(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 876 307**

(51) Int. CI.:

F03D 7/02 (2006.01)
F03D 17/00 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.04.2017 PCT/DK2017/050106**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **12.10.2017 WO17174090**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.04.2017 E 17717074 (3)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.06.2021 EP 3440347**

(54) Título: **Control de una turbina eólica que comprende acelerómetros de múltiples ejes**

(30) Prioridad:

08.04.2016 DK 201670212

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
12.11.2021

(73) Titular/es:

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

(72) Inventor/es:

HOVGAARD, TOBIAS GYBEL;
NIELSEN, JOHNNY y
ODGAARD, PETER

(74) Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

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

DESCRIPCIÓN

Control de una turbina eólica que comprende acelerómetros de múltiples ejes

Campo de la invención

La presente invención se refiere al control de una turbina eólica basándose en información obtenida a partir de acelerómetros.

Antecedentes

Las turbinas eólicas más modernas se controlan y regulan de manera continua con el propósito de garantizar una máxima extracción de energía a partir del viento en las condiciones actuales de viento y climatología, mientras que al mismo tiempo se garantiza que las cargas sobre los diferentes componentes de la turbina eólica se mantienen en cualquier momento dentro de límites aceptables.

Durante el funcionamiento, se observa que la torre de turbina eólica se mueve y oscila. Las oscilaciones de la torre están provocadas principalmente por variaciones en la fuerza de empuje y el par motor que actúan sobre el rotor. Tales variaciones están normalmente provocadas por turbulencias en el viento o por cambios en el control de la turbina eólica, por ejemplo, cambio del paso o la guiñada. Para el control de la turbina eólica y con el propósito general de optimizar la producción de energía y reducir las cargas de la turbina, es importante conocer o disponer de una buena estimación de la velocidad del viento y la fuerza de empuje que actúa sobre el rotor. Asimismo, la posición y velocidad de la góndola o la parte superior de la torre son parámetros que es importante poder tener en cuenta en el control de la turbina eólica. Tanto las posiciones como las velocidades en la dirección longitudinal y en la dirección lateral con respecto a la orientación de la turbina eólica son importantes.

La oscilación de la torre puede determinarse, al menos hasta cierto punto, colocando varios acelerómetros y/o galgas extensométricas a lo largo de toda la longitud de la torre con el fin de estimar de ese modo las formas de modo de la torre oscilante. En otro enfoque, la posición de la parte superior puede estimarse basándose en un acelerómetro posicionado para medir las aceleraciones longitudinales de la góndola junto con una estimación de la fuerza de empuje que actúa sobre el rotor. Sin embargo, este enfoque sólo tiene en cuenta el movimiento longitudinal y el uso de una estimación de empuje en la estimación reduce inevitablemente la exactitud del método.

El documento US 2008/118342 da a conocer colocar acelerómetros o galgas extensométricas en la cabeza de la torre y aproximadamente a media altura de la torre de una turbina correspondiente al punto en el que se producen las máximas desviaciones de la torre a las frecuencias naturales primera y segunda. Si las medidas superan ciertos límites indicativos de oscilaciones excesivas, se hace funcionar la turbina en modo de barrena para amortiguar las oscilaciones.

El documento US 2004/108729 da a conocer una turbina eólica con medios para detectar y monitorizar la oscilación de la torre de turbina eólica. Dos acelerómetros unidireccionales están colocados formando ángulos rectos en la góndola y las aceleraciones medidas se acumulan y se usan en la determinación de la desviación promedio de la torre con respecto a la posición en reposo. Sin embargo, la oscilación sólo se determina mediante este promedio a lo largo del tiempo, lo cual queda lejos de describir completamente la oscilación o el desplazamiento de la góndola durante el funcionamiento.

El documento WO2010060772 da a conocer controlar un parámetro de funcionamiento de una pala de turbina eólica. Se determinan la velocidad de la góndola de turbina eólica y una posición de la góndola de turbina eólica con respecto a una media móvil y, a partir de éstas, se determina la situación de funcionamiento real. Esta situación de funcionamiento real se compara con un espacio predeterminado de situaciones de funcionamiento aceptables determinadas a partir de un conjunto de situaciones de funcionamiento normales y se elige una estrategia de control a partir de un conjunto predeterminado de estrategias.

Sumario de la invención

Un objetivo de realizaciones de la invención es proporcionar un método más preciso y robusto pero eficaz para determinar las oscilaciones de la torre y para mejorar la determinación de la posición de la parte superior de la torre y velocidades durante movimientos tanto longitudinales como laterales de la torre.

Un objetivo adicional de realizaciones de la invención es proporcionar un método de mejora de la determinación de las fuerzas de empuje que actúan sobre el rotor, método que es igualmente adecuado durante cualquier tipo de funcionamiento de rotor así como durante un estado inmóvil.

En un primer aspecto la presente invención se refiere a un método de control de una turbina eólica según la reivindicación 1.

De este modo, se obtiene un método de control sencillo pero eficaz en el que las posiciones de la parte superior de la torre pueden determinarse eficazmente y con una exactitud mejorada, mejorando de ese modo el método de control con la posibilidad de controlar mejor y amortiguar las oscilaciones de la torre y por tanto las cargas.

Mediante el método propuesto que mide aceleraciones en al menos dos direcciones diferentes mediante cada acelerómetro de múltiples ejes durante el funcionamiento de la turbina eólica, los acelerómetros medirán componentes tanto a partir de las aceleraciones reales de los movimientos de la parte superior de la torre así como a partir de la gravedad. Después, se usa eficazmente esta información, junto con las formas de modo del movimiento de la turbina eólica, en el establecimiento de ecuaciones para determinar las posiciones absolutas de la parte superior de la torre.

Debido al uso y al posicionamiento de una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes, pueden tenerse en cuenta movimientos tanto longitudinales como laterales de la turbina eólica proporcionando una estimación mucho más precisa para la posición absoluta durante el funcionamiento de la turbina eólica.

Mediante el método propuesto, el método de control se basa en la posición absoluta determinada de uno o más de los acelerómetros y no sólo en una posición relativa, desviación promedio o amplitud tal como se observa en la técnica anterior. De este modo, el parámetro de control de la turbina eólica puede determinarse de manera mucho más exacta proporcionando un método de control más preciso y eficaz.

