

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 870 074**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.03.2017 PCT/DK2017/050093**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.10.2017 WO17167343**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.03.2017 E 17715902 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.05.2021 EP 3436693**

54 Título: **Control de una turbina eólica usando cálculo de ganancia en tiempo real**

30 Prioridad:

30.03.2016 DK 201670175

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

26.10.2021

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

GRUNNET, JACOB DELEURAN;

KRÜGER, THOMAS;

ZAIB, ALI y

THOMSEN, JESPER SANDBERG

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 870 074 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

Control de una turbina eólica usando cálculo de ganancia en tiempo real

Campo técnico

La invención se refiere a un método para controlar un mecanismo o un sistema de accionamiento de una turbina eólica, a un sistema de control asociado y también a una turbina eólica equipada con un sistema de control de este tipo.

Antecedentes de la invención

Las turbinas eólicas modernas a escala de empresa de servicios públicos están diseñadas para funcionar en un amplio intervalo de condiciones de viento con el fin de maximizar la extracción de energía a partir del viento. Para alcanzar este objetivo, las turbinas eólicas están equipadas habitualmente con palas cuyo ángulo de paso puede controlarse mediante un sistema de control de paso de pala. El paso de pala se controla haciendo rotar cada pala alrededor de su eje longitudinal, lo que cambia su ángulo de ataque con respecto al flujo de viento incidente.

El control de paso es el principal mecanismo de control por encima de la velocidad de régimen del viento, en el que una turbina eólica tenderá a funcionar con una estrategia de plena carga en la que el objetivo es mantener una salida de potencia constante. Esto puede lograrse controlando el ángulo de paso de pala para garantizar que el par motor generado por el rotor no aumente más allá de límites permisibles, por ejemplo según se determine mediante un punto de consigna de referencia de potencia.

El control de paso de pala puede aplicarse colectiva e individualmente. Por ejemplo, una componente colectiva es un ajuste de paso en el que los ángulos de paso de todas las palas se cambian simultáneamente, y es la principal acción de control para ajustar el par motor producido por el rotor. En cambio, una componente de paso individual puede ajustar el paso de unas seleccionadas de las palas independientemente unas de otras y puede usarse para equilibrar cargas ejercidas sobre el árbol de rotor.

La configuración del sistema de control de paso, en particular las ganancias de bucle de los diversos controladores implementados en el sistema de control, se determina en gran medida mediante la envolvente de funcionamiento de la turbina eólica. Normalmente, se lleva a cabo un modelado durante la fase de diseño para determinar las ganancias que se requieren para garantizar que el sistema de control de paso pueda lograr sus objetivos de control deseados sustancialmente en toda la envolvente de funcionamiento predicha de la turbina eólica. Sin embargo, este enfoque tiene limitaciones porque las ganancias de bucle sólo se simulan para puntos seleccionados de la envolvente de funcionamiento de la turbina eólica. Esto puede reducir la capacidad del sistema de controlar las cargas de rotor durante condiciones de funcionamiento más inusuales o extremas.

El artículo "Augmented adaptive control of a wind turbine in the presence de structural modes" de Frost *et al*, American Control Conference (ACC), 2010, IEEE, Piscataway, NJ, EE.UU., 30 de junio de 2010, páginas 2760-2765, facilita un ejemplo de un controlador adaptativo para una turbina eólica.

Las realizaciones de la invención se han ideado en el contexto de estos antecedentes.

Sumario de la invención

Según un primer aspecto de la invención, se proporciona un sistema de control de turbina eólica que comprende al menos un módulo de control configurado para emitir una señal de control para un mecanismo de control de una turbina eólica, una calculadora de ganancia para calcular un parámetro de ganancia asociado con el módulo de control, y un modelo de pala en tiempo real informatizado que usa un punto de funcionamiento de turbina eólica determinado como entrada, comprendiendo el modelo de pala en tiempo real informatizado: un módulo de estimación de velocidad del viento dispuesto para determinar un valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado, y un módulo de calculadora de sensibilidad aerodinámica dispuesto para determinar un valor de sensibilidad aerodinámica basándose en el valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado y el punto de funcionamiento de turbina eólica determinado; en el que el parámetro de ganancia se calcula basándose en el valor de sensibilidad aerodinámica.

El modelo de pala puede ser un modelo de impulso de elemento de pala.

En otro aspecto, la invención puede expresarse como un método de control de un mecanismo de control de una turbina eólica, comprendiendo el método determinar al menos un parámetro de ganancia, en el que el parámetro de ganancia se basa en una salida de un modelo de pala en tiempo real informatizado usando al menos un punto de funcionamiento de turbina eólica medido como entrada; y determinar una señal de control para el mecanismo de control basándose en el al menos un parámetro de ganancia determinado.

También puede considerarse que la invención reside en: una turbina eólica que incorpora un sistema de control tal como se definió anteriormente; un controlador que comprende un procesador, un módulo de memoria y un sistema de entrada/salida, y en el que la memoria incluye un conjunto de instrucciones de código de programa que, cuando

se ejecutan mediante el procesador, implementan un método tal como se definió anteriormente; y un producto de programa informático que puede descargarse desde una red de comunicación y/o está almacenado en un medio legible por máquina, que comprende instrucciones de código de programa para implementar un método tal como se definió anteriormente.

5 En una implementación, el parámetro de ganancia es parte de un módulo de control de realimentación, y el parámetro de ganancia es un término de control de una ley de control implementada en el módulo de control de realimentación. Aunque puede calcularse un único parámetro de ganancia, la invención también puede aplicarse a una implementación que incluye una pluralidad de módulos de ganancia asociados con uno o más módulos de control.

10 Ventajosamente, la invención proporciona un sistema de control más flexible y que responde mejor que puede adaptarse a condiciones de viento cambiantes aunque esas condiciones de viento superen lo que se predice habitualmente. Dado que los parámetros de ganancia de controlador se calculan en tiempo real, y se basan en características de una pala modelada, puede realizarse un ajuste fino de la manera en la que las palas responden a cambios de las variables de control (por ejemplo, ángulo de paso de pala) para tener en cuenta la severidad de las condiciones de viento.

Los o cada uno de los parámetros de ganancia pueden basarse en un valor de sensibilidad aerodinámica respectivo calculado mediante el modelo de pala en tiempo real informatizado, en el que ese valor de sensibilidad es indicativo de la sensibilidad de una respuesta de fuerza a un cambio de una variable de control. En una implementación de este tipo, el valor de sensibilidad es uno o más del grupo de:

20 una sensibilidad de paso con respecto a empuje que proporciona una indicación de la sensibilidad de fuerza de empuje a lo largo de un eje de rotor generada por las palas dependiendo de un cambio de ángulo de paso de pala;

una sensibilidad de paso con respecto a par motor que proporciona una indicación de la sensibilidad de par motor de rotor dependiendo de un cambio de ángulo de paso de pala;

25 una sensibilidad de paso con respecto a carga de flap que proporciona una indicación de la sensibilidad de una carga de flap de pala en respuesta a un cambio del ángulo de paso; y

una sensibilidad de paso con respecto a momento de flexión en el sentido de la cuerda que proporciona una indicación de la sensibilidad del momento de flexión en el sentido de la cuerda en respuesta a un cambio del ángulo de paso.

