

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 552 162**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.11.2007** **E 07022879 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.08.2015** **EP 2063110**

54 Título: **Método de amortiguación de vibraciones de torre de una turbina eólica y sistema de control de inclinación**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
26.11.2015

73 Titular/es:

**SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
WITTELSBACHERPLATZ 2
80333 MÜNCHEN, DE**

72 Inventor/es:

EGEDAL, PER

74 Agente/Representante:

LOZANO GANDIA, José

ES 2 552 162 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).

MÉTODO DE AMORTIGUACIÓN DE VIBRACIONES DE TORRE DE UNA TURBINA EÓLICA Y SISTEMA DE CONTROL DE INCLINACIÓN

DESCRIPCIÓN

5 La presente invención se refiere a un método de amortiguación de vibraciones de torre de una turbina eólica que está equipada con palas de rotor, un controlador de paso y un sistema actuador de paso, en el que las vibraciones de torre se amortiguan fijando el paso de las palas de rotor. Además, la presente invención se refiere a un sistema de control de inclinación para su uso en una turbina eólica que está equipada con palas de rotor y un sistema actuador de paso.

10 En las turbinas eólicas, se activarán vibraciones de torre por las condiciones del viento en el campo de viento que actúa sobre la turbina eólica. En las turbinas eólicas con base en tierra, estas vibraciones de torre son de alta frecuencia y sólo producen pequeñas inclinaciones de torre. Sin embargo, por ejemplo las turbinas eólicas montadas en bases flotantes del tipo denominado boya de espeque pueden tener, debido a las condiciones del viento, bajas frecuencias de vibración de la torre y grandes inclinaciones de la torre y por tanto grandes movimientos de la góndola.

15 Una combinación de baja frecuencia de torre y curva de empuje negativa a altas velocidades del viento puede conducir a altas cargas de torre y grandes variaciones de inclinación de la góndola si la turbina está controlada a potencia constante. En el control de potencia constante, la turbina eólica habitualmente se controla para mantener aproximadamente una velocidad de rotor constante y el par de torsión del rotor se regula fijando un ángulo de paso apropiado de las palas de turbina para mantener una potencia aproximadamente constante. Altas cargas de torre y grandes variaciones de inclinación en este modo de control de potencia pueden conducir a inestabilidades y a un fallo estructural de la turbina eólica. Hasta ahora, por tanto, no se han instalado turbinas eólicas en torres con frecuencia de torre muy baja (por debajo de 0,05 Hz).

20 En el documento US 6.891.280 B2 se da a conocer un método para hacer funcionar plantas de turbinas eólicas en alta mar basándose en la frecuencia de sus torres. En este método, se evita hacer funcionar la planta en un intervalo de frecuencia en el que se encuentra la frecuencia de torre resonante. Para lograr esto, se determinan la frecuencia natural crítica de la planta y la velocidad del rotor a la que se activa la planta en su intervalo de frecuencia natural crítica. Entonces, se evita este intervalo de velocidad durante el funcionamiento de la planta de torres eólicas haciéndola funcionar por encima o por debajo de dicho intervalo de velocidad crítica y, si es necesario, pasando rápidamente a través del intervalo de velocidad crítica.

25 En el documento WO 2007/053031 A1 se da a conocer un método de amortiguación de vibraciones de torre de una turbina eólica. En este método, las vibraciones propias de torre se amortiguan mediante un incremento angular $\Delta\beta$ que se suma al ángulo de paso de la pala. Este incremento se calcula basándose en las velocidades de torre, con el fin de contrarrestar las vibraciones propias.

30 En el documento US 2006/0066111 A1 se da a conocer un método para amortiguar vibraciones de una torre de turbina eólica. En este método, se modula el par de torsión de demanda del generador proporcionando una señal basándose en cambios en la velocidad de rotor del generador.

35 El documento EP 1 719 910 A1 describe un generador de turbina eólica y un método de amortiguación de vibración activo para el mismo. Para lograr la amortiguación activa se suma un valor de modificación $\delta\Theta^*$ a un comando de ángulo de paso de pala para llegar a un comando resultante para fijar un ángulo de paso de las palas de molino de viento para generar un empuje en las palas de molino de viento que contrarresta las vibraciones de la góndola.

40 El documento GB 2 117 934 A describe la amortiguación de las vibraciones de potencia mediante el uso del control del ángulo de paso. En el método de control, se usa un comando de referencia de ángulo de pala adicional que produce variaciones de empuje incrementales que se prevé que están en fase con la velocidad de la parte superior de la torre para proporcionar una amortiguación aerodinámica positiva adicional de la torre

45 El documento US 2006/0033338 A1 describe un sistema de control de turbina eólica que comprende un estimador de flujo de viento para predecir un flujo de viento, una posición de torre y una velocidad de torre que entonces se usan para calcular un ángulo de paso de pala deseado.

50 El documento WO 02/075153 A1 describe un método y un dispositivo para monitorizar oscilaciones de torre. Se menciona que puede cambiarse el ángulo de paso de la pala de rotor si la oscilación de torre supera un límite dado.

55 El documento WO 2007/089136 A2 describe un método para amortiguar las vibraciones de una torre de turbina eólica en el que se cambia el paso de la pala de rotor. Cuando la torre se ladea hacia delante, el paso de pala se cambia hacia pérdida aerodinámica, y cuando la torre se mueve hacia atrás el paso de pala se cambia alejándose de la pérdida aerodinámica. En caso de que una aceleración máxima en el ladeo de torre hacia atrás máximo supere un nivel predeterminado, se desencadena un control de paso de amortiguación y se deshabilita o invalida el control

de paso para regular la producción de potencia máxima.

Con respecto al estado mencionado de la técnica, un primer objetivo de la presente invención es proporcionar un método mejorado de amortiguación de vibraciones de torre de una turbina eólica. Un segundo objetivo de la presente invención es proporcionar un sistema de control de inclinación mejorado para su uso en una turbina eólica.

El primer objetivo se resuelve mediante un método de amortiguación de vibraciones de torre de una turbina eólica según la reivindicación 1, y el segundo objetivo se resuelve mediante un sistema de control de inclinación para su uso en una turbina eólica según la reivindicación 14. Las reivindicaciones dependientes contienen desarrollos adicionales de la invención.