Las medidas a partir de la pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes comprenden componentes tanto a partir de las aceleraciones reales de los movimientos de la parte superior de la torre así como a partir de la gravedad, descompuestas en los múltiples ejes de los acelerómetros. Estimando que la torre vibra y oscila según el número de formas de modo predeterminadas, pueden establecerse ecuaciones que relacionan la(s) posición/posiciones de la parte superior de la torre con la posición absoluta de cada uno de los acelerómetros y de nuevo con las aceleraciones medidas.

Según la invención, una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes están montados en diferentes posiciones en la góndola y/o en una porción superior de la torre. La pluralidad de acelerómetros pueden ser dos, tres o más acelerómetros, y estos están configurados, cada uno, para medir aceleraciones en dos o más direcciones, normalmente en tres direcciones. Uno, más o la totalidad de los acelerómetros de múltiples ejes pueden medir aceleraciones en tres direcciones ortogonales entre sí. Cuantos más acelerómetros se usen, menor será el ruido y más exactas serán las posiciones absolutas que pueden determinarse.

Los acelerómetros están montados en diferentes posiciones. Las posiciones se obtienen y se usan en la determinación de la posición absoluta según el método. La posición de un acelerómetro según está montado corresponde normalmente a la posición durante un estado inmóvil de la turbina eólica en la que la turbina eólica no está oscilando o sólo oscila de manera insignificante (en comparación con oscilaciones durante el funcionamiento de la turbina eólica).

Los acelerómetros están montados en diferentes posiciones en la góndola y/o en una porción superior de la torre, tal como dentro de la góndola, en o cerca del buje, cerca del sistema de ajuste de guiñada y/o en la parte más superior de la torre, tal como en los 0-10 metros más superiores de la torre. De este modo, se obtiene una posición absoluta de un punto en la góndola o una porción superior de la torre que es la más ventajosa para el control según el método dado que la posición determinada proporciona entonces una medida fiable de la posición de la góndola y por tanto del buje de rotor durante cualquier deformación u oscilación de la turbina eólica.

Los acelerómetros están montados en diferentes posiciones para obtener información de las aceleraciones experimentadas en estas posiciones diferentes y múltiples. Los acelerómetros están montados en orientaciones definidas, es decir, orientaciones bien conocidas que pueden ser parcial o completamente iguales o todas ellas diferentes. Preferiblemente, la totalidad o al menos algunos de los acelerómetros están montados tal como para medir aceleraciones en dos direcciones predominantemente horizontales o casi horizontales. A medida que la torre de turbina eólica se dobla y oscila estas direcciones cambian naturalmente con la deformación y el movimiento.

Las formas de modo predeterminadas para el movimiento de la turbina eólica se basan al menos en dimensiones de la torre. Las dimensiones incluyen preferiblemente las dimensiones más significativas y estructuralmente descriptivas de la torre tales como la altura (es decir, la longitud global) de la torre desde el suelo hasta su parte superior y opcionalmente las posiciones de cualquier cable de sujeción de soporte o similares. Las dimensiones pueden incluir además el diámetro de la torre o los diámetros y longitudes de secciones de torre dependiendo del diseño estructural de la torre. Las dimensiones pueden incluir el grosor de la torre y/o la rigidez de la pared de torre.

Las formas de modo predeterminadas para el movimiento de la turbina eólica se basan además al menos en un peso de la góndola y el rotor según están soportados por la torre. El peso incluye preferiblemente el peso de todos los componentes dentro de, o sobre, la góndola según están soportados y portados por la torre y según están posicionados cerca de, o en, el extremo superior de la torre.

Las formas de modo para el movimiento de la turbina eólica caracterizan la dinámica modal y los modos normales de la turbina eólica, es decir, cómo la torre de turbina eólica, incluyendo góndola y el rotor según están soportados por la torre, basculan hacia delante y hacia atrás y en movimientos laterales a sus frecuencias naturales o frecuencias resonantes. Las formas de modo pueden incluir la primera y preferiblemente al menos la segunda forma de modo en la dirección longitudinal. Para una determinación más precisa de la posición absoluta, las formas de modo pueden incluir además la primera y preferiblemente al menos también la segunda forma de modo en la

dirección lateral. Las formas de modo pueden incluir además formas de modo de orden superior para el movimiento de la torre en una o ambas direcciones de las direcciones longitudinal y/o lateral. Las formas de modo pueden incluir además formas de modo de las palas de rotor tanto en rotación como no en rotación. Las formas de modo pueden predeterminarse, por ejemplo, a partir de análisis de elementos finitos u otros modelos estructurales y dinámicos.

Las dimensiones de la torre y el peso de la góndola y el rotor según están soportados por la torre son los parámetros principales y dominantes en la determinación de las formas de modo y, mediante el uso de estos parámetros, pueden determinarse estimaciones eficaces y bastante exactas para las formas de modo. Cuanta más información y detalles hay sobre la estructura y el diseño de la turbina eólica, más exactas son las formas de modo que pueden obtenerse.

El método de control determina una posición absoluta de al menos uno de los acelerómetros durante el funcionamiento de la turbina eólica. El funcionamiento puede incluir cualquier tipo de funcionamiento de la turbina eólica tal como funcionamiento de producción de energía normal, rotación al ralentí del rotor, funcionamiento durante arranque y paradas, funcionamiento en estado inmóvil y/o de frenado. La posición absoluta del al menos un acelerómetro expresa la posición con respecto a algún sistema de coordenadas fijo y por tanto, a lo largo del tiempo, expresa el movimiento del acelerómetro y por tanto el movimiento y la oscilación de la turbina eólica.

El método de control puede implementarse en turbinas eólicas nuevas o existentes como implementación de software pura sin necesidad de ningún hardware adicional en la turbina excepto por la pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes, o puede implementarse como una combinación de software y hardware.

En una realización de la invención, el método de control comprende además determinar una velocidad de al menos uno de los acelerómetros durante el funcionamiento de la turbina eólica basándose en las aceleraciones medidas, la posición y orientación de cada acelerómetro según está montado, y las formas de modo. De este modo, se obtiene una estimación más precisa y exacta para la oscilación de la torre mediante lo cual los parámetros de control pueden determinarse de manera más precisa para amortiguar las oscilaciones de la torre y por tanto las cargas de la torre. Además, la velocidad puede usarse junto con las posiciones determinadas y las aceleraciones medidas para determinar el empuje que actúa sobre el rotor de turbina eólica durante el funcionamiento.

