculo.

En otro aspecto de la invención, dicha pluralidad de funciones periódicas se derivan por medio de las relaciones inversas entre el primer armónico periódico y las amplitudes modales de pala medidas.

30 En otro aspecto de la invención, dicha pluralidad de funciones periódicas se derivan por medio de sucesivos filtrados de paso de banda aplicados a la función de distribución de carga.

En otro aspecto de la invención, dicha pluralidad de funciones periódicas se derivan por medio de un estimador recursivo de mínimos cuadrados aplicado a la función de distribución de carga.

35 En otro aspecto de la invención, dichos datos de carga se recogen mediante la medición de los momentos de flexión en el encastre de la pala mediante los cuales se puede obtener una medición representativa, preferentemente con medios sensores ya existentes.

40 En otro aspecto de la invención, dichos momentos de flexión se miden para al menos una pala. Al hacer mediciones en una sola pala, los datos pueden ser utilizados para establecer una corrección de cabeceo optimizada aplicada a todas las palas, suponiendo que todas las palas del rotor están sometidas a la misma carga asimétrica como función de una vuelta completa del rotor.

En otro aspecto de la invención, dichos momentos de flexión se miden para más de una pala, por ejemplo para dos palas de la turbina eólica. Al hacer mediciones en más de una pala, una corrección de cabeceo individual óptima puede ser aplicada a cada pala individual.

45 En otro aspecto de la invención, dichos momentos de flexión se miden en dos direcciones sustancialmente perpendiculares.

En otro aspecto de la invención, dichos datos de carga se recogen mediante la medición del ángulo de ataque de las palas mediante el cual puede conseguir una medición representativa, preferentemente con medios de medición existentes.

50 En otro aspecto de la invención, dichos datos de carga se recogen mediante la medición de las fuerzas sobre un árbol principal de la turbina eólica, tal como un árbol de baja o alta velocidad.

En otro aspecto de la invención, dichas fuerzas de carga sobre dicho árbol se miden en dos direcciones sustancialmente perpendiculares.

En otro aspecto de la invención, dicho medio de control de la turbina eólica comprende un mecanismo de control de cabeceo de pala con el fin de poder implementar dichas acciones determinadas.

5 En otro aspecto de la invención, dichas fuerzas de carga se miden continuamente o durante un período de tiempo predeterminado, dependiendo del grado y la velocidad de las variaciones en la situación de flujo de entrada de viento y de la necesidad de medición y control.

En otro aspecto de la invención, dicho período predeterminado de tiempo es igual a entre 0,01 y 0,5 rotaciones completas del rotor, preferentemente en el intervalo de 0,1 a 0,3 rotaciones completas del rotor, dependiendo de la necesidad del mismo.

10 En otro aspecto de la invención, dicho período de tiempo predeterminado es igual a entre 0,5 y 6 rotaciones completas del rotor, preferentemente en el intervalo de 0,75 a 3 rotaciones completas del rotor, dependiendo de la necesidad del mismo.

La invención también se refiere a un sistema de control así como a una turbina eólica y a un parque eólico.

Figuras

La invención será descrita a continuación con referencia a las figuras, en las cuales

- 15 la fig. 1 ilustra una turbina eólica moderna grande que incluye tres palas de turbina eólica en el rotor de la turbina eólica,
- la fig. 2 ilustra un sistema de referencia para medir el ángulo de acimut Ψ . El ángulo de acimut Ψ se define por la posición de la pala 1,
- 20 la fig. 3a ilustra esquemáticamente un ejemplo de la dirección de las mediciones de carga de la pala de rotor de la turbina eólica,
- la fig. 3b ilustra un sistema de coordenadas de referencia para la medición de las cargas de la pala de rotor de la turbina eólica,
- la fig. 4 ilustra esquemáticamente un modo de realización de un sistema de control para controlar los ángulos de cabeceo de las palas de la turbina eólica,
- 25 la fig. 5a ilustra las cargas de momento no coplanares sobre las palas del rotor de una turbina eólica de 3 palas como resultado de una distribución idealizada de cizalla de viento lineal entre una posición de la pala del rotor superior ($\Psi = 0$ [rad]) y una posición hacia abajo ($\Psi = \pi$ [rad]) que corresponde a una situación de flujo libre de entrada de viento,
- 30 la fig. 5b ilustra las cargas de momento transformadas, $m_{\text{inclinación}}$, $m_{\text{guiñada}}$, como función de acimut para una rotación completa del rotor y como resultado de dicha distribución lineal de cizalla de viento
- la fig. 6 ilustra el error del ángulo de cabeceo entre una función escalón deseada y una regulación del ángulo de cabeceo cíclica con el rotor,
- la fig. 7 ilustra esquemáticamente la funcionalidad del sistema de cabeceo adaptativo inventado en una turbina eólica con control de cabeceo,
- 35 la fig. 8a ilustra las cargas de momento no coplanares sobre las palas del rotor de una turbina eólica de 3 palas como resultado de una cizalla en escalón horizontal que corresponde a una situación idealizada de flujo de entrada de media estela,
- la fig. 8b ilustra las cargas de momento transformadas, $m_{\text{inclinación}}$, $m_{\text{guiñada}}$, como función de acimut para una rotación completa del rotor y como resultado de dicha cizalla en escalón horizontal
- 40 la fig. 9 ilustra la diferencia entre las cargas de momento transformadas, $m_{\text{inclinación}}$, $m_{\text{guiñada}}$ reales y las cargas de momento filtradas, $m_{\text{inclinación}}^{(h)}$, $m_{\text{guiñada}}^{(h)}$ como resultado de una cizalla en escalón horizontal correspondiente a una situación idealizada de flujo de entrada de media estela,
- la fig. 10 ilustra el error de ángulo de cabeceo entre una función escalón deseada y una regulación del ángulo de cabeceo armónica, incluyendo un número truncado de componentes armónicos,

45 Descripción detallada

La fig. 1 ilustra una turbina eólica moderna 1 con una torre 2 y una góndola 3 de turbina eólica situada en la parte superior de la torre.

El rotor de la turbina eólica, que comprende al menos una pala, tal como tres palas 5 de turbina eólica como se

ilustra, está conectado al buje 4 a través de un mecanismo de cabeceo 16. Cada mecanismo de cabeceo incluye un rodamiento de pala y medios de accionamiento de cabeceo que permiten que la pala cabecee con relación al viento. El proceso de cabeceo está controlado por un controlador de cabeceo, como se explicará con más detalle más adelante.

- 5 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 delantera de la góndola.

Como se ilustra en la figura, el viento por encima de cierto nivel activará el rotor y permitirá que gire en una dirección perpendicular al viento. El movimiento de rotación se convierte en potencia eléctrica que generalmente es suministrada a la red de transporte como es conocido por los expertos en el área.

- 10 La fig. 2 ilustra cómo el ángulo de acimut Ψ es medido 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 extremos: a (el centro del árbol de baja velocidad 4a), y b (el punto extremo de la pala del rotor 7). El ángulo de acimut es medido para una pala del rotor de referencia, por ejemplo la pala 1, como función del tiempo y la posición.

- 15 La fig. 3a ilustra una pala del 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 delantera de la góndola.

La pala del rotor se carga por una fuerza del viento $F_{carga}(t)$ dependiente de, por ejemplo, la dirección del viento con respecto a la pala del rotor, el área de la pala del rotor, el cabeceo de la pala de rotor, etc. Dicha fuerza del viento, que intenta literalmente arrancar la góndola de la torre o de los cimientos, produce un momento de flexión de carga m_x en el árbol de baja velocidad 4 y en el encastramiento de la pala de rotor 10 alrededor de su línea central 8.

