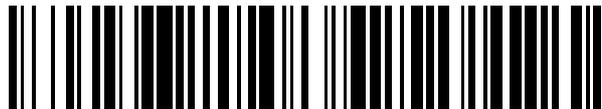


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 687 784**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.11.2014 PCT/DK2014/050393**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.05.2015 WO15074664**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.11.2014 E 14799962 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.08.2018 EP 3071831**

54 Título: **Control de palas de rotor para vientos intensos**

30 Prioridad:

21.11.2013 DK 201370714

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

29.10.2018

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**CAPONETTI, FABIO;
COUCHMAN, IAN;
KRÜGER, THOMAS;
ZAIB, ALI y
THOMSEN, CARSTEN NØRLUND**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 687 784 T3

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

DESCRIPCIÓN

Control de palas de rotor para vientos intensos

5 La presente invención se refiere a un aparato y a un método de control para controlar las palas de rotor de una turbina eólica, y en particular para controlar las palas de rotor durante vientos intensos o episodios de carga extrema.

10 Las turbinas eólicas de ángulo de paso variable conocidas funcionan en una serie de modos diferentes que dependen de parámetros tales como la energía disponible y también la velocidad del viento incidente. En lo que respecta a la producción de energía, en condiciones normales, una turbina eólica funcionará en uno de dos modos conocidos como funcionamiento de carga parcial o de carga completa. En el funcionamiento de carga parcial, la velocidad del generador generalmente se controla de modo que se maximice la eficiencia de la turbina. Un controlador de carga parcial controla la velocidad de rotación de la turbina seleccionando el par motor inverso
15 adecuado, y un controlador de ángulo de paso controla el ángulo de ataque de las palas de turbina eólica de modo que estén en ángulo con el viento y garanticen la máxima eficiencia y coeficiente de energía. Esto tiende a acelerar el rotor y hace que la energía producida aumente hacia su nivel de energía máximo o nominal.

20 En el funcionamiento de carga completa, cuando el generador de turbina eólica ha alcanzado su energía producida máxima o nominal, un controlador de carga completa controla el ángulo de ataque de las palas para que las palas se resguarden total o parcialmente del viento. En esta situación, se dice que las palas se colocan en posición de bandera, ya que ya no interactúan con el viento de la manera más aerodinámica y permiten que escape parte de la energía cinética del viento. Como resultado de ello, no toda la energía cinética disponible se transforma en un par motor en el rotor y en una energía producida correspondiente en el generador, y se puede evitar que las palas de
25 rotor giren demasiado rápido, sobrecargando el generador de turbina eólica o la red y ejerciendo cargas perjudiciales sobre el tren de transmisión o la torre.

30 Existen varios mecanismos de control para controlar el funcionamiento del rotor y el generador de turbina eólica en función de la velocidad del viento. Por ejemplo, por debajo de una velocidad mínima del viento, denominada velocidad de arranque, la turbina eólica no puede funcionar de manera eficiente para producir energía, y se frena o se deja en marcha en vacío. Además, por encima de una velocidad máxima del viento, denominada velocidad del viento de corte, la turbina eólica generalmente se para para garantizar la seguridad.

35 En el momento de la parada, el generador de turbina eólica normalmente se desconecta eléctricamente de la red y se controla para que no produzca energía. Con la turbina eólica en modo de marcha en vacío o en reposo, la góndola de la turbina eólica se girará a menudo en la dirección del viento entrante usando un controlador de orientación y las mismas palas de turbina eólica se colocarán en posición de bandera contra el viento entrante para que se disperse el viento. El giro de la góndola hacia el viento asegura que las palas de turbina eólica respondan al viento entrante de manera predecible y se produzca una minimización de cargas. El rotor de turbina eólica también
40 puede frenarse activamente para que el rotor no gire o se le permita girar libremente por la influencia del viento entrante.

45 Siempre que el rotor de turbina eólica no se frene activamente, en la zona de funcionamiento por encima de la velocidad del viento de corte, se dice que el generador de turbina eólica está en un modo de marcha en vacío. El modo de marcha en vacío es cuando el rotor y el generador pueden girar, pero no están conectados activamente a sistemas de control o a la red, y normalmente se produce a velocidades de rotación mínimas.

50 La parada de un generador de turbina eólica en condiciones de viento extremo o de falla se describe, por ejemplo, en el documento WO2007/086930, en el que se aplica un par motor de frenado al rotor para detenerlo.

55 En la posición de bandera, sin embargo, debido a la gran superficie de la pala que se extiende contra la dirección del flujo del viento, las palas de turbina eólica pueden experimentar aún fuerzas significativas procedentes del viento, en particular en casos de alta velocidad del viento o cambios rápidos en la velocidad del viento o en la dirección del viento, es decir, ráfagas de viento. Un problema particular son las oscilaciones inducidas en la estructura de la pala o torre como resultado del viento incidente o de la rotación del generador. Las oscilaciones de Edgewise, por ejemplo, se refieren a oscilaciones en la dirección longitudinal de la pala, es decir, movimientos periódicos de la punta de la pala con respecto a la raíz de la pala, y tienen graves consecuencias para el rotor y el tren de transmisión si no se controlan.

60 La solicitud anterior del solicitante WO2009/068035, describe, por ejemplo, una circunstancia en la que, en una situación de marcha en vacío, las cargas en las palas de turbina eólica se controlan para que permanezcan dentro de las tolerancias de diseño y los márgenes de seguridad. En particular, el controlador mide las cargas experimentadas por las respectivas palas de turbina eólica, y controla el ángulo de paso de las palas para compensar o reducir la carga.

65

El problema de la gestión de cargas en el generador de turbina eólica se vuelve aún más significativo durante episodios de viento intenso o de carga extrema. Los episodios de viento extremo son episodios en los que el viento alcanza una velocidad muy alta, o en los que el viento está sujeto a cambios rápidos de dirección, por ejemplo, condiciones de turbulencia o de tormenta. Los episodios de viento extremo pueden incluir vientos con velocidades de, por ejemplo, más de 50 m/s o 70 m/s, mientras que las velocidades de viento intenso pueden referirse a velocidades de entre 25 m/s y 50 m/s.

Muchos sistemas de reducción de carga dependen del funcionamiento de los accionadores de ángulo de paso y de los mecanismos de orientación para orientar correctamente la turbina eólica y las palas de turbina eólica en la corriente de viento entrante. Sin embargo, tales sistemas de control requieren que haya energía disponible, y aunque tal energía puede recogerse de la producción y llevarse a la red eléctrica, en condiciones de viento extremo es posible que la red eléctrica falle y que la energía necesaria no esté disponible. Una fuente de alimentación auxiliar puede proporcionar energía para tales situaciones, pero tiene un costo adicional y añade complejidad al diseño del generador eólico y el parque eólico.

El documento US2013/161950 A1 describe un sistema de generación de energía eólica y un método de control de este.

El documento GB2479415A describe un control de pala independiente de turbina eólica fuera de la producción nominal.

El documento DE19532409A1 describe un método de funcionamiento de una estación de energía eólica para limitar cargas.

