

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 528 743**

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: **02.04.2008** **E 08006746 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.12.2014** **EP 2107236**

54 Título: **Método de amortiguación de vibraciones de la torre de una turbina eólica y sistema de control para turbinas eólicas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
12.02.2015

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

EGEDAL, PER

74 Agente/Representante:

PÉREZ BARQUÍN, Eliana

ES 2 528 743 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método de amortiguación de vibraciones de la torre de una turbina eólica y sistema de control para turbinas eólicas.

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

10 En turbinas eólicas, las vibraciones de la torre se excitarán por las condiciones de viento en la planta eólica que actúan sobre la turbina eólica. En turbinas eólicas terrestres, estas vibraciones de la torre son de alta frecuencia y sólo producen pequeñas inclinaciones de la torre. Sin embargo, por ejemplo, turbinas eólicas montadas en bases flotantes del tipo denominado boya de espeque, pueden tener, debido a las condiciones de 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 la torre y curva de empuje negativa a altas velocidades del viento puede conducir a altas cargas en la torre y a grandes variaciones de inclinación de la góndola si la turbina se controla con una potencia constante. Con un control de potencia constante, la turbina eólica se controla habitualmente para mantener aproximadamente una velocidad del rotor constante y el par motor del rotor se regula ajustando un ángulo de paso apropiado de las palas de la turbina de modo que se mantenga una potencia aproximadamente constante. Altas cargas en la torre y grandes variaciones de inclinación en este modo de control de potencia pueden conducir a inestabilidades y a fallos estructurales 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 de alta mar basado en la frecuencia de sus torres. En este método, se evita hacer funcionar la planta en un intervalo de frecuencia en el que se sitúe la frecuencia resonante de la torre. Para conseguir esto se determinan la frecuencia natural crítica de la planta y la velocidad del rotor excitando la planta en su intervalo de frecuencia natural crítica. Después 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 por el intervalo de velocidad crítica.

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

30 Un método para amortiguar las vibraciones de una torre de una turbina eólica se da a conocer en el documento US 2006/0066111 A1. En este método, el par motor requerido por el generador se modula proporcionando una señal basada en cambios en la velocidad del rotor del generador.

35 El documento EP 1 719 910 A1 describe un generador de turbina eólica y un método de amortiguación activa de vibraciones para el mismo. Para conseguir la amortiguación activa, se suma un valor de modificación a una orden de ángulo de paso de pala para llegar a una orden resultante para ajustar un ángulo de paso de las palas de la turbina eólica para generar un empuje sobre las palas de la turbina eólica que anule las vibraciones de la góndola.

40 El documento GB 2 117 933 A describe un sistema de generación eléctrica eólico con un control para modular el ángulo de pala de rotor que proporciona una componente de orden de ángulo de pala que ajustará el ángulo de pala de rotor de la turbina para proporcionar amortiguación aerodinámica positiva a la torre en respuesta a una señal indicativa de movimiento longitudinal de la torre en paralelo al rotor. Como ejemplo de una señal indicativa de movimiento longitudinal de la torre, se menciona una señal de aceleración que se alimenta al sistema de control del ángulo de pala de rotor como señal de velocidad de referencia de pala de paso de corrección. Esta señal se suma a una señal de velocidad de referencia de ángulo de paso y se integra. El resultado proporciona entonces una señal de referencia de ángulo de paso de pala.

45 El documento GB 2 117 934 A describe la amortiguación de vibraciones de potencia mediante el uso de control de ángulo de paso. En el método de control se usa una orden de referencia de ángulo de pala adicional que provoca variaciones de empuje incrementales, que se han predicho que están en fase con la velocidad de la parte superior de la torre, para proporcionar amortiguación aerodinámica positiva adicional de la torre.

50 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 está curvando aguas arriba, se cambia el paso de pala hacia pérdida, y cuando la torre se está moviendo aguas abajo, se cambia el paso de pala fuera de pérdida. En caso de que una aceleración máxima en la máxima curvatura aguas abajo de la torre supere un nivel predeterminado, se activa el control de paso de amortiguación y se desactiva o se cancela el control de paso para

regular la salida de potencia máxima.

El documento WO 2007/010322 A1 describe un sistema de control para un generador eléctrico de velocidad variable en una turbina eólica que incluye un estimador de flujo de viento. El estimador de flujo de viento usa el movimiento medido, la velocidad de rotación del generador y el ángulo de paso de pala para predecir el flujo de viento por un área de barrido del rotor y para predecir el movimiento de la torre. Se emite una orden de paso de pala por un control de la turbina basándose en el flujo de viento estimado, la posición de la torre y la velocidad de la torre, la medición del paso de pala, la medición de la velocidad del rotor y la velocidad de rotación del rotor deseada.

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

El primer objetivo se soluciona mediante un método de amortiguación de vibraciones de la torre de una turbina eólica según la reivindicación 1 y el segundo objetivo se soluciona mediante un sistema de control para uso en una turbina eólica según la reivindicación 16. Las reivindicaciones dependientes contienen desarrollos adicionales de la invención.

En el método de la invención de amortiguación de vibraciones de la torre de una turbina eólica que está equipada con palas de rotor, un controlador de paso y un sistema de accionamiento del paso, la amortiguación se realiza ajustando 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 debe ajustar el sistema de accionamiento del paso. La determinación del valor de referencia de paso se realiza de la siguiente manera: se proporcionan un valor de referencia de velocidad para la velocidad del rotor y un valor de velocidad del rotor que representa la velocidad real del rotor. Se proporciona un valor de modificación que representa una modificación que debe realizarse para tener en cuenta las vibraciones de la torre, en particular las vibraciones de la torre en la parte superior de la torre, por ejemplo, en la ubicación de la góndola. El valor de modificación se usa entonces para modificar el valor de referencia de velocidad para establecer un valor de referencia de velocidad modificado. El valor de referencia de paso se determina entonces basándose en al menos la diferencia entre el valor de referencia de velocidad modificado y el valor de velocidad del rotor real.

Aunque en el estado de la técnica el ángulo de paso se calcula basándose en la diferencia entre un valor de referencia de velocidad no modificado y el valor de velocidad del rotor real, y se realiza una modificación con respecto al ángulo de paso para amortiguación las vibraciones de la 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 por el que se modifica el valor de referencia de velocidad puede representar, en particular, la velocidad de la torre provocada por las vibraciones de la torre, en particular por las vibraciones de la torre en la parte superior de la torre, por ejemplo en la ubicación de la góndola. El valor de velocidad de la torre se suma entonces al valor de referencia de velocidad para establecer el valor de referencia de velocidad modificado. Aunque en el estado de la técnica la velocidad de la torre se incorpora en el ángulo de paso, en la presente implementación de la invención, en lugar de ello, se incorpora en el valor de referencia de velocidad.