- 20 La fig. 3b ilustra un diagrama formalizado de las fuerzas in situ que actúan en 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 9, una fuerza del viento resumida $F_{carga}(t)$ y la dirección del momento de flexión de carga (o el momento no coplanar) m_x de la pala número x.

- 25 La fig. 4 ilustra esquemáticamente un modo de realización preferente de un sistema de control para controlar los ángulos de cabeceo de las palas de la turbina eólica.

Los datos de la turbina eólica 1 son medidos con medios sensores 11, tales como sensores de posición de cabeceo, sensores de carga de la pala, sensores de acimut, etc. Los datos medidos por los sensores se suministran a medios de cálculo 12 con el fin de convertir los datos en una señal de realimentación. La señal de realimentación se utiliza en el sistema de control de cabeceo 13 para controlar el ángulo de cabeceo mediante el establecimiento de valores de control para el control de dicha al menos una pala 5 de la turbina eólica.

- 30 Los medios de cálculo 12 incluyen preferentemente un microprocesador y medios de almacenamiento informático para controlar continuamente dicha señal de realimentación.

Mediante la medición de forma continua de los valores actuales de los momentos de carga sobre las palas del rotor, el cálculo de un ajuste deseado del ángulo de cabeceo óptimo y la alimentación de esta información al sistema de control de cabeceo en un bucle de realimentación cerrado es posible optimizar los valores de control para controlar (sustancialmente) el rotor en los límites de diseño de la turbina eólica y, especialmente, en los límites de diseño de las palas de la turbina eólica.

- 35 Un ejemplo de la técnica anterior para el control de las cargas de momento no coplanares en las palas de la turbina eólica de una turbina eólica se describe aquí.

Un ejemplo de la técnica anterior para el control de las cargas de momento no coplanares en las palas de la turbina eólica de una turbina eólica se describe aquí.

- 40 Las cargas del encastramiento de la pala $M_R = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ sobre las palas del rotor de una turbina eólica de 3 palas se definen como consecuencia de una distribución lineal de la cizalla de viento dada entre una posición superior de la pala del rotor ($\Psi = 0$) y la posición hacia abajo ($\Psi = \pi$) que corresponden estrechamente a una situación idealizada de flujo libre de entrada de viento.

La fig. 5a ilustra un dibujo típico de dichos momentos para condiciones de flujo de entrada libre.

- 45 Transformando M_R en un sistema de coordenadas definido por las direcciones equivalentes a la inclinación, cabeceo e impulso, las respectivas cargas de momento $m_{inclinación}$, $m_{guiñada}$, m_{sum} se convierten en:

$$m_{inclinación} = m_1 \cdot \cos(\Psi) + m_2 \cdot \cos(\Psi + 4\pi/3) + m_3 \cdot \cos(\Psi + 2\pi/3)$$

$$m_{guiñada} = -m_1 \cdot \sen(\Psi) - m_2 \cdot \sen(\Psi + 4\pi/3) - m_3 \cdot \sen(\Psi + 2\pi/3)$$

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

- 50 Para las cargas ilustradas en la fig. 5a, dichas cargas de momento transformadas, $m_{inclinación}$, $m_{guiñada}$, son ilustradas en la fig. 5b como función de una rotación completa del rotor. Para este ejemplo idealizado de un estado de la

técnica, $m_{\text{inclinación}}$, $m_{\text{guiñada}}$ son constantes.

La cercanía a un comportamiento senoidal de M_R como se ilustra en la fig. 5a dará lugar a cargas de fatiga sobre las palas del rotor. Una técnica para compensar en parte estas cargas alteradas en las palas del rotor puede ser por lo tanto controlar individualmente las palas del rotor durante una rotación completa de una pala con el fin de nivelar la distribución de las fuerzas del viento, es decir, una pala de rotor cabecea menos en el viento en la parte superior que en la parte inferior del movimiento de rotación realizado por el rotor incluyendo las palas.

Debido a esta estrecha relación entre M_R y el control deseado del ángulo de cabeceo, la señal deseada de control de cabeceo es también una función del ángulo de acimut, es decir, una función senoidal de una frecuencia igual a la frecuencia de rotación del rotor. Esta técnica se llama cabeceo cíclico o cíclico con el rotor de las palas de turbina eólica, es decir, un cambio cíclico del ángulo de cabeceo durante una rotación completa de una pala.

Cuando la pala del rotor entra en una estela se expone a una cizalla en escalón. Esto ha sido confirmado por mediciones reales en las turbinas eólicas. Sin embargo, con el fin de mantener una carga constante sobre las palas del rotor bajo esta condición, dicho control de cabeceo cíclico con el rotor se puede aplicar dando como resultado una optimización básica de la carga. Pero como la carga afectada tiene un comportamiento escalonado y dicho control de cabeceo cíclico con el rotor tiene un comportamiento senoidal siempre se producirá una fuerza alternada no despreciable en las palas del rotor.

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

Un ejemplo de la presente invención para controlar las cargas de momento no coplanares sobre las palas de la turbina eólica de una turbina eólica es descrito aquí.

La fig. 7 ilustra para la presente invención un modo de realización preferente de dicho sistema de control para controlar los ángulos de cabeceo de las palas de turbinas eólicas.

Las cargas de momentos $M_R = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ sobre las palas del rotor y el ángulo de acimut Ψ son medidas por los medios sensores y alimentadas a los medios de cálculo.

M_R es transformado en un sistema de coordenadas definido por las direcciones equivalentes de inclinación, guiñada e impulso $M_F = [m_{\text{inclinación}} \ m_{\text{guiñada}} \ m_{\text{sum}}]^T = T \cdot M_R$

Donde:

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

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

M_F son datos procesados por un filtro (H) a $M_F^{(h)}$, derivando y procesando una pluralidad de funciones armónicas en diferentes múltiplos enteros de la frecuencia del rotor (ω_{nom}) con el fin de adaptar el sistema de control del ángulo de cabeceo para reducir al mínimo las fluctuaciones de los datos de carga medidos de tal manera que las cargas sobre las palas del rotor se mantienen constantes o casi constantes.

Una realización preferente de dicho filtro de procesamiento de datos (H) es un estimador recursivo de mínimos cuadrados (RSL) con olvido exponencial. Esta es una técnica de optimización matemática que intenta encontrar un mejor ajuste 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 procesamiento RLS está basado en unos pocos operadores claves y puede ser implementado en una simulación informática tras el siguiente algoritmo:

Simulación:

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

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

R = 9x9 matriz inicializada con cero elementos

G = 9x1 vector inicializado con cero elementos

$$\mu = 1/k_0$$

5 for p = 1..N (p esta expresado como número de paso de simulación, 1, 2, 3..)

$$t = p \cdot T_s$$

for i = 1..3 (iteración sobre $m_{inclinación}$, $m_{guiñada}$, m_{sum})

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

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

10 $\theta^{(i)} = (R^{(i)})^{-1} G^{(i)}$

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

end

end

En el ejemplo de simulación por ordenador anterior:

15 ω_{nom} = la frecuencia nominal del rotor cíclico

φ = el vector de análisis armónico (incluyendo aquí los componentes hasta el cuarto armónico)

θ = las amplitudes de los armónicos

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

G = es un vector 9x1, inicializada con cero elementos

20 T_s = el tiempo de escalón de simulación

μ = un factor de olvido

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

Vale la pena señalar que dicho filtro RLS es adaptativo lo que produce que la salida de los filtros cambie como respuesta a un cambio en la entrada.