Teniendo en cuenta los sistemas de la técnica anterior, hemos comprendido que sería deseable proporcionar un sistema de control para una turbina eólica que controle de manera eficaz las cargas en episodios de viento intenso o extremo. En este sentido, también hemos comprendido que un sistema de control que se puede usar en episodios de viento extremo para mitigar cargas también se puede usar de manera más general en episodios de carga extrema.

Sumario de la invención

De acuerdo con un primer aspecto de la invención, se proporciona un método para hacer funcionar un generador de turbina eólica que tiene palas de turbina eólica con control activo de ángulo de paso, comprendiendo el método: determinar una condición de funcionamiento en el generador de turbina eólica indicativa de un episodio de viento extremo o un episodio de carga extrema; una vez realizada una determinación de un episodio de viento extremo o de un episodio de carga extrema, mantener la velocidad de generador a un valor distinto de cero, menor que el valor nominal, en una zona por encima de la velocidad del viento de corte (v_{off}); y hacer funcionar uno o más accionadores de ángulo de paso de las palas para controlar la rotación de las palas de turbina eólica.

Al controlarse la velocidad de generador por encima de la velocidad del viento de corte para que el generador tenga una velocidad de rotación baja, aunque no nula, y al usarse un control activo de ángulo de paso, las cargas experimentadas por el generador de turbina eólica y el tren de transmisión pueden mantenerse bajo control y limitadas a valores que estén dentro de la envolvente de carga de diseño para la turbina eólica y que sean más bajos que en el caso en el que la turbina eólica se deja en reposo. Durante el funcionamiento de la turbina eólica a una velocidad de generador distinta de cero, aunque con un control activo de ángulo de paso, se puede considerar que la turbina eólica está funcionando en un modo de marcha en vacío seguro.

La reducción de la velocidad de generador del valor nominal al valor distinto de cero indica una posible reducción al 60 % o menos del valor nominal, 50 % o menos, 40 % o menos, 35 % o menos, o 25 % o menos.

La condición de funcionamiento puede ser una o más de, la velocidad del viento, la dirección del viento, una detección de turbulencia, una carga sobre una pala de rotor, la carga sobre el cojinete principal y momentos de inclinación y orientación. Por tanto, la condición de funcionamiento puede indicar directamente una condición de viento extremo, tal como en las mediciones de variables del viento, o puede indicar indirectamente una condición tal como, por ejemplo, cargas altas experimentadas en las palas de turbina eólica u otros componentes. Cuando la condición de funcionamiento es una carga, también es posible que se active el modo de marcha en vacío seguro antes de que la velocidad del viento exceda la velocidad del viento de corte. En este modo, la velocidad de generador se reduce del valor nominal al valor distinto de cero, aunque siempre se mantenga la condición de carga extrema.

Método según la reivindicación 1 o 2, en el que cuando se realiza una detección de un episodio de viento extremo o un episodio de carga extrema, se hacen funcionar uno o más controladores para controlar el funcionamiento de la turbina eólica, incluyendo los controladores un controlador de ángulo de paso, un controlador de inclinación y orientación, un controlador activo de amortiguación de torre y un controlador de amortiguación de tren de transmisión. El funcionamiento de los controladores proporciona estabilidad adicional en el funcionamiento del rotor

de turbina eólica durante el episodio extremo.

En un ejemplo, el valor predeterminado para la velocidad de generador es independiente de la velocidad del viento. La función de control de velocidad de generador en este ejemplo es esencialmente una línea horizontal recta que expresa un valor constante. En un ejemplo alternativo, el valor predeterminado para la velocidad de generador disminuye de manera continua al aumentar la velocidad del viento. En las realizaciones de la presente invención, el valor predeterminado para la velocidad de generador disminuye de manera discontinua al aumentar la velocidad del viento, presentando etapas o saltos que omiten valores predeterminados de la velocidad de generador. En el primero de estos dos ejemplos, la función de control de velocidad de generador puede ser una función lineal, tal como una línea recta con gradiente negativo, o una función no lineal, tal como una curva que tiende a un valor tal como cero. En este último ejemplo, la función de control puede ser, por ejemplo, una función de etapa.

En una realización, el valor predeterminado para la velocidad de generador es de 15 a 20 % de la velocidad nominal de generador, opcionalmente de 10 a 25 %. Se ha encontrado que este rango de valores tiene una magnitud suficientemente alta como para permitir que los accionadores de control de ángulo de paso funcionen de manera eficiente al reducirse las cargas en el tren de transmisión, y suficientemente baja como para que la rotación del rotor y el generador no perjudique de manera indebida la carga en el tren de transmisión y la torre. En algunas realizaciones, el límite inferior del rango también puede ser del 5 %.

El método también puede comprender, en una zona inmediatamente por debajo de la velocidad del viento de corte, hacer funcionar uno o más accionadores de ángulo de paso de las palas y mantener la velocidad de generador a un valor predeterminado para una velocidad del viento dada, disminuyendo el valor predeterminado para la velocidad de generador a medida que aumenta la velocidad del viento. Por tanto, la velocidad nominal de generador y la energía producida pueden reducirse parcialmente antes de la velocidad del viento de corte.

Además, el método puede comprender detectar una velocidad del viento de corte (v_{off}) para la turbina eólica y desconectar eléctricamente el generador de turbina eólica de la red eléctrica. Alternativamente, la turbina eólica puede permanecer conectada a la red en el nuevo régimen de control.

El método puede comprender adicionalmente, en una zona por encima de la velocidad del viento de corte (v_{off}), controlar que el generador tenga una energía producida distinta de cero, y desviar la energía producida para proporcionar energía auxiliar a los sistemas de control de turbina eólica. Esto permite que la turbina eólica sea autosuficiente en caso de que exista una falla en la red, sin tener la necesidad de proporcionar una fuente de energía auxiliar específica, tal como un generador diésel o un sistema de almacenamiento de baterías.

En una realización, el método comprende hacer funcionar un mecanismo de orientación para inclinar el rotor del generador de turbina eólica para hacer que se oriente en la dirección del viento entrante. La alineación de orientación sirve para reducir cargas que pueden surgir si el rotor no está alineado correctamente con el viento entrante. Por ejemplo, las palas pueden no estar correctamente en posición de bandera con respecto al flujo entrante, lo que da como resultado un mayor ángulo de ataque y el desarrollo de fuerzas aerodinámicas no deseadas.

Sin embargo, el método puede comprender de manera adicional o alternativamente detectar un error de orientación y si el error de orientación es mayor que un umbral, establecer la velocidad de generador a cero y parar el generador de turbina eólica. Esto permite que el modo de funcionamiento ampliado se ejecute incluso aunque la función del mecanismo de orientación no esté disponible, o, aunque la dirección del viento esté cambiando demasiado rápido para que el mecanismo de orientación se ajuste.

La invención comprende un generador de turbina eólica con un controlador programado en correspondencia, y un producto de programa informático para funcionar en un controlador de turbina eólica.