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

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

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

En una primera alternativa del método de la invención, 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 del rotor y el valor de referencia de velocidad modificado y determinando la señal de referencia de paso basándose en el valor de diferencia de velocidad. Puesto que el valor de referencia de velocidad se modifica para tener en cuenta las vibraciones de la torre, estas vibraciones se amortiguan. Puede usarse un controlador PID (controlador proporcional integral diferencial) para calcular la señal de referencia de paso a partir del valor de diferencia de velocidad.

En una segunda alternativa del método de la invención, 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 del 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. Al determinar el valor de referencia de paso basándose en el valor de diferencia de inclinación, la inclinación de la parte superior de la torre puede contrarrestarse ajustando 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 la torre, no sólo se reduce la inclinación sino que también se amortiguan las vibraciones, lo que conduce a una amortiguación de las fluctuaciones en el valor de inclinación a lo largo del tiempo que conduce a su vez a una amortiguación de las fluctuaciones en el valor de diferencia de inclinación. Por tanto, puede conseguirse una rápida amortiguación de la inclinación de la torre, lo que da lugar a un control más directo de los movimientos de la torre y, por tanto, hace posible conseguir un lazo de control estable al tiempo que se obtienen 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. 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 de la segunda alternativa, el valor de referencia de inclinación puede fijarse a un valor dado. Mediante este método resulta posible evitar grandes movimientos de la torre provocados por cargas debidas a las olas mar. Un valor dado de este tipo puede depender, por ejemplo, de la velocidad del viento.

En ambas alternativas, el método de la invención puede desactivarse en caso de velocidades del viento muy altas. Esto ofrece la oportunidad de determinar el valor de referencia de paso sobre el valor de referencia de velocidad sólo con el fin de evitar un exceso de velocidad a altas velocidades del viento.

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

Un sistema de control de la invención para su uso en una turbina eólica que está equipada con palas de rotor y un sistema de accionamiento del paso comprende una unidad de control de paso, que puede implementarse, por ejemplo, como controlador PID, una entrada de velocidad del 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 debe ajustar el sistema de accionamiento del paso. La entrada de velocidad del rotor y la entrada de referencia de velocidad están diseñadas para recibir una señal de velocidad del rotor que representa la velocidad del rotor real y una señal de referencia de velocidad para la velocidad del 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 a partir del cual 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. Comprende además una primera unidad de resta que está conectada a la unidad de modificación para recibir la señal de referencia de velocidad modificada y a la entrada de velocidad del rotor para recibir la señal de velocidad del rotor, y que está diseñada para establecer una señal de diferencia de velocidad que representa la diferencia entre la señal de velocidad del rotor y la señal de referencia de velocidad modificada. Además, la unidad de control de paso está conectada a la primera unidad de resta para recibir la señal de diferencia de velocidad y está diseñada para establecer el valor de referencia de paso basándose en al menos la señal de diferencia de velocidad.

La modificación de la señal de referencia de velocidad permite reducir rápidamente oscilaciones en la velocidad del rotor y, como consecuencia, los movimientos de la torre. El sistema de control de la invención permite realizar el

método de la invención y consigue las ventajas asociadas con el método de la invención.

5 En una realización particular del sistema de control de la invención, la unidad de modificación está diseñada para establecer, como señal de modificación, una señal de velocidad de la 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 la torre y para emitir la señal de referencia de velocidad modificada.

10 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 la torre basándose en la señal diferenciada. Con el fin de descartar contribuciones a la señal de referencia de velocidad modificada que no son resultado de vibraciones de baja frecuencia, la unidad de modificación del sistema de control de la invención puede comprender un filtro paso bajo que está conectado al diferenciador para recibir la señal diferenciada y diseñado para emitir una señal diferenciada filtrada de modo que la señal de velocidad de la torre se establece basándose en la señal diferenciada filtrada.

15 Además, la unidad de modificación puede comprender un amplificador que está conectado al filtro paso bajo para recibir la señal diferenciada filtrada y diseñado para emitir una señal diferenciada filtrada amplificada, de modo que pueden procesarse más fácilmente señales diferenciadas filtradas pequeñas. Además, la unidad de modificación puede comprender un limitador que está conectado al amplificador para recibir la señal diferenciada filtrada amplificada y diseñado para llevar la señal diferenciada filtrada amplificada a saturación si se alcanza un margen dado de la señal diferenciada filtrada amplificada y para emitir una señal diferenciada filtrada amplificada saturada. Mediante esta medida puede evitarse el procesamiento de una señal diferenciada filtrada amplificada demasiado fuerte.

20 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 diseñado para sumar la señal de velocidad de la 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 la torre. Puesto que la velocidad de la torre oscila debido a las vibraciones, esta suma representa una referencia de velocidad de oscilación para el controlador de paso. Mediante el uso de esta referencia de velocidad de oscilación, la diferencia entre la velocidad del rotor real (de oscilación) y la referencia de velocidad de oscilación puede reducirse en un proceso de control. Mediante esta medida resulta posible amortiguar rápidamente oscilaciones en la velocidad del rotor.

25 Una amortiguación eficaz de la inclinación de la torre puede conseguirse mediante la implementación especial si la unidad de control de paso comprende un controlador de velocidad, una segunda unidad de resta y un controlador de inclinación. El controlador de velocidad está conectado a la primera unidad de resta para recibir la señal de diferencia de velocidad y 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 resta está conectada al controlador de velocidad para recibir la señal de referencia de inclinación y 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 resta para recibir la señal de diferencia de inclinación y diseñado para establecer la señal de referencia de paso basándose en la señal de diferencia de inclinación recibida. En este desarrollo del sistema de control, el controlador de velocidad calcula una señal de referencia de inclinación de oscilación basándose en la referencia de velocidad de oscilación de la que se restan entonces las inclinaciones reales (de oscilación). El resultado de la resta se alimenta al controlador de inclinación que determina una señal de referencia de paso basándose en el resultado de la resta para reducir así la diferencia. Mediante esta medida, la diferencia entre la señal de referencia de inclinación y la inclinación real puede reducirse bastante rápido lo que a su vez conduce a una amortiguación eficaz de oscilaciones en la inclinación de la torre.

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

35 Características, propiedades y ventajas adicionales de la presente invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción de realizaciones de la invención junto con los dibujos adjuntos.

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

40 La figura 2 muestra la inclinación de una torre de turbina eólica y las aceleraciones que actúan sobre la góndola de una turbina eólica.

La figura 3 muestra la unidad de modificación del sistema de control.

45 La figura 4 muestra la dependencia con respecto al tiempo de diversos parámetros en una turbina eólica con un sistema de control de la invención.

La figura 5 muestra la dependencia con respecto al tiempo de los parámetros de la figura 4 para una turbina eólica sin un sistema de control de la invención.

5 La figura 6 muestra la dependencia con respecto al tiempo de los parámetros de la figura 4 en un funcionamiento normal de la turbina eólica.

La figura 7 muestra una modificación de la realización mostrada en la figura 1 en forma de diagrama de bloques.

