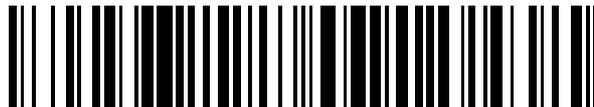


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 741 801**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.06.2016 PCT/DK2016/050215**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.12.2016 WO16206698**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.06.2016 E 16734178 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2019 EP 3314118**

54 Título: **Aumento de energía activa de una turbina eólica**

30 Prioridad:

**26.06.2015 DK 201570399**

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

**12.02.2020**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**KJÆR, MARTIN ANSBJERG;  
HERBSLEB, EIK;  
KNUDSEN, JAN VESTERGAARD y  
THOMSEN, JESPER SANDBERG**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 741 801 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**

Aumento de energía activa de una turbina eólica

**5 Campo de la invención**

La invención se refiere al control de una turbina eólica, particularmente en relación con el refuerzo de energía o el rápido aumento de la producción de energía activa.

**10 Antecedentes de la invención**

La alta penetración de las turbinas eólicas en las redes eléctricas ha permitido que los requisitos de las turbinas eólicas, sobre cómo deberían contribuir a la estabilidad de las redes eléctricas, dichos requisitos se incluyan en los llamados códigos de red.

15 Uno de los requisitos que se pueden incluir en ciertos códigos de red es la respuesta de inercia. La respuesta de inercia es una funcionalidad donde la energía se incrementa de la producción normal durante un corto período de tiempo, es decir, se aumenta la energía entregada a la red eléctrica. El refuerzo de la función de energía puede estar disponible a todas las velocidades del viento, para velocidades de viento muy bajas, el refuerzo de energía puede reducirse bastante.

20 Dependiendo del código de red, los detalles de la fase de refuerzo pueden variar. En algunos lugares se debe proporcionar una energía de refuerzo a pedido. En un ejemplo, se puede especificar que siempre que la producción de la planta de energía eólica sea superior al 25 % de la energía clasificada, la planta de energía eólica debe poder proporcionar un refuerzo de energía del 5 - 10 % de la energía clasificada durante un período de tiempo determinado, por ejemplo, hasta 10 segundos. El código de red también puede especificar los requisitos para el período de recuperación. Como ejemplo, después del refuerzo, se puede especificar que la turbina debe haber regresado a su funcionamiento normal después de 2 minutos, y que, durante la fase de recuperación, la energía producida por la turbina eólica debe permanecer dentro del 80 % de la energía disponible.

30 Muchos de los métodos de energía de refuerzo conocidos de la técnica anterior sufren diversos elementos, como un algoritmo de cálculo complejo, un comportamiento transitorio cuando la turbina eólica pasa de condiciones de viento de carga parcial a condiciones de carga completa, y no al menos dificultades durante la fase de recuperación.

35 La presente invención proporciona una solución para evitar al menos algunos de los problemas con la técnica anterior.

**Sumario de la invención**

40 Un objeto de la presente invención es proporcionar un método y un sistema para aumentar la producción de energía de una turbina eólica durante un período de tiempo. En un objeto adicional de la invención, el método y el sistema con respecto al refuerzo de energía funcionan indiferentemente de la cantidad de energía producida por la turbina eólica.

45 En un primer aspecto, la presente invención se refiere a un método para controlar una turbina eólica, la turbina eólica comprende un rotor conectado a un generador, y un controlador de velocidad de rotación configurado para controlar una velocidad del rotor en respuesta a una referencia de velocidad del generador, y un controlador de energía para controlar una producción de energía eléctrica, el método comprende la etapa de:

- 50 - recibir un comando de refuerzo para solicitar un evento de refuerzo de energía, para aumentar la producción de energía eléctrica,
- imponer una banda muerta con un límite de valor de zona muerta al controlador de velocidad de rotación,
- 55 - en el que la banda muerta impone una señal cero para ser enviada al controlador de velocidad de rotación, cuando un error de velocidad está dentro del límite del valor de la zona muerta y
- en la que la banda muerta impone una señal de error para ser enviada al controlador de velocidad de rotación, cuando el error de velocidad es mayor que el límite del valor de la zona muerta, siendo la señal de error una
- 60 función del error de velocidad y el límite del valor de la zona muerta.

Una ventaja del presente aspecto es que el funcionamiento del generador de turbina eólica por debajo de la velocidad clasificada del viento o por encima de la velocidad clasificada es indiferente con respecto al método presente, la reducción necesaria de la velocidad de rotación es manejada automáticamente por la física para cualquier condición del viento (turbulencia, cizalla, etc.). Otros métodos requieren una conmutación o transición al cambiar entre la operación de carga completa y la operación de carga parcial, ya que la energía de refuerzo

adicional mueve la operación de carga completa a carga parcial.

De acuerdo con una realización de la invención, la función del límite del valor de la zona muerta se establece en relación con el comando de refuerzo.

5 Una ventaja de esta realización es que la función puede depender de la demanda real de refuerzo de energía activa, por lo que para una gran demanda se requiere una zona muerta profunda, aunque se puede tener en cuenta la velocidad real del rotor.

10 De acuerdo con una realización de la invención, el generador de turbina eólica comprende un sistema de cabeceo configurado para ajustar el ángulo de cabeceo de una pala del rotor, y el método comprende además la etapa de

- ajustar el ángulo de cabeceo del sistema de cabeceo para controlar la velocidad de rotación del rotor y/o la producción de energía eléctrica.

15 De acuerdo con una realización de la invención, la etapa de recibir el comando de refuerzo comprende:

- recibir una solicitud para aumentar la producción de energía,
- 20 - calcular un límite de valor de zona muerta basado en la velocidad real del generador y al menos otro parámetro,
- pasar la solicitud para aumentar la producción de energía al controlador de energía.

De acuerdo con una realización de la invención, comprende la etapa de:

- 25 - devolver la turbina eólica gradualmente al modo de operación normal en modo operativo normal al aumentar la velocidad de rotación.

30 De acuerdo con una realización de la invención, un límite de valor de zona muerta se mantiene durante un período de tiempo predeterminado antes de que la velocidad vuelva a subir para seguir una referencia de velocidad sin la banda muerta.

Según una realización de la invención, el período de tiempo predeterminado está en un intervalo de 2 segundos a 15 segundos.

35 Una ventaja de esta realización es que el operador de la turbina eólica puede predecir cuándo volverá a funcionar la turbina eólica después de un evento de refuerzo.

40 De acuerdo con una realización de la invención, la velocidad vuelve a aumentar a una velocidad de rampa predeterminada.

Una ventaja de esta realización es que la velocidad vuelve al modo de funcionamiento normal sin un comportamiento transitorio del rotor. De este modo se evitan altas cargas.

45 De acuerdo con una realización de la invención, la tasa de rampa predeterminada está en un rango de 0,025 RPM/s a 0,2 RPM/s.

De acuerdo con una realización de la invención, la etapa de devolver la turbina eólica al modo de funcionamiento normal se activa mediante una señal de comando de parada de refuerzo.

50 Una ventaja de esta realización es que el método puede abordar el evento de refuerzo de energía mediante una señal de comando si se solicita.

