

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 790 835**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **09.06.2016 PCT/DK2016/050173**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.12.2016 WO16198076**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.06.2016 E 16731500 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.04.2020 EP 3308015**

54 Título: **Potencia de variación en una turbina eólica usando planificación de ganancia**

30 Prioridad:

**11.06.2015 DK 201570360**

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

**29.10.2020**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**KJÆR, MARTIN ANSBJERG;  
THOMSEN, JESPER SANDBERG;  
KRISTOFFERSEN, JACOB KROGH;  
GRUNNET, JACOB DELEURAN y  
HERBSLEB, EIK**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 790 835 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**

Potencia de variación en una turbina eólica usando planificación de ganancia

**Campo de la invención**

5 La invención se refiere a un método para controlar una turbina eólica, en particular a un método para controlar una turbina eólica durante una variación de potencia.

**Antecedentes de la invención**

10 Las turbinas eólicas pueden hacerse funcionar en un modo con reducción de potencia donde la turbina eólica se controla para producir una cantidad de potencia que es menor que la cantidad de potencia que puede producirse considerando la energía eólica disponible. El fin de hacer funcionar la turbina eólica en un modo con reducción de potencia puede ser establecer una reserva de potencia que puede liberarse si es necesario.

Puede solicitarse que la turbina eólica tenga reducción de potencia para elevar la producción muy rápido hasta la producción completa, por ejemplo, con el fin de satisfacer una mayor demanda de potencia en la red de distribución. La demanda de variación puede ser en forma de una referencia de potencia externa de un operador de red de distribución u otra fuente externa.

15 La rápida elevación de potencia hasta la producción completa puede conducir a diversos efectos no deseados tales como variaciones no deseadas en la potencia producida.

Por consiguiente, existe la necesidad de mejorar la capacidad de la turbina eólica para manejar demandas de variación de potencia.

20 El documento US2012139247A1 da a conocer una central eólica, que incluye un generador accionado por un rotor para generar potencia eléctrica y un controlador que incluye un módulo de paso para ajustar un ángulo de paso de las palas del rotor. El controlador tiene una entrada para una reserva de potencia requerida y determina un ángulo de paso objetivo dependiendo de un punto de funcionamiento de la central eólica. También se proporciona un controlador de paso secundario, que incluye un detector para determinar la potencia disponible y un módulo de compensación dinámica. Señales de entrada para la potencia de reserva disponible determinada por el detector, la potencia de reserva requerida y la potencia eléctrica generada se aplican al módulo de compensación dinámica, que está diseñado para determinar un valor para una compensación de ángulo de paso. Un elemento de activación varía en ángulo de paso objetivo mediante la compensación de ángulo de paso.

30 El documento WO 2015/078478 da a conocer el seguimiento de una tasa de cambio en una referencia externa y el cálculo de un ajuste de ángulo de paso de prealimentación según la tasa de cambio en la referencia de potencia externa, y el envío del ajuste de ángulo de paso de prealimentación a la turbina eólica para ajustar un ángulo de paso de las palas de rotor simultáneamente con el ajuste de la salida de potencia según la referencia externa.

**Sumario de la invención**

35 Un objeto de la invención es mejorar el control de una turbina eólica en relación con el manejo de demandas de variación de potencia, en particular mejorar la capacidad de la turbina eólica para manejar referencias de potencia externas que demandan altas tasas de variación.

Un objeto adicional de la invención es reducir los efectos no deseados provocados por la rápida elevación de potencia hasta la producción completa. Tales efectos no deseados pueden incluir la disminución no deseada en la velocidad del generador o la potencia generada.

40 Un objeto adicional de la invención puede ser reducir cargas estructurales de la turbina eólica debido a demandas de variación de potencia.

En un primer aspecto de la invención, se proporciona un método para controlar una turbina eólica que comprende las etapas de

- controlar la producción de potencia eléctrica dependiendo de una referencia de potencia,
- 45 - controlar el paso de una pala de la turbina eólica usando una solicitud de paso, donde la solicitud de paso se amplifica mediante una ganancia ajustable,
- fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia aumentado si una tasa de cambio de la referencia de potencia supera un umbral.

50 El método para controlar una turbina eólica puede usarse en una situación en la que la producción de potencia aumenta o se eleva dependiendo de una referencia de potencia creciente. Durante la variación, el paso se controla con el fin de ajustar la potencia absorbida por el rotor de la turbina eólica de modo que la potencia absorbida

- 5 corresponde a la potencia generada. Debido a la dinámica del sistema de control, el paso puede no ajustarse suficientemente rápido. Ventajosamente, mediante el aumento de la ganancia para una alta tasa de cambios de la referencia de potencia, pueden mejorarse las capacidades dinámicas del sistema de control de modo que el paso puede ajustarse más rápido con el efecto de que la turbina eólica puede realizar el seguimiento de rápidos aumentos en la referencia de potencia.
- El método comprende controlar el paso hasta que el paso alcanza una referencia de paso determinada dependiendo de la velocidad del viento. Por ejemplo, la referencia de paso puede ser un paso mínimo que proporciona una entrada de energía óptima por el rotor, por ejemplo, un paso óptimo determinado dependiendo de la velocidad del viento y la velocidad del generador.
- 10 El método comprende además
- controlar la producción de potencia eléctrica dependiendo de la diferencia entre una referencia de funcionamiento y un parámetro de funcionamiento medido, y
  - controlar el paso dependiendo de la referencia de paso, una vez que el paso ha alcanzado la referencia de paso.
- 15 Por consiguiente, una vez que el paso ha alcanzado la referencia de paso, puede cambiarse una configuración de un sistema de control de modo que el paso se determina basándose en una referencia de paso, por ejemplo, según un modo de carga completa.
- 20 Según una realización, el método comprende aumentar la producción de potencia dependiendo de la referencia de potencia creciente, donde la producción de potencia se aumenta desde una potencia inicial que es menor que o igual a la energía eólica disponible. Por consiguiente, la turbina eólica puede hacerse funcionar en un modo con reducción de potencia y en un punto en el tiempo que solicita que la turbina eólica aumente la producción de potencia, posiblemente hasta la energía eólica disponible. La solicitud de aumentar la potencia puede alegarse por la referencia de potencia que se ha elevado.
- 25 Según una realización, el método comprende aumentar la producción de potencia desde la potencia inicial P0 hasta una potencia final P1 que es menor que o igual a una potencia nominal Prated o una potencia máxima de la turbina eólica. La potencia final P1 puede corresponder a la energía eólica disponible que puede ser menor que o igual a la potencia nominal.
- 30 Según una realización, la potencia inicial P0 también puede ser el resultado de un evento de baja tensión, que puede producirse cuando la red de distribución eléctrica experimenta una falla en la que la tensión de la red de distribución cae desde un primer nivel y hasta un segundo nivel inferior. Las realizaciones de la presente invención pueden usarse después de la terminación del evento de baja tensión para variar de nuevo la tensión hasta la potencia final P1 de operación normal. La potencia inicial P0 es en esta situación el nivel de tensión resultante de la turbina tras la terminación del evento de baja tensión, y la potencia final P1 es el nivel de potencia deseado que debe retomar la turbina.
- 35 Según una realización, el método comprende aumentar la ganancia ajustable dependiendo de la tasa de cambio de la referencia de potencia. Por consiguiente, la ganancia puede fijarse a una ganancia fija aumentada o la ganancia puede aumentarse gradualmente, por ejemplo, de manera progresiva o continua, dependiendo de la tasa de cambio de la referencia de potencia. Dicho de otro modo, la ganancia puede cambiarse de manera adaptativa dependiendo de la tasa de cambio de la referencia de potencia.
- 40 Según una realización el método comprende fijar la ganancia ajustable según un esquema de ganancia que define los valores de ganancia como una función de la tasa de cambio de la referencia de potencia.
- Por ejemplo, el esquema de ganancia puede definir una ganancia mínima para la tasa de cambios de la referencia de potencia por debajo del umbral.
- Alternativa o adicionalmente, el esquema de ganancia puede comprender funciones de ganancia creciente para la tasa de cambios de la referencia de potencia por encima del umbral.
- 45 Alternativa o adicionalmente, el esquema de ganancia puede definir valores de ganancia para la tasa de cambios positiva y negativa de la referencia de potencia. Por ejemplo, el esquema de ganancia puede definir un valor de ganancia máximo para la tasa de cambios positiva de la referencia de potencia por encima de un umbral positivo superior y/o para la tasa de cambios negativa de la referencia de potencia por debajo de un umbral negativo superior.
- 50 Según una realización, el método comprende determinar la solicitud de paso dependiendo de la diferencia entre una referencia de velocidad del generador y una velocidad del generador medida. Por ejemplo, la turbina eólica puede comprender un controlador, por ejemplo, un controlador de carga parcial u otro sistema de control, configurado para determinar el paso para ajustar las palas dependiendo de un error de velocidad.
- Un segundo aspecto de la invención se refiere a un sistema de control para una turbina eólica, donde la turbina