10 La figura 8 muestra el controlador de paso de la modificación mostrada en la figura 7.

La figura 9 muestra la dependencia con respecto al tiempo de diversos parámetros en una turbina eólica con un sistema de control según la figura 7.

15 En la figura 1 se muestra una realización del sistema de control de la invención. El sistema es para su uso en una turbina eólica que está equipada con palas de rotor y un sistema de accionamiento del paso. Comprende tres entradas, concretamente una entrada 1 de velocidad del rotor que está diseñada para recibir una señal de velocidad del rotor que representa el valor de velocidad del 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 del 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 comprende además una salida 7 de referencia de paso que está diseñada para emitir una señal de referencia de paso al sistema de accionamiento del paso de la turbina eólica. La señal de referencia de paso representa los valores de paso que debe ajustar el sistema de accionamiento del paso.

25 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 de modo que se establece así una señal de referencia de velocidad modificada. Esta señal de referencia de velocidad modificada se emite entonces por la unidad 9 de modificación.

30 Un restador 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 del rotor para recibir la señal de velocidad del rotor que representa el valor de velocidad del rotor real. Resta la señal de velocidad del 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.

35 El controlador 13 de paso está conectado, en la presente realización, al primer restador 11 para recibir la señal de error de velocidad. Se implementa como controlador PID que deriva la señal de referencia de paso a partir de la señal de error de velocidad. La señal de referencia de paso, que representa un paso individual o global para cada pala de rotor que debe ajustar el sistema de accionamiento del paso de la turbina eólica, se emite entonces a través de la salida 7 de referencia de paso.

45 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. Tal parámetro es, por ejemplo, la aceleración longitudinal de la góndola. A continuación se describirá en relación con la figura 2 la manera de derivar el valor de inclinación a partir de la aceleración longitudinal.

50 La figura 2 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 está soportado por la góndola 103. La turbina 100 eólica está sujeta a vibraciones de la torre que a su vez conducen a una inclinación de oscilación Φ de la turbina eólica. La oscilación también produce una aceleración longitudinal a_y de la góndola, es decir una aceleración de la góndola en la dirección del eje y del rotor. El ángulo de inclinación Φ se define como el ángulo entre la aceleración longitudinal a_y de la góndola 103 y la dirección horizontal. Además, la aceleración de la gravedad a_g actúa sobre la góndola así como en una dirección vertical.

55 La aceleración longitudinal a_y depende de la segunda derivada con respecto al tiempo de la ubicación de la góndola en la dirección del eje del 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 del rotor. Incluso en el caso de un ángulo de inclinación de hasta 20° , la función seno de este ángulo se aproxima muy bien por este ángulo en sí mismo si el ángulo se expresa en radianes en lugar de en grados. El error por sustituir el seno del ángulo de inclinación Φ por el propio ángulo de inclinación Φ en radianes es de sólo aproximadamente el 2 por ciento para ángulos de hasta 20° . Para ángulos más pequeños el error se vuelve incluso menor. Esto significa que el ángulo de inclinación puede aproximarse bien mediante la razón de la aceleración 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, el ángulo de inclinación puede suponerse que es proporcional al valor de aceleración longitudinal a_y . Además, puede suponerse que la aceleración dy/d^2t provocada por las vibraciones siempre puede despreciarse en comparación con

la proyección de la aceleración de la gravedad sobre la dirección del eje del rotor. Obsérvese que en este contexto la proyección de la aceleración de la gravedad así como la aceleración provocada por las vibraciones de baja frecuencia son máximas para los mayores ángulos de inclinación Φ , 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 longitudinal a_y puede usarse para representar el ángulo de inclinación Φ en la unidad 9 de modificación.

La figura 3 muestra la unidad 9 de modificación en más detalle. En la figura 3 se supone que la señal de inclinación viene dada por una señal de aceleración longitudinal que representa el valor de aceleración longitudinal medido por, por ejemplo, un acelerómetro junto a o en el interior 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 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 longitudinal. Calcula la derivada con respecto al tiempo de la señal de aceleración longitudinal que es entonces la señal de salida del diferenciador. Como se explicó anteriormente, la señal de aceleración longitudinal puede suponerse que es proporcional al ángulo de inclinación Φ . Por tanto, la derivada con respecto al tiempo de la señal de aceleración longitudinal también es proporcional a la derivada con respecto al tiempo del ángulo de inclinación, que a su vez es proporcional a la velocidad de la torre. Por tanto, con las constantes conocidas de proporcionalidad, la derivada con respecto al tiempo de la señal de aceleración longitudinal es una buena aproximación para la velocidad de la torre. Por tanto, esta derivada puede considerarse que es una señal de velocidad de la torre.

El filtro 23 paso bajo está conectado a un diferenciador 21 para recibir la señal de velocidad de la torre, es decir la derivada con respecto al tiempo de la señal de aceleración longitudinal. La señal de salida del filtro 23 paso bajo es una señal de velocidad de la torre filtrada de la que se eliminan componentes de alta frecuencia, no provocadas por vibraciones de baja frecuencia de la torre.

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

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

La salida del limitador 27 es la señal de modificación que recibe 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 3 se ha descrito con respecto a la señal de aceleración longitudinal como la señal de inclinación, la unidad de modificación también funcionaría con una señal de inclinación que representa la inclinación de la torre real en lugar de su aceleración longitudinal. En este caso, el diferenciador calcularía la derivada con respecto al tiempo del ángulo de inclinación en lugar de la de la aceleración longitudinal.

El efecto del sistema de control de la invención puede verse en las figuras 4 a 6 que muestran el comportamiento en el tiempo de la velocidad del viento, la potencia de salida de la turbina eólica, la velocidad del rotor, el ángulo de paso, la aceleración longitudinal (figura 5) y la inclinación para una turbina eólica con un sistema de control de la invención (figura 4 y figura 6) y sin tal sistema (figura 5). Las figuras 4 y 5 muestran la reacción de la potencia de salida, la velocidad del rotor, el ángulo de paso, la aceleración longitudinal (figura 5) y la inclinación con respecto a un escalón de viento, es decir un aumento repentino en la velocidad del viento de 4 m/s (desde 10 hasta 14 m/s en la figura 4 y desde 14 hasta 18 m/s en la figura 5). En la figura 5, la potencia de salida de la turbina eólica se mantiene constante excepto por un pequeño tambaleo inmediatamente después del escalón de viento. Esta constancia se debe al hecho de que en la figura 5 la turbina eólica se hace funcionar en un modo de potencia nominal.