30 En las realizaciones definidas anteriormente, el valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado puede ser la velocidad del viento del área barrida plana de las palas en rotación de la turbina eólica. El valor de velocidad del viento estimado puede calcularse dependiendo de una diferencia entre un valor de potencia generada real y un valor de potencia generada estimada. Además, el valor de potencia generada estimada puede obtenerse a partir del modelo de pala en tiempo real informatizado.

35 En un control de turbina eólica general, el punto de funcionamiento deseado de la turbina eólica se selecciona basándose en el campo de viento experimentado por el rotor de la turbina eólica. El punto de funcionamiento se define como un punto en un espacio de parámetros multidimensional que abarca dos o más de los parámetros velocidad de generador, ángulo de paso, potencia eléctrica, par motor eléctrico, velocidad del viento, así como parámetros adicionales usados para controlar la turbina eólica. En una realización, el punto de funcionamiento de las turbinas eólicas se selecciona basándose en el campo de viento estimado/experimentado del rotor.

40 **Breve descripción de los dibujos**

Para que la invención se entienda más completamente, ahora se describirá a modo de ejemplo sólo con referencia a los siguientes dibujos, en los que:

la figura 1 es una vista de una turbina eólica que tiene un sistema de control de paso;

45 la figura 2 es un diagrama de bloques funcional que muestra el sistema de control de paso de la turbina eólica con más detalle;

la figura 3 es un diagrama de bloques funcional que muestra una parte del sistema de control de paso en la figura 2 con más detalle;

la figura 4 es un diagrama de bloques funcional que muestra otra parte del sistema de control de paso en la figura 2 con más detalle;

50 la figura 5 es un diagrama de bloques funcional de un estimador de viento, tal como se muestra en la figura 3.

Descripción detallada de realizaciones de la invención

Con referencia inicialmente a la figura 1, una turbina eólica 10 comprende una torre 12 que soporta una góndola 14 en la que está montado un rotor 16. El rotor 16 comprende un conjunto de palas 18 que están acopladas a un buje 20. La turbina eólica 10 en este ejemplo es una turbina eólica de eje horizontal (HAWT) que incluye tres palas. Sin embargo, el experto estará al tanto de configuraciones alternativas.

Como es habitual en diseños de turbina eólica que están configurados para un funcionamiento a velocidad variable, la turbina eólica 10 está equipada con un sistema de control de paso 22 a través del cual pueden controlarse las palas 18 de modo que pueden ajustarse angularmente alrededor de su eje longitudinal. Esto puede lograrse por medio de un controlador de paso 24 que puede hacerse funcionar para ordenar que un conjunto de accionadores de paso 26 se coloquen en posiciones de paso respectivas.

En la figura 2 se ilustra con más detalle una implementación del sistema de control de paso de pala 22. En resumen, el controlador de paso de pala 24 incluye una pluralidad de módulos de control de paso 30a-d que pueden hacerse funcionar, colectivamente, para proporcionar tres señales de control de paso a respectivos accionadores de paso 32a-c. Más específicamente, el paso de una primera pala se establece mediante un primer accionador de paso 32a en respuesta a una primera señal de control de paso P_A , el paso de una segunda pala se establece mediante un segundo accionador de paso 32b en respuesta a una segunda señal de control de paso P_B , y el paso de una tercera pala se establece mediante un tercer accionador de control de paso 30c en respuesta a una tercera señal de control de paso P_C .

Los tres accionadores de paso 32a-c se muestran en este caso como una única unidad pero se apreciará que en la práctica los accionadores de paso serán específicos para cada una de las palas 18.

En esta realización, cada uno de los módulos de control de paso 30a-d implementa una ley de control adecuada que está configurada para controlar una variable de procedimiento (por ejemplo, una posición de paso medida) de modo que satisface una variable de referencia o de control (por ejemplo, una posición de paso objetivo). Una ley de control de este tipo puede ser una ley de control basada en PID, pero puede ser una ley de control simplificada si las circunstancias lo permiten.

En la figura 2, el controlador de paso se ilustra como entidad independiente, sin embargo, en general, la funcionalidad del controlador de paso puede implementarse como un elemento funcional de un controlador general o principal de la turbina eólica.

Los cuatro módulos de control de paso 30a-d trabajan conjuntamente para proporcionar entradas de señal de paso compuesta que se combinan para formar las señales de control de paso individuales P_A - P_C . Por tanto, cada uno de los módulos de control 30a-30d proporciona una señal de paso respectiva que es una parte componente de las señales de paso finales P_A - P_C para cada una de las palas.

En resumen, los cuatro módulos de control de paso 30a-30d son: el módulo de control de empuje 30a, el módulo de control de velocidad 30b, el módulo de control de paso individual (IPC) 30c y el módulo de control de amortiguación de torre de lado a lado (SSTD) 30d.

El módulo de control de empuje 30a es responsable de regular el empuje axial generado sobre el rotor. La fuerza de empuje tiende a inclinar la góndola y, por tanto, aplica momentos de flexión sobre la torre de la turbina eólica, lo que es deseable controlar dentro de un límite aceptable.

El módulo de control de velocidad 30b es responsable de controlar el par motor generado por el rotor para que sea igual a un valor de par motor solicitado o de referencia. Este valor de referencia puede establecerse mediante un controlador de velocidad/potencia de nivel superior de la turbina eólica.

El módulo de control de IPC 30c es responsable de controlar el paso individual de las palas con el fin de satisfacer unos límites de carga de flap predeterminados para cada una de las palas. Tales componentes de señal de control pueden ser de naturaleza cíclica para controlar las cargas de flap dentro de límites aceptables ya que las cargas sobre cada una de las palas varían a medida que rota el rotor, por ejemplo en respuesta a ráfagas de viento a diferentes alturas en el disco de rotor.

El módulo de control de SSTD 30d es responsable de proporcionar amortiguación para el movimiento lateral de la góndola, es decir transversalmente con respecto al eje de rotor. Lo hace proporcionando ajustes de paso cíclicos con respecto a cada pala para regular la fuerza horizontal que actúa sobre el rotor y, por tanto, la estructura de soporte de la turbina eólica.

Las señales de salida del módulo de control de empuje 30a y el módulo de control de velocidad 30b, denominadas en este caso P_1 y P_2 , respectivamente, se combinan para dar una única señal de control de paso colectiva P_{COL} . Esa señal se divide luego en tres componentes y se introduce en respectivas conexiones sumadoras 34a-c. Las señales de paso de pala colectivas P_{COL} se combinan luego con señales de control de paso de pala individuales que se emiten mediante el módulo de control de IPC 30c y el módulo de control de SSTD 30d, tal como se describirá.