En una realización, el número de formas de modo predeterminadas de la turbina eólica se determina a partir de las formas de modo naturales de un larguero fijado en un extremo y con una masa puntual en un extremo libre opuesto. De este modo, se obtiene un conjunto de formas de modo que caracterizan, hasta un alto grado, las formas de modo de una turbina eólica con base en tierra física. Además, de este modo las formas de modo pueden determinarse de manera eficaz y mediante medios relativamente sencillos. La longitud del larguero debe corresponder preferiblemente a la longitud o altura de la torre y la masa puntual corresponder al peso de la góndola y el rotor según están soportados por la torre. Las formas de modo pueden refinarse incluyendo más detalles en el modelo de larguero tal como una distribución de masa y/o rigidez más específica a lo largo de la longitud del larguero (correspondiente a la torre de turbina eólica) y, por ejemplo, teniendo también en cuenta el rotor en rotación. De este modo, las formas de modo modelan el comportamiento dinámico de la turbina eólica. Para turbinas eólicas en alta mar o soportadas de manera diferente, las formas de modo predeterminadas de la turbina eólica pueden determinarse a partir de un modelo de larguero con condiciones de extremos que cambian de manera correspondiente.

Según la invención, el número de formas de modo predeterminadas comprende al menos las dos primeras formas de modo naturales en un plano correspondiente a movimientos longitudinales de la turbina eólica. Esto resulta ventajoso ya que estas formas de modo, y en particular la primera forma de modo, dominan los movimientos de la turbina eólica impulsados por las variaciones de la fuerza de empuje.

Según la invención, el número de formas de modo comprende al menos las dos primeras formas de modo naturales en un plano correspondiente a movimientos laterales de la turbina eólica. Esto resulta ventajoso ya que estas formas de modo, y en particular la segunda forma de modo lateral, dominan los movimientos de la turbina eólica impulsados por el par motor del generador.

La exactitud de la estimación de la posición mejora a medida que se incluyen más formas de modo en la estimación.

Preferiblemente, tanto las formas de modo para el movimiento longitudinal como para el movimiento lateral se incluyen en la estimación, mejorando de ese modo la estimación y la determinación de la posición absoluta.

Preferiblemente, las ecuaciones que rigen el movimiento de la turbina eólica se formulan teniendo en cuenta los movimientos longitudinales y laterales como movimientos acoplados.

En una realización adicional, el método de control comprende además estimar una fuerza de empuje que actúa sobre las palas de rotor por el viento basándose en la posición absoluta determinada del al menos uno de los acelerómetros durante el funcionamiento de la turbina eólica. De este modo, se obtiene una medida mejorada para la fuerza de empuje y por tanto de las cargas que actúan sobre el rotor y los diferentes componentes de turbina eólica de lo que se estimaría normalmente de otro modo. Tradicionalmente, las oscilaciones de la torre se obtienen basándose en estimaciones de la fuerza de empuje. Naturalmente, basar tales estimaciones en otra estimación (en

la fuerza de empuje) sólo aumenta la incertidumbre de método. Sin embargo, en este caso la fuerza de empuje puede determinarse de manera mucho más exacta dado que puede derivarse directamente a partir de las oscilaciones de la torre determinadas.

En otra realización, el método de control comprende además estimar la velocidad del viento basándose en el empuje estimado y parámetros que incluyen una velocidad de rotación de las palas de rotor, un ángulo de paso de cada una de las palas de rotor y una densidad del aire. De este modo, mediante medios sencillos y pocas etapas adicionales se obtiene una estimación de la velocidad del viento que, al menos en algunas situaciones, puede demostrar ser más exacta que las velocidades del viento medidas (en las que, por ejemplo, se ha observado que el funcionamiento del rotor afecta en algunos casos a las mediciones mediante los sensores de velocidad del viento) o velocidades del viento estimadas mediante otros métodos (tal como a partir de la potencia). De este modo, la velocidad del viento actual puede determinarse con mayor certeza o bien directamente a partir de la velocidad del viento estimada mediante este método según la invención por sí solo o bien mediante comparaciones de la velocidad del viento estimada y medida mediante diferentes métodos y/o sensores.

En una realización de la invención, la posición absoluta del/de los acelerómetro(s) se determina por medio de un filtro de Kalman. El filtrado de Kalman, también conocido como estimación cuadrática lineal (LQE), es un algoritmo que usa una serie de medidas observadas a lo largo del tiempo, que contiene ruido estático y otras imprecisiones, y produce estimaciones de variables desconocida (en este caso, la posición absoluta) que tienden a ser más precisas que las basadas en tan sólo una única medida. El filtrado de Kalman puede comprender un filtro de Kalman ponderado en frecuencia y/o un filtro no lineal tal como un filtro de Kalman extendido o un filtro de Kalman inodoro y/u otros tipos de técnicas de filtrado de Kalman. De este modo, puede determinarse la posición tanto longitudinal como lateral del al menos un acelerómetro así como sus velocidades produciendo en primer lugar, en una etapa de predicción, estimaciones de las variables de estado actuales (posición y velocidad del acelerómetro), junto con sus incertidumbres, y después, a partir del resultado de la siguiente medición (de aceleraciones), actualizando estas estimaciones usando un promedio ponderado.

Según aún otra realización de la invención, los acelerómetros de múltiples ejes están montados cada uno con dos ejes de medición dispuestos en un plano esencialmente horizontal. De este modo, se obtiene que las aceleraciones se miden al menos en dos direcciones horizontales cuando están montados aunque los acelerómetros sólo sean acelerómetros biaxiales. De este modo, puede obtenerse información sobre las aceleraciones en las direcciones tanto longitudinal como lateral en todo momento para todas las deformaciones y movimientos de la parte superior de la torre.

En una realización, al menos dos de la pluralidad de los acelerómetros de múltiples ejes están montados de tal manera que los ejes de medición de los acelerómetros de múltiples ejes están orientados en las mismas direcciones. De este modo, las aceleraciones en estas direcciones comunes pueden obtenerse fácilmente sin necesidad de convertir en primer lugar las aceleraciones medidas de un sistema de referencia en otro. Además, las aceleraciones medidas a partir de estas direcciones comunes pueden convertirse entonces fácilmente en algún otro sistema de referencia por medio de las mismas operaciones.