Debido a la oscilación de baja frecuencia de la torre que se introduce por el escalón de viento, la velocidad del rotor experimenta oscilaciones. Aunque estas variaciones se contrarrestan en el sistema de control de la invención mediante la señal de modificación que se suma a la señal de referencia de velocidad, tal como se muestra en la figura 4, no se adoptan medidas en la turbina eólica mostrada en la figura 5. Como consecuencia, el error de velocidad, es decir la diferencia entre la señal de velocidad y la señal de referencia de velocidad, se controla para que se vuelva cero bastante rápidamente con el sistema de control de la invención de modo que se amortiguan las oscilaciones en la velocidad del rotor mientras que se producen oscilaciones estables a largo plazo en la turbina eólica sin el sistema de control de la invención. Como consecuencia, las oscilaciones en la inclinación de la torre se

amortiguan eficazmente. Por otro lado, en la turbina eólica sin el sistema de control de la invención, las oscilaciones estables a largo plazo de la velocidad del rotor también pueden verse en el ángulo de inclinación. En otras palabras, las oscilaciones de baja frecuencia se amortiguan eficazmente con el sistema de control de la invención mientras que continúan prácticamente sin amortiguar en la turbina eólica sin el sistema de control de la invención. Por tanto, el sistema de control de la invención proporciona una medida adecuada para amortiguar oscilaciones de baja frecuencia, como las que se producen, por ejemplo, en turbinas eólicas con bases flotantes.

La figura 6 muestra una simulación de una turbina eólica que funciona en condiciones operativas normales. La figura muestra los mismos parámetros que la figura 4. Como puede observarse, la inclinación varía sólo aproximadamente 1 grado para velocidades del viento que varían entre 12 y casi 18 m/s.

A continuación se describirá una modificación del sistema de control de la invención con respecto a las figuras 7 y 8.

El sistema de control modificado difiere del sistema de control mostrado en las figuras 1 y 3 en el controlador 113 de paso. En el sistema de control modificado, el controlador 113 de paso no sólo está conectado al primer restador 11 para recibir la señal de error de velocidad sino también a la entrada 5 de inclinación para recibir la señal de inclinación. El controlador 113 de paso establece la señal de referencia de paso, que representa un paso individual o global para cada pala de rotor que debe ajustar el sistema de accionamiento del paso de la turbina eólica, basándose en la señal de error de velocidad recibida y la señal de inclinación recibida. La señal de referencia de paso se emite entonces a través de la salida 7 de referencia de paso.

El controlador 113 de paso del sistema de control modificado se muestra en más detalle en la figura 8. Comprende un controlador 15 de velocidad, un controlador 17 de inclinación y un segundo restador 19. Tanto el controlador 15 de velocidad como el controlador 17 de inclinación se implementan como controladores proporcionales-integrales-diferenciales (controladores PID).

El controlador 15 de velocidad está conectado al primer restador 11 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 de salida del controlador 15 de velocidad.

El segundo restador 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. Resta 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.

El controlador 17 de inclinación está conectado al restador 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 se emite entonces al sistema de accionamiento del paso a través de la salida 7 de referencia de paso. La señal de referencia de paso representa los ángulos de paso que deben ajustarse para las palas de rotor con el fin de reducir la diferencia entre la referencia de inclinación y la inclinación real.

El efecto del sistema de control de la invención puede verse en la figura 9 que muestra el comportamiento en el tiempo de la velocidad del viento, la potencia de salida de la turbina eólica, la velocidad del rotor, el ángulo de paso, la aceleración longitudinal y la inclinación para una turbina eólica con un sistema de control de la invención. El efecto se compara con una turbina eólica sin tal sistema (figura 5). Las figuras 9 y 5 muestran la reacción de la potencia de salida, la velocidad del rotor, el ángulo de paso, la aceleración longitudinal y la inclinación con respecto a un escalón de viento, es decir un aumento repentino en la velocidad del viento desde 10 hasta 14 m/s. La potencia de salida de la turbina eólica se mantiene constante en ambos casos excepto por un pequeño tambaleo inmediatamente después del escalón de viento. Esta constancia se debe al hecho de que la turbina eólica se hace funcionar en un modo de potencia nominal.

Debido a la oscilación de baja frecuencia de la torre que se introduce por el escalón de viento, la velocidad del rotor experimenta oscilaciones. Aunque estas variaciones se contrarrestan en el sistema de control de la invención mediante la señal de modificación que se suma a la señal de referencia de velocidad, tal como se muestra en la figura 9, no se adoptan medidas en la turbina eólica mostrada en la figura 5. Como consecuencia, con el sistema de control de la invención el error de velocidad, es decir la diferencia entre la señal de velocidad y la señal de referencia de velocidad, se controla para que se vuelva cero bastante rápidamente de modo que se amortiguan las oscilaciones en la velocidad del rotor mientras que sin el sistema de control de la invención se producen oscilaciones estables a largo plazo en la turbina eólica. Al mismo tiempo, la señal de referencia de inclinación, que es una señal de referencia de aceleración 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 del rotor, la señal de error de inclinación, es decir la diferencia entre la referencia de aceleración longitudinal y la aceleración longitudinal real, se controla para que se vuelva cero bastante rápidamente de modo que, como consecuencia, se amortiguan las amplitudes en los ángulos de inclinación. Por otro lado, en la turbina eólica sin el sistema de control de la invención, las oscilaciones estables a largo plazo de la velocidad del rotor también pueden verse en la aceleración 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 la invención mientras que continúan prácticamente sin amortiguar en la turbina eólica sin el sistema de control de la invención. Por tanto, el sistema de control de la invención proporciona una medida adecuada para amortiguar oscilaciones de baja frecuencia, como las que se producen, por ejemplo, en turbinas eólicas con bases flotantes.

5 En sintonía con la realización mostrada en las figuras 1 y 3, la inclinación puede representarse por la aceleración longitudinal de, por ejemplo, la parte superior de la torre. En caso de usar la aceleración longitudinal para representar la inclinación, también puede usarse la aceleración longitudinal en el controlador 113 de paso. Sin embargo, también es posible usar el ángulo de inclinación en lugar de la aceleración longitudinal en la unidad 9 de modificación así como en el controlador 113 de paso. También es posible usar el ángulo de inclinación en una 10 unidad y la aceleración longitudinal en la otra. Sin embargo, en este caso el sistema de control deberá tener cuatro entradas, concretamente una entrada de velocidad del rotor, una entrada de referencia de velocidad, una entrada de aceleración 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 113 de paso.