- El módulo de control de IPC 30c y el módulo de control de SSTD 30d emiten cada uno tres señales de control de paso, mostradas en este caso como P3-P5 y P6-P8, respectivamente. Dado que el módulo de control de IPC 30c y el módulo de control de SSTD 30d emiten señales de control que son específicas para una de cada una de las palas, se combinan pares de las señales de control en respectivas conexiones sumadoras 36a-c. Más específicamente, las señales de control P3 y P6 se combinan en la conexión sumadora 36a para dar como resultado la señal de control P10, que está asociada con el accionador de control de paso 32a; las señales de control P4 y P7 se combinan en la conexión sumadora 36b para dar como resultado la señal de control P11 y está asociada con el accionador de paso 32b; y las señales de control P5 y P8 se combinan en la conexión sumadora 36c para dar como resultado la señal de control P12 y está asociada con el accionador de paso 32c.
- Finalmente, las señales de control de paso específicas de pala P10-P12 se combinan con las señales de paso colectivas P_{COL} en las conexiones sumadoras 34a-c y se emiten como señales de paso de pala P_A , P_B y P_C , respectivamente.
- Debe apreciarse en este momento que, aunque en este caso se proporcionan cuatro módulos de control de paso, un sistema alternativo y en cierto modo simplificado puede incluir menos módulos de control. Por ejemplo, si puede lograrse un control de paso suficiente controlando la velocidad de la turbina eólica, puede que sólo sea necesario uno de los módulos de control. Sin embargo, en términos realistas, las metodologías de control de paso presentan normalmente un elemento de control de paso colectivo y un elemento de control de paso individual, particularmente en sistemas de turbinas eólicas a escala comercial.
- Cada uno de los módulos de control 30a-30d puede incluir al menos un valor de ganancia de controlador. En enfoques de control conocidos, los valores de ganancia de controlador se optimizarán antes de o durante la instalación de la turbina eólica. Alternativamente, se conoce cambiar valores de ganancia de controlador basándose en una planificación preestablecida dependiendo de la condición de funcionamiento (velocidad del viento, potencia de generador, velocidad de rotor) bajo la cual está funcionando la turbina eólica. Tales planificaciones de ganancia se determinan en un entorno fuera de línea y se configuran para actualizar los valores de ganancia del uno o más módulos de control una vez que se alcanzan puntos de funcionamiento predeterminados de la turbina eólica.
- En la realización ilustrada de la invención, los valores de ganancia de controlador son variables dependiendo de un modelo de impulso de elemento de pala (BEM) informatizado en línea o "en tiempo real" 50. El modelo de BEM se ejecuta en tiempo real y emite diversos parámetros de sensibilidad aerodinámica a los módulos de control de pala 30a-d. A su vez, los módulos de control de pala 30a-d pueden hacerse funcionar para calcular valores de ganancia actualizados que se implementan en la ley de control en los mismos.
- En resumen, el modelo de BEM 50 se implementa como un algoritmo que recibe entradas de datos de funcionamiento desde fuentes adecuadas, tal como se describirá, y que puede hacerse funcionar para emitir:
- una señal de sensibilidad de paso con respecto a empuje 52 que proporciona una indicación de la sensibilidad del empuje (a lo largo del eje de rotor) generado por las palas dependiendo de un cambio de ángulo de paso;
 - una señal de sensibilidad de paso con respecto a par motor 54 que proporciona una indicación de la sensibilidad de par motor de rotor dependiendo de un cambio de ángulo de paso;
 - una señal de sensibilidad de paso con respecto a momento de flexión de carga de flap 56 que proporciona una indicación de la sensibilidad de carga de flap de pala en respuesta a un cambio del ángulo de paso;
 - una señal de sensibilidad de paso con respecto a momento de flexión en el sentido de la cuerda 58 que proporciona una indicación de la sensibilidad del momento de flexión en el sentido de la cuerda en respuesta a un cambio del ángulo de paso.
- Con el fin de derivar las señales de sensibilidad aerodinámica 52-58 mencionadas anteriormente, el modelo de BEM 50 recibe las siguientes entradas: una señal de potencia de generador 60, una señal de velocidad de rotor 62, señales de ángulo de paso de pala medido 64; y una señal de densidad del aire 66. Estas señales pueden obtenerse a partir de sistemas de detección apropiados asociados con la turbina eólica, y o bien transmitirse directamente al controlador o bien extraerse de un bus de datos de sistema, por ejemplo.
- Ahora se hará referencia también a la figura 3, que ilustra una posible implementación estructural del modelo de BEM 50.
- El módulo de BEM 50 incluye un módulo de calculadora de sensibilidad aerodinámica 70 que implementa un modelo de impulso de elemento de pala, y también un módulo de estimación de viento 72. Tal como conocerá el experto, un modelo de BEM es una combinación de la teoría del elemento de pala y la teoría del impulso que se usan para analizar el rendimiento de un rotor de turbina eólica. En el presente documento no se proporcionará una descripción completa, puesto que los ingenieros que trabajan en el campo del diseño de palas de turbina eólica entenderán bien las teorías y, además, están documentadas en libros de texto contemporáneos, por ejemplo *Aerodynamics of Wind Turbines*, de M. Hansen: n.º ISBN 978-1-84407-438-9, y *Wind Energy Handbook*, de T. Burton: n.º ISBN 978-0-470-69975-1.

El módulo de calculadora de sensibilidad aerodinámica 70 implementa cálculos de carga de pala basándose en los coeficientes de sustentación y arrastre de las palas 18, que serán valores predeterminados basándose en el diseño de las palas 18. Los cálculos se basan en el punto de funcionamiento de la turbina eólica, que puede definirse mediante la señal de velocidad de rotor 62, las señales de ángulo de paso de pala medido 64; y la señal de densidad del aire 66. Además de estas señales, el módulo de cálculo de sensibilidad aerodinámica 70 también recibe una señal indicativa de la velocidad del viento estimada a través del área de rotor que se determina mediante el módulo de estimación de velocidad del viento 72.

El módulo de estimación de velocidad del viento 72 proporciona un valor de la velocidad del viento estimada en el, o en las inmediaciones muy próximas al, plano de rotor definido por las palas 18 de la turbina eólica. Este valor no puede medirse mediante un sensor de velocidad del viento convencional, que se montaría habitualmente en la góndola de la turbina eólica. Sin embargo, es importante observar que la "velocidad del viento libre", tal como se mide mediante técnicas de medición y estimación de la velocidad del viento convencionales tales como anemómetros y sensores LIDAR (dirección y medición de distancia por luz), no es un parámetro apropiado para su uso en los cálculos de modelo de pala en línea comentados en el presente documento. Los siguientes comentarios dejarán esto claro.

Para poder calcular las fuerzas generadas a lo largo de una pala, es necesario conocer la velocidad del viento relativa (V_{rel}) y el ángulo de ataque de la pala. Tal como entenderá el experto, la velocidad del viento relativa depende de dos parámetros principales: la velocidad del viento en el plano de rotor (V_a) y la velocidad del viento inducida por la rotación del rotor (V_{rot}). La teoría del impulso, tal como la entienden los expertos en la técnica, indica que la velocidad del viento libre (V_o) y la velocidad del viento en el plano de rotor (V_a) están relacionadas a través de la inducción axial (a) del rotor. La inducción axial depende de la velocidad del viento en el plano de rotor (V_a), el ángulo de paso de las palas y la velocidad de rotor. Más específicamente, puede considerarse que la expresión es $V_a = (1-a)V_o$. El cálculo de la velocidad del viento en el plano de rotor basándose en la teoría anterior es computacionalmente intensivo y es inadecuado para una implementación en tiempo real en un entorno de control de máquina crítico.