En el método inventivo de amortiguación de vibraciones de torre de una turbina eólica que está equipada con palas de rotor, un controlador de paso y un sistema actuador de paso, la amortiguación se realiza fijando el paso de las palas de rotor. El ángulo de paso de las palas de rotor se controla según un valor de referencia de paso que representa un paso que ha de fijar el sistema de activación de paso. La determinación del valor de referencia de paso se realiza de la siguiente forma: se proporcionan un valor de referencia de velocidad para la velocidad de rotor y un valor de velocidad de rotor que representa la velocidad real del rotor. Se proporciona un valor de modificación que representa una modificación que ha de realizarse para tener en cuenta las vibraciones de torre, en particular las vibraciones de torre en la parte superior de la torre, por ejemplo, en la ubicación de la góndola. Entonces se usa el valor de modificación para modificar el valor de referencia de velocidad para establecer un valor de referencia de velocidad modificado. Entonces se determina el valor de referencia de paso basándose en al menos la diferencia entre el valor de referencia de velocidad modificado y el valor de velocidad de rotor real.

Mientras que en el estado de la técnica el ángulo de paso se calcula basándose en la diferencia entre un valor de referencia de velocidad modificado y el valor de velocidad de rotor real, y se realiza una modificación en el ángulo de paso para amortiguar las vibraciones de torre, en la presente invención se modifica el valor de referencia de velocidad en lugar del ángulo de paso. Esto permite amortiguar frecuencias de torre muy lentas, lo que no es posible fácilmente con el estado de la técnica.

El valor de modificación en que se modifica el valor de referencia de velocidad puede representar, en particular, la velocidad de torre producida por las vibraciones de torre, en particular por las vibraciones de torre en la parte superior de la torre, por ejemplo en la ubicación de la góndola. Entonces se suma el valor de velocidad de torre al valor de referencia de velocidad para establecer el valor de referencia de velocidad modificado. Mientras que en el estado de la técnica, la velocidad de torre se incorpora en el ángulo de paso, se incorpora en el valor de referencia de velocidad en su lugar en la presente implementación de la invención.

El valor de velocidad de torre puede calcularse, por ejemplo, a partir de un valor de inclinación que representa la inclinación de la torre producida por las vibraciones de torre. La diferenciación del valor de inclinación conduce fácilmente al valor de velocidad de torre. Esta inclinación puede medirse por ejemplo en la góndola o en la góndola de la turbina eólica.

En un desarrollo adicional del método inventivo, se usa un valor de aceleración en sentido longitudinal, que representa la aceleración de torre en el sentido del eje de rotor y que se produce por las vibraciones de torre, para representar el valor de inclinación. El establecimiento del cambio de inclinación mediante el uso de este valor de aceleración en sentido longitudinal puede realizarse formando la derivada de la razón del valor de aceleración en sentido longitudinal con respecto a la aceleración de la gravedad que actúa sobre la parte superior de la torre. Incluso ángulos de inclinación grandes de la torre son relativamente pequeños en comparación con un ángulo de 90°. Por tanto, la razón del valor de aceleración en sentido longitudinal con respecto a la aceleración de la gravedad puede aproximarse por el ángulo de inclinación expresado en radianes, en lugar del seno del ángulo de inclinación. En otras palabras, la aceleración en sentido longitudinal es aproximadamente proporcional al ángulo de inclinación expresado en radianes para ángulos pequeños. Esto ofrece la posibilidad de medir la inclinación usando simplemente acelerómetros en la parte superior de la torre, por ejemplo en o dentro de la góndola.

Para descartar contribuciones al valor de inclinación que no están producidas por vibraciones de torre y que habitualmente son superiores en frecuencia a las contribuciones producidas por vibraciones de torre, puede filtrarse la derivada del valor de inclinación mediante un filtro paso bajo.

En un desarrollo adicional del método inventivo, el valor de referencia de paso se determina basándose en el valor de referencia de velocidad modificado estableciendo un valor de diferencia de velocidad que representa la diferencia entre el valor de velocidad de rotor y el valor de referencia de velocidad modificado, calculando un valor de referencia de inclinación para la torre, en particular para la parte superior de la torre, por ejemplo para la góndola, a partir del valor de diferencia de velocidad, estableciendo un valor de diferencia de inclinación que representa la diferencia entre el valor de inclinación y el valor de referencia de inclinación, y determinando el valor de referencia de paso basándose en el valor de diferencia de inclinación. Mediante la determinación del valor de referencia de paso basándose en el valor de diferencia de inclinación, puede contrarrestarse la inclinación de la parte superior de la torre fijando el ángulo de paso para reducir esta diferencia. Además, como el valor de referencia de velocidad ya se

ha modificado para tener en cuenta las vibraciones de torre, no sólo se reduce la inclinación sino que también se amortiguan las vibraciones, lo que conduce a la amortiguación de las fluctuaciones en el valor de inclinación a lo largo del tiempo, lo que a su vez conduce a la amortiguación de las fluctuaciones en el valor de diferencia de inclinación. Por tanto, puede lograrse una rápida amortiguación de la inclinación de torre, lo que da lugar a un control más directo de los movimientos de torre y por tanto posibilita obtener un bucle de control estable mientras que se tienen frecuencias de torre muy bajas.

Para calcular el valor de referencia de inclinación a partir del valor de diferencia de velocidad, puede usarse un controlador PID (controlador proporcional, integral, diferencial). Un controlador de este tipo también puede usarse para calcular el valor de referencia de paso a partir del valor de diferencia de inclinación.

En una realización especial del método inventivo, el valor de referencia de inclinación puede restringirse a un valor dado. Mediante este método es posible evitar grandes movimientos de torre producidos por cargas de olas del mar. Un valor dado de este tipo puede depender, por ejemplo, de la velocidad del viento.

Además, el método inventivo puede desactivarse en caso de velocidades del viento muy altas. Esto ofrece la oportunidad de determinar el valor de referencia de paso según el valor de referencia de velocidad solamente con el fin de evitar una velocidad excesiva a altas velocidades del viento.

Además del método descrito, la velocidad de torre o la inclinación derivada también podría alimentarse a la referencia de velocidad para un controlador de potencia con el fin de amortiguar movimientos de torre si la turbina eólica funciona por debajo de la potencia nominal. Además podría alimentarse a la velocidad en una tabla de potencia/velocidad que se usa a una velocidad por debajo de la potencia nominal para consultar una velocidad para una potencia determinada.