25 Una versión práctica aplicada del procesamiento de datos comprende medios de cálculo para la adquisición de datos digitales, análisis de armónicos, filtro de cálculo RLS, almacenamiento de datos y conversión D/A, de forma continua o por un período de tiempo predeterminado.

30 Debido a los retrasos de tiempo en los medios de detección, en los medios de cálculo y en el sistema de control de cabeceo, la señal de control correctiva del ángulo de cabeceo es desplazada en el tiempo en relación a las cargas medidas en la pala M_R . Para corregir esto, $M_F^{(h)}$ es desplazada en el tiempo de forma equivalente para sincronizar, es decir $M_{FS}^{(h)} = \text{desplazamiento en el tiempo } (M_F^{(h)})$.

Un desplazamiento de tiempo general de una suma de señales de armónicos se puede realizar de la siguiente manera:

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

35 de modo que

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

, (1x2) x (2x2) x (2x1) = (1x1)

donde:

$$P^{(i)} = [a^i \ b^i]^T$$

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

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

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

La señal $M_R^{(h)}$ se multiplica con una ganancia para la conversión a radianes, esto es $\beta_{dem}^{(h)} = \text{Ganancia } M_R^{(h)}$ y es añadida a la señal de demanda de cabeceo colectiva $\beta_{dem}^{(c)}$.

10 La fig. 8a ilustra como un ejemplo cargas de momento $M_R = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ en las palas del rotor de una turbina eólica de 3 palas como consecuencia de una cizalla en escalón horizontal que corresponde a una situación idealizada de flujo de entrada de media estela.

Transformando M_R en un sistema de coordenadas definido por las direcciones equivalentes de inclinación, guiñada e impulso, las respectivas cargas de momento $m_{inclinación}$, $m_{guiñada}$, m_{sum} se convierten en:

$$m_{inclinación} = m_1 \cdot \cos(\Psi) + m_2 \cdot \cos(\Psi + 4\pi/3) + m_3 \cdot \cos(\Psi + 2\pi/3)$$

$$m_{guiñada} = -m_1 \cdot \text{sen}(\Psi) - m_2 \cdot \text{sen}(\Psi + 4\pi/3) - m_3 \cdot \text{sen}(\Psi + 2\pi/3)$$

15 $m_{sum} = m_1 + m_2 + m_3$

$m_{inclinación}$, $m_{guiñada}$, son ilustradas en la fig. 8b como función de una rotación completa del rotor.

Las funciones periódicas como las funciones ilustradas en la fig. 8b se pueden resolver como una suma infinita de senos y cosenos llamada serie de Fourier y en este caso pueden ser expresadas generalmente como:

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

20 donde:

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

El cálculo de la serie de Fourier se conoce como análisis armónico.

25 Se observa a partir de la ecuación $m(\Psi)$ que la serie de Fourier consiste en un componente no-alternativo, componentes que se alternan de acuerdo con el parámetro de base Ψ y una pluralidad de funciones periódicas de diferentes múltiplos enteros de la frecuencia básica. Los coeficientes ponderados de Fourier a_i , b_i determinan la amplitud de cada frecuencia armónica en la señal original.

30 El mencionado estimador de datos RLS procesa un número truncado de funciones periódicas derivadas por el análisis armónico, por ejemplo, los primeros cuatro múltiplos armónicos de la frecuencia básica del rotor. El propósito del estimador RLS es producir una señal de salida que es alimentada al sistema de control de cabeceo con el fin de minimizar la energía en la señal de carga M_R , es decir, para reducir al mínimo las cargas fluctuantes en las palas del rotor.

35 Para este ejemplo idealizado las señales de entrada 17, 19 que representan los momentos de carga $m_{inclinación}$, $m_{guiñada}$, de M_F respectivamente se ilustran en la figura 9. Las señales de salida $m_{inclinación}^{(h)}$, $m_{guiñada}^{(h)}$, de $M_F^{(h)}$ están representadas por 18, 20, respectivamente. El mencionado filtro RLS ha procesado los primeros cuatro múltiplos armónicos de la frecuencia básica.

La señal filtrada $M_F^{(h)}$ es desplazada en el tiempo a una señal $M_{FS}^{(h)}$ y transformada del sistema de referencia fijo de nuevo al sistema de referencia rotatorio mediante $M_R^{(h)} = T^{-1} \cdot M_{FS}^{(h)}$

donde:

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

Por último, la señal filtrada $M_R^{(h)}$ es ajustada en ganancia $\beta_{dem}^{(h)}$ y añadida a una señal de control de ángulo de cabeceo general $\beta_{dem}^{(c)}$ definida por un controlador de velocidad de la turbina eólica, y la señal de control resumida β_{dem} es alimentada al controlador de cabeceo que efectúa las acciones deseadas.

5 La fig. 10 ilustra una señal de control de cabeceo de datos procesados, por ejemplo $m_1^{(h)}$ de $M_R^{(h)}$, en el ejemplo anterior, que corresponde a una situación de media estela idealizada. La curva 14 ilustra un cambio brusco deseado en el control del ángulo de cabeceo y la curva 22 ilustra un control correctivo real del ángulo de cabeceo aplicado por dicha técnica de cabeceo cíclico con el rotor. La diferencia entre las dos curvas se ilustra por 21.

10 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 la turbina eólica mediante mecanismos de cabeceo. Sin embargo, debe entenderse que la invención no se limita a los ejemplos particulares descritos anteriormente, sino que se puede diseñar y modificar en una multitud de variedades dentro del alcance de la invención tal como se especifica en las reivindicaciones.

Lista de números de referencia

- 15 En los dibujos, los siguientes números de referencia se refieren a:
 - 1. Turbina eólica o sistema de turbina eólica
 - 2. Torre de turbina eólica
 - 3. Góndola de turbina eólica
 - 4. Árbol de baja velocidad
- 20
 - 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
 - 7. Punto extremo de una pala de rotor de turbina eólica
 - 8. Línea central del árbol de baja velocidad
- 25
 - 8a. Línea central formalizada del árbol de baja velocidad
 - 9. Línea vertical central de la pala del rotor a través del punto central del árbol de baja velocidad
 - 10. Encastre de la pala del rotor de turbina eólica
 - 11. Medios sensores
 - 12. Medios de cálculo
- 30
 - 13. Sistema de control de cabeceo
 - 14. Ejemplo de un ángulo de cabeceo con escalón deseado
 - 15. Ejemplo de una corrección real cíclica con el rotor del ángulo de cabeceo
 - 16. Error de ángulo - corrección de ángulo cíclica con el rotor
 - 17. $m_{inclinación}$ idealizado
- 35
 - 18. $m_{inclinación}$ filtrado
 - 19. $m_{guiñada}$ idealizado

20. m_{guiñada} filtrado

21. Error de ángulo - corrección armónica de ángulo

22. Ejemplo de una corrección armónica real del ángulo de cabeceo

Ψ . Angulo de acimut para la pala de rotor 1 relativa a una posición de referencia vertical fijada