Sin embargo, en esta realización, el módulo de estimación de velocidad del viento 72 calcula la velocidad del viento en el plano de rotor estimada (V_{EST}) basándose en una comparación de la potencia aerodinámica predicha (P_{BEM}), parámetro que recibe como entrada desde el módulo de cálculo de sensibilidad aerodinámica 70, y la potencia generada real (P_{GEN}) que recibe como entrada directa. Así, se evita la necesidad de llevar a cabo cálculos en tiempo real computacionalmente intensivos, mientras que todavía se logra una estimación exacta de la velocidad del viento en el plano del rotor, es decir la velocidad del viento cuando pasa a través del área barrida plana definida por las palas del rotor a medida que rotan.

En la figura 5 se muestra una implementación del módulo de estimación de velocidad del viento 72. En esta implementación, el valor estimado de la velocidad del viento en el disco de rotor se calcula basándose en la diferencia entre la potencia generada real de la turbina eólica generada y la potencia generada estimada, según la estima el módulo de calculadora de carga de pala.

En la figura 5 se muestra una implementación del módulo de estimación de velocidad del viento 72. En esta implementación, el valor estimado de la velocidad del viento en el disco de rotor se calcula basándose en la diferencia entre la potencia generada real de la turbina eólica y la potencia aerodinámica generada estimada, según la estima el módulo de cálculo de sensibilidad aerodinámica 70. Tal como se apreciará a partir de los siguientes comentarios, este enfoque para calcular la velocidad del viento en el rotor es menos intensivo computacionalmente que un enfoque de estimación basado únicamente en la teoría del impulso, que implica cálculos iterativos en tiempo real del factor de inducción axial del rotor.

En la figura 5, una señal de error de potencia P_{ER} se determina en una conexión sumadora 73 restando una señal de potencia de red eléctrica estimada P_{GEST} a partir de la señal de potencia de red eléctrica medida P_{GEN} . Sin embargo, la señal P_{GEST} no es una entrada directa, sino que se calcula basándose en la señal de potencia aerodinámica P_{BEM} , tal como la proporciona el módulo de cálculo de sensibilidad aerodinámica 70. Más específicamente, la señal de potencia aerodinámica P_{BEM} se alimenta a una calculadora de pérdidas 74 que calcula las pérdidas mecánicas asociadas con el tren de accionamiento de turbina eólica y las pérdidas eléctricas asociadas con el equipo de convertidor de turbina eólica para proporcionar de ese modo una señal de pérdida de potencia $P_{PÉRD}$. La señal de pérdida de potencia $P_{PÉRD}$ se resta entonces a partir de la señal de potencia aerodinámica P_{BEM} en la conexión sumadora 75 para dar como resultado la señal de potencia de red eléctrica estimada P_{GEST} .

Basándose en la señal de error de potencia P_{ER} , se determina una señal de corrección P_{CORR} haciendo pasar la señal de error de potencia P_{ER} a través de un módulo de ganancia 75. La señal de corrección P_{CORR} se suma a la señal de estimación de viento en el plano de rotor V_{EST} de la muestra anterior (alimentada a través de un retardo unitario 76) y la señal V_{EST_0} resultante se suministra a un módulo de limitación de estabilidad 77. La función del módulo de limitación de estabilidad 77 es, en efecto, validar las correcciones que se están realizando a la señal V_{EST_0} entrante. Para hacer esto, el módulo de limitación de estabilidad 77 también recibe como entradas una señal de ángulo de paso 64 y una señal de velocidad de rotor 62. Usando estas dos señales, el módulo de limitación de estabilidad 77 determina unos límites superior e inferior válidos de velocidad del viento en el rotor y garantiza que la

señal de velocidad del viento en el rotor $V_{EST,0}$ entrante está dentro de esos límites. El módulo de limitación de estabilidad 77 puede implementar esta funcionalidad de diversas maneras que entenderá el experto. Como ejemplo, una implementación puede basarse en una tabla de consulta que correlaciona valores de velocidad de rotor superior e inferior aceptables y puntos de funcionamiento específicos basándose en el ángulo de paso y la velocidad de rotor.

- 5 A partir de los comentarios anteriores, debe apreciarse que el módulo de estimación de viento 72 no requiere cálculos computacionalmente pesados basándose en modelos de pala, sino que en su lugar basa la velocidad del viento en el rotor estimada en la convergencia entre la potencia medida que entrega la turbina eólica y la potencia estimada que se determina mediante el modelo de pala implementado en el módulo de cálculo de sensibilidad aerodinámica 70.
- 10 Volviendo a la figura 3, las señales de entrada 62, 64, 66 y V_{EST} recibidas por el módulo de cálculo de sensibilidad aerodinámica 70 le proporcionan información relacionada con el punto de funcionamiento actual de la turbina eólica; es decir, el paso de pala, la velocidad del viento en el rotor, la velocidad de rotor y la densidad del aire actuales. Basándose en esta definición del punto de funcionamiento actual, el módulo de calculadora de sensibilidad aerodinámica 70 puede calcular diversas sensibilidades aerodinámicas.
- 15 Por ejemplo, la sensibilidad de empuje de rotor con respecto a cambios de ángulo de paso puede determinarse mediante (por ejemplo, una estimación de orden 0):

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} \approx 3 \frac{F_y(\Delta\theta + \theta_0, V_0, \Omega_0) - F_y(\theta_0 - \Delta\theta, V_0, \Omega_0)}{2\Delta\theta} \quad (1)$$

La derivación anterior se refiere a la señal de sensibilidad de paso con respecto a empuje 52 tal como se mencionó anteriormente.

- 20 Un ejemplo adicional es la sensibilidad del momento de flexión de carga de flap de pala con respecto a cambios de ángulo de paso, que puede detectarse mediante:

$$\frac{\partial M_x}{\partial \theta} \approx 3 \frac{M_x(\Delta\theta + \theta_0, V_0, \Omega_0) - M_x(\theta_0 - \Delta\theta, V_0, \Omega_0)}{2\Delta\theta} \quad (2)$$

La derivación anterior se refiere a la señal de sensibilidad de paso con respecto a momento de flexión de carga de flap 56 tal como se mencionó anteriormente.

- 25 Además, la siguiente ecuación proporciona la sensibilidad de par motor de rotor con respecto a cambios de ángulo de paso, que se refiere a una señal de sensibilidad de paso con respecto a par motor 54 tal como se mencionó anteriormente:

$$\frac{\partial M_{rot}}{\partial \theta} \approx 3 \frac{M_y(\Delta\theta + \theta_0, V_0, \Omega_0) - M_y(\theta_0 - \Delta\theta, V_0, \Omega_0)}{2\Delta\theta} \quad (3)$$

- 30 mientras que la siguiente ecuación proporciona la sensibilidad del momento de flexión en el sentido de la cuerda o "en plano" con respecto a cambios de ángulo de paso, que corresponde a la señal de sensibilidad de paso con respecto a momento de flexión en el sentido de la cuerda 58 tal como se mencionó anteriormente.

$$\frac{\partial F_x}{\partial \theta} \approx \frac{F_x(\Delta\theta + \theta_0, V_0, \Omega_0) - F_x(\theta_0 - \Delta\theta, V_0, \Omega_0)}{2\Delta\theta}$$

- 35 En las ecuaciones anteriores, θ_0 , V_0 , Ω_0 (ángulo de paso, velocidad del viento, velocidad de rotor) es el punto de funcionamiento calculado, ΔV , $\Delta\theta$ son los intervalos de velocidad del viento y de paso a lo largo de los cuales se realiza la aproximación de orden 0 y M_x , F_y son respectivamente el momento en plano y la fuerza fuera de plano de raíz de pala estimados, respectivamente. En general, se entenderá que el modelo de BEM 50 puede determinar las siguientes medidas de sensibilidad:

- Sensibilidad de fuerza de empuje, F_y , con respecto a paso, velocidad de rotor y velocidad del viento.
- Sensibilidad de momento de accionamiento, M_y , con respecto a paso, velocidad de rotor y velocidad del viento.