55 En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un sistema de control para una turbina eólica dispuesto para recibir un comando de refuerzo de un controlador externo para solicitar un evento de refuerzo de energía, la turbina eólica comprende un rotor conectado a un generador configurado para generar energía eléctrica dependiente en una referencia de energía y el comando de refuerzo, el sistema de control comprende:

- 60 - un controlador de velocidad de rotación dispuesto para controlar la velocidad del generador, basado en un error de velocidad,
- un bloque de banda muerta dentro del controlador de velocidad de rotación dispuesto para imponer una banda muerta, con un límite de valor de zona muerta, al controlador de velocidad de rotación en respuesta al comando de refuerzo,
- 65 - en el que la banda muerta está dispuesta para enviar una señal cero al controlador de velocidad de rotación,

cuando el error de velocidad está dentro de un límite de valor de zona muerta, y

- en el que la banda muerta está dispuesta para enviar una señal de error, donde la señal de error es una función del error y el límite del valor de la zona muerta, al controlador de velocidad de rotación, cuando el error de velocidad es mayor que el límite del valor de la zona muerta.

De acuerdo con una realización de la invención, una planta de energía eólica que comprende un controlador de planta de energía y al menos una turbina eólica con un sistema de control de acuerdo con el segundo aspecto de la invención, estando dispuesto el controlador de la planta de energía para enviar un punto de ajuste de energía al menos a una turbina eólica, en la que el punto de ajuste de energía incluye una referencia de energía incrementada o un comando de refuerzo.

En un tercer aspecto, la presente invención se refiere a un producto de programa informático que puede cargarse en una memoria interna de un dispositivo de procesamiento, comprendiendo el producto de programa informático porciones de código de software para realizar las etapas del método según el primer aspecto.

### Breve descripción de los dibujos

La figura 1 muestra una turbina eólica,

La figura 2 muestra un sistema de control de la turbina eólica donde el sistema de control está en estado de carga parcial y completa,

La figura 3 muestra un diagrama de bloques del controlador,

La figura 4 muestra simulaciones del método de acuerdo con la invención, por debajo de la velocidad clasificada del viento, y

La figura 5 muestra simulaciones del método de acuerdo con la invención, por encima de la velocidad clasificada del viento.

### Descripción de las realizaciones

La presente invención se explicará ahora con más detalle.

La figura 1 muestra una turbina eólica 100 (WTG) que comprende una torre 101 y un rotor 102. El rotor comprende tres palas del rotor 103, sin embargo, el número puede variar, como dos, cuatro o incluso más palas. El rotor está conectado a una góndola 104 que está montada en la parte superior de la torre 101 y está adaptada para impulsar un generador situado dentro de la góndola. El rotor 102 es giratorio por acción del viento. La energía de rotación inducida por el viento de las palas del rotor 103 se transfiere a través de un eje al generador. Por lo tanto, la turbina eólica 100 es capaz de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica por medio de las palas del rotor y, posteriormente, en energía eléctrica por medio del generador. La disposición eléctrica de la turbina eólica puede, además del generador, incluir un convertidor de energía. El convertidor de energía se conecta en serie entre el generador y la red eléctrica para convertir la energía de CA del generador de frecuencia variable en una red de energía de CA para inyectar en la red eléctrica. El generador es controlable a través del convertidor de energía para producir una energía correspondiente a una solicitud de energía.

Las palas 103 pueden inclinarse para alterar las propiedades aerodinámicas de las palas, por ejemplo, para maximizar la captación de la energía eólica. Las palas están inclinadas por un sistema de cabeceo, que incluye accionadores para lanzar las palas en función de una solicitud de cabeceo.

En un funcionamiento normal, una turbina eólica está configurada para capturar tanta energía del viento, a cualquier velocidad del viento, esto funciona siempre que la producción de energía esté por debajo del límite de energía clasificada de la turbina eólica, es decir, operación de carga parcial. Cuando la velocidad del viento aumenta por encima de la velocidad clasificada del viento, a menudo diseñada a 10-12 m/s, la turbina eólica debe lanzar las palas 103, por lo que la energía capturada es estable a la energía clasificada, incluso si el viento está muy por encima de la velocidad clasificada del viento.

Para asegurar la mayor cantidad posible de rendimiento energético, durante la carga parcial, el valor de consigna de la energía eléctrica Preq se establece de manera que la relación de velocidad de la punta,  $\lambda$  para el rotor 102, se mantenga en su valor óptimo,  $\lambda_{opt}$ .

Los términos como relación de velocidad de punta y relación de velocidad de punta óptima son conocidos por los expertos.

El estado de carga parcial puede seleccionarse si la velocidad del viento no es lo suficientemente alta como para

5 permitir la generación de energía eléctrica clasificada o plena del generador. En este estado, la cabeceo  $\theta$  y la velocidad del generador se controlan para optimizar la eficiencia aerodinámica de la turbina eólica 100. Por lo tanto, la solicitud de cabeceo  $\theta_{req}$  se puede establecer en una referencia de cabeceo óptima  $\theta_{opt}$  que maximice la eficiencia aerodinámica del rotor. La velocidad del generador  $\omega_r$  puede controlarse para extraer la mayor cantidad de energía posible al rastrear la velocidad deseada del generador  $\omega_{ref}$ . En el estado de carga parcial, la velocidad del generador se controla a través de la solicitud de energía  $P_{req}$  que afecta el par del generador.

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

15 El estado de carga completa se puede seleccionar si la velocidad del viento  $v$  es lo suficientemente alta como para permitir la generación de una energía eléctrica clasificada. Por lo tanto, la velocidad del generador y la energía del generador pueden controlarse para lograr una producción de energía deseada, por ejemplo, una energía clasificada o una energía reducida. La solicitud de energía  $P_{req}$  se establece en la producción de energía deseada. El núcleo de referencia de la velocidad del generador puede determinarse en función de la producción de energía deseada y, posiblemente, limitarse a una velocidad clasificada máxima. En el estado de carga completa, la velocidad del generador se controla a través de la solicitud de cabeceo  $\theta_{req}$ .

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

25 El nivel de energía clasificada es el nivel de energía que la turbina eólica está diseñada para generar a una velocidad del viento clasificada o superior. En algunas circunstancias, la turbina eólica puede ser operada para generar una energía máxima, que es más alta que la energía clasificada, cuando este aumento es por un corto período de tiempo que se llama en el evento de refuerzo.

30 La figura 2 muestra un ejemplo de un diagrama de flujo de un controlador de carga total y carga parcial 200 para una turbina eólica.

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

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

45 Durante la carga completa, la solicitud del generador  $P_{req}$  se determina en función de una referencia de alimentación externa  $P_{ext}$  y, por lo tanto, el controlador de carga parcial puede inactivarse durante el control de carga completa. Por ejemplo, la solicitud de generador  $P_{req}$  puede ser igual a la referencia de alimentación externa  $P_{ext}$ . La referencia de energía externa  $P_{ext}$  puede ser proporcionada por un operador de red u otra fuente, como el controlador de la planta de energía que se comunica con una pluralidad de turbinas eólicas, por ejemplo, el controlador de la planta de energía configurado para compensar los cambios de frecuencia de la red.

50 Cuando un operador de la red solicita continuamente un  $P_{ext}$  que es mayor que  $P_{req}$  en carga parcial, se producirá un error de alimentación, ya que la turbina eólica se limita a la energía disponible en el viento a la velocidad del viento dada.

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

60 La solicitud de cabeceo  $\theta_{req}$  se suministra al sistema de cabeceo 202 que realiza el ajuste de cabeceo de los álabes 103. El sistema de cabeceo puede contener un controlador de cabeceo con el que recibe la solicitud de cabeceo  $\theta_{req}$  y controla los activadores de cabeceo para establecer la cabeceo a la cabeceo solicitada.

65 Se observa que la velocidad del generador  $\omega_r$  y la velocidad del rotor están unidas por la relación de engranaje del engranaje que conecta el rotor con el árbol del generador. Por consiguiente, el núcleo de referencia de la velocidad del generador  $\omega_{ref}$  y sus equivalentes se pueden establecer como una referencia de la velocidad del rotor y se puede usar una velocidad del rotor medida de manera equivalente en lugar de una velocidad del generador medida.