Un sistema de control de inclinación inventivo para su uso en una turbina eólica que está equipada con palas de rotor y un sistema actuador de paso comprende una unidad de control de paso, una entrada de velocidad de rotor, una entrada de referencia de velocidad, una entrada de señal de inclinación, una salida de referencia de paso y una unidad de modificación. La unidad de control de paso está diseñada para establecer una señal de referencia de paso que representa un paso que ha de fijar el sistema actuador de paso. La entrada de velocidad de rotor y la entrada de referencia de velocidad están diseñadas para recibir una señal de velocidad de rotor que representa la velocidad de rotor real y una señal de referencia de velocidad para la velocidad de rotor, respectivamente. La entrada de señal de inclinación está diseñada para recibir una señal que representa una inclinación de la torre. La señal de inclinación puede representar, en particular, la inclinación en la parte superior de la torre y puede contener o bien un valor de inclinación directo o bien un valor del que puede derivarse la inclinación. La salida de referencia de paso está diseñada para emitir la señal de referencia de paso. La unidad de modificación está conectada a la entrada de referencia de velocidad para recibir la señal de referencia de velocidad y a la entrada de señal de inclinación para recibir la señal de inclinación. Está diseñada para establecer una señal de modificación basándose en la señal de inclinación, para modificar la señal de referencia de velocidad por medio de la señal de modificación, y para emitir una señal de referencia de velocidad modificada. La unidad de control de paso está conectada a la unidad de modificación para recibir la señal de referencia de velocidad modificada y está diseñada para establecer el valor de referencia de paso basándose en al menos la señal de referencia de velocidad modificada.

La modificación de la señal de referencia de velocidad permite reducir rápidamente las oscilaciones en la velocidad de rotor y, como consecuencia, los movimientos de torre. El sistema de control de inclinación inventivo permite realizar el método inventivo y logra las ventajas asociadas con el método inventivo.

En una realización particular del sistema de control de inclinación inventivo, la unidad de modificación está diseñada para establecer, como la señal de modificación, una señal de velocidad de torre basándose en una señal que representa una inclinación de la torre. Está diseñada además para modificar la señal de referencia de velocidad por medio de la señal de velocidad de torre y para emitir la señal de referencia de velocidad modificada.

En una implementación especial, la unidad de modificación comprende un diferenciador para diferenciar la señal que representa una inclinación de la torre. Además, la unidad de modificación está diseñada para establecer la señal de velocidad de torre basándose en la señal diferenciada. En esta implementación especial, la unidad de modificación puede comprender además un sumador que está conectado a la entrada de referencia de velocidad para recibir la señal de referencia de velocidad y está diseñado para sumar la señal de velocidad de torre a la entrada de referencia de velocidad para establecer la señal de referencia de velocidad modificada. Por tanto, la señal de referencia de velocidad modificada es la suma de la señal de referencia de velocidad y la señal de velocidad de torre. Puesto que la velocidad de torre oscila debido a las vibraciones, esta suma representa una referencia de velocidad oscilante para el controlador de paso. Mediante el uso de esta referencia de velocidad oscilante, puede reducirse la diferencia entre la velocidad de rotor real (oscilante) y la referencia de velocidad oscilante en un procedimiento de control. Mediante esta medición se hace posible amortiguar rápidamente oscilaciones en la velocidad de rotor.

Puede lograrse una amortiguación eficaz de la inclinación de torre mediante la implementación especial si

comprende además una primera unidad de sustracción que está conectada a la unidad de modificación para recibir la señal de referencia de velocidad modificada y a la entrada de velocidad de rotor para recibir la señal de velocidad de rotor, y que está diseñada para establecer una señal de diferencia de velocidad que representa la diferencia entre la señal de velocidad de rotor y la señal de referencia de velocidad modificada. Además, la unidad de control de paso comprende un controlador de velocidad, una segunda unidad de sustracción y un controlador de inclinación. El controlador de velocidad está conectado a la primera unidad de sustracción para recibir la señal de diferencia de velocidad y está diseñado para establecer y para emitir una señal de referencia de inclinación basándose en la señal de diferencia de velocidad recibida. La segunda unidad de sustracción está conectada al controlador de velocidad para recibir la señal de referencia de inclinación y está conectada a la entrada de señal de inclinación para recibir la señal de inclinación. Está diseñada para establecer la diferencia entre la señal de referencia de inclinación y la señal de inclinación, y para emitir una señal de diferencia de inclinación. El controlador de inclinación está conectado a la segunda unidad de sustracción para recibir la señal de diferencia de inclinación y está diseñado para establecer la señal de referencia de paso basándose en la señal de inclinación recibida. En este desarrollo del sistema de control de inclinación, el controlador de velocidad calcula una señal de referencia de inclinación oscilante basándose en la referencia de velocidad oscilante de la que se sustraen entonces las inclinaciones (oscilantes) reales. El resultado de la sustracción se alimenta al controlador de inclinación que determina una señal de referencia de paso basándose en el resultado de la sustracción para reducir la diferencia. Mediante esta medida, puede reducirse bastante rápidamente la diferencia entre la señal de referencia de inclinación y la inclinación real lo que a su vez conduce a una amortiguación eficaz de oscilaciones en la inclinación de torre.

El controlador de velocidad y/o el controlador de inclinación pueden implementarse como controladores PID.

Con el fin de descartar contribuciones en la señal de referencia de velocidad modificada que no resultan de vibraciones de baja frecuencia, la unidad de modificación del sistema de control de inclinación inventivo puede comprender un filtro paso bajo que está conectado al diferenciador para recibir la señal diferenciada y está diseñado para emitir una señal diferenciada filtrada.

Características, propiedades y ventajas adicionales de la presente invención quedarán claras a partir de la siguiente descripción de una realización de la invención conjuntamente con los dibujos adjuntos.

La figura 1 muestra una realización del sistema de control de inclinación inventivo en forma de un diagrama de bloques.

La figura 2 muestra el controlador de paso del sistema de control de inclinación.

La figura 3 muestra la inclinación de una torre de turbina eólica y las aceleraciones que actúan sobre la góndola de una turbina eólica.

La figura 4 muestra la unidad de modificación del sistema de control de inclinación.

La figura 5 muestra la dependencia del tiempo de diversos parámetros en una turbina eólica con un sistema de control de inclinación inventivo.

La figura 6 muestra la dependencia del tiempo de los parámetros de la figura 5 para una turbina eólica sin un sistema de control de inclinación inventivo.