eólica comprende un generador de potencia configurado para generar potencia dependiendo de una referencia de potencia, y un sistema de paso configurado para ajustar el paso de una pala de la turbina eólica dependiendo de una solicitud de paso, comprendiendo el sistema de control

- un controlador configurado para determinar la solicitud de paso dependiendo de una ganancia ajustable, y

- 5 - un planificador de ganancia configurado para fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia aumentado si una tasa de cambio de la referencia de potencia supera un umbral.

Un tercer aspecto de la invención se refiere a una turbina eólica que comprende un sistema de control según el segundo aspecto.

- 10 Un cuarto aspecto de la invención se refiere a un producto de programa informático que puede cargarse directamente en una memoria interna de un ordenador digital, comprendiendo el producto de programa informático partes de código de software para realizar las etapas del método según el primer aspecto cuando el producto de programa informático se ejecuta en el ordenador.

- 15 En general, los diversos aspectos de la invención pueden combinarse y acoplarse de cualquier modo posible dentro del alcance de la invención. Estos y otros aspectos, características y/o ventajas de la invención resultarán evidentes a partir de y se dilucidarán con referencia a las realizaciones descritas a continuación en el presente documento.

### Breve descripción de los dibujos

Las realizaciones de la invención se describirán, a modo de ejemplo únicamente, con referencia a los dibujos, en los que

la figura 1 muestra una turbina eólica,

- 20 la figura 2 muestra un sistema de control de la turbina eólica donde el sistema de control está en un estado de carga completa,

la figura 3 muestra curvas que ilustran la potencia generada, la velocidad del generador y la energía eólica disponible para una turbina eólica que se hace funcionar en un modo de potencia disminuida,

la figura 4 muestra un sistema de control de turbina eólica configurado con un planificador de ganancia,

- 25 la figura 5A muestra un ejemplo de un planificador de ganancia,

la figura 5B muestra un ejemplo de un esquema de ganancia usado en un planificador de ganancia, y

la figura 6 muestra curvas que ilustran la disminución en variaciones en la potencia producida y la velocidad del generador en caso de variación de potencia debido al uso de la planificación de potencia donde la ganancia se determina dependiendo de la tasa de cambio de la demanda de variación de potencia.

### 30 Descripción de realizaciones

- La figura 1 muestra una turbina eólica 100 (WTG) que comprende una torre 101 y un rotor 102 con al menos una pala de rotor 103, tal como tres palas. El rotor está conectado a una góndola 104 que está montada en la parte superior de la torre 101 y que está adaptada para accionar un generador situado dentro de la góndola. El rotor 102 puede rotar por la acción del viento. La energía de rotación de las palas de rotor 103 inducida por el viento se transfiere a través de un árbol al generador. Por tanto, la turbina eólica 100 puede convertir la energía cinética del viento en energía mecánica por medio de las palas de rotor y, posteriormente en potencia eléctrica por medio del generador. El generador puede incluir un convertidor de potencia para convertir la potencia de CA del generador en una potencia de CC y un inversor de potencia para convertir la potencia de CC en una potencia de CA que va a incorporarse a una red de distribución eléctrica. El generador puede controlarse para producir una potencia correspondiente a una solicitud de potencia.
- 35 40

Puede regularse el paso de las palas 103 con el fin de modificar las propiedades aerodinámicas de las palas, por ejemplo, con el fin de maximizar la captación de energía eólica. El paso de las palas se regula mediante un sistema de paso que incluye actuadores para regular el paso las palas dependiendo de una solicitud de paso.

- 45 La figura 2 muestra un ejemplo de una configuración 200 de una turbina eólica en una situación en la que un sistema de control de la turbina eólica está configurado según un estado de carga completa.

El sistema de control de la turbina eólica comprende un controlador de carga completa 201 que se activa en el estado de carga completa para determinar la solicitud de paso  $\theta_{req}$  para el sistema de paso 202. Durante la carga completa, la solicitud de paso se determina dependiendo de la diferencia entre una referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y una velocidad del generador medida  $\omega_m$ .

El sistema de control de la turbina eólica también comprende un controlador de carga parcial que se activa en un estado de carga parcial para determinar la solicitud de potencia  $P_{req}$  para el generador de potencia. Durante la carga parcial, la solicitud de potencia se determina dependiendo de la diferencia entre la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y la velocidad del generador medida  $\omega_m$ .

5 El controlador de carga parcial no se muestra en la configuración de carga completa 200 puesto que durante la carga completa la solicitud del generador  $P_{req}$  se determina basándose en una referencia de potencia externa  $P_{ext}$  y, por tanto, el controlador de carga parcial puede inactivarse durante el control de carga completa. Por ejemplo, la solicitud del generador  $P_{req}$  puede fijarse igual a la referencia de potencia externa  $P_{ext}$ . La referencia de potencia externa  $P_{ext}$  puede proporcionarse por un operador de red de distribución u otra fuente, tal como el controlador de central eléctrica que se comunica con una pluralidad de turbinas eólicas, por ejemplo, el controlador de central eléctrica configurado para compensar cambios de frecuencia de la red de distribución.

10 La solicitud del generador  $P_{req}$  se suministra al generador de potencia 203. El generador de potencia puede contener un controlador de generador que recibe la solicitud del generador  $P_{req}$  y controla el generador para producir la potencia solicitada  $P_{req}$ . Por consiguiente, el generador de potencia puede definirse como un sistema de generador de potencia que contiene el controlador de generador, el generador, convertidores/inversores de potencia y otras unidades y que está configurado para producir potencia según la cantidad solicitada.

15 La solicitud de paso  $\theta_{req}$  se suministra al sistema de paso 202 que realiza el ajuste de paso de las palas 103. El sistema de paso puede contener un controlador de paso que recibe la solicitud de paso  $\theta_{req}$  y controla los actuadores de paso para fijar el paso al paso solicitado.

20 El estado de carga parcial puede seleccionarse si la velocidad del viento no es suficientemente alta como para permitir la generación de potencia eléctrica nominal o de régimen a partir del generador. En este estado, se controlan el paso  $\theta$  y la velocidad del generador para optimizar la eficacia aerodinámica de la turbina eólica 100. Por tanto, la solicitud de paso  $\theta_{req}$  puede fijarse a una referencia de paso óptima  $\theta_{opt}$  que maximiza la eficacia aerodinámica del rotor. La velocidad del generador  $\omega_r$  puede controlarse para extraer la mayor cantidad de potencia posible realizando el seguimiento de velocidad del generador deseada  $\omega_{ref}$ . En el estado de carga parcial, la velocidad del generador  $\omega_r$  se controla a través de la solicitud de potencia  $P_{req}$  que afecta al par motor del generador.

25 Por consiguiente, en carga parcial, el controlador de carga parcial calcula la solicitud de potencia  $P_{req}$  que minimiza la diferencia entre la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y la velocidad del generador medida  $\omega_m$ .