15

REIVINDICACIONES

1. Método de amortiguación de vibraciones de la torre de una turbina (100) eólica que está equipada con palas de rotor, un controlador (13, 113) de paso y un sistema de accionamiento del paso, ajustando el paso de las palas de rotor, que comprende las etapas de:
 - proporcionar un valor de referencia de velocidad para la velocidad del rotor;
 - proporcionar un valor de velocidad del rotor que representa la velocidad del rotor; y
 - establecer un valor de modificación que representa una modificación que debe hacerse en el valor de referencia de velocidad para tener en cuenta las vibraciones de la torre;
 - usar el valor de modificación para modificar el valor de referencia de velocidad para establecer un valor de referencia de velocidad modificado;
 - determinar un valor de referencia de paso que representa un paso que debe ajustar el sistema de accionamiento del paso basándose en al menos la diferencia entre el valor de referencia de velocidad modificado y el valor de velocidad del rotor;
 - controlar el ángulo de paso de las palas de rotor según el valor de referencia de paso.
2. Método según la reivindicación 1, en el que el valor de modificación es un valor de velocidad de la torre que representa la velocidad de la torre provocada por las vibraciones de la torre y el valor de velocidad de la 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 la torre se calcula a partir de un valor de inclinación que representa la inclinación de la torre provocada por las vibraciones de la torre.
4. Método según la reivindicación 3, en el que se usa un valor de aceleración longitudinal que representa la aceleración de la torre en la dirección del eje del rotor provocada por las vibraciones de la torre para representar la inclinación de la torre.
5. Método según la reivindicación 4, en el que el valor de inclinación se deriva a partir del valor de aceleración longitudinal calculando la derivada de la razón del valor de aceleración longitudinal con respecto a la aceleración de la gravedad.
6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que el valor de velocidad de la torre se establece a partir de una derivada filtrada paso bajo del valor de inclinación.
7. Método según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, 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 del rotor y el valor de referencia de velocidad modificado y determinando la señal de referencia de paso basándose en el valor de diferencia de velocidad.
8. Método según la reivindicación 7, en el que se usa un controlador PID para calcular la señal de referencia de paso a partir del valor de diferencia de velocidad.
9. Método según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, 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 del 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.
10. Método según la reivindicación 9, en el que se usa un controlador PID para calcular el valor de referencia de inclinación a partir del valor de diferencia de velocidad.

11. Método según la reivindicación 9 o la reivindicación 10, en el que se usa un controlador PID para calcular el valor de referencia de paso a partir del valor de diferencia de inclinación.
- 5 12. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en el que el valor de referencia de inclinación se fija a un valor dado.
13. Método según la reivindicación 12, en el que el valor dado depende del viento.
- 10 14. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, en el que el método se desactiva a velocidades de viento muy altas.
15. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, 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.
- 15 16. Sistema de control para su uso en una turbina (100) eólica con palas de rotor y un sistema de accionamiento del paso, comprendiendo el sistema de control:
- 20 - una unidad (13, 113) de control de paso que está diseñada para establecer una señal de referencia de paso que representa un paso que debe ajustar el sistema de accionamiento del paso;
- una entrada (1) de velocidad del rotor diseñada para recibir una señal de velocidad del rotor que representa la velocidad del rotor;
- 25 - una entrada (3) de referencia de velocidad diseñada para recibir una señal de referencia de velocidad para la velocidad del rotor;
- una entrada (5) de señal de inclinación diseñada para recibir una señal que representa una inclinación de la torre;
- 30 - una salida (7) de referencia de paso diseñada para emitir la señal de referencia de paso;
- caracterizado por
- 35 - una unidad (9) de modificación que está conectada a la entrada (3) 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 la unidad (9) de modificación 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;
- 40 - una primera unidad (11) de resta que está conectada a la unidad (9) de modificación para recibir la señal de referencia de velocidad modificada y a la entrada (1) de velocidad del rotor para recibir la señal de velocidad del rotor, estando la primera unidad (11) de resta diseñada para establecer una señal de diferencia de velocidad que representa la diferencia entre la señal de velocidad del rotor y la señal de referencia de velocidad modificada; y
- 45 - porque la unidad (13, 113) de control de paso está conectada a la primera unidad (11) de resta para recibir la señal de diferencia de velocidad y diseñada para establecer el valor de referencia de paso al menos basándose en la señal de diferencia de velocidad.
- 50 17. Sistema de control según la reivindicación 16, caracterizado porque la unidad (9) de modificación está diseñada para establecer como señal de modificación una señal de velocidad de la 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 la torre, y para emitir la señal de referencia de velocidad modificada.
- 55 18. Sistema de control según la reivindicación 17, caracterizado porque
- la unidad (9) de modificación comprende un diferenciador (21) para diferenciar la señal que representa una inclinación de la torre; y
- 60 - la unidad de modificación está diseñada para establecer la señal de velocidad de la torre basándose en la señal diferenciada.
19. Sistema de control según la reivindicación 18, caracterizado porque
- 65 - la unidad (9) de modificación comprende un filtro (23) paso bajo que está conectado al diferenciador (21) para recibir la señal diferenciada y diseñado para emitir una señal diferenciada filtrada.

20. Sistema de control según la reivindicación 19, caracterizado porque
- 5 - la unidad (9) de modificación comprende un amplificador (25) que está conectado al filtro (23) paso bajo para recibir la señal diferenciada filtrada y diseñado para emitir una señal diferenciada filtrada amplificada.
21. Sistema de control según la reivindicación 19, caracterizado porque
- 10 - la unidad (9) de modificación comprende un limitador (27) que está conectado al amplificador (25) para recibir la señal diferenciada filtrada amplificada y diseñado para llevar la señal diferenciada filtrada amplificada a saturación si se alcanza un margen dado de la señal diferenciada filtrada amplificada y para emitir una señal diferenciada filtrada amplificada saturada.
22. Sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 18 a 21, caracterizado porque la unidad de modificación comprende (9) un sumador (29) que está conectado a la entrada (3) de referencia de velocidad para recibir la señal de referencia de velocidad y diseñado para sumar la señal de velocidad de la torre a la señal de referencia de velocidad para establecer la señal de referencia de velocidad modificada.
- 15 23. Sistema de control según una cualquiera de las reivindicaciones 16 a 22, caracterizado porque la unidad (13) de control de paso es un controlador PID.
- 20 24. Sistema de control según una cualquiera de las reivindicaciones 16 a 23, caracterizado
- 25 - porque la unidad (113) de control de paso comprende un controlador (15) de velocidad, una segunda unidad (19) de resta y un controlador (17) de inclinación;
- 30 - porque el controlador (15) de velocidad está conectado a la primera unidad (11) de resta para recibir la señal de diferencia de velocidad y diseñado para establecer y para emitir una señal de referencia de inclinación basándose en la señal de diferencia de velocidad recibida,
- 35 - porque la segunda unidad (19) de resta 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 resta 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
- 40 - porque el controlador (17) de inclinación está conectado a la segunda unidad (19) de resta 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.
25. Sistema de control según la reivindicación 24, caracterizado porque el controlador (15) de velocidad es un controlador PID.
- 45 26. Sistema de control según la reivindicación 24 o la reivindicación 25, caracterizado porque el controlador (17) de inclinación es un controlador PID.