En la figura 1 se muestra una realización del sistema de control de inclinación inventivo. El sistema se usará en una turbina eólica que está equipada con palas de rotor y un sistema actuador de paso. Comprende tres entradas, concretamente una entrada 1 de velocidad de rotor que está diseñada para recibir una señal de velocidad de rotor que representa el valor de velocidad de rotor real del rotor de la turbina eólica, una entrada 3 de referencia de velocidad que está diseñada para recibir una señal de referencia de velocidad que representa un valor de referencia de velocidad para la velocidad de rotor y una entrada 5 de señal de inclinación que está diseñada para recibir una señal que representa una inclinación de la torre. El sistema de control de inclinación comprende además una salida 7 de referencia de paso que está diseñada para emitir una señal de referencia de paso al sistema actuador de paso de la turbina eólica. La señal de referencia de paso representa los valores de paso que ha de fijar el sistema actuador de paso.

Una unidad 9 de modificación está conectada a la entrada 3 de referencia de velocidad para recibir la señal de referencia de velocidad y a la entrada 5 de inclinación para recibir la señal de inclinación. Se establece una señal de modificación en la unidad de modificación basándose en la señal de inclinación recibida y se usa para modificar la señal de referencia de velocidad para establecer una señal de referencia de velocidad modificada. Esta señal de referencia de velocidad modificada se emite entonces por la unidad 9 de modificación.

Un sustractor 11 está conectado a la unidad 9 de modificación para recibir la señal de referencia de velocidad modificada y a la entrada 1 de velocidad de rotor para recibir la señal de velocidad de rotor que representa el valor de velocidad de rotor real. Sustraer la señal de velocidad de rotor de la señal de referencia de velocidad modificada

para establecer una señal de error de velocidad (señal de diferencia de velocidad) que entonces se emite.

5 El controlador 13 de paso está conectado, en la presente realización, al primer sustractor 11 para recibir la señal de error de velocidad y a la entrada 5 de inclinación para recibir la señal de inclinación. Basándose en la señal de error de velocidad recibida y la señal de inclinación recibida, el controlador de paso establece la señal de referencia de paso que representa un paso individual o uno global para cada pala de rotor que ha de fijarse por el sistema de activación de paso de la turbina eólica. La señal de referencia de paso se emite entonces a través de la salida 7 de referencia de paso.

10 El controlador 13 de paso se muestra en más detalle en la figura 2. Comprende un controlador 15 de velocidad, un controlador 17 de inclinación y un segundo sustractor 19. Tanto el controlador 15 de velocidad como el controlador 17 de inclinación están implementados como controladores proporcionales-integrales-diferenciales (controladores PID).

15 El controlador 15 de velocidad está conectado al primer sustractor para recibir la señal de error de velocidad. El controlador PID establece entonces una señal de referencia de inclinación basándose en la señal de error de velocidad recibida. Esta señal de referencia de inclinación es la señal emitida del controlador de velocidad.

20 El segundo sustractor 19 está conectado al controlador 15 de velocidad para recibir la señal de referencia de inclinación y a la entrada 5 de inclinación para recibir la señal de inclinación. Sustrahe la señal de inclinación de la señal de referencia de inclinación y emite una señal de error de inclinación (señal de diferencia de inclinación), que representa la diferencia entre la referencia de inclinación y la inclinación real de la turbina eólica.

25 El controlador 17 de inclinación está conectado al sustractor 19 para recibir la señal de error de inclinación. El controlador PID establece basándose en la señal de error de inclinación recibida, la señal de referencia de paso que entonces se emite al sistema actuador de paso a través de la salida 7 de referencia de paso. La señal de diferencia de paso representa los ángulos de paso que han de fijarse para las palas de rotor con el fin de reducir la diferencia entre la referencia de inclinación y la inclinación real.

30 La señal de inclinación puede ser una señal que representa un valor de inclinación directo medido por un sensor adecuado. Sin embargo, también es posible tener una señal de inclinación que no representa directamente el valor de inclinación sino un parámetro que permite derivar el valor de inclinación a partir del mismo. Un parámetro de este tipo es, por ejemplo, la aceleración en sentido longitudinal de la góndola. Ahora se describirá cómo derivar el valor de inclinación a partir de la aceleración en sentido longitudinal conjuntamente con la figura 3.

35 La figura 3 muestra una turbina 100 eólica con una torre 101, una góndola 103 en la torre en la parte superior de la torre y un rotor 105 cuyo árbol porta la góndola 103. La turbina 100 eólica se somete a vibraciones de torre que a su vez conducen a una inclinación oscilante Φ de la turbina eólica. La oscilación también produce una aceleración en sentido longitudinal a_y de la góndola, es decir una aceleración de la góndola en el sentido del eje de rotor y . Se define que el ángulo de inclinación Φ es el ángulo entre la aceleración en sentido longitudinal a_y de la góndola 103 y la dirección horizontal. Además, la aceleración de la gravedad a_g también actúa sobre la góndola en una dirección vertical.

45 La aceleración en sentido longitudinal a_y depende de la segunda derivada en el tiempo de la ubicación de la góndola en el sentido del eje de rotor, dy/d^2t y el seno del ángulo de inclinación Φ multiplicado por la aceleración de la gravedad a_g , es decir la proyección de la aceleración de la gravedad sobre la dirección del eje de rotor. Incluso en el caso de un ángulo de inclinación de hasta 20° , la función de seno de este ángulo se aproxima muy bien por este mismo ángulo si el ángulo se expresa en radianes en lugar de en grados. El error al reemplazar el seno del ángulo de inclinación Φ por el mismo ángulo de inclinación Φ en radianes es sólo de aproximadamente el 2 por ciento para ángulos de hasta 20° . Para ángulos más pequeños, el error se hace incluso más pequeño. Esto significa que el ángulo de inclinación puede aproximarse bien por la razón de la aceleración en sentido longitudinal a_y con respecto a la aceleración de la gravedad a_g . En otras palabras, puesto que la aceleración de la gravedad es constante, puede suponerse que el ángulo de inclinación es proporcional al valor de aceleración en sentido longitudinal a_y . Además, puede suponerse que la aceleración dy/d^2t producida por las vibraciones siempre puede omitirse en comparación con la proyección de la aceleración de la gravedad sobre el sentido del eje de rotor. Debe observarse en este contexto que la proyección de la aceleración de la gravedad así como la aceleración producida por las vibraciones de baja frecuencia son las más altas para los ángulos de inclinación Φ superiores, y que la aceleración debida a las vibraciones de baja frecuencia es considerablemente pequeña en comparación con la aceleración de la gravedad. Por tanto, el valor de aceleración en sentido longitudinal a_y puede usarse para representar el ángulo de inclinación Φ en la unidad 9 de modificación.