30 El estado de carga completa puede seleccionarse si la velocidad del viento  $v$  es suficientemente alta como para permitir la generación de una potencia eléctrica nominal. Por tanto, pueden controlarse la velocidad del generador y la potencia del generador para lograr una producción de potencia deseada, por ejemplo, una potencia nominal o una potencia disminuida. La solicitud de potencia  $P_{req}$  se fija a la producción de potencia deseada. La referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  puede determinarse dependiendo de la producción de potencia deseada y posiblemente está limitada a una velocidad nominal máxima. En el estado de carga completa, la velocidad del generador  $\omega_r$  se controla a través de la solicitud de paso  $\theta_{req}$ .

35 El nivel de potencia nominal es el nivel de potencia para el que la turbina eólica se ha diseñado que genere a o por encima de la velocidad del viento nominal. En algunas circunstancias, la turbina eólica puede hacerse funcionar para generar una potencia máxima que es mayor que la potencia nominal.

40 Por consiguiente, en carga completa, el controlador de carga completa 204 calcula la solicitud de paso  $\theta_{req}$  que minimiza la diferencia entre la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y la velocidad del generador medida  $\omega_m$ .

45 Cabe señalar que la velocidad del generador  $\omega_r$  y la velocidad del rotor están relacionadas por la razón de engranajes del engranaje que conecta el rotor con el árbol de generador. Por consiguiente, la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y puede fijarse de manera equivalente como referencia de velocidad del rotor y puede usarse de manera equivalente la velocidad del rotor medida en lugar de una velocidad del generador medida. También cabe señalar que el generador de potencia 203 puede controlarse de manera equivalente por medio de una solicitud de par motor en lugar de la solicitud de potencia  $P_{req}$ . Por consiguiente, se entiende que la solicitud de potencia  $P_{req}$  puede ser un punto de referencia de potencia o par motor para el generador de potencia 203.

50 La turbina eólica puede hacerse funcionar en un modo con reducción de potencia en la configuración de carga completa 200, es decir, en un modo donde la solicitud de potencia  $P_{req}$  se fija a una referencia de potencia disminuida. El modo con reducción de potencia también se denomina un modo de potencia disminuida. La referencia de potencia disminuida puede ser cualquier potencia que sea menor que la potencia nominal de la turbina eólica. En el modo con reducción de potencia, el paso se controla según una referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  que puede reducirse, es decir, disminuirse, o no dependiendo del diseño de la turbina eólica. La referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  puede fijarse a partir de una relación de potencia-velocidad predefinida.

55 Por tanto, el modo con reducción de potencia se refiere a una situación en la que la turbina eólica se hace funcionar

para producir una cantidad reducida de potencia, es decir, una situación en la que la turbina eólica se controla para producir una cantidad de potencia que es menor que la potencia que puede producirse con la energía eólica disponible.

5 Por ejemplo, la turbina eólica puede hacerse funcionar en un modo con reducción de potencia con el fin de establecer una reserva de potencia que pueda liberarse rápidamente, por ejemplo, si surge un problema con la red de distribución. Por consiguiente, a demanda, la turbina eólica tiene que variar la potencia muy rápido de vuelta a la producción completa.

Cabe señalar que la configuración 200 es sólo un ejemplo y que una turbina eólica puede configurarse de otros modos para lograr el control del paso y la potencia para lograr la producción reducida de potencia.

10 La figura 3 ilustra la potencia generada 301 y la velocidad del generador 303 para una turbina eólica que se hace funcionar en el modo de potencia disminuida. La curva 302 ilustra la energía eólica disponible. La potencia disminuida tiene el valor  $P_0$  y la velocidad asociada del generador tiene el valor  $\omega_0$ .

15 En  $t_1$ , la turbina eólica recibe una demanda, por ejemplo, en forma de una referencia de potencia externa  $P_{ext}$ , para variar la producción de potencia completa, es decir, la producción de potencia que es posible con la energía eólica disponible. En este caso, la energía eólica disponible está ligeramente por debajo de la potencia nominal  $P_{rated}$ . Debido a la dinámica del controlador de carga completa 201 y el sistema de paso 202, por ejemplo, el tiempo de bucle del controlador de carga completa 201, no se regula el paso de las palas suficientemente rápido como para aumentar la extracción de energía eólica correspondiente a la generación de potencia creciente dada por la variación de potencia 310. Puesto que no se regula el paso de las palas suficientemente rápido como para aumentar la extracción de energía eólica a una velocidad suficientemente alta, la velocidad del generador disminuye 311 durante la variación.

25 En el tiempo  $t_2$ , la potencia generada 301 se aproxima a la energía eólica disponible y, por tanto, el sistema de control de la turbina eólica conmuta al estado de carga parcial. Cuando la potencia generada 301 se acerca a la energía eólica disponible 302, la solicitud de paso  $\theta_{req}$  se aproxima a un valor de paso óptimo  $\theta_{opt}$ .  $\theta_{opt}$  es un ángulo de paso predeterminado que proporciona un rendimiento aerodinámico óptimo para una velocidad del viento y velocidad del generador dadas.

Por consiguiente, puede usarse una comparación de la solicitud de paso  $\theta_{req}$  y el valor de paso óptimo  $\theta_{opt}$  como condición para determinar cuándo conmutar al estado carga parcial.

30 En el estado de carga parcial, el controlador de carga parcial controla la velocidad del generador  $\omega_r$  por medio de una solicitud de potencia  $P_{req}$  determinada para minimizar el error de velocidad entre una velocidad del generador medida  $\omega_m$  y la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$ . El error de velocidad provocado por la disminución de velocidad del generador 311 provoca una disminución de potencia 312 con el fin de aumentar la velocidad del generador, es decir, el controlador de carga parcial disminuye la solicitud de potencia debido al error de velocidad.

35 En el tiempo  $t_3$ , la velocidad del generador  $\omega_r$  vuelve a la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y la potencia generada 301 corresponde a la energía eólica disponible 302.

La disminución de potencia 312 es inaceptable para la red de distribución y por tanto debe evitarse.

La figura 4 muestra un ejemplo de un sistema de control 410 para una turbina eólica. A los elementos en la figura 4 que son de tipo igual o similar o tienen funciones similares a los del elemento en la figura 2 se les proporcionan los mismos números de referencia por motivos de conveniencia y por tanto no se describen en relación con la figura 4.

40 El sistema de control 410 comprende un controlador 402 configurado para determinar la solicitud de paso  $\theta_{req}$ , es decir, una señal de control de paso, dependiendo de una ganancia ajustable 401, 401a. El controlador 402 puede ser un controlador de carga completa 201 tal como se describe en relación con la figura 2. Por tanto, el controlador 402 puede configurarse para determinar la solicitud de paso  $\theta_{req}$  dependiendo de la diferencia entre una referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y una velocidad del generador medida  $\omega_m$ . Por ejemplo, el controlador, por ejemplo un controlador PI, puede determinar la solicitud de paso a través de un algoritmo de control para minimizar el error de velocidad  $\omega_e$  entre la velocidad del generador medida  $\omega_m$  y la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$ .

45 O bien el error de velocidad  $\omega_e$  o la salida del controlador 402 puede amplificarse mediante una ganancia ajustable 401, 401a. Por medio de la amplificación, la solicitud de paso  $\theta_{req}$  se amplifica mediante la ganancia ajustable. Cuando la solicitud de paso  $\theta_{req}$  se amplifica mediante una ganancia mayor de uno, el sistema de paso 202 reaccionará más rápido a los cambios en el error de velocidad  $\omega_e$ .

50 El sistema de control 410 comprende además un planificador de ganancia 400 configurado para fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia aumentado si la tasa de cambio de la referencia de potencia supera un umbral. Por ejemplo, el planificador de ganancia 400 puede estar configurado para fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia mayor de uno si la tasa de cambio de la referencia de potencia supera el umbral.