- Sensibilidad de momento de flexión de pala, M_x , con respecto a paso, velocidad de rotor y velocidad del viento.
- Sensibilidad de fuerza transversal, F_x , con respecto a paso, velocidad de rotor y velocidad del viento.

Basándose en estas sensibilidades básicas es posible calcular otras sensibilidades, por ejemplo

- Momento de guiñada e inclinación con respecto a paso, velocidad del viento y velocidad de rotor cíclicos
- 5 • Potencia y par motor con respecto a paso, velocidad del viento y velocidad de rotor colectivos
- Fuerza de lado a lado y ascendente-descendente con respecto a paso, velocidad del viento y velocidad de rotor cíclicos
- Empuje de rotor con respecto a paso, velocidad del viento y velocidad de rotor colectivos

10 Las variables de sensibilidad aerodinámica emitidas desde el modelo de BEM 50 se introducen en los módulos de control 52-58 y después de eso se usan para calcular, en tiempo real, valores de ganancia actualizados para su uso dentro de los respectivos módulos de control 30a-d. El siguiente ejemplo de cómo pueden actualizarse ganancias de control adecuadas proporcionará una apreciación completa de la implementación.

15 El módulo de control de empuje 30a se muestra con más detalle en la figura 4. Tal como puede observarse, el módulo de control de empuje 30a incluye una ley de control 80, un bloque de ganancia 82 y una calculadora de ganancia 84. Tal como se ha mencionado, la ley de control 82 puede estar en forma de una ley de control de PID o una versión simplificada de la misma, según sea apropiado.

20 La ley de control 80 actúa sobre una entrada de error modificada E' y emite una señal de paso colectiva P_{COL_EMPUJE} con el fin de reducir la señal de error modificada a cero. La señal de error modificada E' se determina mediante el bloque de ganancia 82 que actúa sobre una señal de error inicial E que se deriva de la diferencia entre un valor de empuje objetivo 86 y un valor de empuje real o medido 88, calculado en el punto sumador 90. Obsérvese que el valor de empuje objetivo 86 puede recibirse desde un controlador de nivel superior y el valor medido 88 puede recibirse desde el bus de datos de la turbina eólica o directamente desde un sistema de medición o control adecuado.

25 La señal de error E se introduce en el bloque de ganancia 82, que entonces calcula la señal de error modificada E' . Tal como se ha mencionado, el módulo de control de empuje 30a recibe una señal de sensibilidad aerodinámica continuamente actualizada desde el modelo de BEM en tiempo real 50, más específicamente la señal de sensibilidad de paso con respecto a empuje 52. Esto proporciona al módulo de control de empuje 30a un valor contemporáneo, basado en el punto de funcionamiento predominante de la turbina eólica 10, de la sensibilidad o capacidad de respuesta de cambios de empuje que resultan de un cambio de paso. Como ejemplo, con el fin de
30 calcular un valor de ganancia adecuada, la calculadora de ganancia 84 puede usar la siguiente fórmula:

$$Ganancia = K_{TL} \frac{\frac{\partial F_{y,nom}}{\partial \theta}}{\frac{\partial F_y}{\partial \theta}} \quad (3)$$

En la fórmula anterior:

- $\frac{\partial F_y}{\partial \theta}$ es la sensibilidad calculada mediante el modelo de BEM en línea 50;
- $\frac{\partial F_{y,nom}}{\partial \theta}$ es un parámetro que indica la sensibilidad "nominal"; y
- 35 • K_{TL} es la ganancia de controlador deseada a la sensibilidad nominal.

Debe observarse en este caso que la sensibilidad nominal puede ser la sensibilidad de fuerza de empuje de rotor con respecto a cambios de paso a la velocidad de régimen del viento, que será cuando la fuerza de empuje sea más alta. Por tanto, en este punto de funcionamiento, puede calcularse la ganancia de controlador K_{TL} y la planificación de ganancia se corregirá para otros puntos de funcionamiento.

40 Se apreciará que el mismo principio y la misma estructura que se usan para el módulo de control de empuje 30a tal como se muestra en la figura 4 también pueden aplicarse a los demás módulos de control 30b, 30c y 30d.

Por ejemplo, el módulo de control de amortiguación de torre de lado a lado 30d puede tener una estructura común aunque el bloque de ganancia pueda actualizarse con un valor de ganancia diferente según se calcula mediante la calculadora de ganancia 84. Por ejemplo, la calculadora de ganancia puede implementar la siguiente fórmula para

calcular la ganancia requerida en tiempo real:

$$Ganancia = K_{ss} \frac{\frac{\partial F_{ss,nom}}{\partial \theta}}{\frac{3}{2} \frac{\partial F_x}{\partial \theta}}$$

En la fórmula anterior:

• K_{ss} es la ganancia nominal,

- 5 • $\frac{\partial F_{ss,nom}}{\partial \theta}$ es la sensibilidad de fuerza de lado a lado nominal con respecto a amplitud de paso cíclica y
- $\frac{\partial F_x}{\partial \theta}$ es la sensibilidad de fuerza en plano de pala con respecto a regulación de paso tal como se deriva del modelo de BEM en línea.

10 A partir de los comentarios anteriores, se apreciará que las realizaciones de la invención proporcionan un sistema de control en el que términos de ganancia seleccionados del mismo se actualizan continuamente basándose al menos en parte en el punto de funcionamiento predominante de la turbina eólica, tal como lo permite un modelo de pala en tiempo real informatizado. Esto proporciona una regulación más exacta del mecanismo de control bajo control, en este caso un mecanismo de control de paso, dado que los términos de ganancia de los controladores relevantes pueden adaptarse en respuesta a cambios del punto de funcionamiento de la turbina eólica. Una ventaja particular es que el rendimiento del controlador sigue siendo alto aunque el punto de funcionamiento de la turbina eólica se

15 extiende más allá de lo que se espera habitualmente de modo que la turbina eólica tiene un buen rendimiento en condiciones inusuales tales como funcionamiento a temperaturas extremas, arranque y parada durante condiciones de viento fuerte, etcétera.

El experto apreciará que pueden realizarse modificaciones a las realizaciones específicas comentadas anteriormente sin apartarse del concepto inventivo tal como se define por las reivindicaciones.