En una realización de la invención, al menos dos de la pluralidad de los acelerómetros de múltiples ejes están montados de tal manera que los ejes de medición de los acelerómetros de múltiples ejes están orientados de manera diferente. De este modo, los acelerómetros pueden montarse de manera más rápida y fácil dado que no se necesita orientarlos de la misma manera. Las aceleraciones medidas pueden convertirse entonces en un sistema de referencia común mediante el uso de la información de cómo está montado cada acelerómetro.

En una realización, un primer acelerómetro está montado en una primera posición en un primer plano vertical paralelo a un eje de rotación de las palas de rotor de la turbina eólica, y un segundo acelerómetro está montado en una segunda posición en un segundo plano vertical paralelo al eje de rotación, siendo el primer plano diferente del segundo plano. De este modo, se garantiza que al menos dos de la pluralidad de acelerómetros están montados con alguna distancia horizontal cuando se observa desde un extremo de la góndola. De este modo, los acelerómetros capturan y muestran mejor la inclinación lateral de la góndola y/o la porción superior de la torre. Esto puede observarse más claramente a partir de la ilustración de la figura 2, descrita con más detalle a continuación.

En una realización adicional, un primer acelerómetro está montado en una primera posición en un primer plano perpendicular a un eje de rotación de las palas de rotor de la turbina eólica, y un segundo acelerómetro está montado en una segunda posición en un segundo plano perpendicular al eje de rotación, siendo el primer plano diferente del segundo plano. De este modo, se garantiza que al menos dos de la pluralidad de acelerómetros preferiblemente no están colocados uno directamente encima del otro. De este modo, los acelerómetros capturan y muestran mejor cualquier inclinación lateral y/o cualquier inclinación o movimiento longitudinal de la góndola y/o la porción superior de la torre. Esto puede observarse más claramente a partir de la ilustración de las figuras 1 y 2, ambas descritas con más detalle a continuación.

El parámetro de control puede comprender preferiblemente un parámetro de paso de una o más de las palas de rotor y el control de la turbina eólica comprende entonces ajustar el paso de una o más de las palas según el parámetro de paso. De este modo, el/los parámetro(s) de paso de la turbina se basa(n) en datos más exactos

incluyendo información sobre el movimiento y la oscilación de la parte superior de la torre mejorando el control de la turbina eólica.

El parámetro de control puede comprender alternativa o adicionalmente otros parámetros de control, tales como un parámetro de par motor, posiblemente en forma de un punto de referencia de potencia, y el control de la turbina eólica comprende ajustar el par motor de un generador de turbina eólica según el parámetro de par motor/punto de referencia de potencia. Las ventajas del mismo son las mismas que para el parámetro de control que comprende un parámetro de paso tal como se describió anteriormente.

En un aspecto adicional la presente invención se refiere a un sistema de control para una turbina eólica según la reivindicación 14.

En un aspecto adicional la presente invención se refiere a una turbina eólica que comprende una torre que soporta una góndola y un rotor con varias palas de rotor de paso ajustable, comprendiendo la turbina eólica además una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes montados en diferentes posiciones en la góndola y/o en una porción superior de la torre, estando cada acelerómetro montado en una orientación definida, y un sistema de control según lo anterior.

Las ventajas del sistema de control y la turbina eólica que comprende un sistema de control de este tipo son tal como se describió con respecto al método de control anteriormente.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirán diferentes realizaciones de la invención con referencia a los dibujos, en los que:

la figura 1 muestra una turbina eólica equipada con una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes y durante un movimiento longitudinal,

la figura 2 muestra una turbina eólica equipada con una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes y durante un movimiento lateral,

la figura 3 es un esquema de una turbina eólica modelada como un larguero con una masa puntual en su extremo libre,

las figuras 4 y 5 ilustran las primeras formas de modo en la dirección longitudinal y lateral, respectivamente,

la figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra una realización de la invención,

la figura 7 ilustra un diagrama de flujo que muestra la relación de parámetros con respecto a la(s) velocidad(es) y posición/posiciones de la parte superior de la torre, y

la figura 8 muestra un filtro de Kalman extendido para estados estimados.

Descripción de realizaciones

Las figuras 1 y 2 ilustran una turbina eólica 100 equipada con una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes 101. En este caso, dos acelerómetros de tres ejes 101 están montados en diferentes posiciones en la góndola 102. Los acelerómetros de múltiples ejes están indicados mediante sus ejes de medición y cómo están estos orientados cuando la turbina eólica 100 está en su posición erguida y no deformada 104 y a medida que oscila 105 (los movimientos y la deformación de la turbina eólica se exageran por motivos de claridad). Los acelerómetros 101 miden componentes tanto de las aceleraciones reales a partir de los movimientos de la parte superior de la torre así como a partir de la gravedad (ilustrada con la flecha 106), descompuestos en los tres ejes dependiendo de la pose del acelerómetro. La pose de cada acelerómetro es una combinación de la geometría en principio conocida de la instalación en la góndola/buje (es decir, la posición y orientación del acelerómetro según está montado) y cómo se mueve el acelerómetro (traslación, rotación, guiñada) debido al movimiento de la parte superior de la torre. Esto se ilustra para movimientos y oscilaciones en la dirección longitudinal, con dos acelerómetros representados como sistemas de coordenadas de tres ejes, en la figura 1, y para movimientos y oscilaciones en la dirección lateral (observada desde detrás de la góndola) en la figura 2. En la figura 2, la góndola 102 se indica simplemente mediante un recuadro. Para capturar mejor el movimiento de la turbina eólica, los acelerómetros están montados en diferentes posiciones y preferiblemente no directamente uno encima de otro, preferiblemente uno detrás de otro, y preferiblemente en diferentes posiciones laterales (cuando se observa como en la figura 2 desde detrás de la góndola). De este modo, las componentes a partir de la gravedad en las señales de aceleración medidas son diferentes en cada acelerómetro.

La figura 3 ilustra un esquema de una turbina eólica. La torre 301 de la turbina eólica 100 puede modelarse como un larguero que está fijado 302 en un extremo mientras que se aplica una fuerza o un par motor en el extremo libre. Encima del larguero (el extremo libre) pueden modelarse la góndola 102 y el rotor como una masa puntual. El movimiento de las secciones de torre puede describirse usando las formas de modo naturales de un larguero de este tipo, por ejemplo, establecidas por medio de modelado de elementos finitos y análisis dinámicos.