Por consiguiente, el sistema de control 410 proporciona un método para controlar una turbina eólica 100 que incluye controlar la producción de potencia eléctrica 301 dependiendo de una referencia de potencia Pext, controlar el paso de una pala de la turbina eólica usando una solicitud de paso  $\theta_{req}$ , en el que la solicitud de paso  $\theta_{req}$  se amplifica mediante una ganancia ajustable 401, 401a, y fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia aumentado si una tasa de cambio de la referencia de potencia Pext supera un umbral.

La referencia de potencia Pext puede tener, en algunas situaciones, antes de una solicitud de variación, un valor que es mayor que la energía eólica disponible 302. Por ejemplo, la referencia de potencia puede fijarse a un valor por defecto, por ejemplo, la potencia nominal de la turbina eólica. En una situación en la que la referencia de potencia Pext tiene un valor por defecto que es mayor que la energía eólica disponible 302 y se solicita que la turbina eólica disminuya la potencia desde la cantidad producida, que corresponde a la cantidad de potencia disponible, hasta una cantidad de potencia disminuida, la referencia de potencia saltará inicialmente desde el valor por defecto hasta la cantidad de potencia disponible. Por ejemplo, Pext podría fijarse al valor por defecto de 3 MW y la potencia disponible podría ser de 2 MW. En este caso, la referencia de potencia Pext mostrará un escalón de desde 3 MW hasta 2 MW. El escalón en la referencia de potencia Pext tiene una gran tasa de cambio y por tanto podría conducir a un aumento indeseado o incorrecto en el valor de ganancia.

Por consiguiente, en una realización, el planificador de ganancia está configurado para fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia aumentado si una tasa de cambio de la referencia de potencia supera un umbral, donde la etapa de fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia aumentado sólo es posible cuando la referencia de potencia está por debajo de la energía eólica disponible 302. Por ejemplo, la tasa de cambio sólo puede determinarse para valores de la referencia de potencia por debajo de la energía eólica disponible 302, y/o los cambios en la ganancia sólo se fijan cuando la referencia de potencia está por debajo de la energía eólica disponible 302.

La ganancia ajustable puede fijarse a un valor de ganancia aumentado fijo si la tasa de cambio  $\Delta P$  supera un umbral. Alternativamente, la ganancia ajustable puede aumentarse, por ejemplo, de manera lineal o gradual, dependiendo de la tasa de cambio de la referencia de potencia para la tasa de cambios  $\Delta P$  por encima del umbral.

Cabe señalar que una turbina eólica puede configurarse con otros sistemas de control distintos al sistema de control 410, pudiendo incluir también otros sistemas de control una ganancia ajustable entre error de velocidad y ajuste de paso que puede fijarse a una ganancia aumentada dependiendo de una tasa de cambio de la referencia de potencia Pext. Por ejemplo, el sistema de control 410 podría ser un sistema de control que no incluye controladores de carga parcial y completa específicos y un mecanismo de conmutador para conmutar entre los controladores, pero que incluye un controlador que puede controlar tanto el paso como la potencia sin conmutar entre controladores dedicados y que incluye una ganancia ajustable entre el error de velocidad y el ajuste de paso, es decir, un planificador de ganancia configurado según una realización de la invención.

La figura 5A muestra un ejemplo de un planificador de ganancia 400 que comprende un diferenciador 501 que determina una tasa de cambio de la referencia de potencia externa Pext, un filtro de paso bajo 502 que elimina los transitorios y proporciona un efecto de promedio, y un esquema de ganancia 503 que determina la ganancia ajustable G dependiendo del valor de la tasa de cambio de la referencia de potencia externa Pext. El diferenciador 501, o tal como se mencionó anteriormente, el planificador de ganancia 400, puede estar configurado para determinar la tasa de cambio para referencias de potencia Pext por debajo de la energía eólica disponible 302.

La ganancia ajustable G puede fijarse según un esquema de ganancia que define los valores de ganancia G como una función de la tasa de cambio  $\Delta P$  de la referencia de potencia. Por ejemplo, el esquema de ganancia puede implementarse como una expresión matemática o una tabla de consulta.

La figura 5B muestra un ejemplo de un esquema de ganancia 503 definido como una curva 521 que es una función de la tasa de cambio  $\Delta P$  de la referencia de potencia Pext. La curva 521 podría definirse igualmente como una tabla de consulta, una función, una expresión matemática u otro esquema. El esquema de ganancia puede definir un valor mínimo adecuado  $G_0$ , por ejemplo, una ganancia mínima  $G_0$  de uno, para la tasa de cambios  $\Delta P$  por debajo del umbral  $\Delta P_1$ . El esquema de ganancia 503 puede definir valores de ganancia G para tasas de cambios  $\Delta P$  positivas y/o negativas, es decir, para aumentar y/o disminuir la variación de potencia. Por consiguiente, el esquema de ganancia puede definir una ganancia mínima  $G_0$  para la tasa de cambios positiva  $\Delta P$  por debajo del umbral  $\Delta P_1$  y/o para la tasa de cambios negativa  $\Delta P$  por encima del umbral  $\Delta P_3$ .

El esquema de ganancia 502 puede comprender funciones o curvas de ganancia crecientes 511, 512 para la tasa de cambios  $\Delta P$  por encima del umbral  $\Delta P_1$ . Para un esquema de ganancia 503 definido para la tasa de cambios  $\Delta P$  positiva y/o negativa, el esquema de ganancia 503 puede comprender curvas de ganancia crecientes 511, 512 para la tasa de cambios positiva  $\Delta P$  por encima del umbral  $\Delta P_1$  y/o para la tasa de cambios negativa  $\Delta P$  por debajo del umbral  $\Delta P_3$ . Las curvas de ganancia 511, 512 pueden tener las mismas pendientes o diferentes. Las funciones o curvas de ganancia crecientes 511, 512 pueden definirse como funciones o curvas crecientes de manera lineal, no lineal o gradual.

Por ejemplo, las funciones o curvas de ganancia 511, 512 pueden definirse para aumentar de manera lineal, no

lineal o gradual para la tasa de cambios positiva  $\Delta P$  entre el umbral inferior  $\Delta P1$  y un umbral de tasa positiva superior  $\Delta P2$  y/o para la tasa de cambios negativa  $\Delta P$  entre el umbral inferior  $\Delta P3$  y un umbral negativo superior  $\Delta P4$ .

5 El esquema de ganancia puede definir un valor de ganancia máximo  $G1$  para la tasa de cambios positiva  $\Delta P$  por encima del umbral positivo superior  $\Delta P2$ . Adicional o alternativamente, el esquema de ganancia puede definir un valor máximo para la tasa de cambios negativa  $\Delta P$  por debajo del umbral negativo superior  $\Delta P4$  que puede ser igual a  $G1$  o diferente de  $G1$ .

10 El valor absoluto de  $\Delta P3$  puede ser igual a  $\Delta P1$  o pueden ser diferentes. De manera similar, el valor absoluto de  $\Delta P4$  puede ser igual a  $\Delta P2$  o pueden ser diferentes. Por ejemplo, el valor absoluto de  $\Delta P4$  puede ser mayor de  $\Delta P2$  con el fin de establecer una pendiente más baja de la función de ganancia creciente 512 para disminuir las variaciones de potencia. En este caso, el valor de ganancia máximo en  $\Delta P4$  puede ser igual al valor de ganancia máximo en  $\Delta P2$ .

15 La figura 6 ilustra la potencia generada 301 y la velocidad del generador 303 en una situación similar a la situación en la figura 3. Por consiguiente, a los elementos (curvas, detalles del sistema de coordenadas) en la figura 6 que tienen una función o significado igual o similar que un elemento en la figura 3 se les proporcionan los mismos números de referencia por motivos de conveniencia y por tanto no se describen en relación con la figura 6.