20 Por ejemplo, en la realización ilustrada el bloque de ganancia 82 actúa sobre la señal de error E y luego pasa la señal de error modificada a la ley de control 80. Sin embargo, debe observarse que el módulo de control 30a puede configurarse de tal manera que la calculadora de ganancia 84 actualice los términos de ganancia contenidos dentro de la ley de control, por ejemplo cualquier término de ganancia proporcional, integral o derivada.

25 En las realizaciones ilustradas, el modelo de pala informatizado implementado en el sistema es un modelo de impulso de elemento de pala. Pueden usarse otros modelos de pala que tengan objetivos similares tales como modelos basados en teorías de dinámica de fluidos computacional, aunque tales modelos pueden no ser tan eficientes computacionalmente.

30 Obsérvese que, en los comentarios anteriores, los diversos módulos de control y bloques funcionales se describen como unidades funcionales independientes. Sin embargo, esto se entenderá como un convenio aceptado y no debe considerarse que tal estructura impone ninguna limitación acerca de cómo se implementa esa funcionalidad, ya sea en software, firmware o hardware.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de control de turbina eólica que comprende:

al menos un módulo de control (30a-d) configurado para emitir una señal de control para un mecanismo de control de una turbina eólica (10),

5 una calculadora de ganancia (84) para calcular un parámetro de ganancia asociado con el módulo de control (30a-d), y

un modelo de pala en tiempo real informatizado (50) que usa un punto de funcionamiento de turbina eólica determinado como entrada, comprendiendo el modelo de pala en tiempo real informatizado (50):

10 un módulo de estimación de velocidad del viento (72) dispuesto para determinar un valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado, y

un módulo de calculadora de sensibilidad aerodinámica (70) dispuesto para determinar un valor de sensibilidad aerodinámica basándose en el valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado y el punto de funcionamiento de turbina eólica determinado;

en el que el parámetro de ganancia se calcula basándose en el valor de sensibilidad aerodinámica.
- 15 2. El sistema de control de turbina eólica según la reivindicación 1, en el que el parámetro de ganancia es parte de un módulo de control de realimentación.
3. El sistema de control de turbina eólica según la reivindicación 2, en el que el parámetro de ganancia es un término de control de una ley de control implementada en el módulo de control de realimentación.
4. El sistema de control de turbina eólica según las reivindicaciones 2 o 3, en el que se determinan una pluralidad de parámetros de ganancia, y en el que uno o más de la pluralidad de parámetros de ganancia se asocian con cada uno de uno o más módulos de control.
- 20 5. El sistema de control de turbina eólica según la reivindicación 4, que incluye una pluralidad de módulos de control (30a-d), en el que cada módulo de control proporciona una componente de la señal de control.
6. El sistema de control de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que los o cada uno de los parámetros de ganancia se basan en un valor de sensibilidad aerodinámica respectivo calculado mediante el modelo de pala en tiempo real informatizado (50), en el que ese valor de sensibilidad aerodinámica es indicativo de la sensibilidad de una respuesta de fuerza a un cambio de una variable de control.
- 25 7. El sistema de control de turbina eólica según la reivindicación 6, en el que el valor de sensibilidad aerodinámica es uno del grupo de:

30 una sensibilidad de paso con respecto a empuje que proporciona una indicación de la sensibilidad de fuerza de empuje a lo largo de un eje de rotor generada por las palas dependiendo de un cambio de ángulo de paso de pala;

una sensibilidad de paso con respecto a par motor que proporciona una indicación de la sensibilidad de par motor de rotor dependiendo de un cambio de ángulo de paso de pala;

35 una sensibilidad de paso con respecto a carga de flap que proporciona una indicación de la sensibilidad de una carga de flap de pala en respuesta a un cambio del ángulo de paso; y

una sensibilidad de paso con respecto a momento de flexión en el sentido de la cuerda que proporciona una indicación de la sensibilidad del momento de flexión en el sentido de la cuerda en respuesta a un cambio del ángulo de paso.
- 40 8. El sistema de control de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el modelo de pala en tiempo real informatizado (50) es un modelo de impulso de elemento de pala.
9. El sistema de control de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado se calcula dependiendo de una diferencia entre un valor de potencia generada real y un valor de potencia generada estimada.
- 45 10. El sistema de control de turbina eólica según la reivindicación 9, en el que el valor de potencia generada estimada se obtiene a partir del modelo de pala en tiempo real informatizado (50).
11. El sistema de control de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado es la velocidad del viento del área barrida plana

de las palas en rotación (18).

12. El sistema de control de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que el mecanismo de control es un mecanismo de control de paso.
13. Una turbina eólica que incluye el sistema de control según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.
- 5 14. Un método de control de un mecanismo de control de una turbina eólica (10), comprendiendo el método:

10 implementar un modelo de pala en tiempo real informatizado (50), usando al menos un punto de funcionamiento de turbina eólica medido como entrada, para determinar un valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado, y para determinar un valor de sensibilidad aerodinámica basándose en el valor de velocidad del viento en el plano de rotor estimado y el punto de funcionamiento de turbina eólica determinado;

determinar al menos un parámetro de ganancia asociado con un módulo de control (30a-d) de la turbina eólica (10) basándose en el valor de sensibilidad aerodinámica; y

determinar una señal de control para el mecanismo de control basándose en el al menos un parámetro de ganancia determinado.
- 15 15. Un producto de programa informático que puede descargarse desde una red de comunicación y/o está almacenado en un medio legible por máquina, que comprende instrucciones de código de programa que, cuando se ejecuta el programa informático mediante un ordenador, hacen que el ordenador lleve a cabo el método según la reivindicación 14.