La figura 4 ilustra las tres primeras formas de modo 400 en la dirección longitudinal en las que, en particular, el primer modo 401 es dominante, impulsado por variaciones en la fuerza de empuje. En la figura se muestra el desplazamiento modal 410 a lo largo de la altura de la torre (normalizada) 420. El segundo modo, 402, refleja el modo con desplazamiento máximo aproximadamente a media altura de la torre.

La figura 5 ilustra los movimientos de la torre en la dirección lateral, mediante las tres primeras formas de modo 500 para movimientos laterales, junto con los acoplamientos a la torsión de la torre. Las variaciones en par motor del generador de la turbina eólica impulsan principalmente el 2º modo lateral 502.

Suponiendo que la torre sólo vibra según un número finito de formas de modo (tal como se describió anteriormente y se muestra en las figuras 4 y 5), se establecen ecuaciones que relacionan la(s) velocidad(es) y posición/posiciones de la parte superior de la torre con la pose de cada uno de los acelerómetros y de nuevo que relacionan esto con las componentes de aceleración según se mide. Tales ecuaciones pueden describirse de la siguiente forma:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k, k) + w_{k-1}$$
$$y_k = h(x_k, u_k, k)$$
$$\tilde{y}_k = y_k + v_k$$

Que se ilustra adicionalmente en la figura 7, donde:

• *k* designa un punto diferenciado en el tiempo (siendo *k-1* el punto de tiempo inmediatamente anterior).

• u_k es un vector de entradas (en este caso, puede ser la fuerza de empuje y el par motor del generador).

• x_k es un vector de los estados reales (por ejemplo, la pose de un nodo en el modelo de torre).

• y_k es un vector de las salidas de procedimiento reales (por ejemplo, las componentes de aceleración reales).

• $\tilde{y}_k$ es un vector de las salidas de procedimiento medidas (por ejemplo, las componentes de aceleración medidas).

• w_k y v_k son ruido de procedimiento y de salida respectivamente. Se supone que son valores gaussianos de media nula.

• *f(.)* y *h(.)* son funciones no lineales genéricas que relacionan el estado anterior, la entrada actual y el tiempo actual con el estado siguiente y la salida actual, respectivamente.

En una realización, la torre se describe mediante su primer modo longitudinal, q_1, y su primer modo lateral, q_2. Cada uno de los modos vibra según la ecuación de movimiento, es decir,

$$\ddot{q_1} m_1 + \dot{q_1} c_1 + q_1 k_1 = F_1$$

$$\ddot{q_2} m_2 + \dot{q_2} c_2 + q_2 k_2 = F_2$$

donde m, k, c y F son la masa modal, rigidez modal, amortiguación modal y fuerza modal, respectivamente. En este caso,

$$x = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$$

f(.)viene dado por las dos ecuaciones de movimiento anteriores. En el caso de un único acelerómetro de 3 ejes que mide Acc_1, Acc_2 y Acc_3,

$$y = \begin{bmatrix} Acc_1 \\ Acc_2 \\ Acc_3 \end{bmatrix}$$

y h(.) es la función que traduce las dos coordenadas modales, q_1 y q_2, a las tres componentes medidas de la aceleración. h(.) viene dado por la geometría, es decir, cómo está ubicado el acelerómetro con respecto al nodo para el que se derivan las ecuaciones de movimiento.

Dadas las entradas, salidas medidas y suposiciones sobre el modelo y sobre el ruido de procedimiento y de salida, el propósito de un filtro de Kalman extendido (EKF) es estimar estados no medidos y las salidas de procedimiento reales. Esto se muestra a continuación donde los estados estimados son $\hat{x}_k$ e $\hat{y}_k$ son las salidas medidas estimadas, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 8.

La figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra una realización del método de control tal como se describió anteriormente y según la invención. En una primera etapa 601, se miden las aceleraciones Acc_1, Acc_2, ..., Acc_n mediante los acelerómetros de múltiples ejes. Por medio de filtrado de Kalman, 602, se estiman los estados no medidos $\hat{x}_k$ y las salidas de procedimiento medidas reales $\hat{y}_k$. De este modo, se determina la posición y velocidad absoluta de al menos uno de los acelerómetros, 603, y pueden determinarse parámetros tales como el desplazamiento de la parte superior de la torre, velocidad de la parte superior de la torre, fuerza de empuje que actúa sobre el rotor.

Después puede estimarse la velocidad del viento basándose en el empuje determinado mediante:

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot C_T$$

$$C_T = f(V, \theta, \omega)$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot F_T}{\rho \cdot A \cdot f(V, \theta, \omega)}}$$

donde:

F_T = empuje estimado o medido

C_T = coeficiente de empuje

P = densidad del aire

A = área de rotor

V = velocidad del viento estimada

θ = ángulo de paso

ω = velocidad de rotación del rotor

Aunque se han descrito realizaciones preferidas de la invención, debe entenderse que la invención no se limita a las mismas y pueden realizarse modificaciones sin alejarse de la invención. El alcance de la invención está definido por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método de control de una turbina eólica (100), comprendiendo la turbina eólica una torre (301) que soporta una góndola (102) y un rotor con varias palas de rotor de paso ajustable, comprendiendo la turbina eólica además un sistema de control para cambiar el paso de las palas de rotor y/o el par motor del generador, y una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes (101) montados en diferentes posiciones en la góndola y/o en una porción superior de la torre, estando cada acelerómetro montado en una orientación definida, comprendiendo el método:

- obtener la posición y orientación de cada acelerómetro según está montado;

- medir aceleraciones en al menos dos direcciones diferentes mediante cada acelerómetro durante el funcionamiento de la turbina eólica;

- obtener un número de formas de modo predeterminadas para el movimiento de la turbina eólica basándose al menos en dimensiones de la torre y un peso de la góndola y el rotor según están soportados por la torre;

- determinar una posición absoluta de al menos uno de los acelerómetros durante el funcionamiento de la turbina eólica basándose en las aceleraciones medidas, la posición y orientación de montaje de cada acelerómetro y las formas de modo predeterminadas, determinándose la posición absoluta con respecto a un sistema de coordenadas fijo;

- determinar un parámetro de control de la turbina eólica en función de la posición absoluta determinada; y

- controlar la turbina eólica según el parámetro de control;

caracterizado porque el número de formas de modo predeterminadas comprende al menos las dos primeras formas de modo naturales en un plano correspondiente a movimientos longitudinales (401, 402) de la turbina eólica o en un plano correspondiente a movimientos laterales (500, 502) de la turbina eólica.