5

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para la reducción de cargas de fatiga en los componentes de una turbina eólica (1) sometida a una carga asimétrica de su rotor (6) que comprende las etapas de:
 - recoger y almacenar repetidamente unos datos de carga del rotor (6),
 - 5 determinar una función de distribución de carga para el rotor a partir de dichos datos almacenados,
 - derivar una pluralidad de funciones periódicas a partir de dicha función de distribución de carga,
 - determinar acciones para unos medios de control (12) de la turbina eólica para reducir la carga de fatiga de los componentes de la turbina eólica a partir de dicha pluralidad de funciones periódicas derivadas, e
 - implementar dichas acciones determinadas en los medios de control (12) de la turbina eólica.
- 10 2. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicha pluralidad de funciones periódicas derivadas son funciones senoidales o cosenoidales.
3. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, en el que las frecuencias de dicha pluralidad de funciones periódicas son diferentes múltiplos enteros de la frecuencia del rotor, por ejemplo, hasta 4 veces la frecuencia del rotor, tal como cualquiera de los múltiplos primero, segundo, tercero y cuarto de las
 - 15 frecuencia del rotor o combinaciones de al menos dos de dichos múltiplos.
4. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que para cada una de las funciones periódicas derivadas se determina al menos un componente de amplitud y un componente de fase.
5. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicha pluralidad de funciones periódicas incluye al menos una función con una frecuencia igual a la frecuencia del rotor.
- 20 6. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicha pluralidad de funciones periódicas incluye al menos una función con una frecuencia igual a cuatro veces la frecuencia del rotor.
7. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicha pluralidad de funciones periódicas se deriva por medio de una transformada discreta de Fourier aplicada a la función de distribución de carga.
- 25 8. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicha pluralidad de funciones periódicas se deriva por medio de un estimador recursivo de mínimos cuadrados aplicado a la función de distribución de carga.
9. Un sistema de control (12) para realizar el procedimiento de reducción de las cargas de fatiga en los componentes de una turbina eólica (1) sometida a una carga asimétrica de su rotor de acuerdo con cualquiera de las
 - 30 reivindicaciones 1 a 8, comprendiendo dicho sistema de control:
 - medios de recogida de datos y de almacenamiento para recoger y almacenar repetidamente datos de carga (M_R) del rotor.
 - medios de control de la turbina eólica para controlar la captura de potencia de la turbina eólica (1), y
 - medios de procesamiento de datos para el procesamiento de dichos datos recogidos de carga del rotor (6) de la
 - 35 turbina eólica (1) y que en consecuencia proporcionan una salida de control,
 - donde dichos medios de procesamiento de datos están adaptados para determinar una función de distribución de carga (M_F) para el rotor a partir de dichos datos de carga almacenados, derivando de dicha función de distribución de carga (M_F) una pluralidad de funciones periódicas ($M_F^{(h)}$), determinando acciones, sobre la base de dicha pluralidad de funciones periódicas ($M_F^{(h)}$), para que dichos medios de control de la turbina eólica reduzcan las cargas de fatiga en los componentes de la turbina eólica, y proporcionando una salida de control en consecuencia a los
 - 40 medios de control de la turbina eólica.
10. Un sistema de control de acuerdo con la reivindicación 9, que comprende medios para derivar a partir de dicha función de distribución de carga una pluralidad de funciones periódicas con frecuencias de diferentes múltiplos enteros de la frecuencia del rotor.
- 45 11. Un sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 9 o 10, que comprende medios de transductor dispuestos para medir momentos de flexión de la pala, por ejemplo, cerca del encastre de al menos una de las palas de la turbina eólica y en consecuencia producir una salida para los medios de recogida de datos.
12. Un sistema de control de acuerdo con la reivindicación 11, en el que dichos medios de transductor están dispuestos para medir momentos de flexión en el encastre de la pala de al menos dos de las palas de dicho rotor.

13. Un sistema de control de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes 11 a 12, que comprende medios de transductor dispuestos para medir las fuerzas en el árbol principal de la turbina eólica.

5 14. Turbina eólica que comprende un sistema de control de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13 para la reducción de cargas de fatiga en los componentes de la turbina eólica sometidos a carga asimétrica del plano del rotor.

15. Parque eólico que comprende al menos dos turbinas eólicas, en el que al menos una turbina eólica se controla con un sistema de control de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13 para la reducción de cargas de fatiga en los componentes de la turbina eólica sometidos a carga asimétrica del plano del rotor.