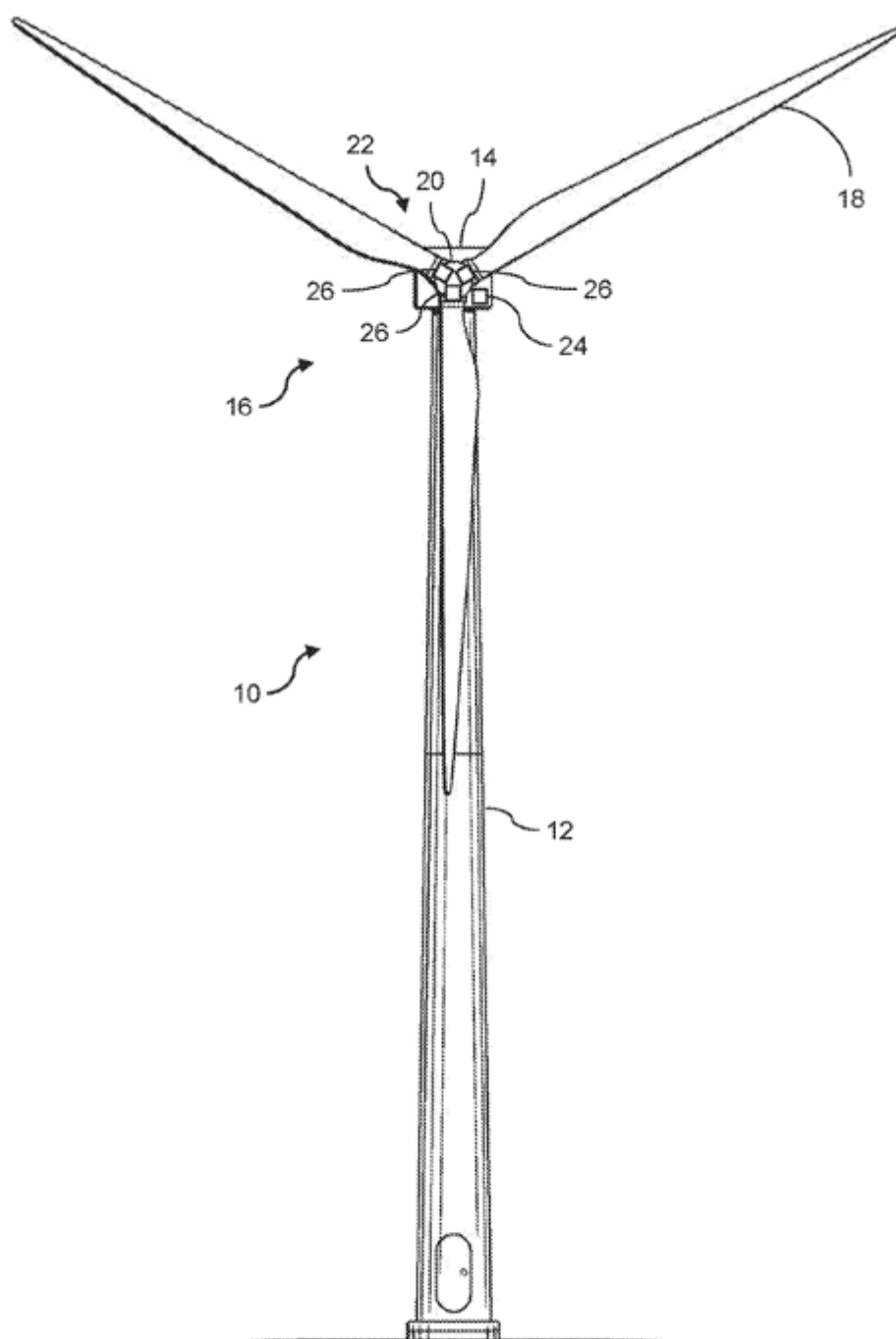


Figura 1

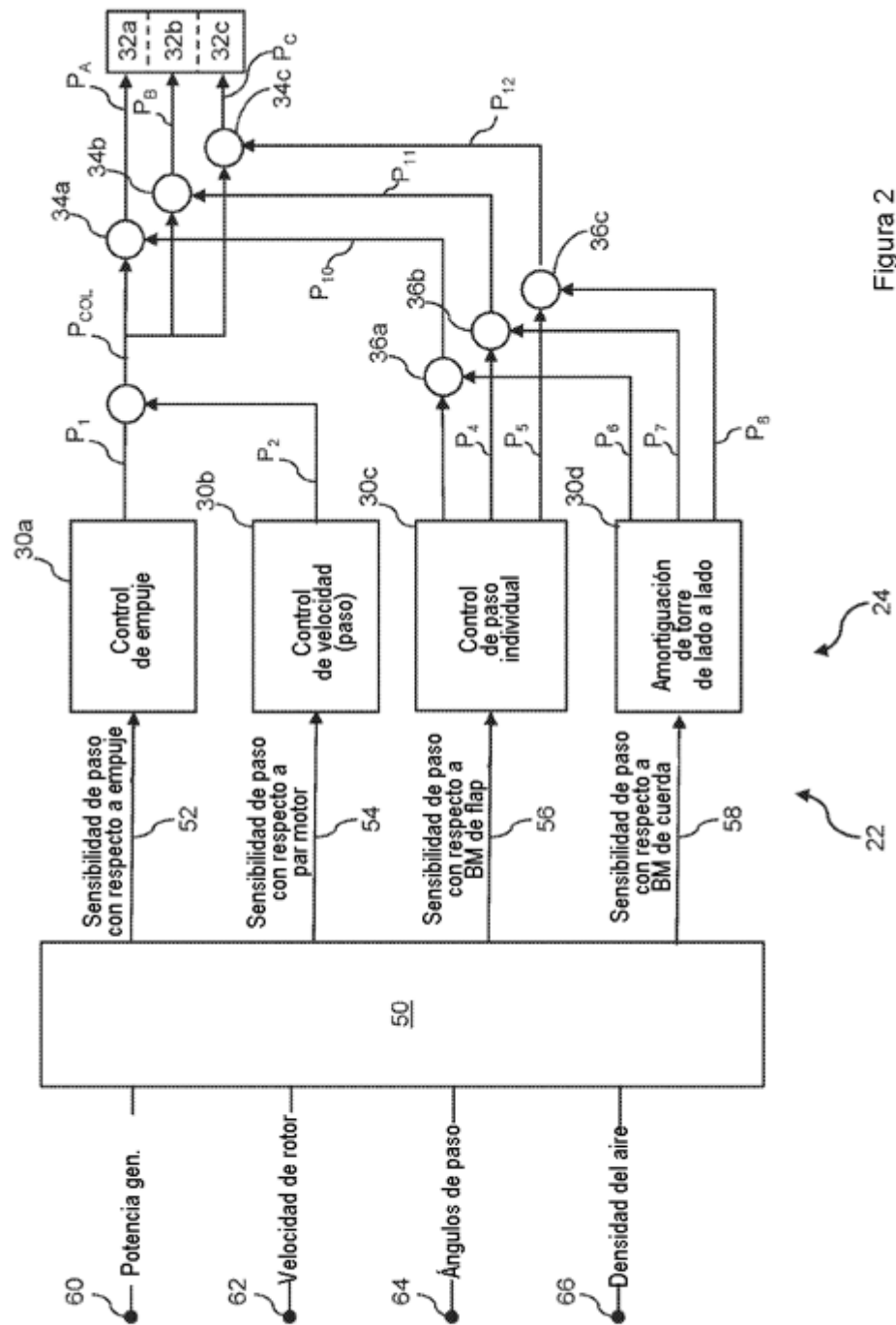


Figura 2

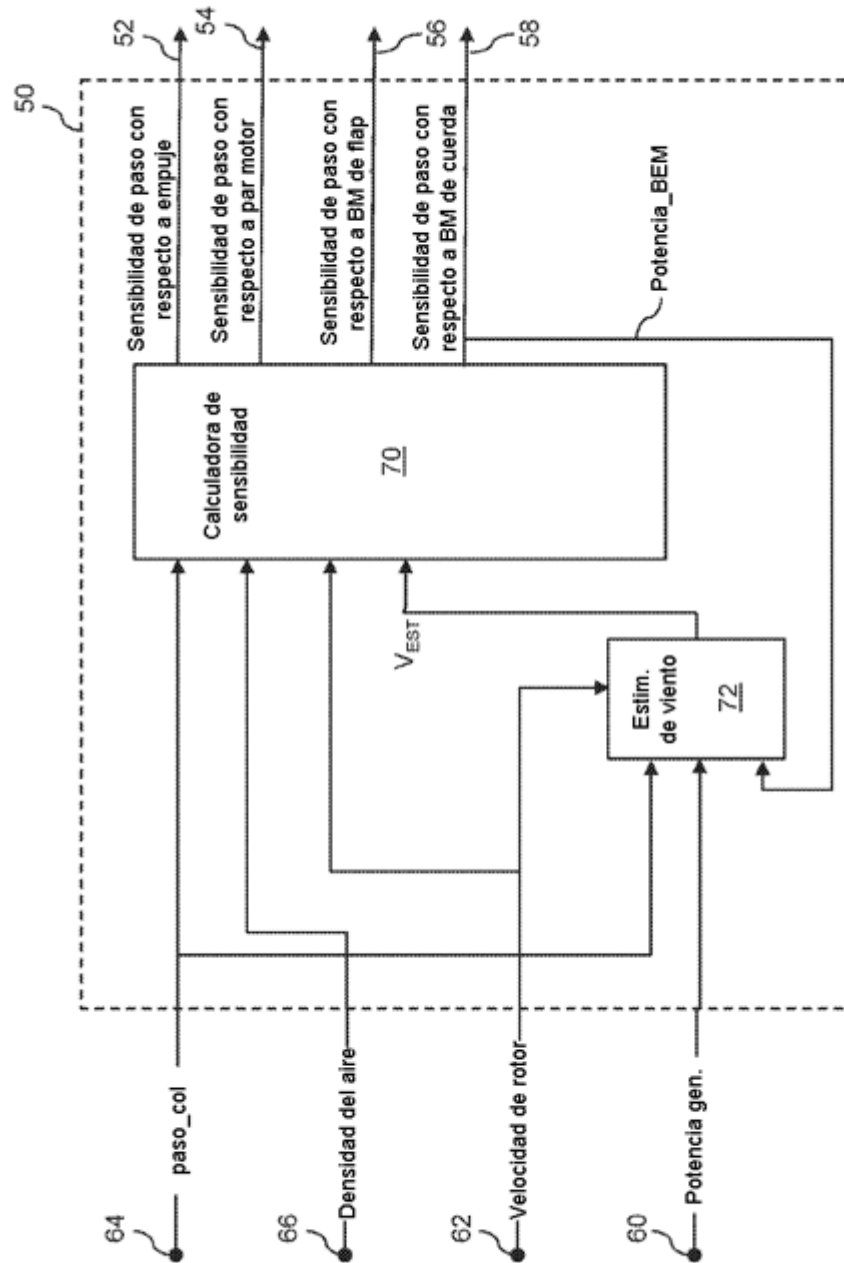