Breve descripción de los dibujos

A continuación, se describen realizaciones ejemplares de la invención con referencia a los dibujos, en los que:

La figura 1 es una ilustración esquemática de una turbina eólica;

La figura 2 es una ilustración esquemática de un controlador de turbina eólica;

La figura 3 es una ilustración esquemática de un algoritmo de control de generador de acuerdo con una realización ejemplar; y

La figura 4 es una ilustración esquemática de un algoritmo de control de generador de acuerdo con otra realización ejemplar.

Descripción detallada

5 En una realización ejemplar de la invención, se proporciona un aparato y un método de control para controlar la velocidad de rotación del generador de turbina eólica, en particular durante un episodio de viento extremo o de carga extrema. La nueva estrategia de control amplía el funcionamiento activo de las palas de rotor de turbina eólica a una zona más allá de la velocidad del viento de corte existente en un modo de marcha en vacío seguro.

10 La nueva estrategia de control puede aceptar que la energía para el sistema de control de turbina eólica esté disponible en la red o en una fuente de energía auxiliar, tal como un generador específico independiente o la propia turbina eólica. En el modo de funcionamiento ampliado, la turbina eólica es por tanto orientada hacia el viento, y el ángulo de paso de las palas de turbina eólica se controla de modo que el rotor y el generador estén en un modo de marcha en vacío a una velocidad de rotación designada. Preferiblemente, la velocidad de rotación mantenida por el control activo de ángulo de paso es relativamente alta en comparación con las velocidades mínimas que resultan de manera natural del modo de marcha en vacío del rotor no frenado desconectado de la red. En particular, la velocidad de generador se controla de preferencia de manera que se encuentre en el intervalo de 15 a 20 % (opcionalmente de 10 a 25 %) de la velocidad de rotación para condiciones de funcionamiento normales. En realizaciones alternativas, también se pueden usar otras velocidades según se desee. El control del generador en el modo de marcha en vacío seguro para que tenga una velocidad de rotación baja, aunque no nula, permite que la turbina eólica sea controlada de forma segura usando varios mecanismos de control, tales como un control de ángulo de paso, un control de inclinación y orientación, un control de inclinación y orientación ampliado, un control activo de amortiguación de torre y un control de amortiguación de tren de transmisión.

25 Se conoce el uso de tales mecanismos de control para controlar el funcionamiento de la turbina eólica en funcionamiento normal. Sin embargo, en el presente caso, hemos comprendido que tales controladores se pueden usar en una zona ampliada (en la que la turbina eólica normalmente se desactivaría por razones de seguridad) para mantener así el funcionamiento seguro de la turbina eólica. Los controladores pueden requerir adaptación para su uso en la zona ampliada a fin de mostrar diferentes condiciones de funcionamiento en comparación con el caso habitual.

30 Además, la velocidad del viento designada para el rotor de turbina eólica en un modo de marcha en vacío se puede calcular como una función de la velocidad determinada del viento incidente. Se ha encontrado que el funcionamiento de la turbina eólica a velocidades de marcha en vacío bajas usando un control activo de ángulo de paso y orientación mantiene las cargas en la turbina eólica y la torre dentro de tolerancias adecuadas.

35 El control de energía producida de la turbina eólica en el modo de funcionamiento ampliado también se puede establecer a cero como en la técnica anterior. Sin embargo, la producción de energía nominal es preferiblemente un valor bajo, aunque no de cero, lo que permite que la energía producida en el modo de funcionamiento ampliado se use como una fuente de energía auxiliar para los sistemas de control de turbina eólica. Esto evita la necesidad de depender de la energía de la red o de un generador de energía independiente para energía auxiliar. De hecho, en condiciones de viento extremo, la red puede no estar disponible. También proporciona un par motor inverso en el rotor para equilibrar el par motor aerodinámico resultante del viento incidente.

45 A continuación, se describe una realización ejemplar con más detalle y con referencia a las figuras 1 a 4 de los dibujos.

50 La figura 1 ilustra una turbina eólica 1, que comprende una torre de turbina eólica 2 en la que está montada una góndola de turbina eólica 3. Un rotor de turbina eólica 4, que comprende al menos una pala de turbina eólica 5, está montado en un buje 6. El buje 6 está conectado a la góndola 3 a través de un eje de baja velocidad (no mostrado) que se extiende desde la parte delantera de la góndola. La turbina eólica ilustrada en la figura 1 puede ser un modelo pequeño destinado a uso doméstico o de servicios públicos pequeños, o puede ser un modelo grande, como los que son adecuados para su uso en la generación de electricidad a gran escala en un parque eólico o en una instalación de producción de energía. En este último caso, el diámetro del rotor puede medir hasta 120 metros o más.

55 La figura 2 ilustra una vista esquemática de un ejemplo de un interior de la góndola 3. Un eje de transmisión principal 7, soportado por un cojinete principal 11 se extiende desde el buje 6 y es recibido en un multiplicador 8. Un eje secundario 9 se extiende desde el multiplicador 8 y hasta el generador 10. La góndola 3 también comprende un convertidor/transformador de energía 12, así como aparatos auxiliares, tales como dispositivos de control, sensores, unidades de calentamiento e iluminación, sistemas hidráulicos, sistemas de refrigeración, etc.

60 La góndola 3 se monta en la torre de turbina eólica 2 mediante un mecanismo de orientación 13, que permite ajustar la orientación acimutal de la góndola con respecto a la dirección del viento incidente, la dirección del viento ascendente y en particular para que el rotor de turbina eólica 4 esté en ángulo con el viento. Uno o más accionadores de control de ángulo de paso 14, tales como accionadores de control de ángulo de paso neumáticos o eléctricos, también se montan en el buje 6 para acoplarse con las secciones de raíz de las palas de turbina eólica, a fin de controlar la orientación de las palas de turbina eólica alrededor de su eje longitudinal.

La góndola 3 también comprende un controlador 15 conectado a un generador 10, a un mecanismo de orientación 13 y a uno o más accionadores de ángulo de paso 14 mediante líneas de control adecuadas. El controlador también puede estar conectado a uno o más dispositivos sensores tales como un anemómetro y/o una veleta 16 para determinar la velocidad del viento y/o la dirección del viento en la turbina eólica. Alternativamente, la velocidad y la dirección del viento pueden medirse en otra parte, tal como en un mástil meteorológico u otra turbina eólica y puede transmitirse un valor estimado al controlador de turbina eólica 15. También se puede alojar un dispositivo opcional de medición de la velocidad del viento clasificado, tal como un dispositivo LIDAR, RADAR o SONAR 17, en el buje 6 o en la góndola 3 para detectar la velocidad del viento y las condiciones del viento a barlovento de la turbina eólica. En realizaciones alternativas, la velocidad y/o la dirección del viento puede estimarse a partir de la velocidad de generador, la energía producida por la turbina eólica y otras características de turbina adecuadas. Finalmente, las palas de rotor y la torre de turbina eólica pueden comprender uno o más sensores de carga para determinar una carga operativa en el componente de turbina eólica y para transmitir esto a través de líneas de control adecuadas al controlador 15.