La figura 6 muestra adicionalmente la referencia de potencia externa  $P_{ext}$ . En el ejemplo, la referencia de potencia  $P_{ext}$  aumenta más allá de la energía eólica disponible 302. La potencia solicitada  $P_{req}$  puede ser igual a la referencia de potencia externa  $P_{ext}$  y puede tener la misma pendiente que la referencia de potencia externa  $P_{ext}$ .

20 Cabe señalar que la potencia generada 301, 310 sigue la solicitud de potencia  $P_{req}$ , posiblemente dentro de algunas tolerancias, al menos siempre que la energía eólica disponible sea suficientemente alta para permitir la producción de la potencia solicitada.

25 Por consiguiente, la figura 6 ilustra un método para controlar una turbina eólica donde la producción de potencia 301 aumenta dependiendo de una referencia de potencia creciente, es decir, la referencia de potencia externa  $P_{ext}$  o la solicitud de potencia  $P_{req}$ . La producción de potencia se aumenta desde una potencia inicial  $P0$  que es menor que o igual a la energía eólica disponible 302. La producción de potencia 301 puede aumentarse hasta una potencia final  $P1$ , por ejemplo, una potencia final correspondiente a la potencia disponible 302, donde la potencia final es menor que o igual a una potencia nominal  $P_{rated}$  o una potencia máxima de la turbina eólica.

30 Puesto que la tasa de cambio de la referencia de potencia creciente  $P_{ext}$  supera un umbral (un umbral de tasa de potencia), la ganancia ajustable  $G$  se aumenta desde el valor nominal  $G0$  hasta un valor de ganancia aumentado  $G_i$ . Por consiguiente, tras el tiempo  $t1$ , el paso de las palas se controla usando la ganancia aumentada  $G_i$ .

35 En  $t1$ , se solicita la variación de la turbina eólica hacia la producción de potencia completa. Debido a la ganancia aumentada  $G_i$ , se regula el paso de las palas más rápido en comparación con la situación en la que la ganancia permanecía igual a  $G0$ . Como consecuencia, se regula el paso de las palas más rápido, de modo que la extracción de energía eólica del rotor aumenta a una tasa mayor, de modo que la posible disminución en la velocidad del generador 611 es más pequeña que la disminución 311 lograda en la situación en la que la ganancia  $G$  del controlador 201 no se modifica.

En el tiempo  $t2$ , la potencia generada 301 se aproxima a la energía eólica disponible y, por tanto, el sistema de control de la turbina eólica conmuta al estado de carga parcial. La conmutación puede condicionarse en una comparación del paso medido y una referencia de paso tal como se describió anteriormente.

40 El error de velocidad entre la velocidad del generador medida 303 y la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  provoca una disminución de potencia 612 con el fin de aumentar la velocidad del generador hasta la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$ . Tal como se ilustra en la figura 6, la disminución de potencia 612 es mucho más pequeña que la disminución de potencia 312 puesto que el error de velocidad acumulado durante la variación se ha disminuido debido a la ganancia aumentada.

45 En el tiempo  $t3$ , la velocidad del generador  $\omega_r$  vuelve a la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y la potencia generada 301 corresponde a la energía eólica disponible 302.

Aunque pueda estar presente todavía una disminución de potencia 612, la disminución es más pequeña en comparación con la situación anterior y por tanto puede ser aceptable para la red de distribución.

Tras el tiempo  $t3$ , cuando se ha completado la variación, la ganancia  $G$  puede fijarse de nuevo a  $G0$ .

50 Con el fin de garantizar que la ganancia aumentada permanezca en el valor aumentado durante un periodo de tiempo dado una vez que la potencia ha alcanzado la potencia disponible 302, el planificador de ganancia 400 puede comprender una unidad para mantener la ganancia en el valor aumentado durante un periodo de tiempo, por ejemplo hasta  $t3$ , cuando se ha completado la variación. Por ejemplo, la unidad puede ser un filtro asimétrico. Esto garantiza que se mantenga el rendimiento dinámico (es decir, el rendimiento dinámico mejorado debido a la



ganancia aumentada) del sistema de control 410 durante un periodo de tiempo deseado. Por ejemplo, en situaciones donde se disminuye la tasa de cambio de la referencia de potencia, por ejemplo hasta cero, algún tiempo después de  $t_2$ , se mantiene la ganancia aumentada.

5 El paso de las palas puede controlarse en el estado de carga completa con reducción de potencia hasta que la solicitud de paso  $\theta_{req}$  se aproxima al valor de paso óptimo  $\theta_{opt}$ . Por consiguiente, el método para controlar una turbina eólica puede incluir controlar el paso hasta que el paso alcanza una referencia de paso determinada dependiendo de la velocidad del viento y dependiendo posiblemente de la velocidad del rotor, es decir, dependiendo de la razón de punta-velocidad tal como el valor de paso óptimo  $\theta_{opt}$ .

10 Dicho de otro modo, el paso de las palas puede controlarse en el estado de carga completa con reducción de potencia siempre que el paso no esté limitado por una entrada de potencia óptima, es decir, una limitación fijada en lo que se refiere a una referencia de paso óptima  $\theta_{opt}$ .

15 Una vez que el paso ha alcanzado la referencia de paso, la turbina eólica puede controlarse en un estado de carga parcial mediante el control de la producción de potencia eléctrica dependiendo de la diferencia entre una referencia de funcionamiento y un parámetro de funcionamiento medido, por ejemplo, dependiendo de la diferencia entre la referencia de velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y la velocidad del generador medida  $\omega_m$ . En el estado de carga parcial, el paso se controla dependiendo de la referencia de paso, por ejemplo, el valor de paso óptimo  $\theta_{opt}$ .

20 Las realizaciones de la invención pueden implementarse por medio de hardware, software, firmware electrónico o cualquier combinación de estos. Pueden disponerse realizaciones implementadas por software o características de las mismas para ejecutarse en uno o más procesadores de datos y/o procesadores de señales digitales. Se entiende software como un programa informático o producto de programa informático que puede almacenarse/distribuirse en un medio legible por ordenador adecuado, tal como un medio de almacenamiento óptico o un medio de estado sólido suministrado junto con o como parte de otro hardware, pero también puede distribuirse en otras formas, tal como a través de Internet u otros sistemas de telecomunicación por cable o inalámbricos. Por consiguiente, el medio legible por ordenador puede ser un medio no transitorio. Por consiguiente, el programa informático comprende partes de código de software para realizar las etapas según realizaciones de la invención cuando el producto de programa informático funciona/se ejecuta en un ordenador o en un sistema informático distribuido.