FIG 1

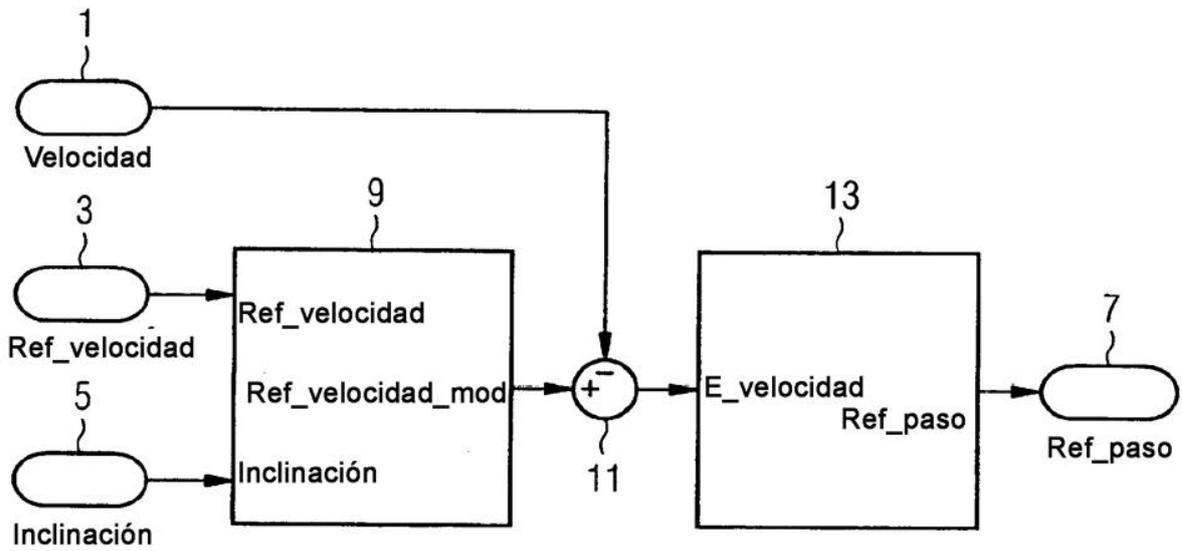


FIG 2

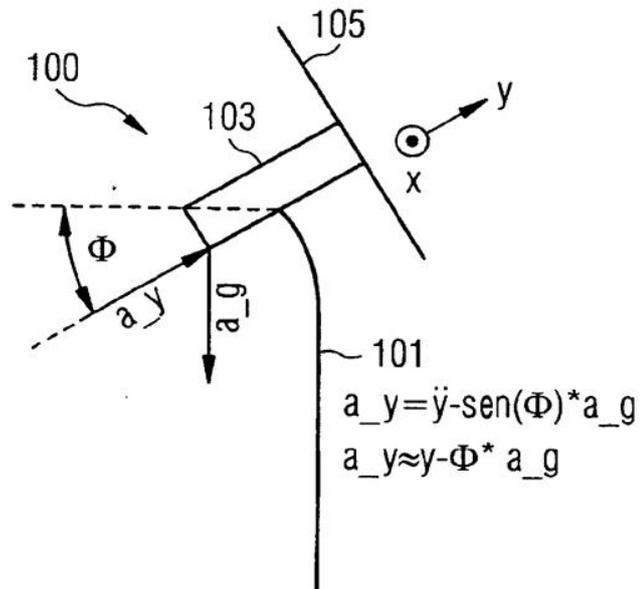


FIG 3

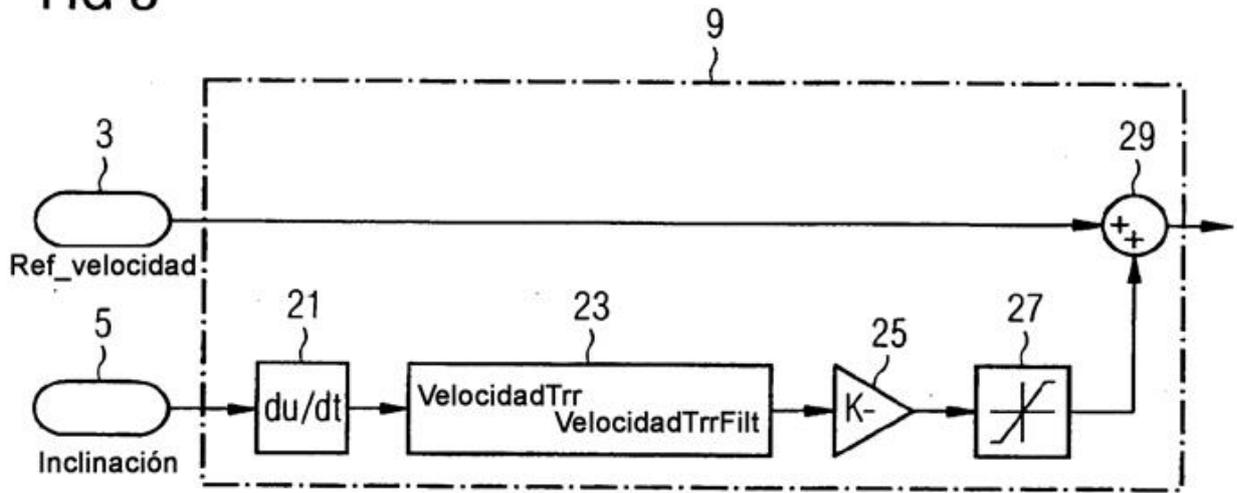


FIG 8