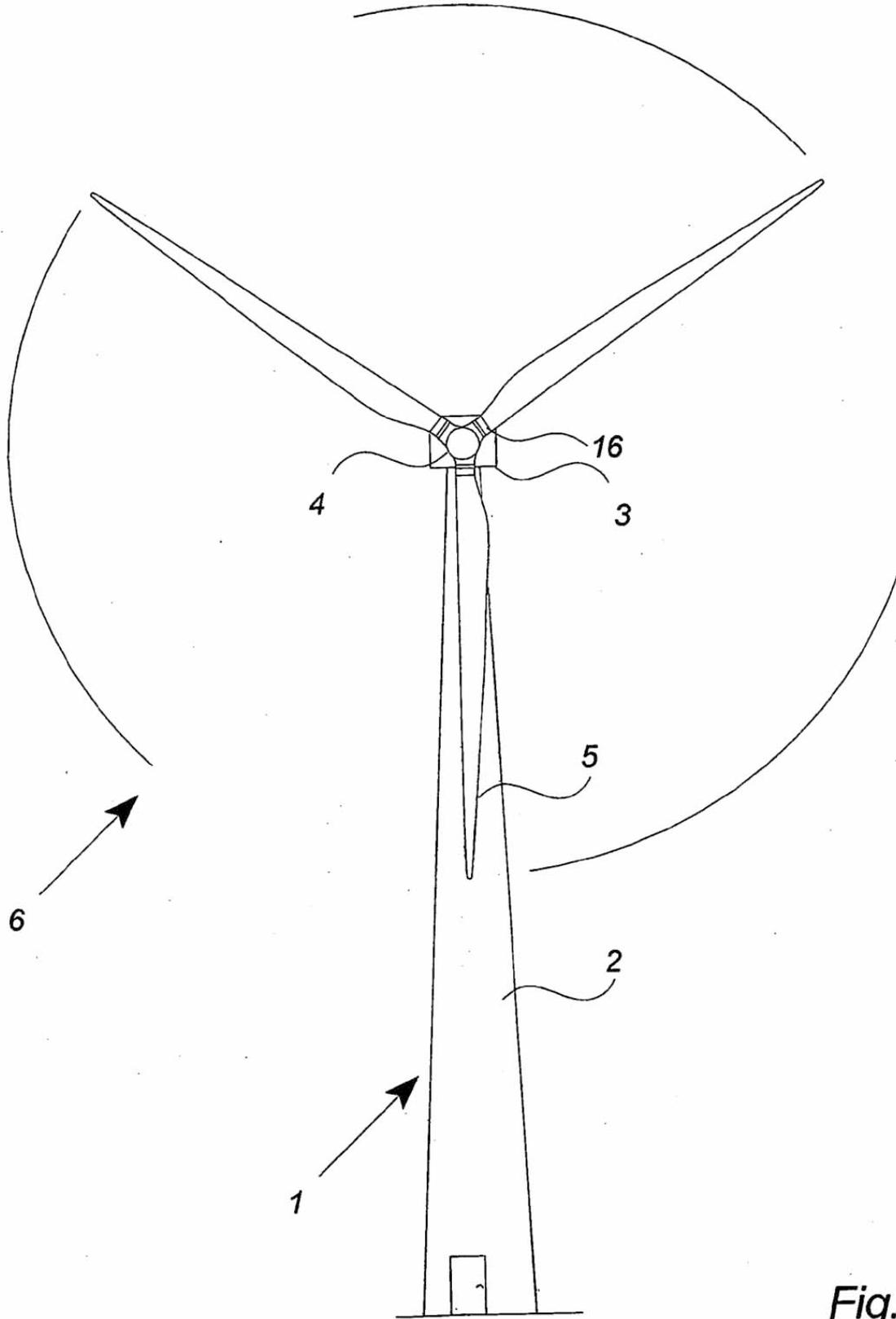


Fig. 1

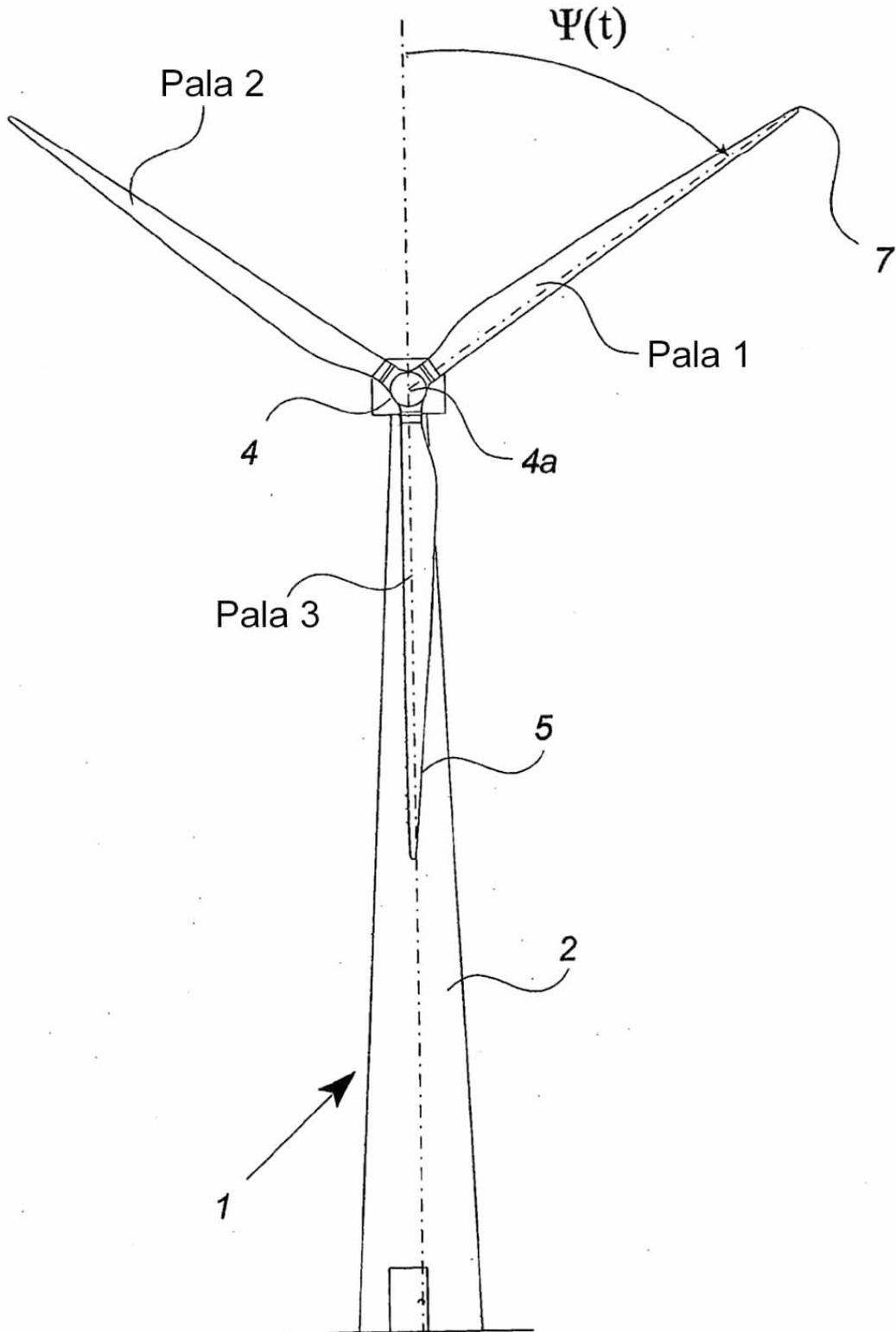


Fig. 2

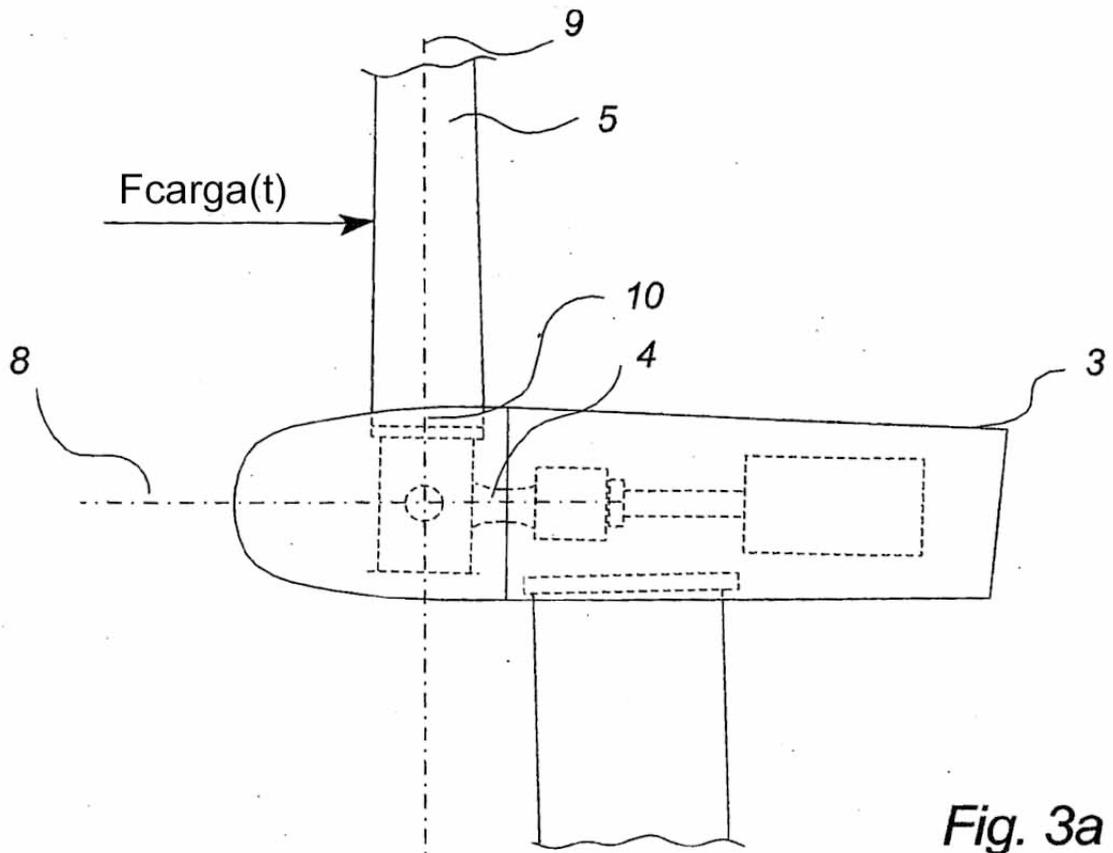


Fig. 3a

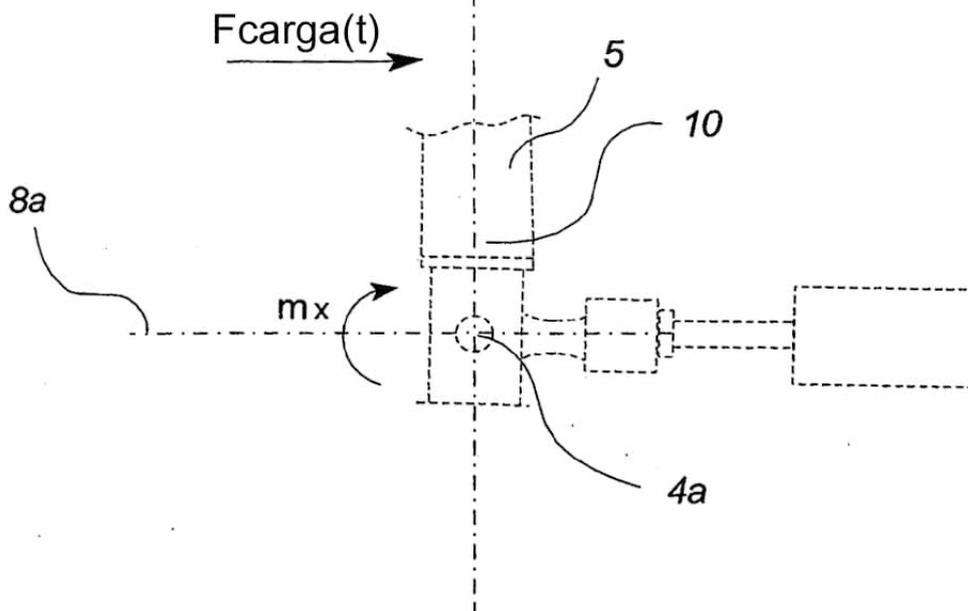