2. Método de control según la reivindicación 1, que comprende además determinar una velocidad de al menos uno de los acelerómetros durante el funcionamiento de la turbina eólica basándose en las aceleraciones medidas, la posición y orientación de cada acelerómetro según está montado y las formas de modo.

3. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el número de formas de modo predeterminadas de la turbina eólica se determina a partir de las formas de modo naturales de un larguero fijado en un extremo (302) y con una masa puntual en un extremo libre opuesto.

4. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además estimar una fuerza de empuje que actúa sobre las palas de rotor por el viento basándose en la posición absoluta determinada del al menos uno de los acelerómetros durante el funcionamiento de la turbina eólica.

5. Método de control según la reivindicación 3, que comprende además estimar la velocidad del viento basándose en el empuje estimado y parámetros incluyendo una velocidad de rotación de las palas de rotor, un ángulo de paso de cada una de las palas de rotor y una densidad del aire.

6. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la posición absoluta del/de los acelerómetro(s) se determina por medio de un filtrado de Kalman (602).

7. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los acelerómetros de múltiples ejes están montados cada uno con dos ejes de medición dispuestos en un plano esencialmente horizontal.

8. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que al menos dos de la pluralidad de los acelerómetros de múltiples ejes están montados de tal manera que los ejes de medición de los acelerómetros de múltiples ejes están orientados en las mismas direcciones.

9. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que al menos dos de la pluralidad de los acelerómetros de múltiples ejes están montados de tal manera que los ejes de medición de los acelerómetros de múltiples ejes están orientados de manera diferente.

10. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que un primer acelerómetro está montado en una primera posición en un primer plano vertical paralelo a un eje de rotación de las palas de rotor de la turbina eólica, y un segundo acelerómetro está montado en una segunda posición en un segundo plano vertical paralelo al eje de rotación, siendo el primer plano diferente del segundo plano.

11. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que un primer acelerómetro está montado en una primera posición en un primer plano perpendicular a un eje de rotación de las palas

de rotor de la turbina eólica, y un segundo acelerómetro está montado en una segunda posición en un segundo plano perpendicular al eje de rotación, siendo el primer plano diferente del segundo plano.

12. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el parámetro de control comprende un parámetro de paso de una o más de las palas de rotor y el control de la turbina eólica comprende ajustar el paso de una o más de las palas según el parámetro de paso.

13. Método de control según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el parámetro de control comprende un parámetro de par motor y el control de la turbina eólica comprende ajustar el par motor de un generador de turbina eólica según el parámetro de par motor.

14. Sistema de control para una turbina eólica (100) que comprende una torre (301) que soporta una góndola (102) y un rotor con varias palas de rotor de paso ajustable, comprendiendo la turbina eólica además una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes (101) montados en diferentes posiciones en la góndola y/o en una porción superior de la torre, estando cada acelerómetro montado en una orientación definida, estando el sistema de control configurado para realizar las etapas de:

- obtener la posición y orientación de cada uno de una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes según están montados;

- recibir datos de la aceleración en al menos dos direcciones diferentes según se miden mediante cada uno de los acelerómetros durante el funcionamiento de la turbina eólica;

- obtener un número de formas de modo predeterminadas para el movimiento de la turbina eólica basándose al menos en dimensiones de la torre y un peso de la góndola y rotor según están soportados por la torre;

- determinar una posición absoluta de al menos uno de los acelerómetros durante el funcionamiento de la turbina eólica basándose en las aceleraciones medidas, la posición y orientación de montaje de cada acelerómetro y las formas de modo predeterminadas, determinándose la posición absoluta con respecto a un sistema de coordenadas fijo;

- determinar un parámetro de control de la turbina eólica en función de la posición absoluta determinada; y

- controlar la turbina eólica según el parámetro de control

caracterizado porque el número de formas de modo predeterminadas comprende al menos las dos primeras formas de modo naturales en un plano correspondiente a movimientos longitudinales (401, 402) de la turbina eólica o en un plano correspondiente a movimientos laterales (500, 502) de la turbina eólica.

15. Turbina eólica que comprende una torre que soporta una góndola y un rotor con varias palas de rotor de paso ajustable, comprendiendo la turbina eólica además una pluralidad de acelerómetros de múltiples ejes montados en diferentes posiciones en la góndola y/o en una porción superior de la torre, estando cada acelerómetro montado en una orientación definida, y un sistema de control según la reivindicación 14.