## ES 2 741 801 T3

En una realización, no hay caja de engranajes entre el rotor 102 y el generador de energía eléctrica 203, por lo tanto, no habrá relación de engranaje, y la velocidad de rotación del rotor 102 y el generador 203.

5 Las velocidades de rotación y las rampas de velocidad mencionadas aquí se traducen al lado del rotor dinámico aerodinámico.

También se observa que el generador de energía 203 se puede controlar de manera equivalente mediante una solicitud de par en lugar de la solicitud de energía Preq. Por consiguiente, se entiende que la solicitud de energía Preq puede ser un punto de ajuste de energía o par para el generador de energía 203.

10 La turbina eólica se puede operar en modo desactivado en la configuración de carga completa 200, es decir, en un modo en el que la Preq de solicitud de energía se establece en una referencia de energía reducida.

15 El modo de desclasificación también se puede practicar en modo de carga parcial, donde el controlador parcial establece una Preq que se descalifica con respecto a la energía óptima para una velocidad de viento determinada.

20 El modo de desclasificación también se conoce como modo de energía reducida o modo de energía reducida. La referencia de energía reducida puede ser cualquier energía, que es inferior a la energía clasificada de la turbina eólica. En el modo de energía des clasificada, la cabeceo se controla de acuerdo con un núcleo de referencia de velocidad del generador que puede desclasificarse, es decir, reducirse o no dependiendo del diseño de la turbina eólica. La referencia de la velocidad del generador  $\omega_{ref}$  se puede establecer a partir de una relación predefinida de energía-velocidad.

25 Por lo tanto, el modo de desclasificación de energía se refiere a una situación en la que la turbina eólica se opera para producir una cantidad reducida de energía, es decir, una situación en la que la turbina eólica se controla para producir una cantidad de energía, que es menor que la energía que se puede producir con la energía eólica disponible.

30 Por ejemplo, la turbina eólica se puede operar en un modo des clasificado para establecer una reserva de energía que se puede liberar rápidamente, por ejemplo, si surge un problema con la red. Por consiguiente, a petición, la turbina eólica debe aumentar la energía rápidamente para volver a la producción total.

35 Se observa que la configuración 200 es solo un ejemplo y que una turbina eólica puede configurarse de otras maneras para lograr el control del cabeceo y la energía y para lograr una producción de energía des clasificada.

40 Como se mencionó anteriormente, es importante que los operadores de la red puedan solicitar energía adicional de una turbina eólica o una pluralidad de turbinas eólicas, para inyectar energía en la red eléctrica, esto puede ocurrir durante un evento de baja frecuencia, donde la energía activa adicional ayudará a que la frecuencia de la red vuelva a un estado mejor.

45 Si bien esa desclasificación puede considerarse como una solución, también requiere que la turbina eólica funcione a un valor des clasificado durante la mayoría de las horas de funcionamiento, por lo que es deseable otra solución.

50 Como una turbina eólica tiene un plano de rotor grande 102 con palas grandes 103, una gran cantidad de energía cinética se almacena en el rotor 102 como inercia del rotor, la energía de rotación puede liberarse extrayendo más energía, lo que resulta en una reducción de la velocidad de rotación del rotor 102, y convertir la energía mecánica en energía eléctrica en el generador. Tal evento es un evento de energía de refuerzo, ya que la energía se refuerza en un corto período de tiempo.

55 En general, es más difícil realizar un evento de energía de refuerzo cuando la turbina eólica está funcionando en una operación de carga parcial, ya que la energía producida está de acuerdo con la velocidad real del viento, es decir, el rotor está funcionando a la velocidad de punta óptima, cosechando la energía disponible, en la velocidad actual del viento.

60 En funcionamiento a plena carga, es algo más simple, ya que el viento proporciona más energía que la captada por el rotor 102, es decir, el ángulo de cabeceo de las palas se establece de manera que las palas 103 se apartan del viento máximo.

Existen diferentes métodos para controlar la turbina en el evento de energía de refuerzo.

65 Común para todos los métodos de refuerzo de energía es que la energía aumenta en la fase de refuerzo, a petición, durante un período de tiempo, como consecuencia, la velocidad de rotación del rotor disminuye al menos en la operación de carga parcial. La fase de refuerzo es seguida por una fase de recuperación, donde la velocidad de rotación vuelve a un ajuste de velocidad, que es normal para la turbina eólica en el nivel de producción de energía dado y la velocidad actual del viento. La fase de recuperación a menudo toma mucho más tiempo que la fase de refuerzo, en la recuperación la energía puede disminuir para acumular energía cinética en el rotor 102. Es

importante que la producción de energía durante la recuperación no disminuya demasiado, de lo contrario podría causar más problemas de estabilidad en la red eléctrica.

5 La figura 3 muestra elementos de una realización de la presente invención, en la que la turbina eólica funciona con una zona muerta de velocidad. Este método tiene varias ventajas en comparación con otros métodos.

En la figura 3 se ilustra un diagrama de bloques del método de la zona muerta de velocidad.

10 Un controlador de planta de energía envía un nivel de refuerzo 308 a la turbina eólica 300. Este nivel de refuerzo se agrega a la salida del controlador de carga parcial (PLC) que luego se convierte en la referencia de energía 310 al convertidor 304.

15 El comando de refuerzo puede enviarse a la turbina eólica desde un controlador de planta de energía, pero también puede iniciarse por otras formas de comunicación. El comando puede ser un punto de ajuste de energía que incluya la producción de energía actual, es decir,  $P_{\text{present}} + \Delta P$ , o puede ser un comando  $\Delta P$  por separado, o como otra opción puede ser un indicador binario que indica que la turbina eólica debe proporcionar un período de refuerzo de energía.

20 En una realización, el sistema de control de la turbina eólica 100 está dispuesto de modo que cuando ocurren eventos predefinidos, el sistema de control inicia el comando de refuerzo internamente. Los eventos predefinidos pueden ser mediciones de baja frecuencia en los terminales de conexión de la turbina eólica a la red eléctrica.

25 En una realización, el nivel de refuerzo 308 está entre el 0 % y el 10 % de la energía clasificada, también se pueden imponer niveles de refuerzo más grandes 308, y se considerará que están dentro del alcance de la presente solicitud.

30 Un componente de zona muerta dinámica 320 se inserta en el error del controlador antes de que entre en el controlador de velocidad 302. En funcionamiento normal, la zona muerta es cero. Cuando el refuerzo está en curso, la lógica de sobreproducción 303 determina un valor de zona muerta 313 que permite que la velocidad del generador disminuya, pero aun así asegura un funcionamiento seguro y evita paradas no deseadas. El valor de la zona muerta se selecciona para que la caída de velocidad del generador no caiga por debajo de la velocidad mínima y las cargas mecánicas de los componentes mecánicos de la turbina eólica estén dentro de un nivel seguro.

35 El valor de zona muerta 313 se comunica al componente de la zona muerta que envía "cero" desde el componente dinámico de la zona muerta 320, cuando el error de velocidad del generador 311 está entre cero y el valor de zona muerta 313. El componente 320 de la zona muerta puede imponer la zona inmediatamente o la zona muerta puede expandirse lentamente al valor de zona muerta 313. De hecho, la zona muerta impone una banda muerta en el error de velocidad.

40 El límite del valor de la zona muerta puede ser un valor predeterminado, pero a menudo será una variable.

En una realización, el límite del valor de la zona muerta es una función de la velocidad del rotor, por lo que el límite del valor de la zona muerta 313 sigue el error de velocidad 311 como una función de envolvente.