Fig. 3b

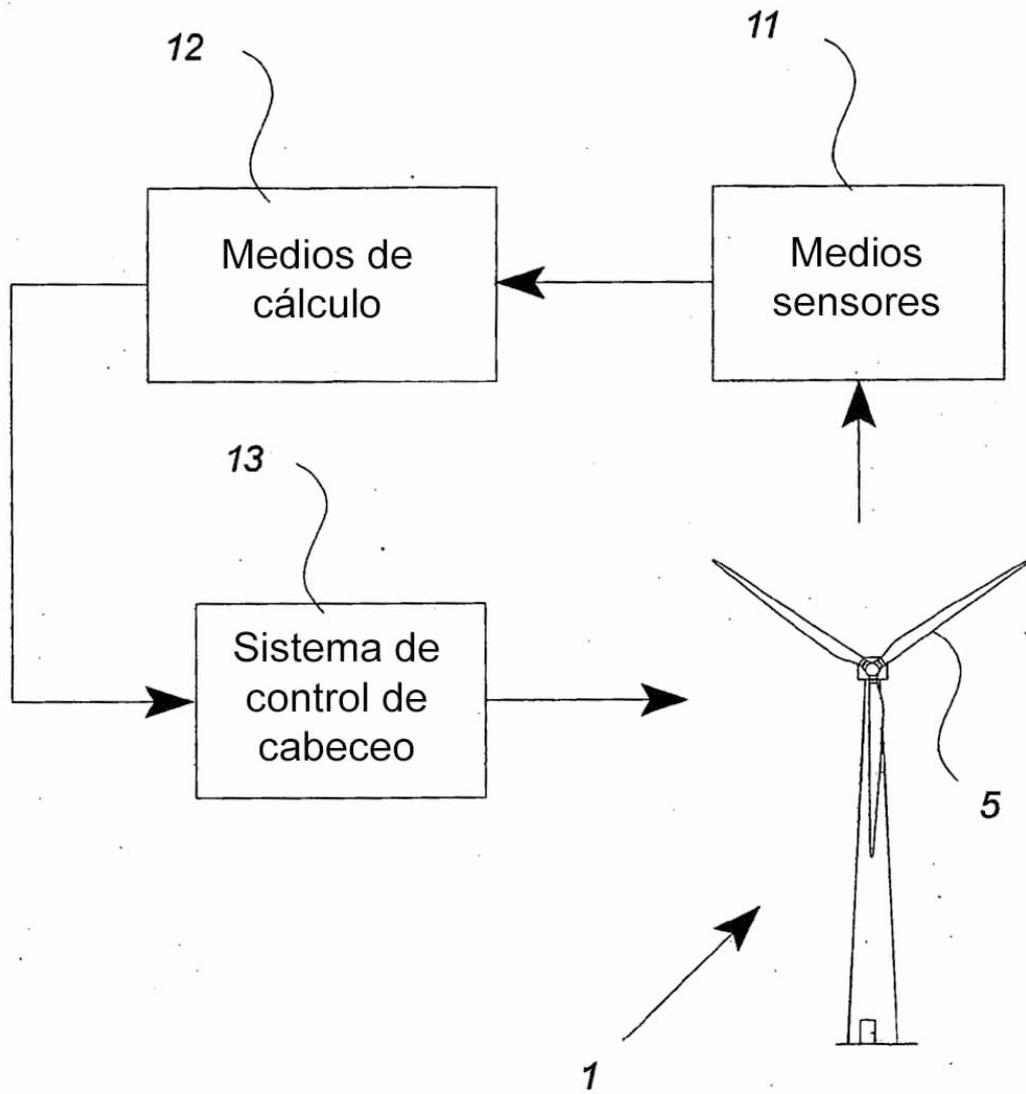


Fig. 4

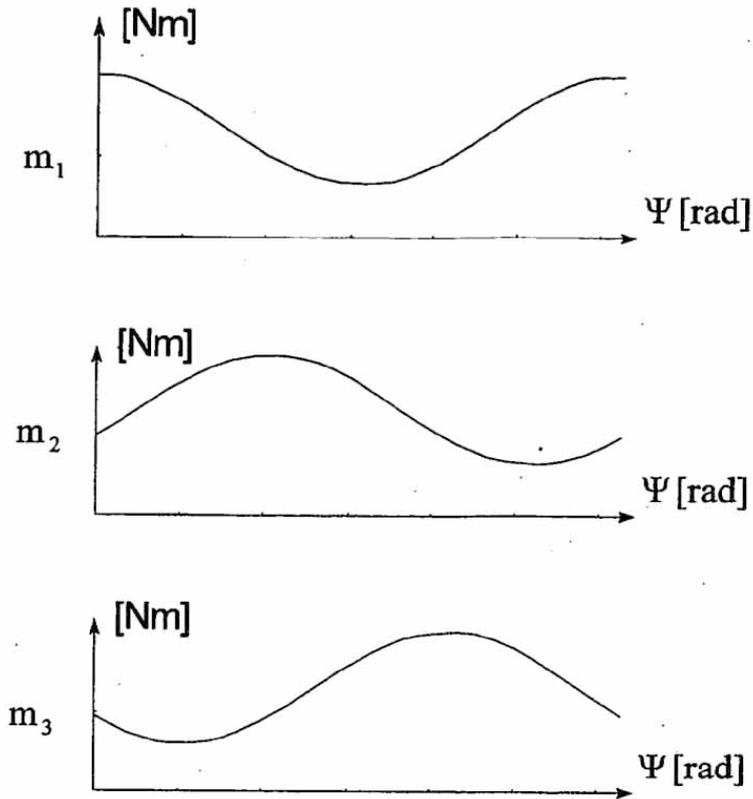


Fig. 5a

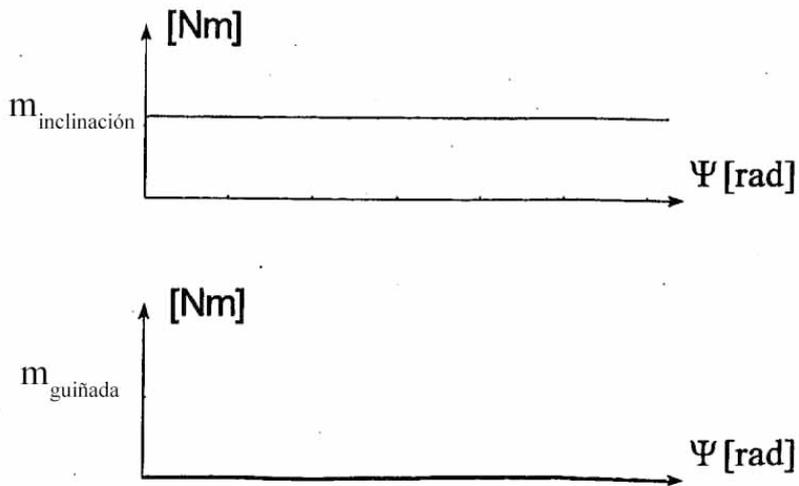
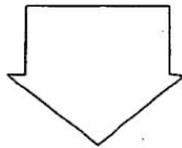