Sensores adicionales pueden detectar otras condiciones que afectan al rotor de turbina eólica y a las palas de rotor, tales como, por ejemplo, la temperatura, la turbulencia del aire, la vibración.

En la práctica, el controlador 15 se aplica como un procesador específico con acceso a algoritmos de control incorporados en software o hardware, que recibe entradas de sensor y señales de control de salida en líneas de control o un bus de datos adecuados. En concreto, el controlador recibe señales de control que indican la velocidad del viento medida o estimada en el generador de turbina eólica, y establece al menos una señal de control de referencia de energía para establecer las condiciones de funcionamiento del generador 10 y varias señales de control de referencia de ángulo de paso y de referencia de orientación para controlar los accionadores de ángulo de paso de las palas de turbina eólica y el ángulo de orientación del rotor 6. Por lo general, el controlador está normalmente conectado a una red, tal como SCADA (control de supervisión y red de adquisición de datos).

La figura 3a ilustra una estrategia de control conocida para controlar la velocidad de generador w_g de la turbina eólica a través del control activo de ángulo de paso aplicado a las palas de rotor. La velocidad deseada de generador $w_{g,ref}$ se ilustra en el eje y, expresada como rpm, con la velocidad del viento incidente ilustrada en el eje x. La escala en el eje y indica el porcentaje de la señal de referencia de velocidad de generador con respecto al valor de velocidad nominal de generador, con un valor 1 indicando el 100 % del valor de velocidad nominal de generador. De manera conocida, los cambios en la velocidad real de generador w_g para armonizar con el valor de referencia, se producen al cambiar el ángulo de paso de las palas de rotor para cambiar el par motor aplicado por el rotor al eje de transmisión y al generador.

La escala en el eje x comienza a la velocidad de arranque, v_{in} . Para velocidades de viento inferiores a la velocidad de arranque, la velocidad de generador no puede seguir la velocidad del viento, y la producción de energía óptima depende del control de las rpm de generador a un límite de velocidad inferior.

Por encima de la velocidad de arranque, el controlador de turbina eólica 15 aumenta gradualmente la referencia de velocidad de generador w_g al aumentar la velocidad del viento hasta alcanzar la velocidad nominal máxima de generador (esto se indica mediante la línea que alcanza un valor '1' en el diagrama, que indica el límite superior de velocidad para el generador). En esta zona, la turbina puede controlarse para tener una relación de velocidad de punta óptima para el viento incidente, y la velocidad de generador sigue linealmente a la velocidad del viento. La turbina eólica extrae la máxima energía del viento ya que el controlador de carga parcial proporciona referencias óptimas de ángulo de paso y energía, aunque produce una salida que está por debajo de la energía nominal.

La velocidad del viento a la cual la referencia de velocidad de generador alcanza su valor máximo permitido, se produce un poco antes de la velocidad nominal del viento. Justo antes de que se alcance la velocidad nominal del viento, la turbina no se puede controlar a la velocidad óptima, ya que de otra forma las rpm de generador llegarían a ser demasiado altas. En esta zona, por tanto, la eficiencia se mantiene haciendo funcionar la turbina en el límite superior de velocidad. El ángulo de paso todavía se controla al valor óptimo. Las tres zonas de funcionamiento descritas anteriormente, es decir a) por debajo de la velocidad de arranque, b) por encima de la velocidad de arranque hasta el límite superior de la velocidad de generador y c) hasta la velocidad nominal del viento mientras se mantiene la velocidad de generador en un límite superior constante, se conocen como funcionamiento de carga parcial.

Por encima de la velocidad nominal del viento, el controlador 15 controla el generador para mantener una velocidad constante de generador y funciona a plena carga. En el funcionamiento de carga completa, la referencia de energía se mantiene en el valor nominal a medida que aumenta la velocidad del viento, el controlador emite más señales de control de ángulo de paso a uno o más accionadores de ángulo de paso 14 usando un algoritmo de control colectivo para que se disperse cada vez más viento desde las palas, y la velocidad de rotación del rotor y el generador permanecen constantes en el valor nominal.

A velocidades del viento más altas, el control de ángulo de paso ya no es suficiente para mantener la velocidad de rotación del generador dentro de los márgenes de seguridad, ya que existe el riesgo de que se dañe el generador y

el rotor. El controlador comienza a reducir el régimen del generador emitiendo comandos para funcionar a una velocidad de rotación más baja, reduciendo así las cargas y el par motor experimentados por el generador y el eje de rotor. Esto se ilustra en la figura 3a, mediante el valor v_{derate} , después de lo cual la referencia de velocidad de generador se reduce a cero.

5 La velocidad del viento de corte es la velocidad a la que se debe parar la turbina eólica, ya que no se puede llevar a cabo un control adicional de la turbina eólica de forma segura. Por encima de la velocidad del viento de corte, v_{off} , la turbina eólica se desconecta de la red.

10 A continuación, se describe una realización ejemplar con respecto a las figuras 3b y 3c. De acuerdo con una realización ejemplar de la invención, la velocidad de generador w_g se controla ahora activamente en una zona de funcionamiento por encima de la velocidad del viento de corte. Con referencia a la figura 3b, se verá que la velocidad del viento de generador, como antes, disminuye gradualmente una vez que se alcanza la reducción de régimen de velocidad del viento v_{derate} . En su lugar, el generador funciona a velocidades superiores a la velocidad del viento de corte con una velocidad de rotación distinta de cero.

15 Como se analiza más adelante, este modo de funcionamiento ampliado entiende que la energía para hacer funcionar los sistemas de control de turbina eólica (el controlador 15, uno o más accionadores de ángulo de paso y el mecanismo de orientación) está disponible, ya sea procedente la red pública o de una fuente auxiliar de energía, tal como un generador, un suministro de almacenamiento de baterías o la propia turbina eólica.

20 Refiriéndonos de nuevo a la figura 3b, se puede ver que, por encima de la velocidad del viento de corte, el controlador controla la velocidad de generador para que siga disminuyendo al aumentar la velocidad del viento hasta un valor de velocidad del viento ampliado de v_{ext} . En el valor de velocidad del viento ampliado v_{ext} , el generador se controla todavía activamente para que gire a una velocidad de generador, preferiblemente de entre 15 y 20 % de su valor nominal o asignado, opcionalmente dentro de 10 a 25 %. A una velocidad del viento de v_{off} , la velocidad de generador, mostrada en la figura 3b, se controla para que sea aproximadamente del 60 %. En el modo de funcionamiento ampliado, la turbina eólica se controla por tanto para que funcione en un modo de marcha en vacío con una velocidad de generador significativamente mayor de lo que normalmente sería lo habitual.

25 A pesar de que la figura 3b ilustra este modo de funcionamiento ampliado terminando en el valor ampliado de v_{ext} , se apreciará que podría continuar indefinidamente. Es decir, una velocidad del viento de corte ya no se aplica al control de la velocidad de generador en el algoritmo de control seguido por el controlador 15. V_{ext} en el diagrama puede por tanto corresponder a una velocidad del viento de 25 m/s, 50 m/s 70 m/s o incluso más.