60 La figura 4 muestra la unidad 9 de modificación en más detalle. En la figura 4 se supone que la señal de inclinación viene dada por una señal de aceleración en sentido longitudinal que representa el valor de aceleración en sentido longitudinal medido por, por ejemplo, un acelerómetro en o dentro de la góndola 103. Sin embargo, la unidad 9 de modificación también funcionaría con una señal de inclinación que representa directamente el ángulo de inclinación

en lugar del valor de aceleración en sentido longitudinal.

La unidad 9 de modificación comprende un diferenciador 21, un filtro 23 paso bajo, un amplificador 25, un limitador 27 y un sumador 29. El diferenciador 21 está conectado a la entrada 5 de inclinación para recibir la señal de aceleración en sentido longitudinal. Forma la derivada en el tiempo de la señal de aceleración en sentido longitudinal que entonces es la señal emitida del diferenciador. Como se explicó anteriormente, puede suponerse que la señal de aceleración en sentido longitudinal es proporcional al ángulo de inclinación Φ . Por tanto, la derivada en el tiempo de la señal de aceleración en sentido longitudinal también es proporcional a la derivada en el tiempo del ángulo de inclinación, que a su vez es proporcional a la velocidad de torre. Por tanto, la derivada en el tiempo de la señal de aceleración en sentido longitudinal es una buena aproximación para la velocidad de torre. Por tanto, puede considerarse que esta derivada es una señal de velocidad de torre.

El filtro 23 paso bajo está conectado a un diferenciador 21 para recibir la señal de velocidad de torre, es decir la derivada en el tiempo de la señal de aceleración en sentido longitudinal. La señal emitida del filtro 23 paso bajo es una señal de velocidad de torre filtrada de la que se eliminan las componentes de alta frecuencia, que no se producen por las vibraciones de torre de baja frecuencia.

El amplificador 25 está conectado al filtro 23 paso bajo para recibir la señal de velocidad de torre filtrada. En el amplificador 25 se amplifica la señal de velocidad de torre recibida y se emite como una señal de velocidad de torre filtrada amplificada.

El limitador 27 está conectado al amplificador 25 para recibir la señal de velocidad de torre filtrada y amplificada. Hace que la señal de velocidad de torre filtrada y amplificada se sature si se alcanza un margen determinado de la amplitud de señal. Mediante esta medida se evita que la señal de velocidad de torre filtrada y amplificada se haga demasiado grande en su valor absoluto.

La emisión del limitador 27 es la señal de modificación que se recibe por el sumador 29 que está conectado al limitador 27 y a la entrada 3 de referencia de velocidad. En el sumador, la señal de modificación se suma a la señal de referencia de velocidad y la suma se emite como la señal de referencia de velocidad modificada.

Aunque la figura 4 se ha descrito con respecto a la señal de aceleración en sentido longitudinal como la señal de inclinación, la unidad de modificación también funcionaría con una señal de inclinación que representa la inclinación real de la torre en lugar de su aceleración en sentido longitudinal. En este caso, el diferenciador formaría la derivada en el tiempo del ángulo de inclinación en lugar de la aceleración en sentido longitudinal.

En caso de que se use la aceleración en sentido longitudinal para representar la inclinación, también puede usarse la aceleración en sentido longitudinal en el controlador 13 de paso. Sin embargo, también es posible usar el ángulo de inclinación en vez de la aceleración en sentido longitudinal en la unidad 9 de modificación así como en el controlador 13 de paso. También es posible usar el ángulo de inclinación en una unidad y la aceleración en sentido longitudinal en la otra. Sin embargo, en este caso, el sistema de control de inclinación necesitaría tener cuatro entradas, concretamente una entrada de velocidad de rotor, una entrada de referencia de velocidad, una entrada de aceleración en sentido longitudinal y una entrada de ángulo de inclinación. Por tanto, es preferible usar la misma señal de entrada en la unidad 9 de modificación y en el controlador 13 de paso.

El efecto del sistema de control de inclinación inventivo puede observarse en la figuras 5 y 6 que muestran el comportamiento en el tiempo de la velocidad del viento, la potencia de salida de la turbina eólica, la velocidad de rotor, el ángulo de paso, la aceleración en sentido longitudinal y la inclinación para una turbina eólica con un sistema de control de inclinación inventivo (figura 5) y sin tal sistema (figura 6). Ambas figuras muestran la reacción de la potencia de salida, la velocidad de rotor, el ángulo de paso, la aceleración en sentido longitudinal y la inclinación con una ráfaga de viento, es decir un aumento repentino en la velocidad del viento de desde 14 hasta 18 m/s. En ambos casos, la potencia de salida de la turbina eólica permanece constante excepto por una pequeña oscilación inmediatamente tras la ráfaga de viento. Esta constancia se debe al hecho de que la turbina eólica se hace funcionar en modo de potencia nominal.

Debido a la oscilación de torre de baja frecuencia que se introduce a través de la ráfaga de viento, la velocidad de rotor experimenta oscilaciones. Aunque estas variaciones se contrarrestan en el sistema de control de inclinación inventivo a través de la señal de modificación sumada a la señal de referencia de velocidad, no se toman medidas en la turbina eólica mostrada en la figura 6. Como consecuencia, se controla el error de velocidad para convertirse en cero bastante rápidamente con el sistema de control inventivo de modo que se amortiguan las oscilaciones en la velocidad de rotor mientras que se producen oscilaciones estables a largo plazo en la turbina eólica sin el sistema de control inventivo. Al mismo tiempo, la señal de referencia de inclinación, que es una señal de referencia de aceleración en sentido longitudinal en el presente caso, también contiene las oscilaciones de la señal de referencia de velocidad modificada. Debido a la amortiguación de las oscilaciones en la velocidad de rotor, se controla la señal de error de inclinación, es decir la diferencia entre la referencia de aceleración en sentido longitudinal y la aceleración en sentido longitudinal real para convertirse en cero bastante rápidamente de modo que, como consecuencia, se amortiguan las amplitudes en los ángulos de inclinación. Por otra parte, en la turbina eólica sin el

5 sistema de control de inclinación inventivo, las oscilaciones estables a largo plazo de la velocidad de rotor también pueden observarse en la aceleración en sentido longitudinal de la góndola y, como consecuencia, en el ángulo de inclinación. En otras palabras, las oscilaciones de baja frecuencia se amortiguan eficazmente con el sistema de control de inclinación inventivo mientras que continúan casi sin amortiguarse en la turbina eólica sin el sistema de control inventivo. Por tanto, el sistema de control de inclinación inventivo proporciona una medida adecuada para amortiguar oscilaciones de baja frecuencia, que se producirían, por ejemplo, en turbinas eólicas con bases flotantes.