25 Aunque la presente invención se ha descrito en relación con las realizaciones especificadas, no debe interpretarse en modo alguno limitada por los ejemplos presentados. El alcance de la presente invención ha de interpretarse a la luz del juego de reivindicaciones adjunto. En el contexto de las reivindicaciones, los términos "que comprende" o "comprende" no excluyen otros posibles elementos o etapas. Además, la mención de referencias tales como "un" o "una", etc., no debe interpretarse excluyente de una pluralidad. El uso de signos de referencia en las reivindicaciones con respecto a los elementos indicados en las figuras tampoco debe interpretarse limitativo del alcance de la invención. Además, las características individuales mencionadas en las diferentes reivindicaciones, pueden combinarse posiblemente de manera ventajosa, y la mención de estas características en diferentes reivindicaciones no excluye que no sea posible y ventajosa una combinación de características, en la que el alcance de protección se define por las reivindicaciones de patente.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para controlar una turbina eólica (100) que comprende
  - controlar la producción de potencia eléctrica (301) dependiendo de una referencia de potencia ( $P_{ext}$ ),
  - controlar el paso de una pala (103) de la turbina eólica usando una solicitud de paso ( $\theta_{req}$ ), donde la solicitud de paso ( $\theta_{req}$ ) se amplifica mediante una ganancia ajustable (401, 401a),
  - fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia aumentado ( $G_1, G_i$ ) si una tasa de cambio ( $\Delta P$ ) de la referencia de potencia ( $P_{ext}$ ) supera un umbral ( $\Delta P_1, \Delta P_3$ ),
 caracterizado porque el método comprende además
  - controlar el paso hasta que el paso alcanza una referencia de paso ( $\theta_{opt}$ ) determinada dependiendo de la velocidad del viento,
  - controlar la producción de potencia eléctrica (301) dependiendo de la diferencia entre una referencia de funcionamiento ( $\omega_{ref}$ ) y un parámetro de funcionamiento medido ( $\omega_m$ ), y
  - controlar el paso dependiendo de la referencia de paso ( $\theta_{opt}$ ), una vez que el paso ha alcanzado la referencia de paso ( $\theta_{opt}$ ).
2. Método según la reivindicación 1, que comprende además
  - aumentar la producción de potencia dependiendo de la referencia de potencia creciente ( $P_{ext}$ ), donde la producción de potencia se aumenta desde una potencia inicial ( $P_0$ ) que es menor que o igual a la energía eólica disponible (302).
3. Método según la reivindicación 2, que comprende además
  - aumentar la producción de potencia desde la potencia inicial ( $P_0$ ) hasta una potencia final ( $P_1$ ) que es menor que o igual a una potencia nominal ( $P_{rated}$ ) o una potencia máxima de la turbina eólica.
4. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además
  - aumentar la ganancia ajustable (401, 401a) dependiendo de la tasa de cambio ( $\Delta P$ ) de la referencia de potencia ( $P_{ext}$ ).
5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende
  - fijar la ganancia ajustable según un esquema de ganancia (503) que define los valores de ganancia ( $G$ ) como una función de la tasa de cambio ( $\Delta P$ ) de la referencia de potencia ( $P_{ext}$ ).
6. Método según la reivindicación 5, en el que el esquema de ganancia (503) define una ganancia mínima ( $G_0$ ) para la tasa de cambios de la referencia de potencia por debajo del umbral ( $\Delta P_1, \Delta P_3$ ).
7. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5-6, en el que el esquema de ganancia (503) comprende funciones de ganancia creciente (511, 512) para la tasa de cambios ( $\Delta P$ ) de la referencia de potencia ( $P_{ext}$ ) por encima del umbral ( $\Delta P_1, \Delta P_3$ ).
8. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5-7, en el que el esquema de ganancia (503) define valores de ganancia para la tasa de cambios ( $\Delta P$ ) positiva y negativa de la referencia de potencia ( $P_{ext}$ ).
9. Método según la reivindicación 8, en el que el esquema de ganancia (503) define un valor de ganancia máximo ( $G_1$ ) para la tasa de cambios positiva de la referencia de potencia por encima de un umbral positivo superior ( $\Delta P_2$ ) y/o para la tasa de cambios negativa de la referencia de potencia por debajo de un umbral negativo superior ( $\Delta P_4$ ).
10. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además
  - determinar la solicitud de paso ( $\theta_{req}$ ) dependiendo de la diferencia entre una referencia de velocidad del generador ( $\omega_{ref}$ ) y una velocidad del generador medida ( $\omega_m$ ).
11. Sistema de control (410) para una turbina eólica (100), donde la turbina eólica comprende un generador de potencia (203) configurado para generar potencia dependiendo de una referencia de potencia ( $P_{ext}$ ), y un sistema de paso (202) configurado para ajustar el paso de una pala de la turbina eólica dependiendo de una solicitud de paso ( $\theta_{req}$ ), comprendiendo el sistema de control

- 5
- un controlador (201, 402) configurado para determinar la solicitud de paso ( $\theta_{req}$ ) dependiendo de una ganancia ajustable (401, 401a), y
  - un planificador de ganancia (400) configurado para fijar la ganancia ajustable a un valor de ganancia aumentado ( $G_1, G_i$ ) si una tasa de cambio ( $\Delta P$ ) de la referencia de potencia ( $P_{ext}$ ) supera un umbral ( $\Delta P_1, \Delta P_3$ )
- caracterizado porque el controlador está configurado además para
- 10
- controlar el paso hasta que el paso alcanza una referencia de paso ( $\theta_{opt}$ ) determinada dependiendo de la velocidad del viento,
  - controlar la producción de potencia eléctrica (301) dependiendo de la diferencia entre una referencia de funcionamiento ( $\omega_{ref}$ ) y un parámetro de funcionamiento medido ( $\omega_m$ ), y
  - controlar el paso dependiendo de la referencia de paso ( $\theta_{opt}$ ), una vez que el paso ha alcanzado la referencia de paso ( $\theta_{opt}$ ).
12. Turbina eólica (100) que comprende un sistema de control según la reivindicación 11.
- 15 13. Producto de programa informático que puede cargarse directamente en una memoria interna de un ordenador digital, comprendiendo el producto de programa informático partes de código de software para realizar las etapas del método según la reivindicación 1 cuando el producto de programa informático se ejecuta en el ordenador.