Fig. 5b

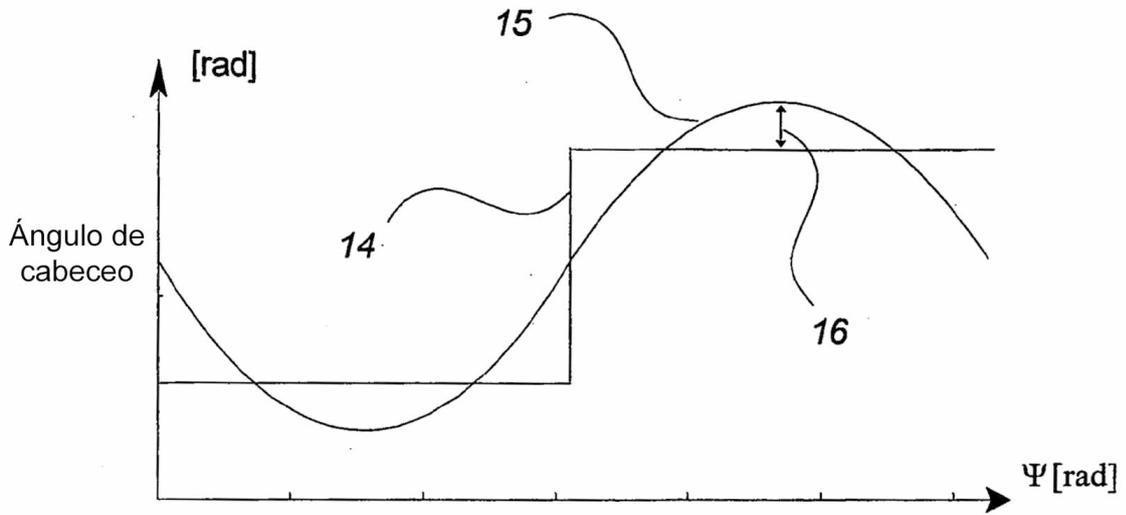


Fig. 6

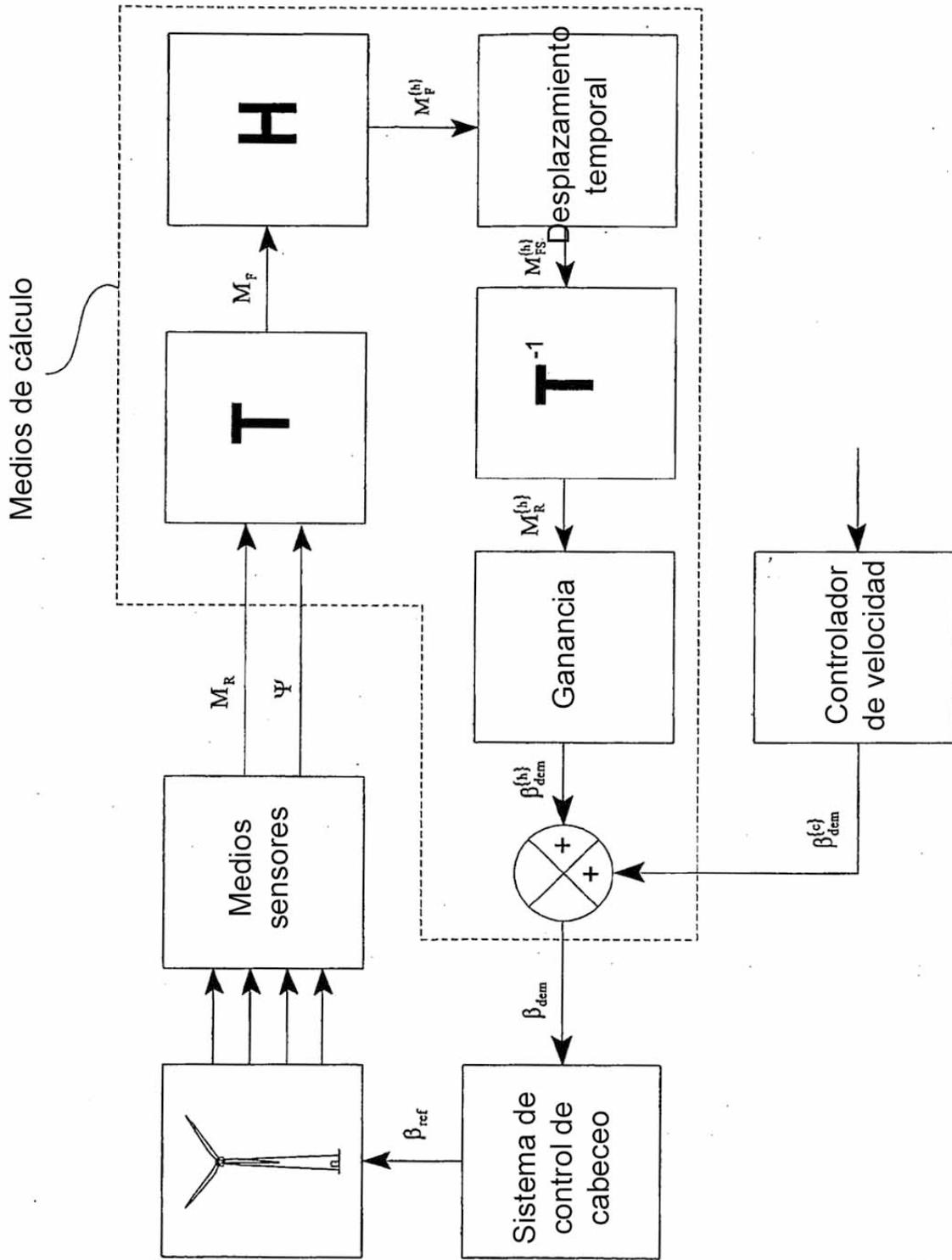


Fig. 7

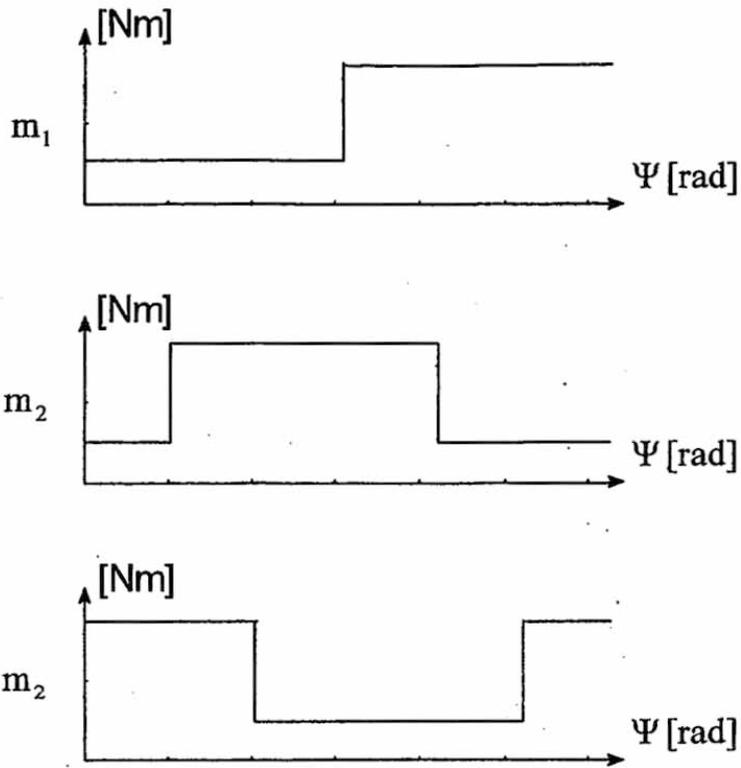


Fig. 8a