REIVINDICACIONES

1. Método de amortiguación de vibraciones de torre de una turbina (100) eólica que está equipada con palas de rotor, un controlador (13) de paso y un sistema actuador de paso, fijando el paso de las palas de rotor, que comprende las etapas de:
 - proporcionar un valor (3) de referencia de velocidad para la velocidad de rotor;
 - proporcionar un valor (1) de velocidad de rotor que representa la velocidad del rotor (105); y
 - establecer un valor de modificación que representa una modificación que ha de realizarse en el valor (3) de referencia de velocidad para tener en cuenta las vibraciones de torre;
 - usar el valor de modificación para modificar el valor (3) de referencia de velocidad para establecer un valor de referencia de velocidad modificado;
 - determinar un valor (7) de referencia de paso que representa un paso que ha de fijar el sistema actuador de paso basándose en al menos la diferencia entre el valor de referencia de velocidad modificado y el valor de velocidad de rotor;
 - controlar el ángulo de paso de las palas de rotor según el valor (7) de referencia de paso.
2. Método según la reivindicación 1, en el que el valor de modificación es un valor de velocidad de torre que representa la velocidad de torre producida por las vibraciones de torre y el valor de velocidad de torre se suma al valor de referencia de velocidad para establecer el valor de referencia de velocidad modificado.
3. Método según la reivindicación 2, en el que el valor de velocidad de torre se calcula a partir de un valor de inclinación que representa la inclinación de la torre producida por las vibraciones de torre.
4. Método según la reivindicación 3, en el que se usa un valor de aceleración en sentido longitudinal que representa la aceleración de torre en el sentido del eje de rotor producida por las vibraciones de torre para representar la inclinación de la torre.
5. Método según la reivindicación 3 o la reivindicación 4, en el que la señal de referencia de paso se determina basándose en el valor de referencia de velocidad modificado
 - estableciendo un valor de diferencia de velocidad que representa la diferencia entre el valor de velocidad de rotor y el valor de referencia de velocidad modificado;
 - calculando un valor de referencia de inclinación para la torre a partir del valor de diferencia de velocidad;
 - estableciendo un valor de diferencia de inclinación que representa la diferencia entre el valor de inclinación y el valor de referencia de inclinación; y
 - determinando la señal de referencia de paso basándose en el valor de diferencia de inclinación.
6. Método según la reivindicación 5, en el que se usa un controlador PID para calcular el valor de referencia de inclinación a partir del valor de diferencia de velocidad.
7. Método según la reivindicación 5 o la reivindicación 6, en el que se usa un controlador PID para calcular el valor de referencia de paso a partir del valor de diferencia de inclinación.
8. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, en el que el valor de referencia de inclinación se restringe a un valor dado.
9. Método según la reivindicación 8, en el que el valor dado depende del viento.
10. Método según la reivindicación 4 y una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 9, en el que el valor de inclinación se deriva del valor de aceleración en sentido longitudinal formando la derivada de la razón del valor de aceleración en sentido longitudinal con respecto a la aceleración de la gravedad.
11. Método según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 10, en el que el valor de velocidad de torre se establece a partir de una derivada a la que se ha aplicado un filtro paso bajo del valor de inclinación.
12. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que método se desactiva a velocidades del viento muy altas.

13. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en el que el valor de inclinación se establece basándose en una medición de inclinación o una medición de aceleración en la parte superior de la torre.
- 5 14. Sistema de control de inclinación para su uso en una turbina (100) eólica con palas de rotor y un sistema actuador de paso, comprendiendo el sistema de control de inclinación:
- 10 - una unidad (13) de control de paso que está diseñada para establecer una señal de referencia de paso que representa un paso que ha de fijar el sistema actuador de paso;
- 15 - una entrada (1) de velocidad de rotor diseñada para recibir una señal de velocidad de rotor que representa la velocidad del rotor;
- una entrada (3) de referencia de velocidad diseñada para recibir una señal de referencia de velocidad para la velocidad de rotor;
- 20 - una entrada (5) de señal de inclinación diseñada para recibir una señal que representa una inclinación de la torre;
- una salida (7) de referencia de paso diseñada para emitir la señal de referencia de paso;
- caracterizado
- 25 - por una unidad (9) de modificación que está conectada a la entrada (1) de referencia de velocidad para recibir la señal de referencia de velocidad y a la entrada (5) de señal de inclinación para recibir la señal de inclinación, estando diseñada la unidad (9) de modificación para establecer una señal de modificación basándose en la señal de inclinación, para modificar la señal de referencia de velocidad por medio de la señal de modificación, y para emitir una señal de referencia de velocidad modificada; y
- 30 - porque la unidad (13) de control de paso está conectada a la unidad (9) de modificación para recibir la señal de referencia de velocidad modificada y está diseñada para establecer el valor de referencia de paso al menos basándose en la diferencia entre la señal de referencia de velocidad modificada y la señal de velocidad de rotor.
- 35 15. Sistema de control de inclinación según la reivindicación 14, caracterizado porque la unidad (9) de modificación está diseñada para establecer como la señal de modificación una señal de velocidad de torre basándose en la señal que representa una inclinación de la torre, para modificar la señal de referencia de velocidad por medio de la señal de velocidad de torre y para emitir la señal de referencia de velocidad modificada.
- 40 16. Sistema de control de inclinación según la reivindicación 15, caracterizado porque
- 45 - la unidad (9) de modificación comprende un diferenciador (21) para diferenciar la señal que representa una inclinación de la torre; y
- la unidad de modificación está diseñada para establecer la señal de velocidad de torre basándose en la señal diferenciada.
- 50 17. Sistema de control de inclinación según la reivindicación 16, caracterizado porque la unidad (9) de modificación comprende un sumador (29) que está conectado a la entrada (3) de referencia de velocidad para recibir la señal de referencia de velocidad y está diseñado para sumar la señal de velocidad de torre a la señal de referencia de velocidad para establecer la señal de referencia de velocidad modificada.
- 55 18. Sistema de control de inclinación según una cualquiera de las reivindicaciones 14 a 17, caracterizado
- 60 - por una primera unidad (11) de sustracción que está conectada a la unidad (9) de modificación para recibir la señal de referencia de velocidad modificada y a la entrada (1) de referencia de velocidad de rotor para recibir la señal de velocidad de rotor, y que está diseñada para establecer una señal de diferencia de velocidad que representa la diferencia entre la señal de velocidad de rotor y la señal de referencia de velocidad modificada;
- porque la unidad (13) de control de paso comprende un controlador (15) de velocidad, una segunda unidad (19) de sustracción y un controlador (17) de inclinación;
- 65 - porque el controlador (15) de velocidad está conectado a la primera unidad (1) de sustracción para recibir la señal de diferencia de velocidad y está diseñado para establecer y para emitir una señal de referencia de