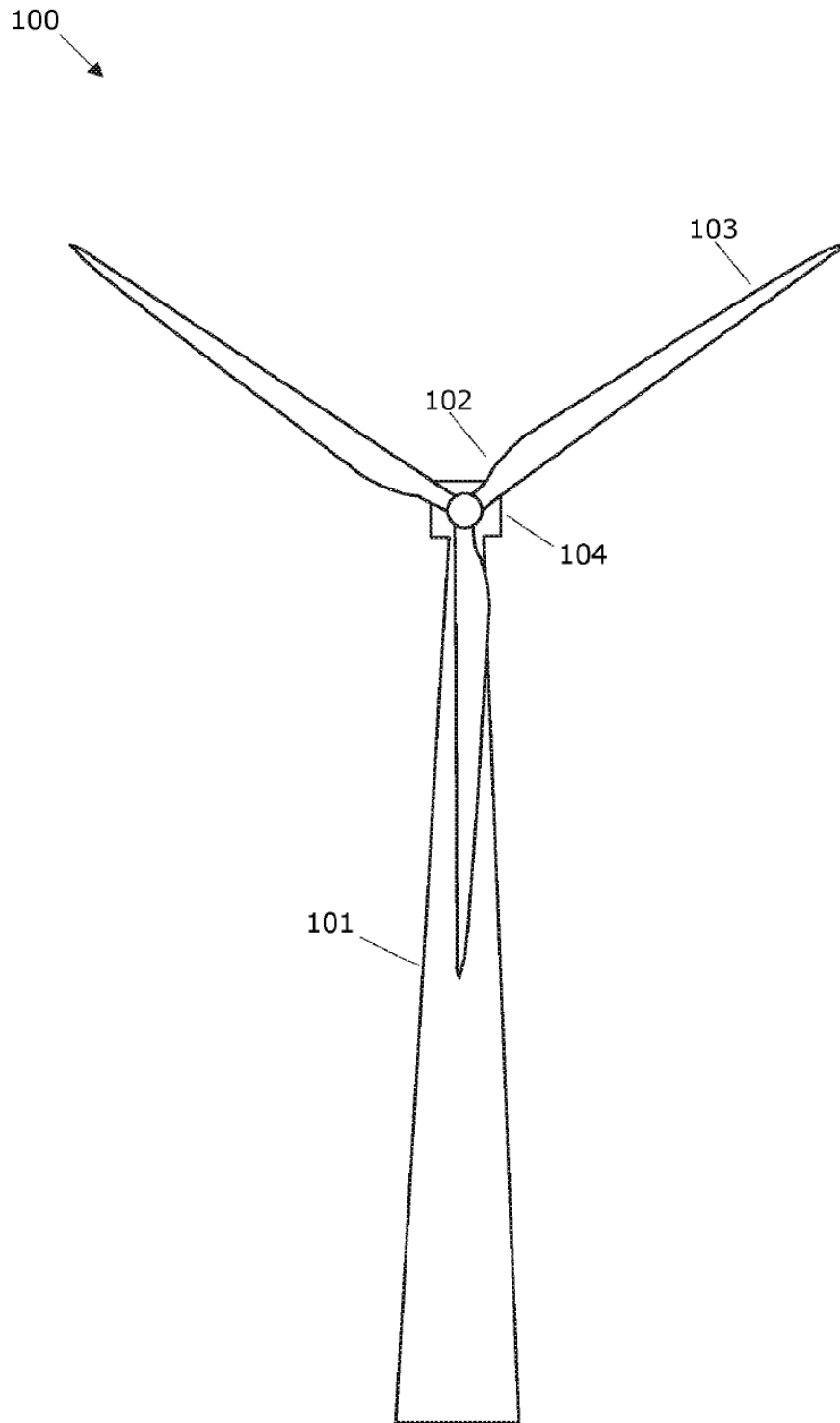


Fig. 1

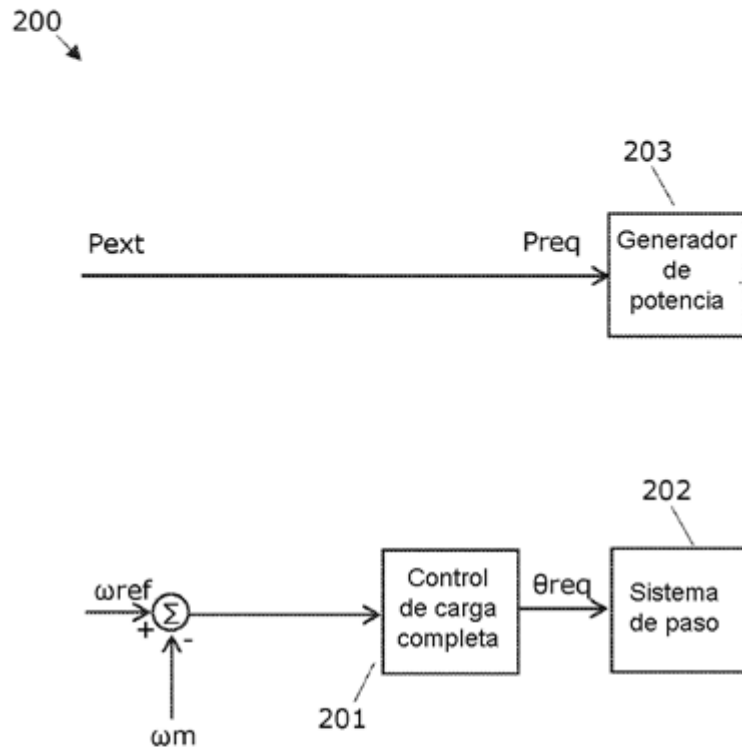


Fig. 2

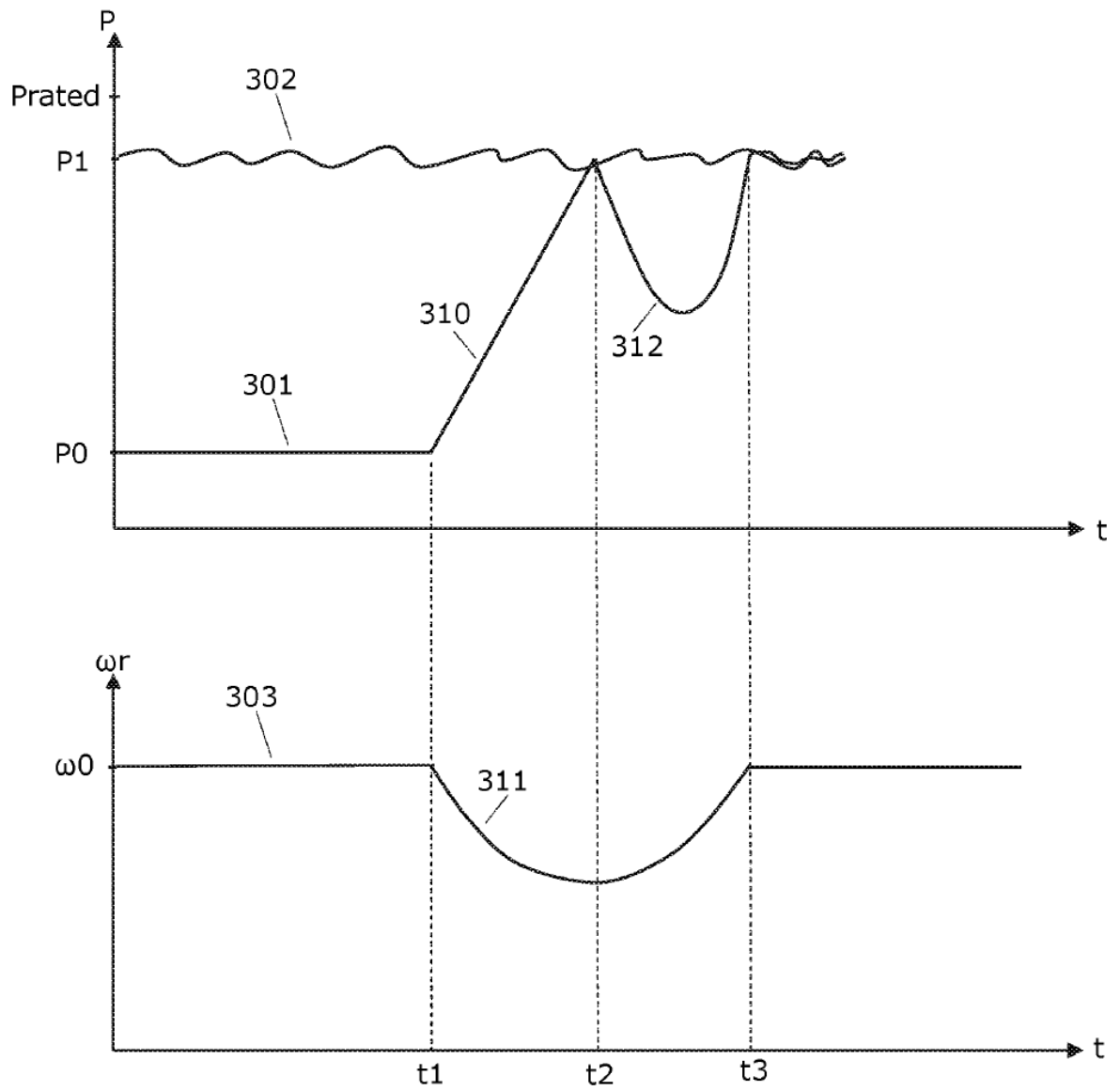


Fig. 3

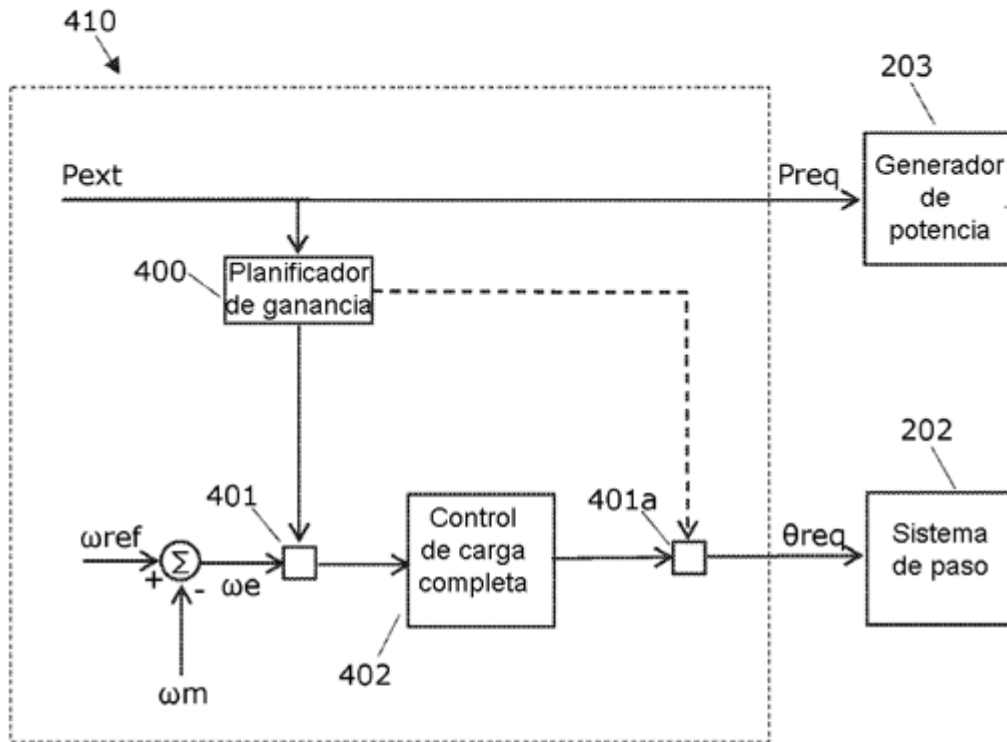