45 En una realización, la función del límite del valor de la zona muerta se establece en relación con el comando de refuerzo, donde se tiene en cuenta la duración del período de refuerzo y la cantidad de energía de refuerzo.

50 En la figura 3, el error de velocidad 311 se calcula como la diferencia entre una medición de velocidad de rotación 312 y la referencia de velocidad del generador 301.

El controlador de velocidad 302 controlará la referencia de energía al convertidor 304, de acuerdo con la salida del componente de zona muerta 520. Durante la fase de refuerzo, el nivel de refuerzo 308 agrega un nivel de energía  $\Delta P$  al convertidor en el bloque de suma.

55 Por debajo de la velocidad clasificada del viento, tal evento de refuerzo de energía hará que la velocidad de rotación disminuya. Para velocidades de viento más altas, eso es lo que corresponde a la energía clasificada más la energía de refuerzo, la velocidad de rotación no disminuirá, ya que existe una energía suficiente en el viento.

60 Normalmente, cuando la velocidad de rotación disminuye, el controlador de velocidad 302 disminuirá la salida de energía para ajustar la velocidad y, por lo tanto, la energía de refuerzo se eliminará de manera efectiva. Para evitar esto, la banda muerta se inserta dentro del controlador de velocidad 302 después del error 311 entre la medición de velocidad de rotación (es decir, la velocidad del generador) y la referencia de velocidad de rotación 301. Esta banda muerta se extiende, si es necesario, en cada muestra hacia abajo con la velocidad de rotación medida descendente. De esta manera el refuerzo no se ve afectado.

65 Es importante mantener la velocidad de rotación del rotor dentro de un área segura, si la velocidad cae a un nivel

bajo, no será posible recuperar la turbina eólica al final del evento de refuerzo, y puede ocurrir un apagado.

5 Para protegerse especialmente de las paradas durante la fase de refuerzo, algunos límites se colocan en la zona muerta. Si se excede un límite (por ejemplo, una caída de velocidad de 400 RPM), la zona muerta simplemente se mantiene en el umbral y el controlador de velocidad 302 comenzará a funcionar. El controlador de velocidad 302 reducirá la energía para mantener la velocidad de rotación en el umbral y, por lo tanto, se evitará un apagado debido a la baja velocidad. Esta situación podría suceder fácilmente si el viento cae durante el aumento.

10 De hecho, el valor límite es el error de velocidad real 311. Cuando se supera el límite, el bloque de zona muerta dinámica 320 envía un valor distinto de cero al PLC 302, la salida no cero del bloque de zona inactiva dinámica 320 es, de hecho, el error de velocidad 311 restó el límite de valor de zona muerta 313.

15 Mientras la velocidad cambia (baja), el controlador de cabeceo 305 ajusta al cabeceo para obtener una captura de energía óptima del rotor.

20 Cuando finaliza el período de refuerzo, se termina desde el lado del controlador de la planta de energía, o se usa el tiempo o la energía máximos, la zona muerta se debe eliminar de nuevo. Para evitar grandes caídas de energía, la entrada al controlador de velocidad 302 debe cambiar lentamente para mantener la velocidad de rotación en la referencia.

25 En una realización, el punto de la zona muerta inferior se mantiene durante 5 segundos antes de que la velocidad se incremente de nuevo con 0,1 RPM/s. Entonces, por ejemplo, para una caída de 0,03 RPM, la zona muerta será eliminada después de 35 segundos.

30 En una realización, la velocidad se reduce de nuevo con una velocidad de 0,025 RPM/s a 0,2 RPM/s preferiblemente alrededor de 0,05 RPM/s.

35 La velocidad de rampa puede depender de la turbina eólica, especialmente la velocidad clasificada del generador, ya que los valores mencionados aquí son valores de velocidad del generador, que dependen de la relación de la caja de engranajes. Entonces, para las turbinas eólicas de accionamiento directo, los valores de velocidad de rampa que deben aplicarse son mucho más bajos.

40 El método presente con la zona muerta tiene la ventaja sobre otros métodos, donde la velocidad de rotación se controla durante el período de refuerzo, en que la energía es siempre la misma, sin importar las condiciones del viento. Por otro lado, con turbulencia no es seguro, cuando se ejecuta por debajo de la velocidad clasificada del viento, es decir, en condiciones de carga parcial, se obtiene una energía adicional, ya que el viento puede acumularse durante el refuerzo y, por lo tanto, no se realiza la reducción de velocidad. Del mismo modo, el viento podría caer durante el refuerzo y el nivel de energía de refuerzo se vuelve demasiado alto para el estado actual de la turbina eólica.

45 El presente método también tiene la ventaja de ser simple y confiable. Especialmente, ya que no es necesario averiguar si se requiere una reducción de velocidad para aumentar la energía; es decir para que haya suficiente energía en el viento, la energía no debe tomarse del rotor. Por lo tanto, la reducción necesaria de la velocidad de rotación es manejada "automáticamente" por la física para cualquier condición del viento (turbulencia, cizallamiento, etc.).

50 El presente método mantiene el refuerzo "vivo" el mayor tiempo posible, ya que la banda muerta activa el controlador de velocidad mientras el error de velocidad se encuentre dentro del límite del valor de la zona muerta 313, esto conduce a un control suave en la zona muerta.

55 Una ventaja de la realización es que el funcionamiento de la turbina eólica en condición de carga parcial o de carga completa es indiferente con respecto al modo durante el evento de refuerzo. Otros métodos requieren un cambio o transición al cambiar entre la operación de carga completa y la operación de carga parcial. Una razón para ese interruptor es que, en funcionamiento normal, el controlador de carga parcial opera el rotor 102 y sus palas 104 a un cabeceo fija mientras se ajusta la velocidad de rotación. En funcionamiento a plena carga, el controlador de cabeceo está activo para mantener la producción de energía en un nivel de energía clasificada.

60 La lógica que determina el límite del valor de la zona muerta 313 debe tener en cuenta las precauciones pertinentes. La versión más sencilla es asegurarse de que la velocidad no descienda por debajo de un umbral determinado. Sin embargo, también se pueden imponer otras restricciones, como las limitaciones de par y las limitaciones de temperatura. La limitación de temperatura es principalmente relevante para el convertidor de energía, ya que el convertidor puede funcionar cerca de un límite de temperatura, y una sobrecarga adicional puede hacer que el convertidor de energía se dispare.

65 Después del evento de refuerzo, cuando la velocidad del rotor debe incrementarse nuevamente, hay muchas maneras de aumentar la velocidad. En términos generales, la velocidad del generador regresa a un estado operativo

para producir la mayor cantidad de energía posible.

En una realización, el período de retención de velocidad es seguido por una rampa de velocidad muy lenta de vuelta a la velocidad operacional normal.

5 En una realización, el aumento de velocidad cambia con la derivada de la velocidad ( $dRPM/dt$ ) suavemente hasta que se alcanza una cantidad suficiente de  $dRPM/dt$  (por ejemplo, del lado del generador a 5 RPM/s) seguida de una rampa.

10 En principio, se puede aplicar cualquier transición suave en la velocidad del rotor siempre que se eviten los transitorios.

Para la realización presentada aquí, se aplica que la fase de refuerzo durante el aumento puede terminarse si la velocidad de rotación excede algunos límites especificados.

15 Debe entenderse que el término controlador de energía abarca tanto un controlador de energía como un controlador de par. La energía se da como el par de torsión de la rotación, aquí tenemos una medida de la rotación o al menos una estimación de la rotación, por lo que es sencillo derivar un valor de energía o un valor de par.