inclinación basándose en la señal de diferencia de velocidad recibida,

- 5
- porque la segunda unidad de sustracción está conectada a la entrada (5) de señal de inclinación para recibir la señal que representa la inclinación y porque la segunda unidad (19) de sustracción está diseñada para establecer la diferencia entre la señal de referencia de inclinación y la señal que representa la inclinación y para emitir una señal de diferencia de inclinación; y
- 10
- porque el controlador (17) de inclinación está conectado a la segunda unidad (19) de sustracción para recibir la señal de diferencia de inclinación y porque el controlador (17) de inclinación está diseñado para establecer la señal de referencia de paso basándose en la señal de diferencia de inclinación.
- 15
19. Sistema de control de inclinación según la reivindicación 18, caracterizado porque el controlador (15) de velocidad es un controlador PID.
20. Sistema de control de inclinación según la reivindicación 18 o la reivindicación 19, caracterizado porque el controlador (17) de inclinación es un controlador PID.
- 20
21. Sistema de control de inclinación según la reivindicación 16 y una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 20, caracterizado porque
- la unidad (9) de modificación comprende un filtro (23) paso bajo que está conectado al diferenciador (21) para recibir la señal diferenciada y está diseñado para emitir una señal diferenciada filtrada.

FIG 1

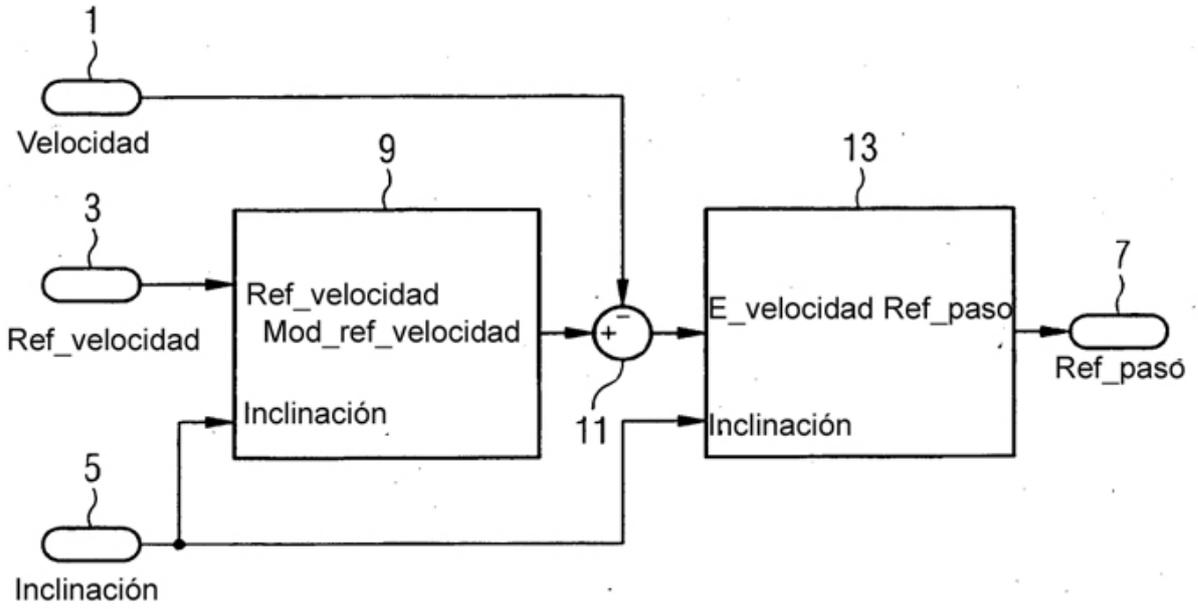


FIG 2

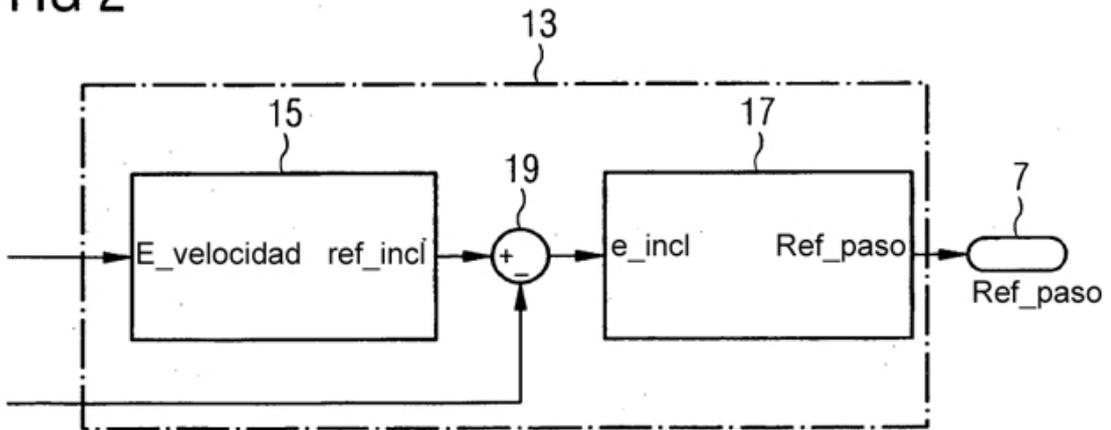


FIG 3

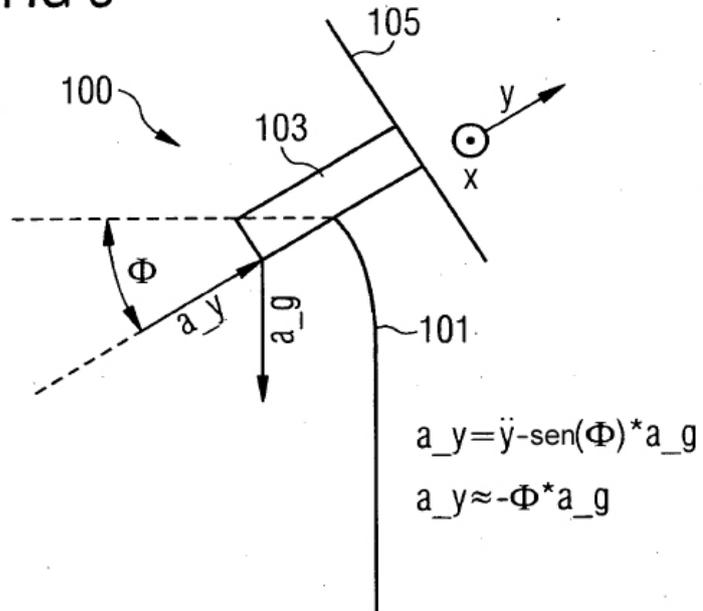


FIG 4

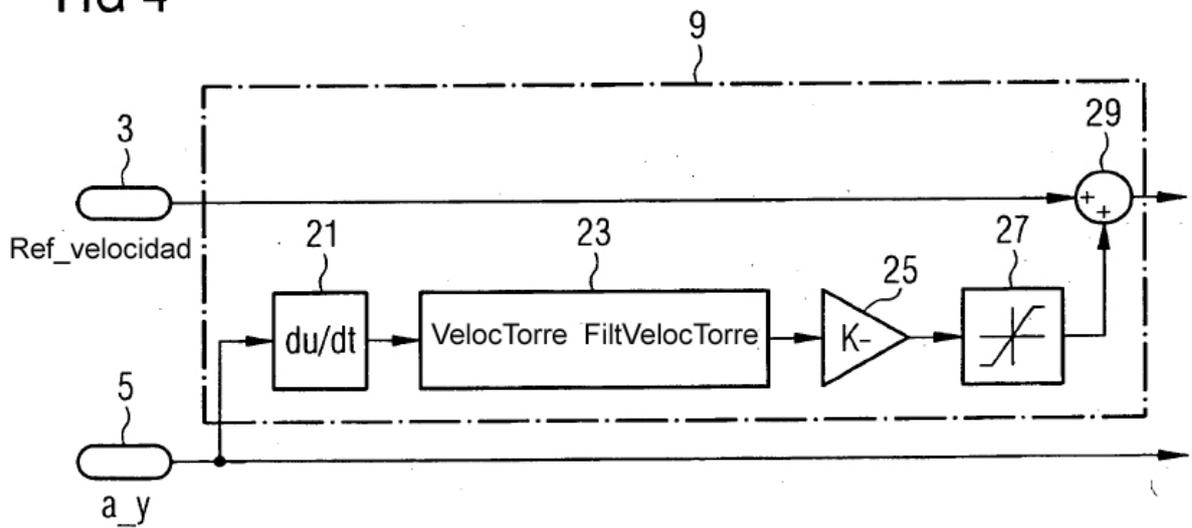


FIG 5

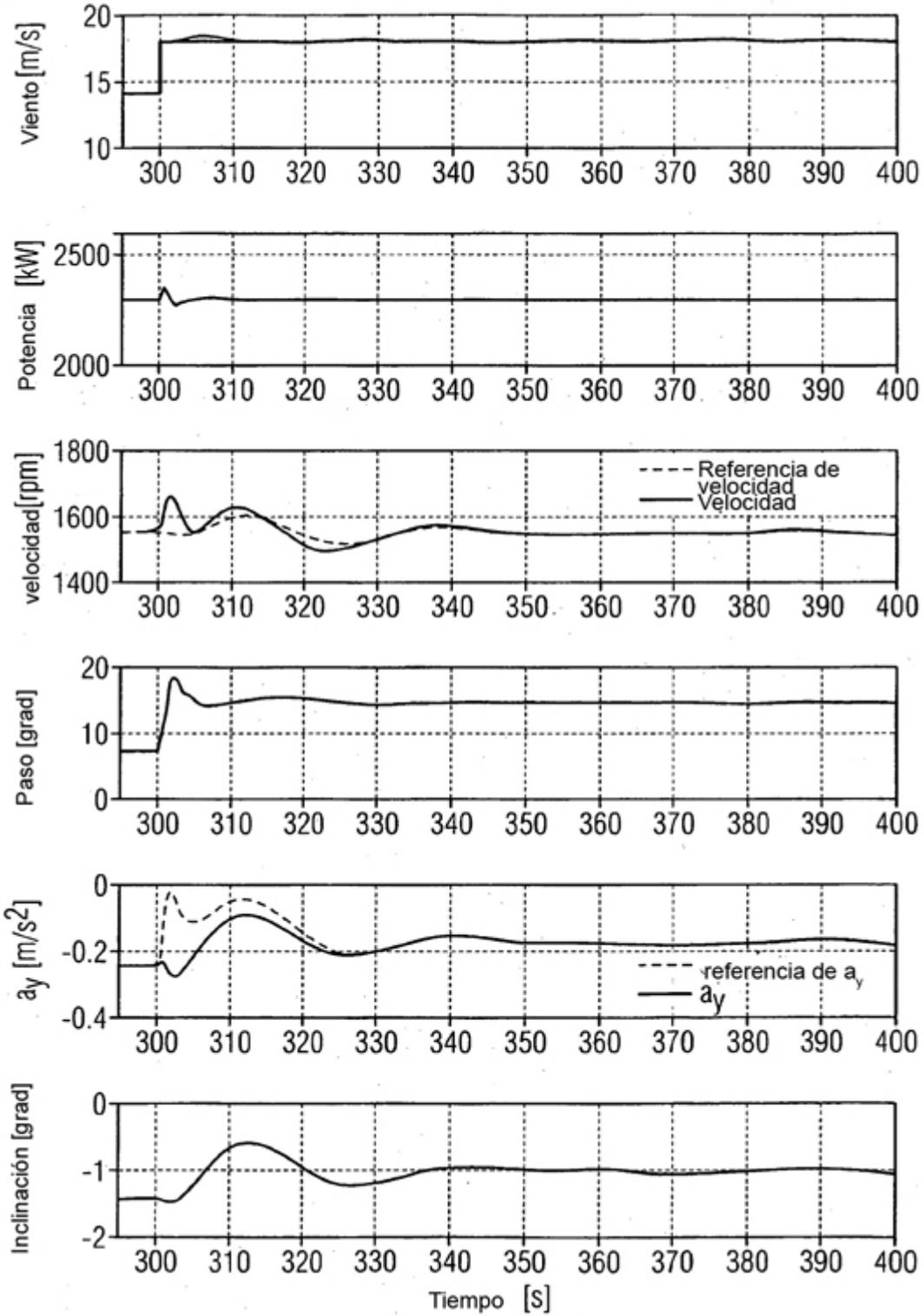


FIG 6