Fig. 4

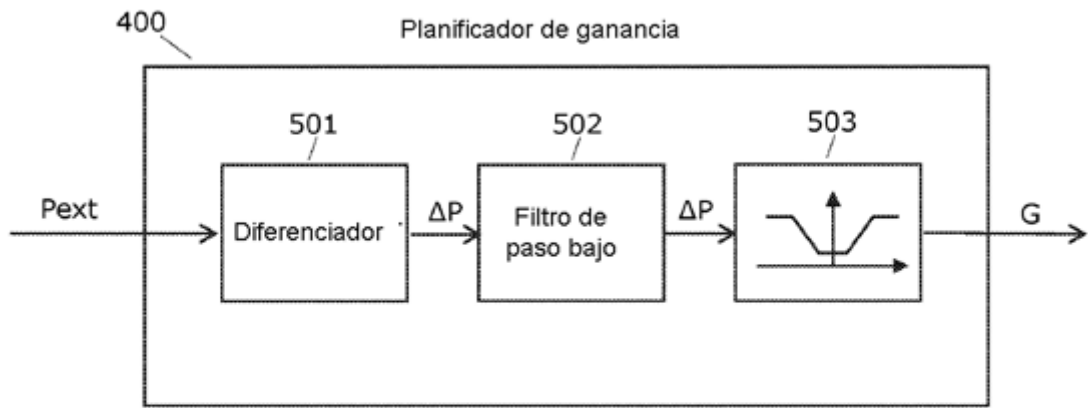


Fig. 5A

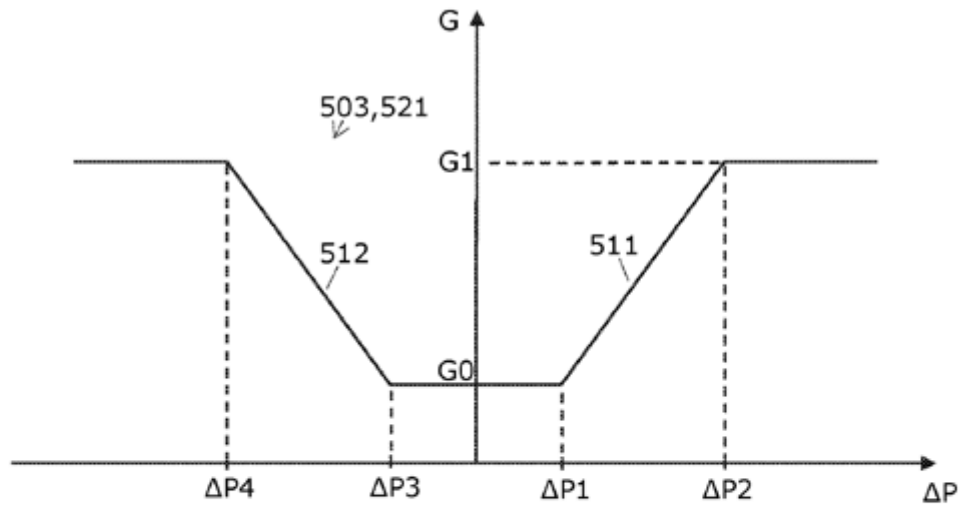


Fig. 5B



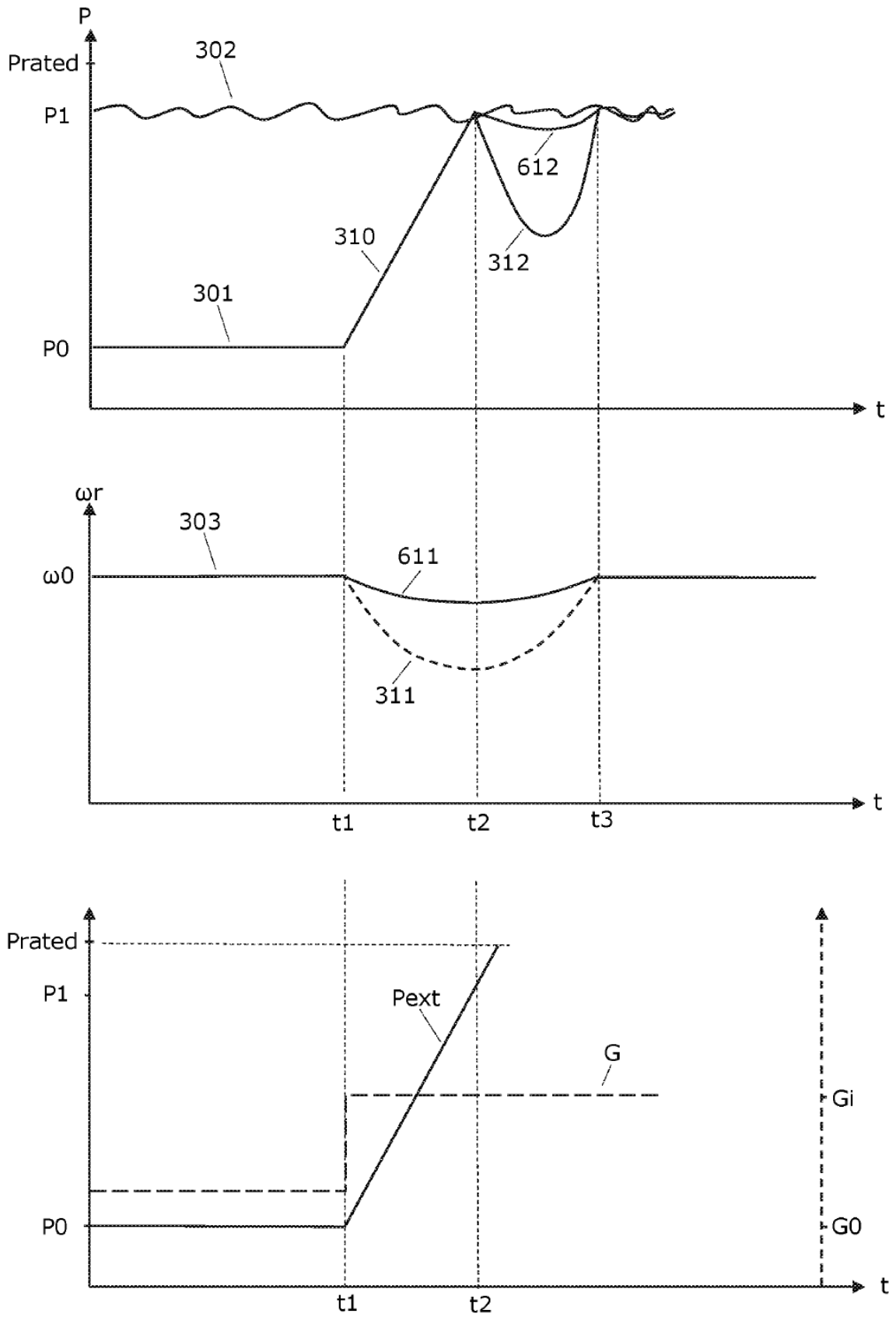


Fig. 6