20 Las figuras 4 y 5 muestran cinco curvas dependientes del tiempo diferentes para ilustrar el comportamiento del método utilizando la zona muerta. Cada figura muestra las mismas señales de arriba a abajo, comenzando con la velocidad real del viento, luego la referencia de energía, seguida de la velocidad del generador eléctrico (la relación de engranaje es 110), y la cuarta curva muestra el límite del valor de la zona muerta establecido por el bloque lógico de sobreproducción 303 de la figura 3. La última curva muestra la señal de error de velocidad real enviada al controlador de velocidad 302.

La figura 4 muestra una situación con una simulación a 7 m/s. Refuerzo del 10 % de la energía clasificada en 10 segundos, que se encuentra en el área de carga parcial. La referencia de energía se incrementa a los 100 segundos. La velocidad del generador muestra una respuesta rápida a medida que la velocidad comienza a disminuir, en función del límite del valor de la zona muerta, que sigue al error de velocidad.

30 El error de velocidad del generador está fuera de límite después del período de refuerzo de 10 segundos, esto se puede ver en la curva inferior donde el "valor de la zona muerta del error de velocidad del generador" difiere de cero, se puede ver que el controlador Pi mantiene el generador velocidad.

35 El "error de velocidad del generador" se encuentra en la señal de entrada al controlador de carga parcial 302 en la figura 3.

40 La figura 5 muestra una simulación a 16 m/s, que está por encima de la velocidad clasificada del viento y, por lo tanto, en funcionamiento a plena carga. Refuerzo del 10 % de la energía clasificada en 10 segundos.

45 Como la turbina eólica funciona a plena carga, solo hay una ligera influencia en la velocidad del generador. La velocidad comienza a disminuir un poco en el tiempo de 100 segundos hasta 105 segundos, donde el controlador de cabeceo de la turbina eólica captura la caída de velocidad y en un tiempo de 110 segundos la velocidad vuelve a la velocidad normal, como lo era antes del evento de refuerzo. Después del evento de refuerzo en el tiempo 110 segundos, la velocidad aumenta un poco a medida que el refuerzo de energía ha finalizado.

50 Las figuras presentadas muestran cómo el método, cuando se implementa, se comporta cuando se solicita un refuerzo de energía.

Aunque la invención es susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, se han descrito realizaciones específicas a modo de ejemplos. Debe entenderse, sin embargo, que la invención no pretende limitarse a las formas particulares descritas. Más bien, la invención debe cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que se encuentran dentro del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas. Cualquier rango o valor del dispositivo dado en el presente documento puede ser extendido o alterado sin perder el efecto buscado, como será evidente para el experto.

60 Las realizaciones de la invención pueden implementarse por medio de hardware electrónico, software, firmware o cualquier combinación de estos. Las realizaciones implementadas por software o características del mismo pueden organizarse para ejecutarse en uno o más procesadores de datos y/o procesadores de señales digitales. El software se entiende como un programa de ordenador o un producto de programa de ordenador que puede almacenarse/distribuirse en un medio adecuado legible por ordenador, 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, 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 de acuerdo con realizaciones de la

invención cuando el producto del programa informático es llevado a cabo/ejecutado por un ordenador o por un sistema informático distribuido.

5 Aunque la presente invención se ha descrito en relación con las realizaciones especificadas, no debe interpretarse como limitada de ninguna manera a los ejemplos presentados. El alcance de la presente invención se define en el conjunto de reivindicaciones adjuntas. En el contexto de las reivindicaciones, los términos "que comprende" o "comprende" no excluyen otros elementos o etapas posibles. Además, la mención de referencias como "un" o "una", etc. no debe interpretarse como excluyendo una pluralidad. El uso de signos de referencia en las reivindicaciones con respecto a los elementos indicados en las figuras tampoco debe interpretarse como limitante del alcance de la invención. Además, las características individuales mencionadas en diferentes reivindicaciones posiblemente pueden combinarse ventajosamente, y la mención de estas características en diferentes reivindicaciones no excluye que una combinación de características no sea posible y ventajosa.

10

**REIVINDICACIONES**

1. Método para controlar una turbina eólica, la turbina eólica comprende un rotor conectado a un generador, y un controlador de velocidad de rotación configurado para controlar una velocidad del rotor en respuesta a una referencia de velocidad del generador, y un controlador de energía para controlar una producción de energía eléctrica, comprendiendo el método la etapa de:
- recibir un comando de refuerzo para solicitar un evento de refuerzo de energía, para aumentar la producción de energía eléctrica,
  - imponer una banda muerta con un límite de valor de zona muerta al controlador de velocidad rotacional,
  - en el que la banda muerta impone una señal cero para enviar al controlador de velocidad de rotación, cuando un error de velocidad está dentro del límite del valor de la zona muerta y
  - en el que la banda muerta impone una señal de error para ser enviada al controlador de velocidad de rotación, cuando un error de velocidad es mayor que el límite del valor de la zona muerta, la señal de error es una función del error de velocidad y el límite del valor de la zona muerta.
2. Método según la reivindicación 1, en el que el límite del valor de la zona muerta es un valor variable.
3. Método según la reivindicación 2, en el que el límite del valor de la zona muerta es una función de la velocidad del rotor.
4. Método según la reivindicación 3, en el que la función del límite de valor de la zona muerta se establece en relación con el comando de refuerzo.
5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el generador de turbina eólica comprende un sistema de cabeceo configurado para ajustar el ángulo de cabeceo de una pala del rotor, y el método comprende además la etapa de:
- ajustar el ángulo de cabeceo del sistema de cabeceo para controlar la velocidad de rotación del rotor y/o la producción de energía eléctrica.
6. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de recibir el comando de refuerzo comprende:
- recibir una solicitud para aumentar la producción de energía,
  - calcular un límite de valor de zona muerta en función de la velocidad real del generador y al menos otro parámetro,
  - pasar la solicitud para aumentar la producción de energía al controlador de energía.
7. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además la etapa de:
- devolver la turbina eólica gradualmente al modo de funcionamiento normal aumentando la velocidad de rotación.
8. Método según la reivindicación 7, en el que un límite de valor de zona muerta se mantiene durante un período de tiempo predeterminado antes de que la velocidad vuelva a aumentar para seguir una referencia de velocidad sin la banda muerta.
9. Método según la reivindicación 8, en el que el período de tiempo predeterminado está en un intervalo de 2 segundos a 15 segundos.
10. Método de acuerdo con la reivindicación 8, en el que la velocidad vuelve a aumentar a una velocidad de rampa predeterminada.
11. Método según la reivindicación 10, en el que la velocidad de rampa predeterminada está en un intervalo de 0,025 RPM/s a 0,2 RPM/s.
12. Método según la reivindicación 7, en el que la etapa de devolver la turbina eólica al modo de funcionamiento normal se activa mediante una señal de comando de parada de refuerzo.
13. Un sistema de control para una turbina eólica dispuesto para recibir un comando de refuerzo para solicitar un evento de refuerzo de energía, la turbina eólica comprende un rotor conectado a un generador configurado para generar energía eléctrica que depende de una referencia de energía y el comando de refuerzo, el sistema de control comprende:
- un controlador de velocidad de rotación dispuesto para controlar la velocidad del generador, basado en un error

de velocidad,

- un bloque de banda muerta dentro del controlador de velocidad de rotación dispuesto para imponer una banda muerta, con un límite de valor de zona muerta, al controlador de velocidad de rotación en respuesta al comando de refuerzo,

5 - en el que la banda muerta está dispuesta a enviar una señal cero al controlador de velocidad de rotación, cuando el error de velocidad está dentro de un límite de valor de zona muerta, y

- en el que la banda muerta está dispuesta a enviar una señal de error, donde la señal de error es una función del error y el límite del valor de la zona muerta, al controlador de velocidad de rotación, cuando el error de velocidad es mayor que el límite del valor de la zona muerta.