30 Aunque, la disminución de la velocidad del viento de generador se muestra en este ejemplo como una función lineal que varía de manera continua, se apreciará que, en realizaciones alternativas, puede variar de forma discontinua y en etapas o saltos que evitan velocidades de generador no deseadas. Por ejemplo, algunas velocidades de generador tendrán una frecuencia que corresponde a la frecuencia natural, o a armónicos de la frecuencia natural de la torre de turbina eólica, o a múltiplos de tales frecuencias cuando se tenga en cuenta la rotación de las palas individuales en el rotor. El control de la velocidad de generador para evitar estos valores evita por tanto la excitación de la torre y cualquier oscilación de torre resultante. Además, el controlador 15 también puede simplemente mantener la referencia de velocidad de generador en un valor constante, dentro del rango de valores dados anteriormente, sin que siga disminuyendo. Esta situación se ilustra en la figura 4b, que se analizará con más detalle a continuación.

35 Mediante el control activo de la velocidad de rotación de la velocidad de generador para que a altas velocidades del viento tenga un valor predeterminado, dentro de un rango de valores conocido, se ha encontrado que las cargas en la torre y las palas de turbina eólica se pueden mantener dentro del diseño de márgenes seguros para la torre de turbina eólica. Esto es contrario a las enseñanzas de la técnica, que pone el rotor en reposo o que permite que el rotor funcione en un modo de marcha en vacío a velocidades muy bajas de una manera incontrolada y puramente dependiente del viento incidente. Se ha encontrado que la situación de la técnica anterior no es deseable ya que la turbina y las cargas operativas en realidad no pueden controlarse adecuadamente. Además, al hacer funcionar la turbina eólica de esta manera, se ha encontrado que las cargas experimentadas son menores que en el caso de reposo. Por tanto, suponiendo que haya energía disponible para los sistemas de control de turbina eólica, esto significa que el requisito de diseño para la construcción de nuevas turbinas eólicas puede actualizarse asumiendo que la turbina eólica estará en ángulo con el viento, con un control activo de ángulo de paso durante episodios de tormentas.

40 Por tanto, el método de control sirve para crear un modo de funcionamiento controlado ampliado por encima de la velocidad del viento de corte. En este modo de control ampliado, el controlador 15 usa el control colectivo de ángulo de paso de las palas de turbina eólica para disminuir la velocidad de generador y asume que el rotor 6 está en ángulo con el viento. Como es sabido en la técnica, el controlador 15 también puede usar un control colectivo de ángulo de paso, tal como la amortiguación de la torre de proa a popa, o un control cíclico de ángulo de paso en palas individuales para contrarrestar cualquier diferencia en las cargas experimentadas por las respectivas palas de turbina eólica cuando giran en el campo de viento. El control cíclico de ángulo de paso puede incluir amortiguación

de oscilación de torre de lado a lado y, por ejemplo, inclinación y orientación de eje principal y control de orientación. A altas velocidades del viento, se apreciará que el campo de viento podría ser muy turbulento, y las diferentes cargas experimentadas por las palas podrían ser significativas. A la velocidad del viento de corte v_{off} , el controlador 15 desconectará eléctricamente la turbina eólica de la red. En la técnica anterior, esto normalmente vendría acompañado de una reducción a cero de la energía producida del generador usando una señal de referencia de energía adecuada.

Sin embargo, en una realización alternativa, en función de la capacidad del convertidor de energía, la energía puede disminuir hasta un valor bajo, aunque distinto de cero, a la velocidad del viento de corte, y disminuir gradualmente más que la velocidad del viento de corte en un modo de funcionamiento ampliado. Esta disposición se ilustra en la figura 3c. La energía puede ser suministrada a la red, en cuyo caso la turbina eólica se controla para que permanezca conectada eléctricamente por encima de la velocidad del viento v_{off} . Alternativamente, la turbina eólica puede desconectarse eléctricamente de la red y la energía producida puede desviarse para alimentar los sistemas eléctricos del generador de turbina eólica, de modo que la turbina eólica sea autosuficiente.

Refiriéndonos de nuevo a la figura 3c, al igual que a la figura 3b, una vez que se sobrepasa la velocidad de arranque, el controlador funciona a carga parcial y emite señales de referencia de energía al generador para controlar la energía producida alimentada a la red. La señal de referencia de energía se incrementa al aumentar la velocidad del viento hasta que, a la velocidad nominal del viento de la energía producida, la señal de referencia de energía sea 1 y la energía producida de la turbina eólica sea la energía nominal. Una vez más, a la velocidad del viento de régimen reducido v_{derate} , el controlador puede comenzar a disminuir la energía producida a cero para evitar sobrecargar eléctricamente el generador o dañar el eje de transmisión de turbina eólica. Se apreciará que en v_{ext} no habrá necesidad de suministrar energía a la red, y debido a las condiciones extremas, la red puede no estar operativa.

En el modo de funcionamiento ampliado, la referencia de energía se establece en un valor distinto de cero y se reduce gradualmente a cero en v_{ext} . V_{ext} en el diagrama puede por tanto corresponder a una velocidad del viento de 25 m/s, 50 m/s 70 m/s o mayor.

Mantener la referencia de energía por encima de cero en el modo de funcionamiento ampliado significa que todavía se puede hacer que la turbina funcione de manera segura, pero que la energía puede ser aún suministrada a la red si la turbina permanece conectada. En los casos en los que la turbina se desconecta de la red o falla la red (que es una posibilidad en episodios de velocidad del viento elevada o extrema), la energía producida del generador también puede servir para suministrar energía auxiliar a la turbina eólica para el funcionamiento del controlador 15 y el mecanismo de orientación 13 y los accionadores de ángulo de paso 14.

En las figuras 3b y 3c, el control de la velocidad de generador y la referencia de energía se reducen constantemente una vez que se alcanza la velocidad del viento de corte. En una realización alternativa ilustrada en las figuras 4a y 4b, hay un cambio más abrupto entre los regímenes de funcionamiento normales y los ampliados.

La figura 4a ilustra una realización alternativa de la invención, en la que inmediatamente después de la velocidad del viento de corte v_{off} , la velocidad de generador se reduce rápidamente a un valor constante de, digamos, 18 % de la nominal, y se mantiene allí para aumentar las velocidades del viento. Nuevamente, el rango preferido está comprendido entre 15 % y 20 %, opcionalmente entre 10 % y 25 %. En la figura 4b, la referencia de energía se establece de manera similar a cero o a un valor nominal bajo para mantener funciones de energía auxiliar.