Figura 3

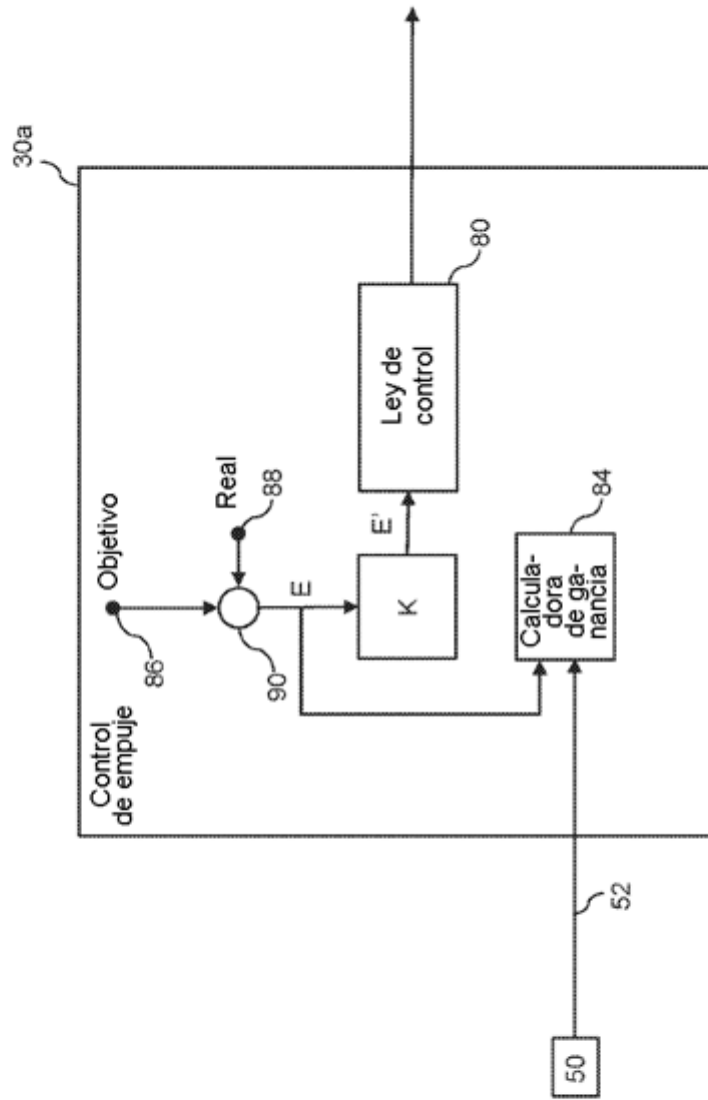


Figura 4

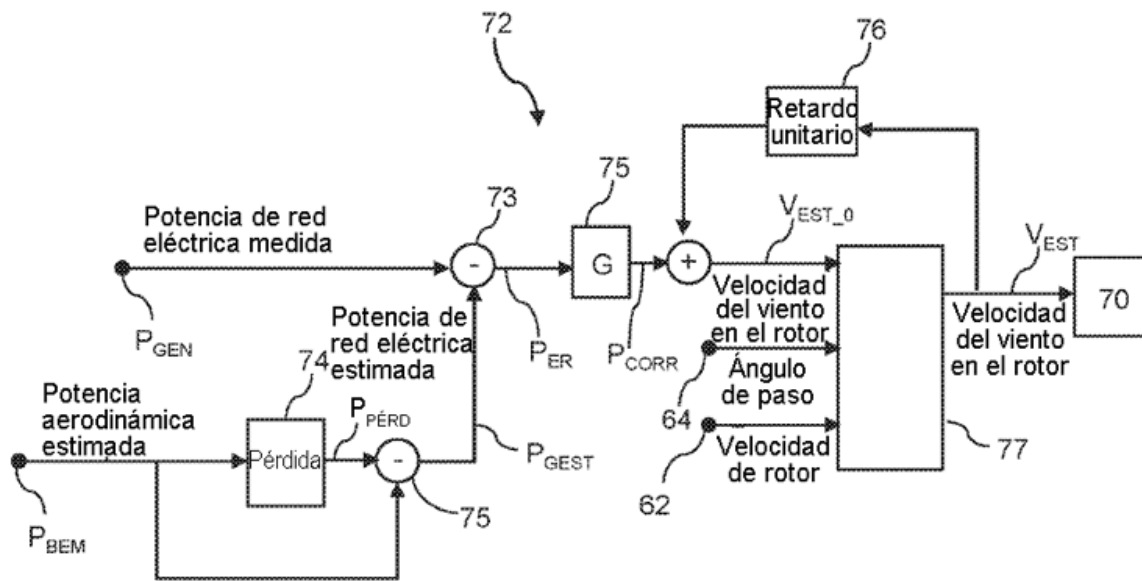


Figura 5