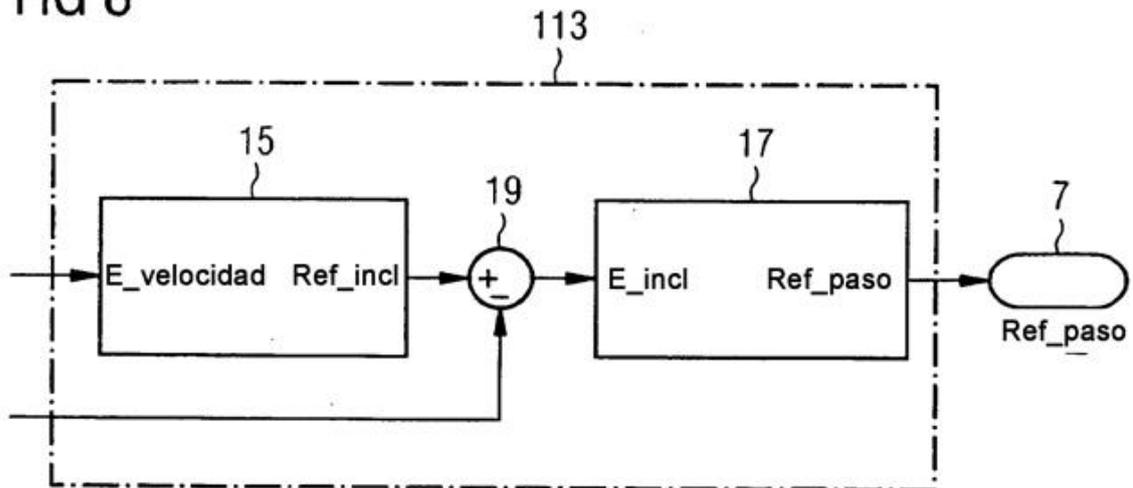


FIG 4

Torre flexible con escalón de viento

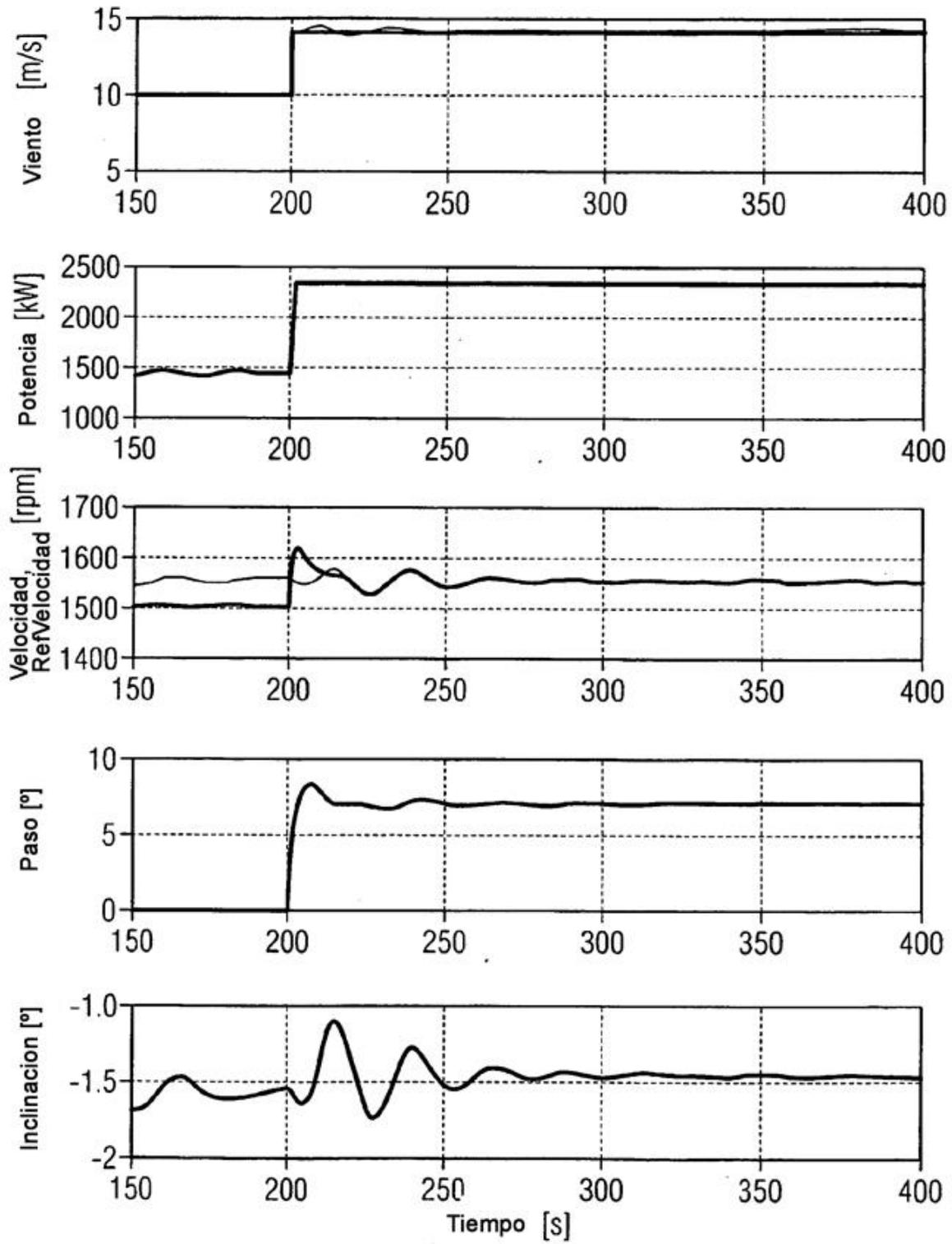
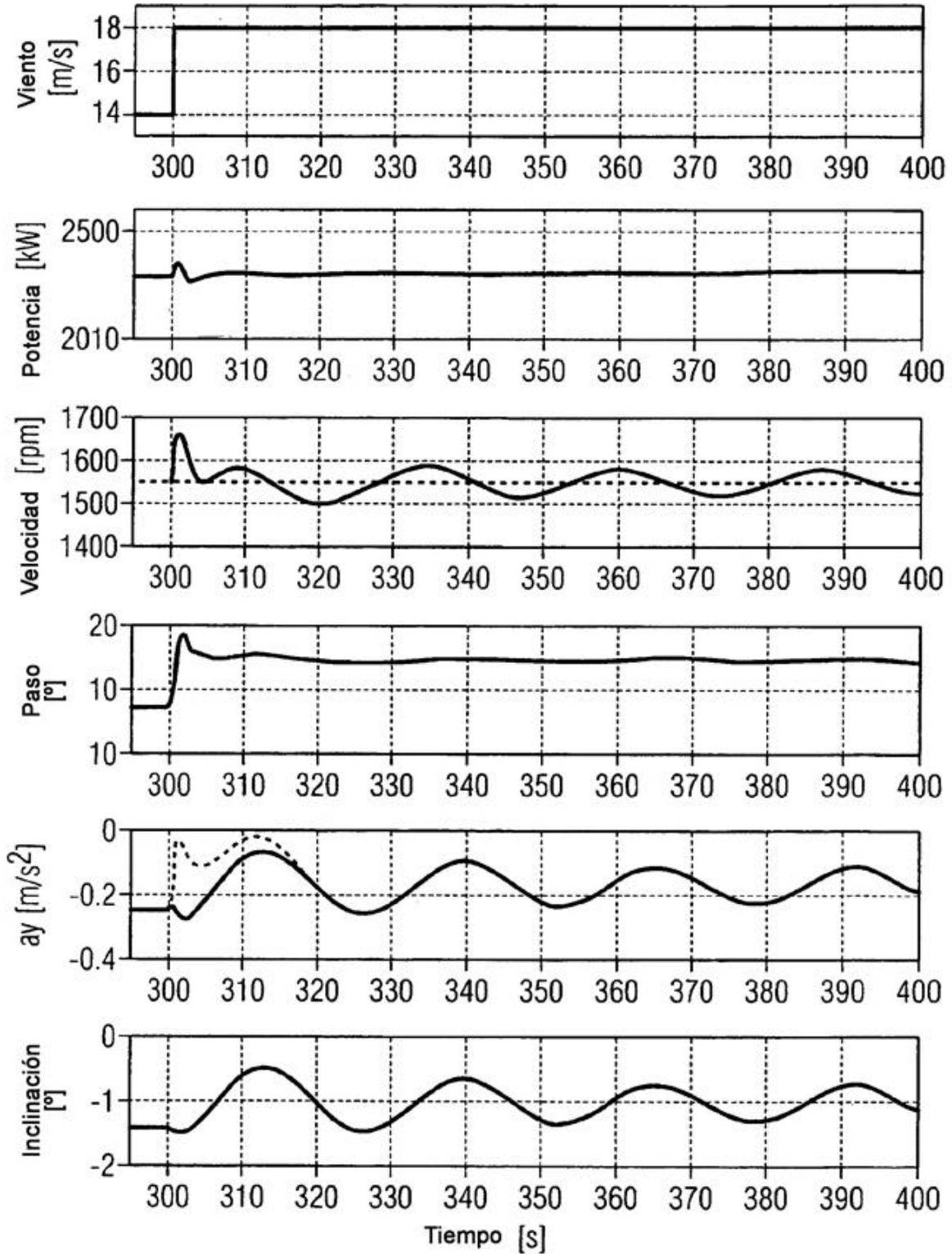