La conveniencia de mantener la velocidad de generador en esta zona se puede entender de la siguiente manera. Hemos apreciado que es conveniente mantener el rotor en un estado de rotación con vientos extremos de forma que se puedan utilizar algoritmos de control de turbina eólica, tales como el control activo de ángulo de paso, el control de inclinación y orientación y la amortiguación. Si las palas de rotor no giran, tal control no tendrá ningún efecto sobre el funcionamiento del rotor. Por otro lado, se sabe que algunas velocidades de generador son problemáticas. Por ejemplo, la resonancia de torre 3p (que es la coincidencia entre la frecuencia de ángulo de paso de las palas y la frecuencia natural de torre) establece un límite superior para las rpm máximas de generador que pueden usarse. También se sabe que algunas cargas aumentan con las rpm. El rango indicado de velocidades de generador, por tanto, permite que el rotor siga girando con una velocidad lo suficientemente alta como para que sea posible el control utilizando el sistema de control de turbina eólica y además tenga un efecto ventajoso en el funcionamiento de turbina eólica a pesar de la alta velocidad del viento. Al mismo tiempo, la velocidad de generador es lo suficientemente baja como para no causar otros problemas, tales como la carga adicional debido a las condiciones del viento y las emisiones de resonancia.

Es posible que los modos de funcionamiento ampliados descritos anteriormente funcionen incluso aunque la función del mecanismo de orientación no esté disponible. Por ejemplo, si el error de orientación, que es la diferencia entre la dirección en la que está orientado el rotor 6 y la dirección del viento incidente, es suficientemente pequeño, y el control de ángulo de paso está disponible, entonces se puede aplicar la enseñanza de los métodos de control anteriores. Si el error de orientación llega a ser demasiado grande, entonces sería posible poner la turbina eólica en un estado de reposo seguro como antes. Un umbral adecuado para el error de orientación puede ser, por ejemplo,

de 20 grados.

5 Aunque la descripción hasta ahora se ha centrado en episodios de viento extremo, el modo de marcha en vacío seguro contemplado también podría ser fomentado debido a las detecciones de episodios de carga extrema en las palas de turbina eólica, el buje de cojinete de rotor o la torre. Los episodios de carga extrema pueden coincidir con episodios de viento extremo, y de hecho la razón de las cargas extremas puede deberse a una alta velocidad del viento incidente, a la cizalladura del viento o a un cambio de dirección o a una turbulencia. Otros episodios también pueden ocasionar cargas extremas.

10 Por tanto, aunque la descripción de las figuras 3 y 4 indica que el modo de marcha en vacío seguro se fomenta una vez que la velocidad del viento alcanza la velocidad del viento de corte, no es necesario que se realice una medición de la velocidad del viento. Todo lo que se requiere es una medición o detección de una condición de funcionamiento indicativa de una condición de viento extremo o de carga extrema. Ejemplos de condiciones que pueden usarse para activar el modo de marcha en vacío seguro incluyen, por tanto, una medida de una velocidad del viento alta, de la cizalladura del viento o de una turbulencia, así como de las cargas operativas experimentadas por el componente de
15 turbina eólica, tales como cargas en la pala de turbina eólica, carga de cojinete principal y momentos de inclinación y orientación. Una vez que se activa el modo de marcha en vacío seguro, las referencias de generador y energía se controlan de la manera que se ilustra en las figuras 3b y 3c, o 4a y 4b.

20 Se apreciará que la baja velocidad de marcha en vacío utilizada para el generador, combinada con el uso de al menos el control de ángulo de paso, en caso de viento extremo o carga extrema, permite que la turbina eólica funcione con seguridad, a pesar de las condiciones que de otro modo requerirían la parada de la turbina eólica. El funcionamiento seguro también puede facilitarse con el uso de varios otros controladores de turbina eólica que estabilizan aún más su funcionamiento, tales como un controlador de inclinación y orientación, un controlador activo
25 de amortiguación de torre y un controlador de amortiguación de tren de transmisión. El controlador de inclinación y orientación, por ejemplo, ajusta el ángulo de paso individual aplicado a las palas para mitigar los momentos de inclinación y orientación en el eje de cojinete principal de la góndola. Preferiblemente, el controlador de inclinación y orientación se activa una vez que se detecta un error de orientación. El controlador activo de amortiguación de torre y el controlador de amortiguación de tren de transmisión aplican de manera similar señales de control de ángulo de
30 paso periódicas a las palas de rotor para suprimir oscilaciones en la torre o en el tren de transmisión. Otros controladores pueden ser posibles.

Los mismos controladores pueden implementarse en software o hardware y típicamente residirán en el controlador principal 15 de la turbina eólica. Los controladores están configurados para recibir entradas de los diferentes
35 sensores descritos anteriormente.

Las realizaciones ejemplares de la invención se han descrito solo con fines de ilustración y no para limitar el ámbito de aplicación de la invención, como se define en las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Método de funcionamiento de un generador de turbina eólica que tiene palas de turbina eólica con control activo de ángulo de paso, comprendiendo el método:
- 5 determinar una condición de funcionamiento en el generador de turbina eólica indicativa de un episodio de viento extremo o un episodio de carga extrema;
- cuando se realiza una determinación de un episodio de viento extremo o de un episodio de carga extrema, mantener la velocidad de generador a un valor distinto de cero, menor que el valor nominal, en una zona por encima de la velocidad del viento de corte (v_{off}); en el que, en la zona por encima de la velocidad del viento de corte, el
- 10 generador se controla de manera que la velocidad disminuye de manera discontinua a medida que aumenta la velocidad del viento, presentando etapas o saltos que omiten valores predeterminados de la velocidad de generador;
- y
- hacer funcionar uno o más accionadores de ángulo de paso de las palas para controlar la rotación de las palas de turbina eólica.
- 15
2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la condición de funcionamiento es una o más de una entre la velocidad del viento, la dirección del viento, una detección de turbulencia, una carga en una pala de rotor, la carga en el cojinete principal y los momentos de inclinación y orientación.
- 20
3. Método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que cuando se realiza una determinación de un episodio de viento extremo o de carga extrema, se hace funcionar uno o más controladores para controlar el funcionamiento de la turbina eólica, incluyendo los controladores un controlador de ángulo de paso, un controlador de inclinación y orientación, un controlador activo de amortiguación de torre y un controlador de amortiguación de tren de transmisión.
- 25
4. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, en la zona por encima de la velocidad del viento de corte, la velocidad de generador se mantiene constante al aumentar la velocidad del viento.
5. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, el valor predeterminado para la velocidad de generador está comprendido entre 15 y 20 % de la velocidad nominal de generador.
- 30
6. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, el valor predeterminado para la velocidad de generador está comprendido entre 10 y 25 % de la velocidad nominal de generador.
- 35
7. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, en una zona inmediatamente por debajo de la velocidad del viento de corte, hacer funcionar uno o más accionadores de ángulo de paso de las palas y mantener la velocidad de generador a un valor predeterminado para una velocidad del viento dada, disminuyendo el valor predeterminado para la velocidad de generador al aumentar la velocidad del viento.
- 40
8. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende detectar una velocidad del viento de corte (v_{off}) y desconectar eléctricamente el generador de turbina eólica de la red eléctrica.
9. Método de acuerdo con la reivindicación 8, que comprende, en una zona por encima de la velocidad del viento de corte (v_{off}), controlar que el generador tenga una producción de energía distinta de cero, y desviar la energía producida para proporcionar energía auxiliar a los sistemas de control de turbina eólica.
- 45
10. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende hacer funcionar un mecanismo de orientación para colocar el rotor de generador de turbina eólica en ángulo con el viento para hacer que se oriente en la dirección del viento entrante.
- 50
11. Método de acuerdo con la reivindicación 9 o 10, que comprende detectar un error de orientación y si el error de orientación es mayor que un umbral, establecer la velocidad de generador a cero y parar el generador de turbina eólica.
- 55
12. Generador de turbina eólica, que comprende:
- una o más palas de turbina eólica acopladas a un generador;
- uno o más accionadores de ángulo de paso de las palas para controlar el ángulo de paso de la una o más palas de turbina eólica;
- uno o más sensores para detectar una condición de funcionamiento en el generador de turbina eólica indicativa de un episodio de viento extremo o un episodio de carga extrema;
- 60 un controlador para controlar el funcionamiento del generador y del uno o más accionadores de ángulo de paso, en el que el controlador puede funcionar para:
- determinar una condición de funcionamiento en el generador de turbina eólica indicativa de un episodio de viento extremo o un episodio de carga extrema;
- 65 cuando se realiza una detección de un episodio de viento extremo o de un episodio de carga extrema, mantener la velocidad de generador a un valor distinto de cero, inferior al valor nominal, en una zona por encima de la velocidad