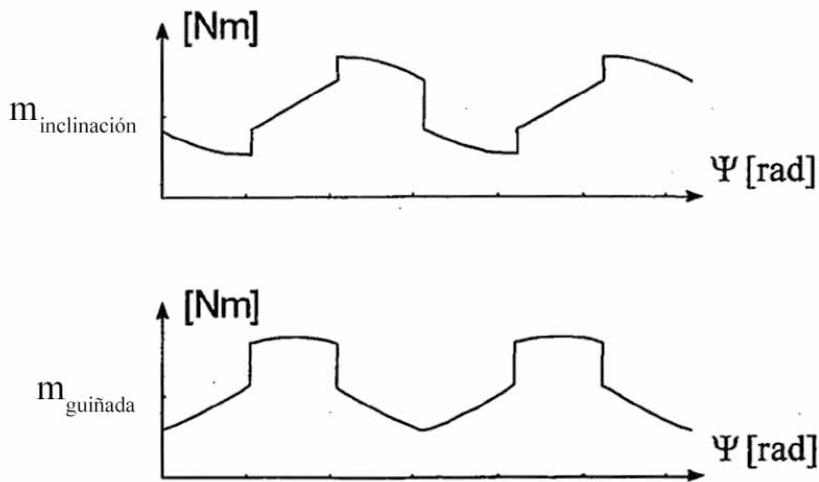
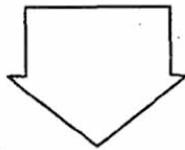


Fig. 8b

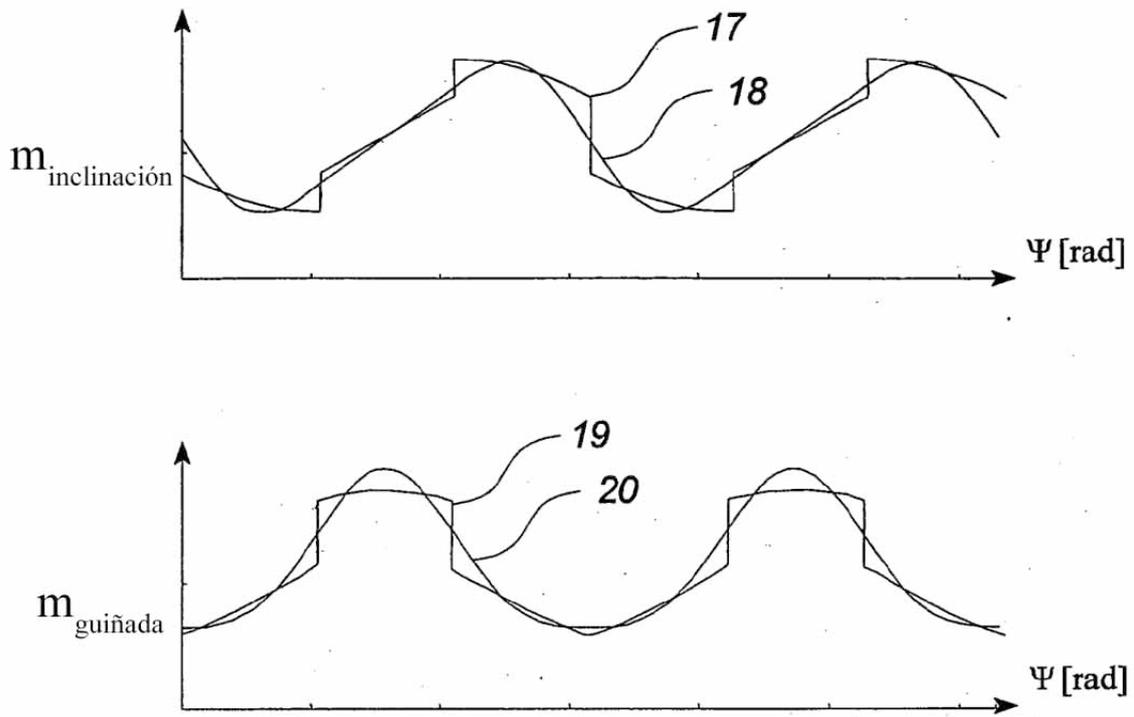


Fig. 9

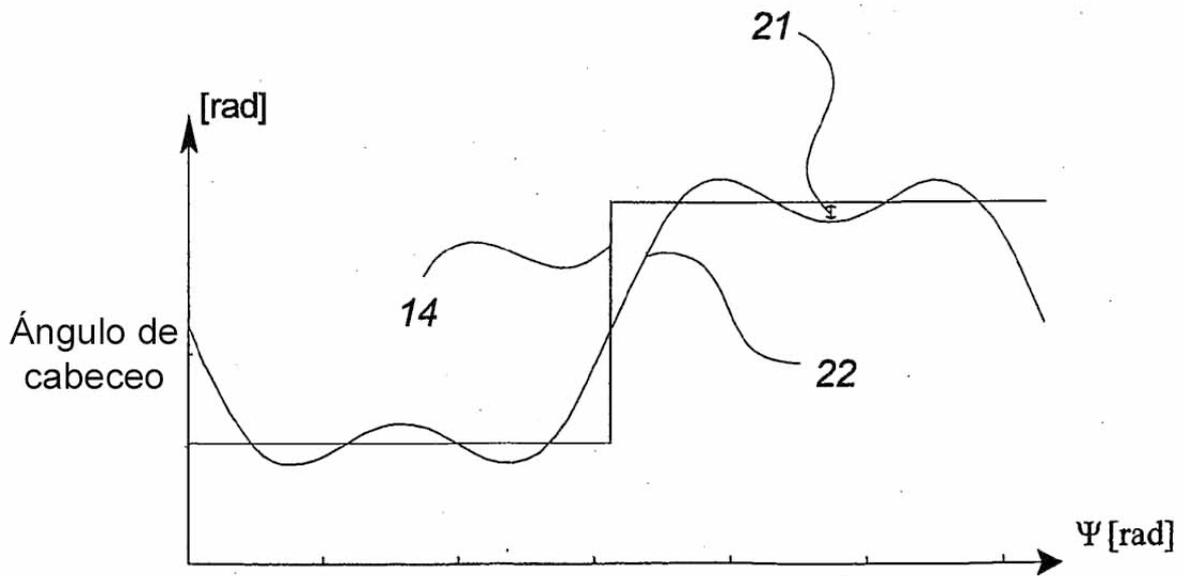


Fig. 10