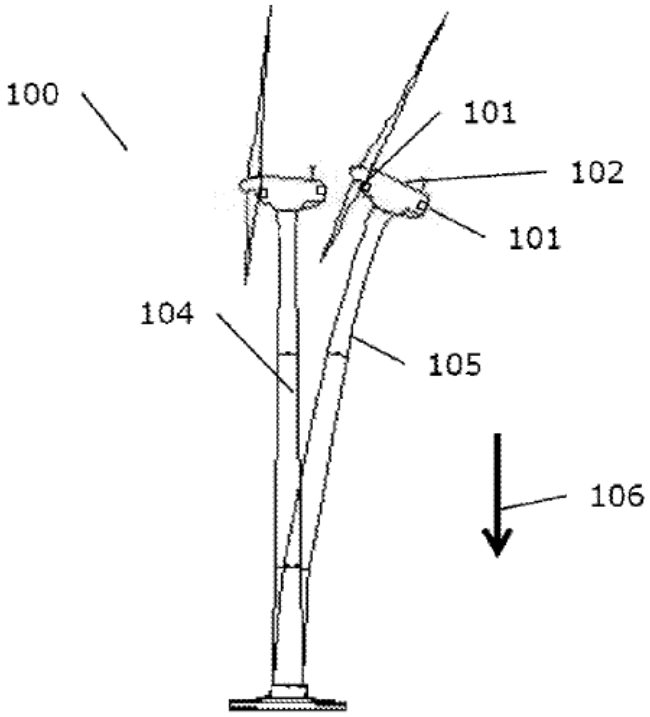


Fig. 1

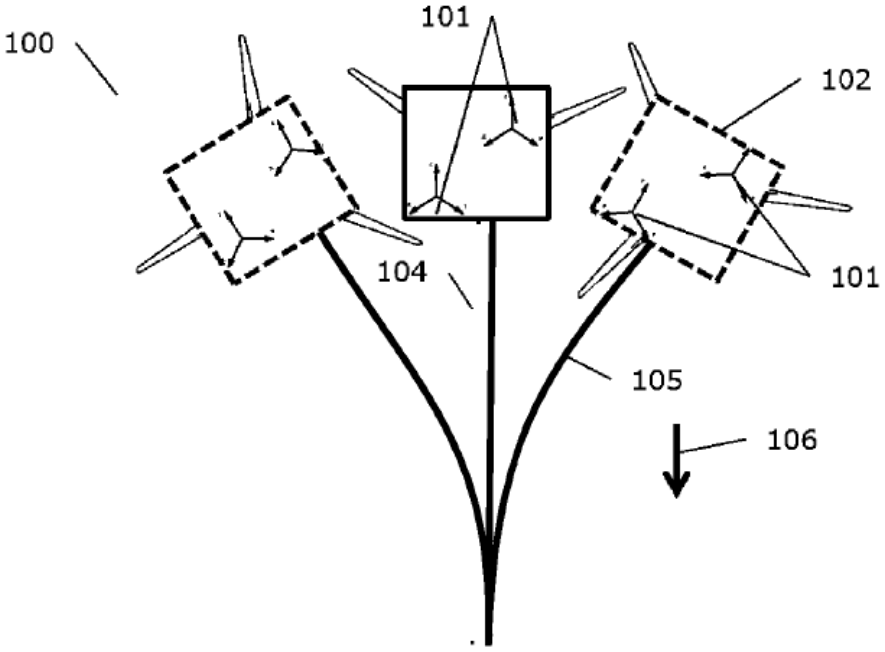


Fig. 2

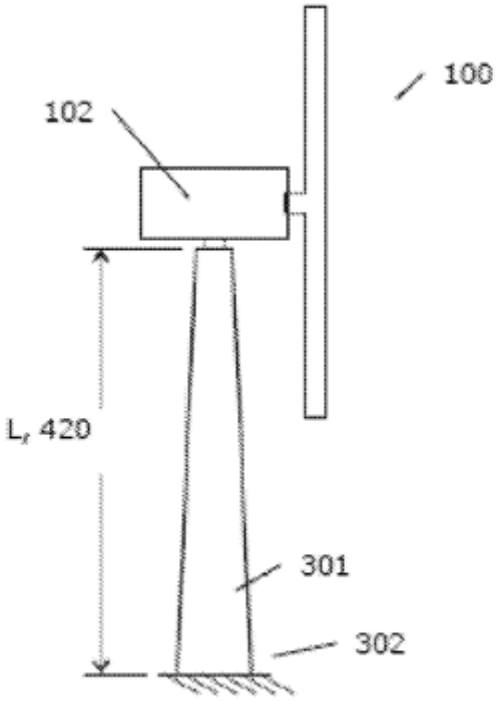

100
102
L, 420
301
302

Fig. 3

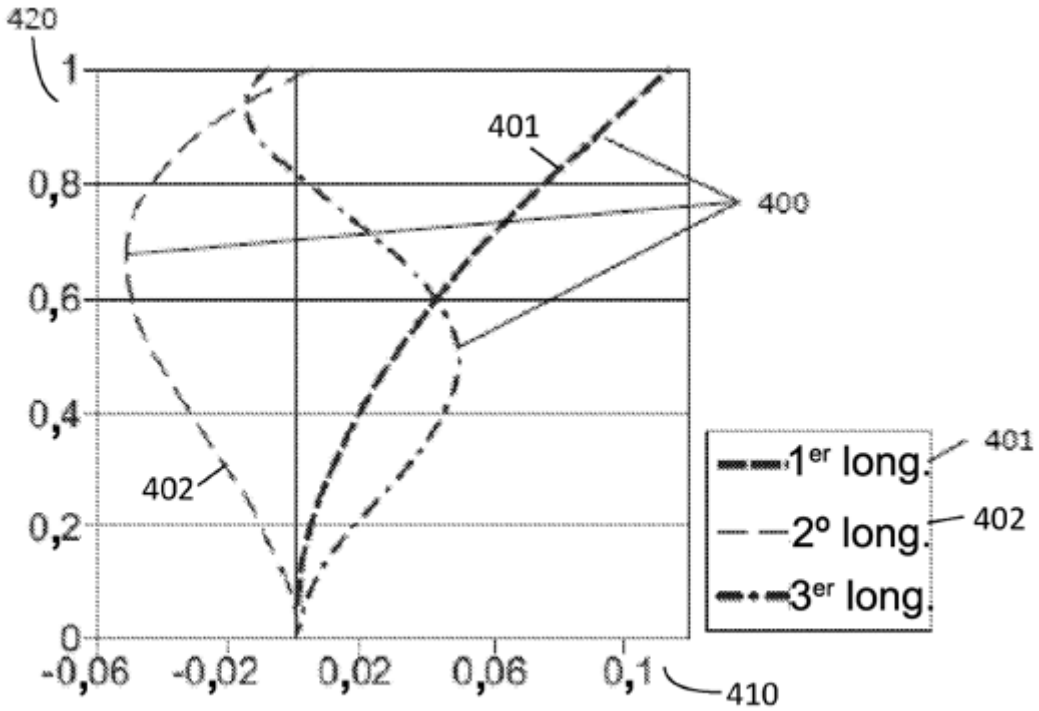

420
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
401
400
402
-0,06
-0,02
0,02
0,06
0,1
410
1er long.
2º long.
3er long.
401
402