del viento de corte (v_{off}); en el que en la zona por encima de la velocidad del viento de corte, el generador se controla de modo que la velocidad disminuye de manera discontinua a medida que aumenta la velocidad del viento, presentando etapas o saltos que omiten valores predeterminados de la velocidad de generador; y hacer funcionar el uno o más accionadores de ángulo de paso de las palas para controlar la rotación de las palas de turbina eólica.

5

13. Producto de programa informático que comprende un código que cuando se ejecuta en el procesador de un controlador de turbina eólica hace que el controlador lleve a cabo cualquiera de las etapas del método de las reivindicaciones 1 a 11.

10

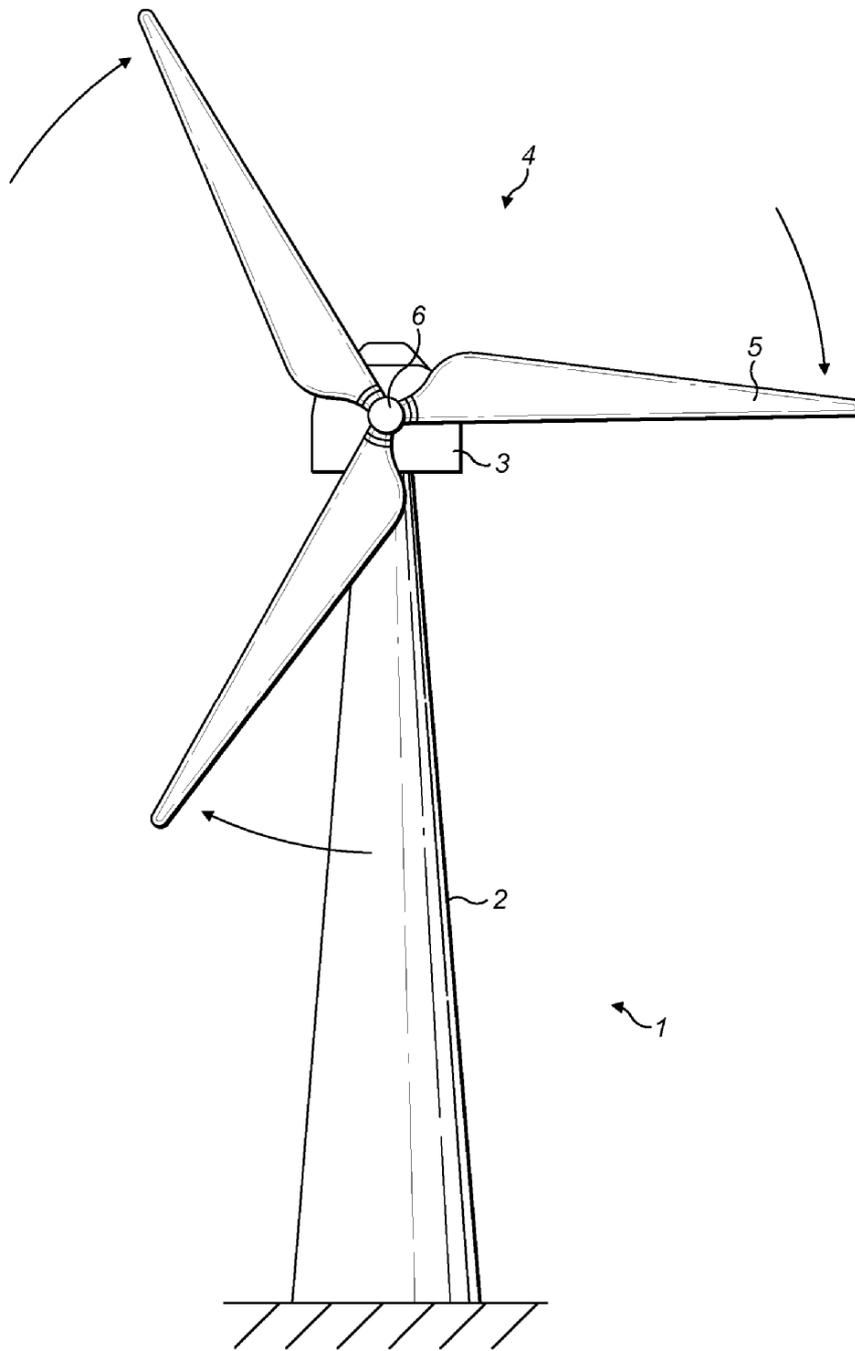


FIG. 1

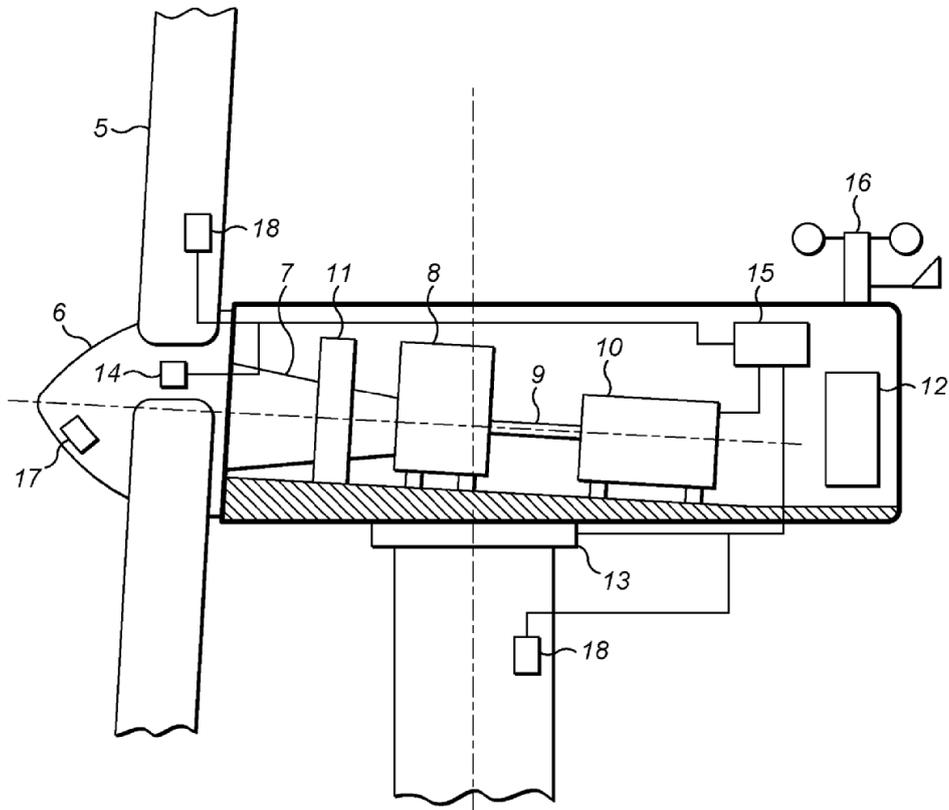


FIG. 2

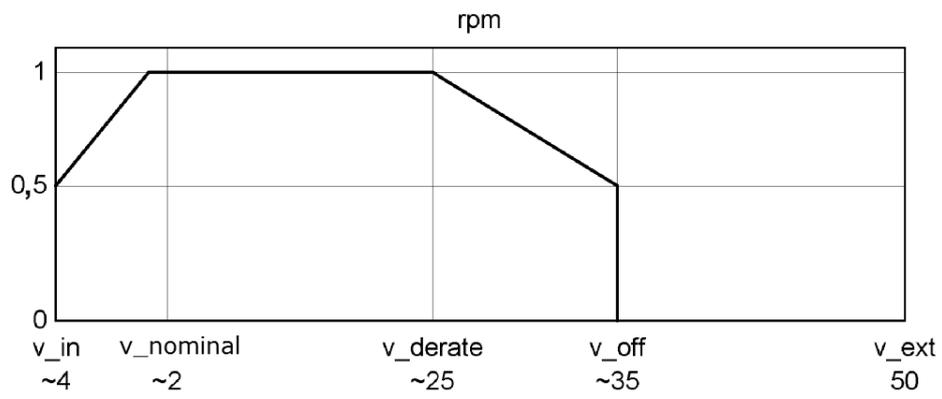


FIG. 3a

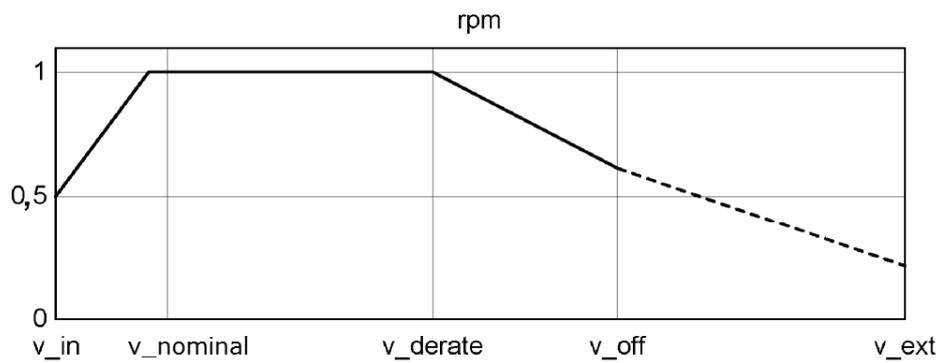


FIG. 3b

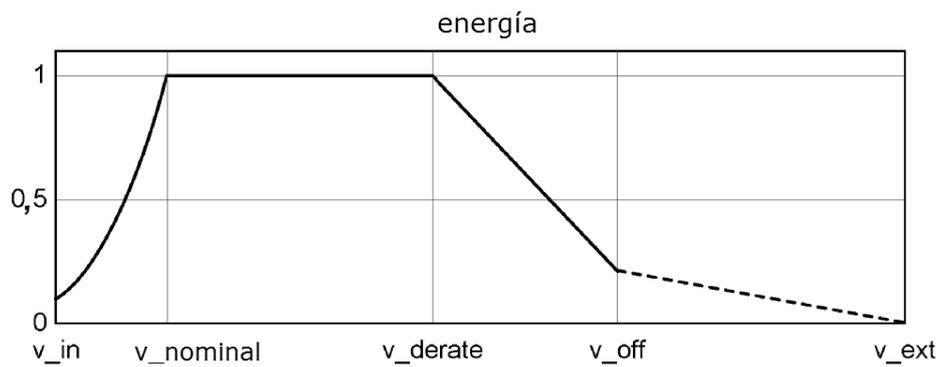


FIG. 3c

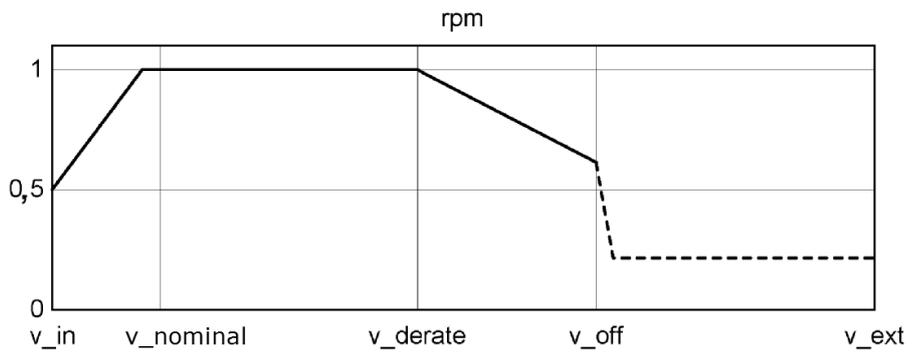


FIG. 4a

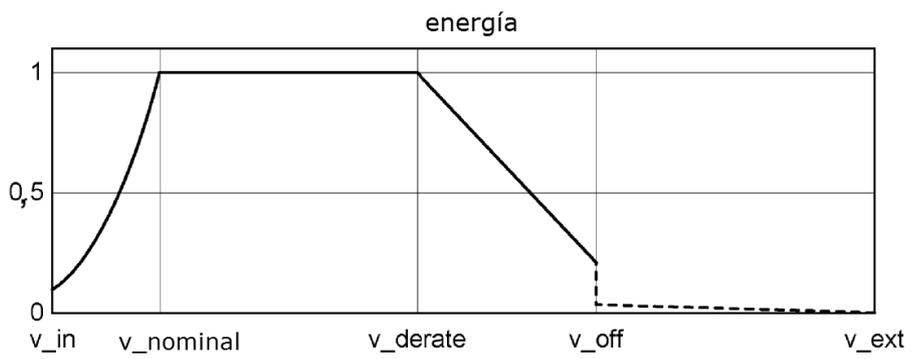


FIG. 4b