10 14. Planta de energía eólica que comprende un controlador de planta de energía y al menos una turbina eólica con un sistema de control de acuerdo con la reivindicación 13, estando dispuesto el controlador de la planta de energía para enviar un punto de ajuste de energía a la al menos una turbina de viento, en el que el punto de ajuste de energía incluye una mayor energía de referencia o un comando de refuerzo.

15 15. Un producto de programa informático que se puede cargar en una memoria interna de un dispositivo de procesamiento, el producto de programa informático que comprende porciones de código de software para realizar las etapas del método de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 12.

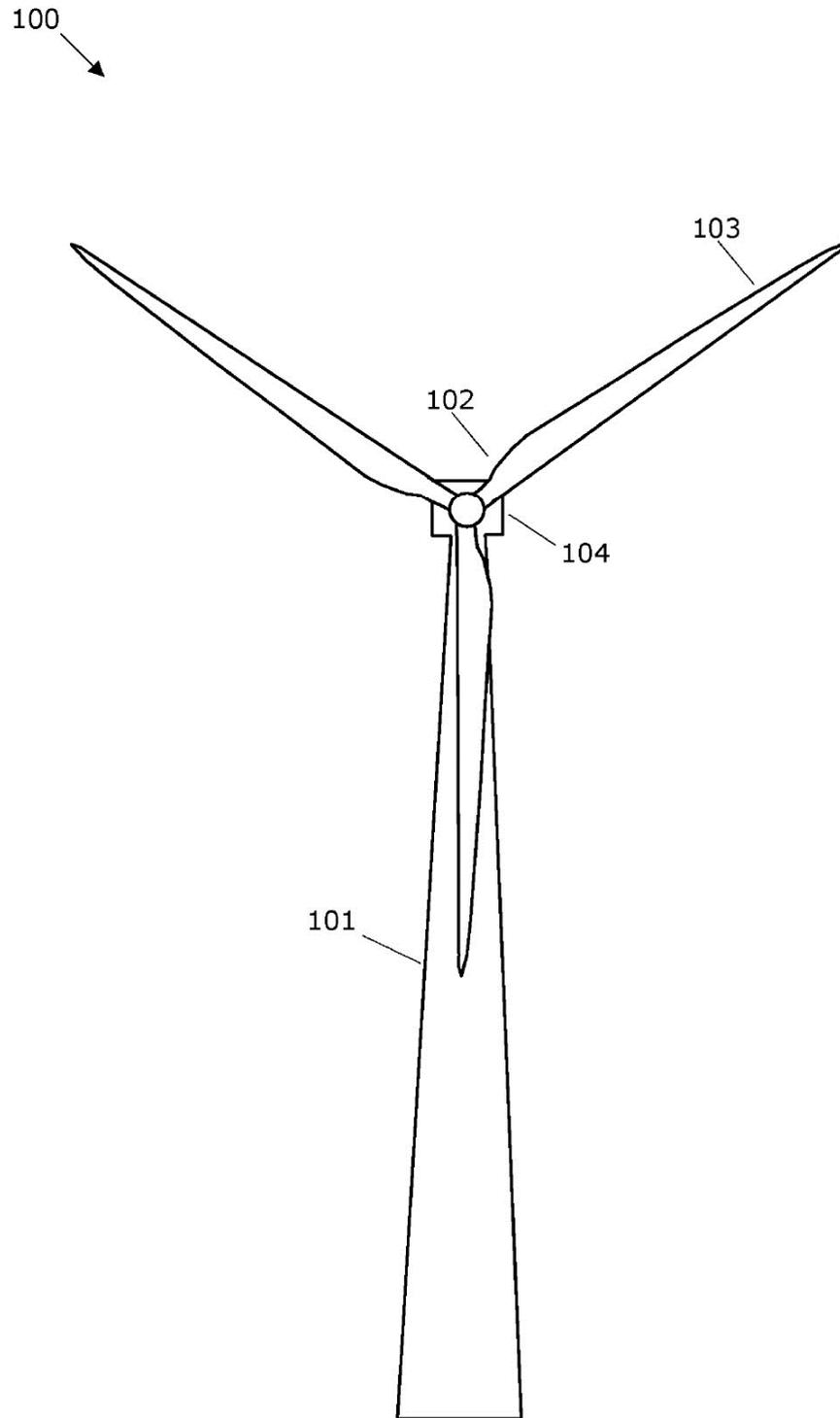