Fig. 4

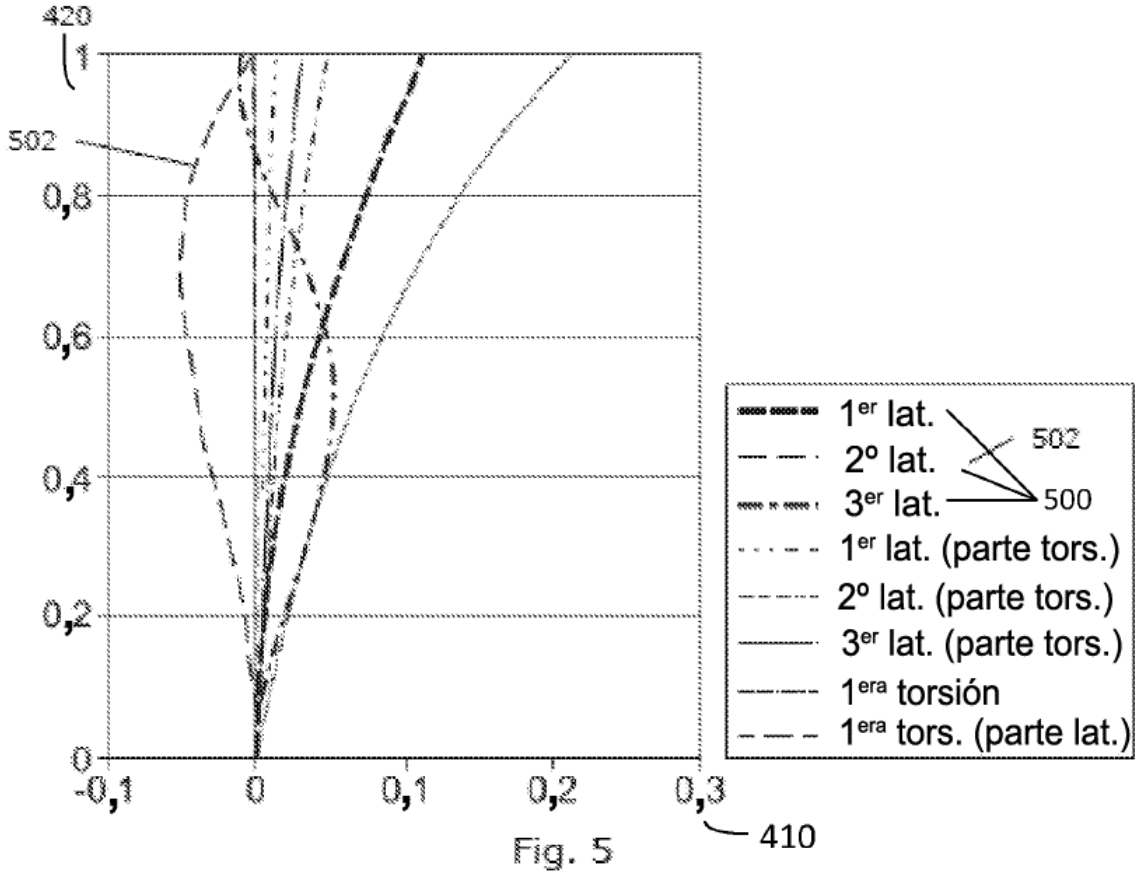

420
1
502
0,8
0,6
0,4
0,2
0
-0,1
0
0,1
0,2
0,3
410
1er lat.
2º lat.
3er lat.
1er lat. (parte tors.)
2º lat. (parte tors.)
3er lat. (parte tors.)
1era torsión
1era tors. (parte lat.)
502
500

Fig. 5

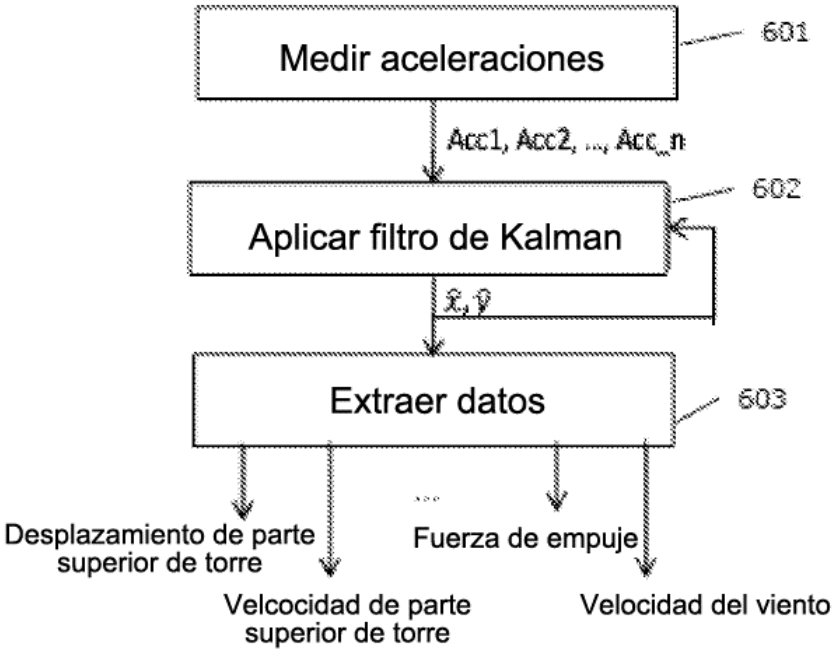

Medir aceleraciones
601
Acc1, Acc2, ..., Acc_n
Aplicar filtro de Kalman
602
x̂, ŷ
Extraer datos
603
Desplazamiento de parte superior de torre
Velcocidad de parte superior de torre
Fuerza de empuje
Velocidad del viento

Fig. 6

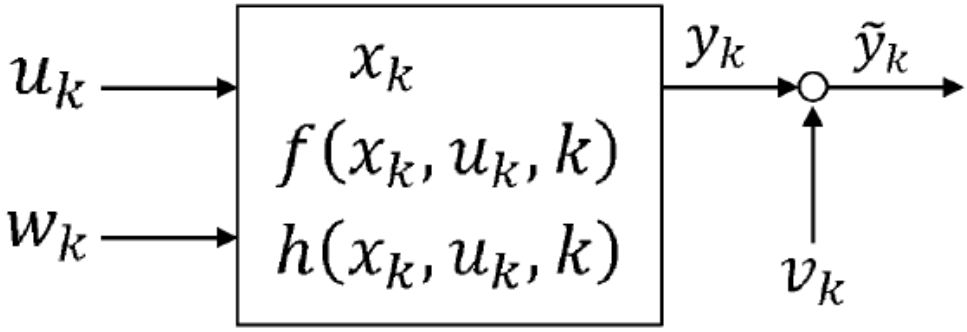

u_k
w_k
x_k
$f(x_k, u_k, k)$
$h(x_k, u_k, k)$
y_k
$\tilde{y}_k$
v_k

Fig. 7


u_k
$\tilde{y}_k$
Filtro de Kalman extendido
$\hat{x}_k$
$\hat{y}_k$

Fig. 8