FIG 5



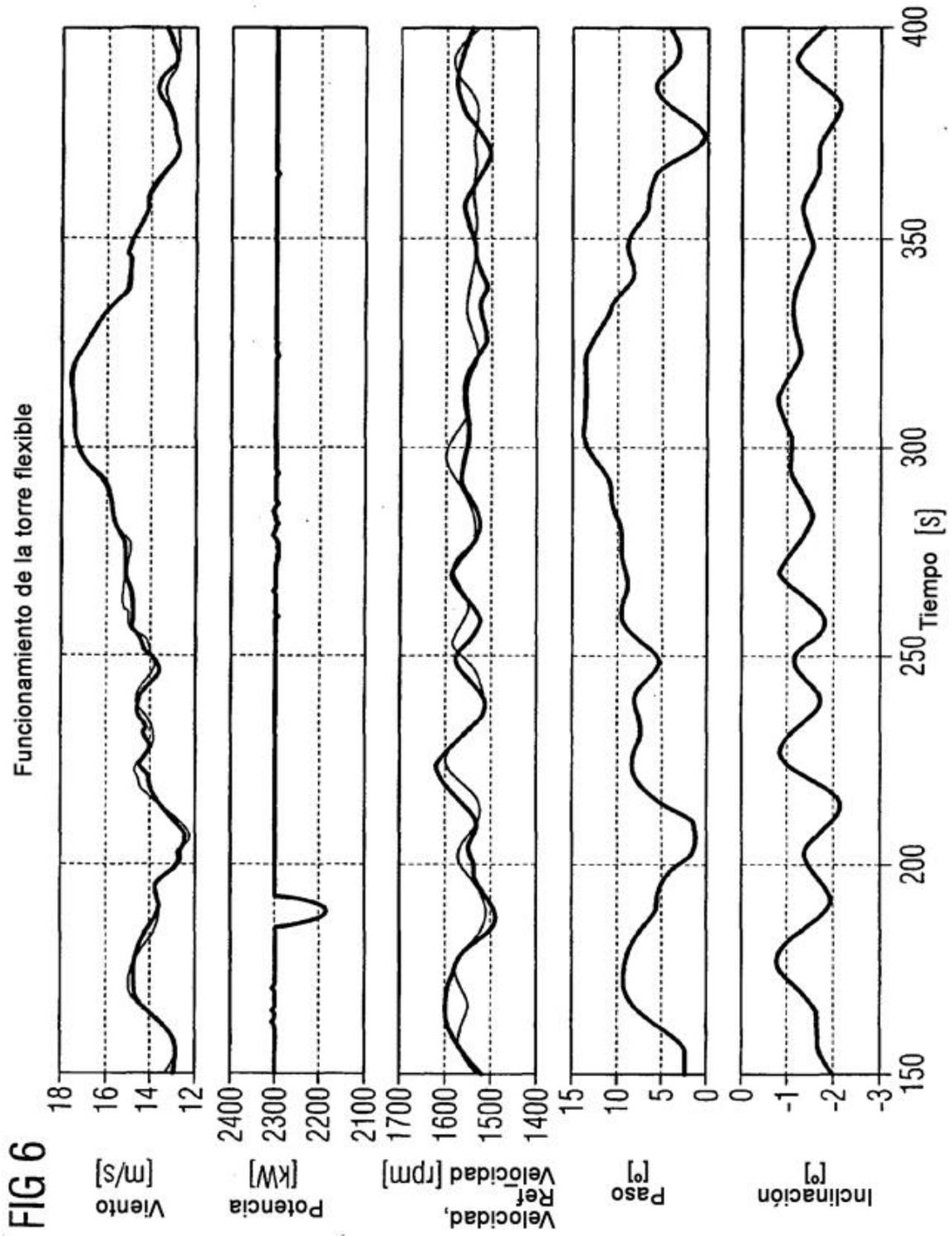


FIG 7

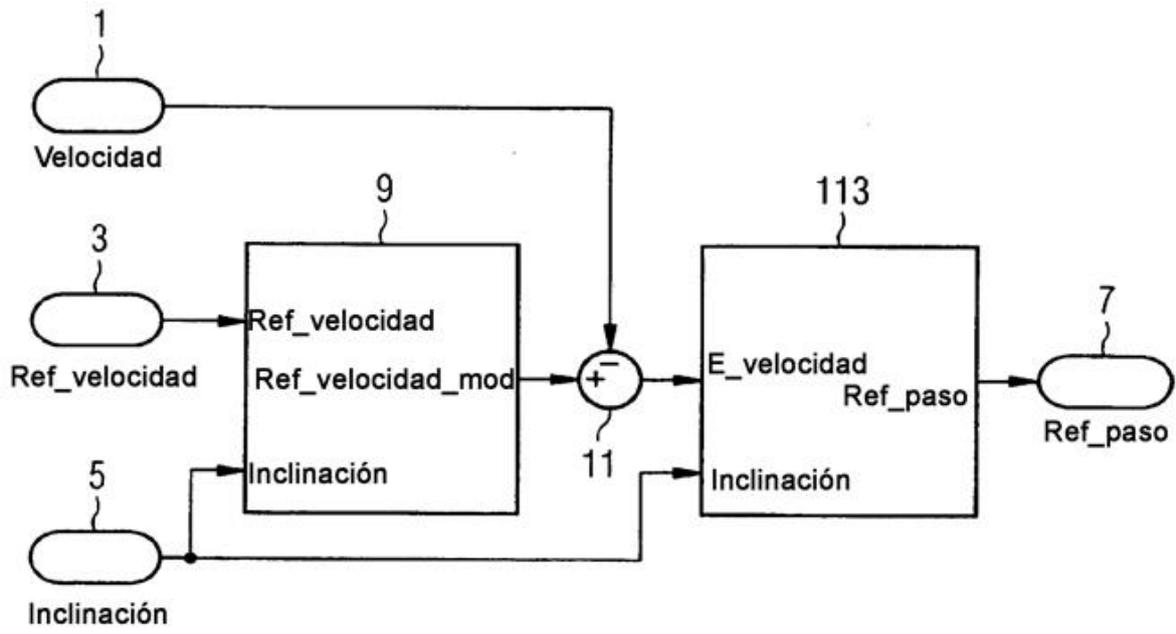


FIG 9