FIGURA 1

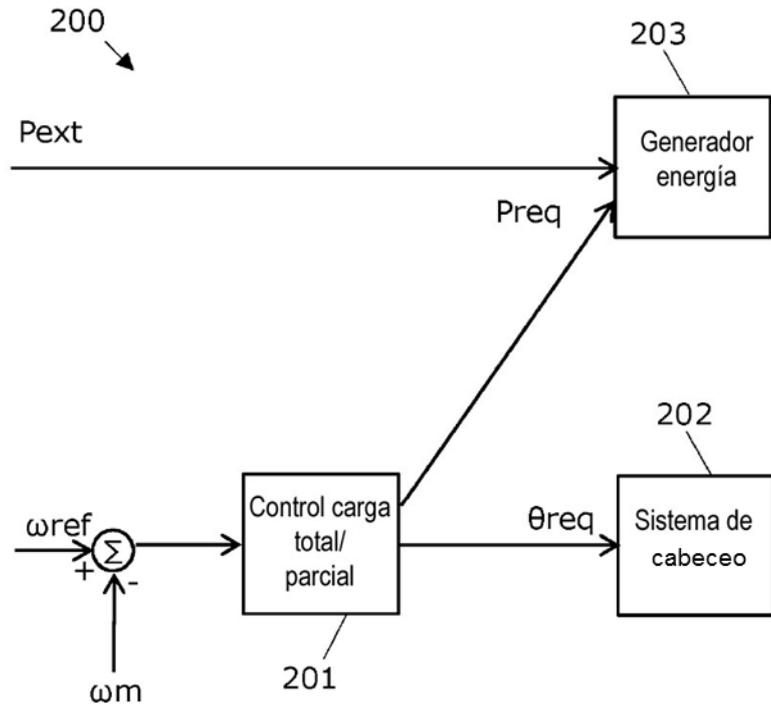


FIGURA 2

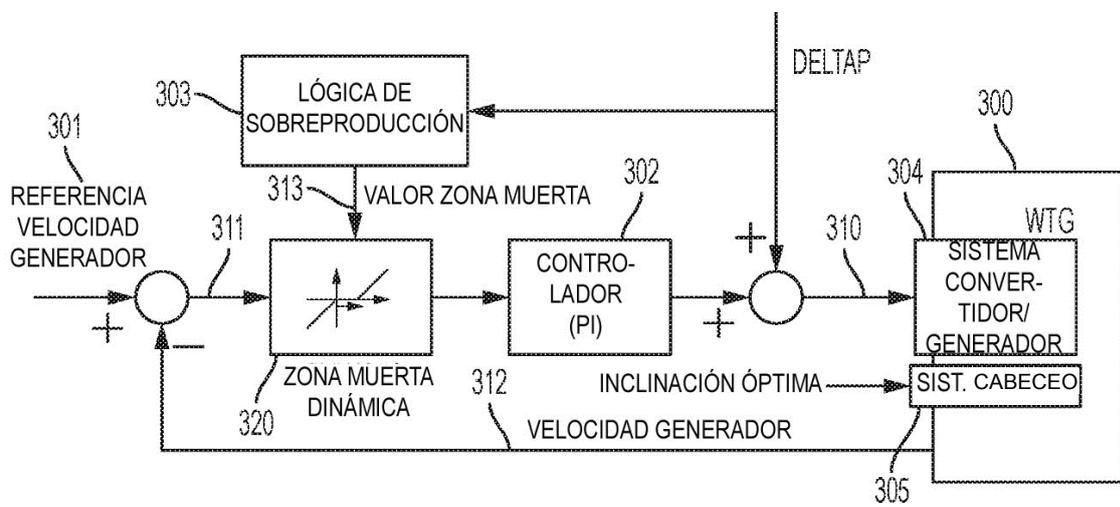


FIGURA 3

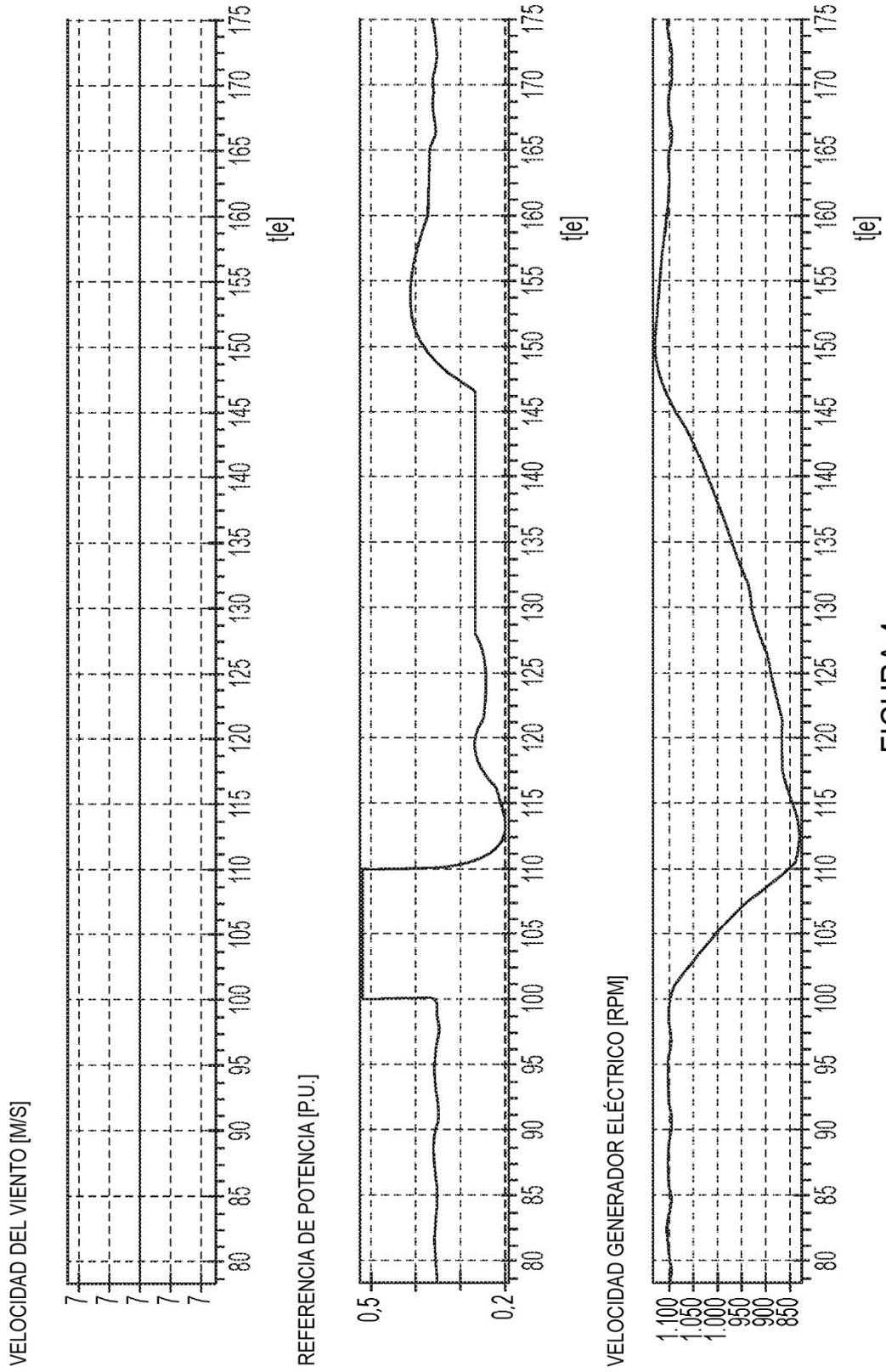


FIGURA 4

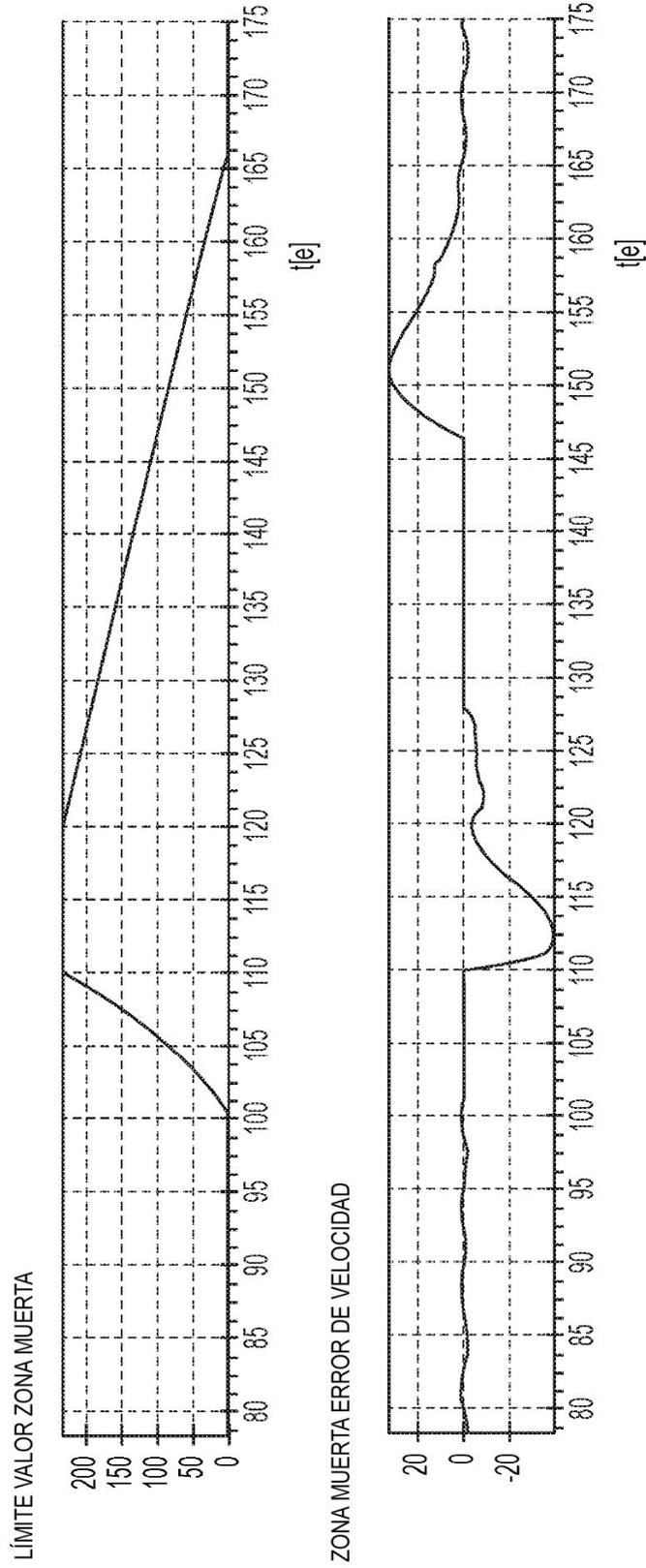


FIGURA 4 CONTINUACIÓN

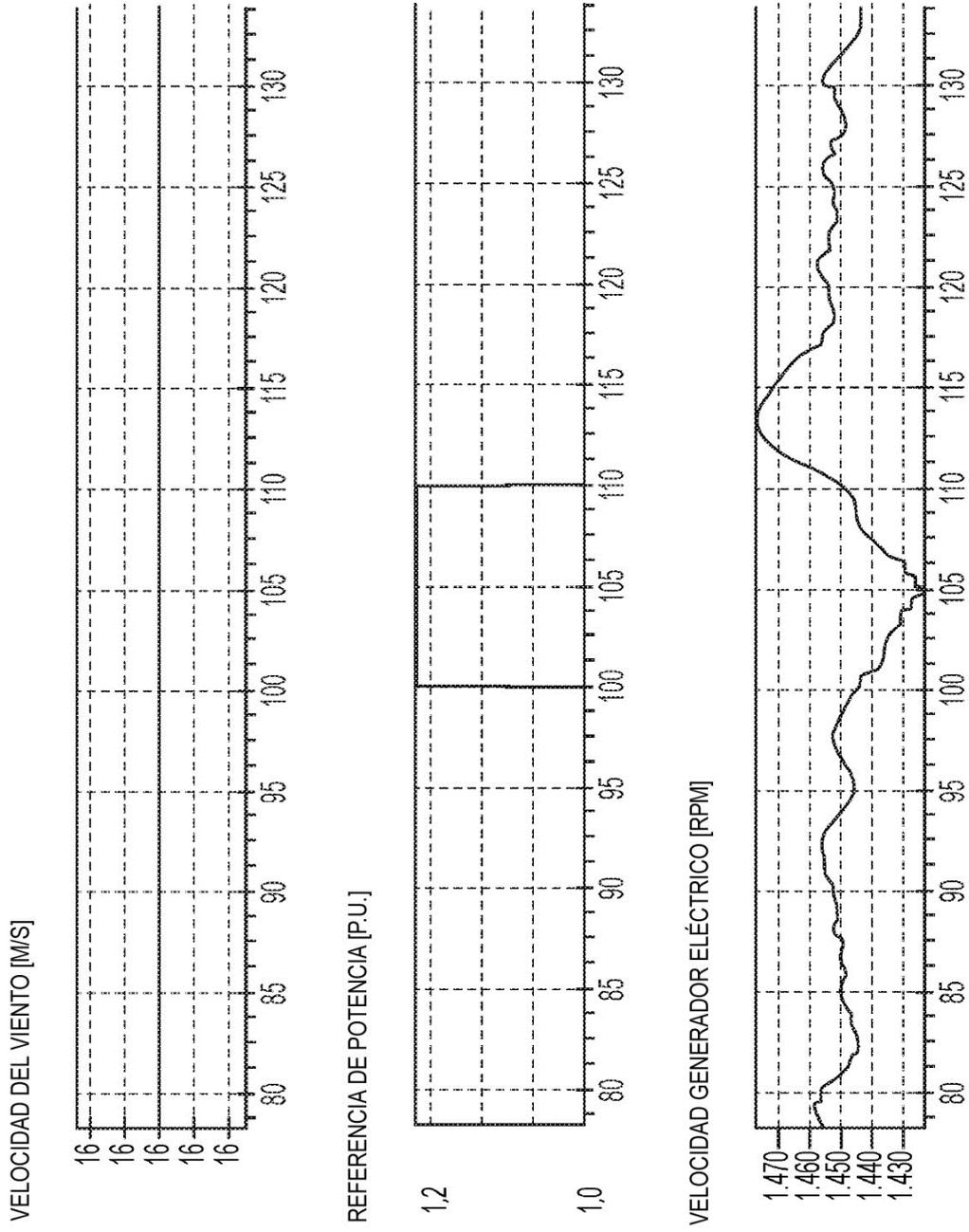


FIGURA 5

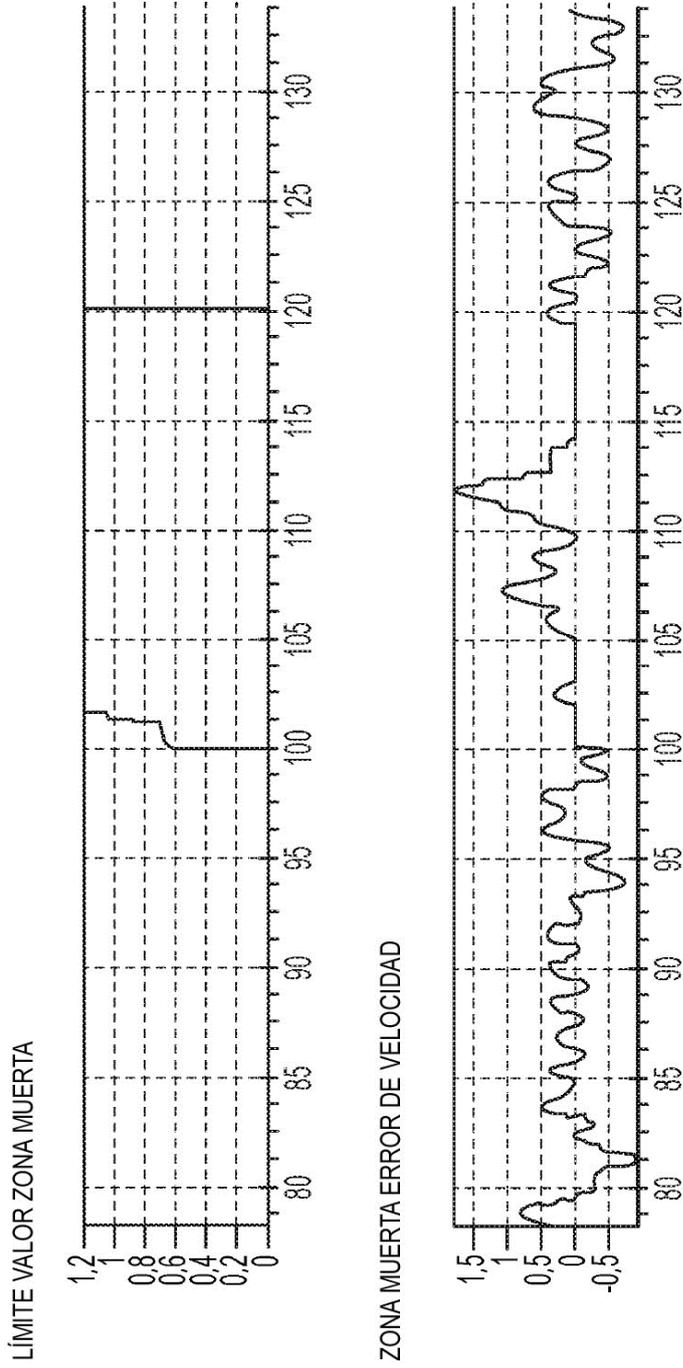


FIGURA 5 CONTINUACIÓN