

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **3 013 289**

(51) Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.06.2020 PCT/DK2020/050177**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **30.12.2020 WO20259772**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.06.2020 E 20740529 (1)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.02.2025 EP 3987172**

(54) Título: **Método de apagado de una turbina eólica**

(30) Prioridad:

24.06.2019 DK PA201970398

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

11.04.2025

(73) Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.00%)
Hedeager 42
8200 Aarhus N, DK**

(72) Inventor/es:

**VASUDEVAN, KARTHIK y
COUCHMAN, IAN**

(74) Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 3 013 289 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método de apagado de una turbina eólica

Campo de la invención

La presente invención se refiere de manera general a un método de apagado de una turbina eólica.

5 Antecedentes de la invención

Convencionalmente, en caso de una emergencia, tal como un alto error de guiñada, una turbina eólica se apaga ajustando el paso de las palas de turbina eólica contra el viento para ralentizar inmediatamente el rotor.

Un método de este tipo puede dar como resultado que se experimenten grandes cargas asimétricas por las palas.

Por consiguiente, existe una necesidad de un método de apagado de una turbina eólica que evite o mitigue tales cargas.

El documento US2015/377215 A 1 da a conocer un método para gestionar cargas en un viento en relación con desalineación de guiñada y apagar la turbina eólica.

El documento US2018/051675 A1 da a conocer aspectos relacionados con el funcionamiento de una turbina eólica en un modo de baja potencia, incluyendo aspectos relacionados con dejar de funcionar en el modo de baja potencia.

15 Sumario de la invención

Un primer aspecto de la invención proporciona un método de apagado de una turbina eólica según la reivindicación 1.

Controlar la potencia eléctrica generada controla indirectamente el par de carga aplicado a la turbina eólica porque hay una relación entre la potencia eléctrica generada y el par de carga aplicado por el generador. El umbral puede ser un umbral predeterminado.

El sistema de generador puede comprender un generador y un convertidor eléctrico; produciéndose la potencia eléctrica y el par de carga por el generador; convirtiendo el convertidor eléctrico una frecuencia de la potencia eléctrica para generar una señal de red de distribución que se introduce en una red de distribución; y controlando la señal de referencia de potencia el convertidor eléctrico que a su vez controla la potencia eléctrica y el par de carga producidos por el generador.

El paso de las palas puede mantenerse sustancialmente constante hasta que se ha reducido la velocidad del rotor por debajo del umbral.

El paso de las palas se mantiene sustancialmente constante a medida que cambia la señal de referencia de potencia en respuesta a la determinación de que se requiere el apagado de la turbina eólica.

30 El paso de las palas puede mantenerse sustancialmente constante desde el momento de determinación de que se requiere el apagado de la turbina eólica hasta que se ha reducido la velocidad del rotor por debajo del umbral.

El término "sustancialmente constante" tal como se usó anteriormente puede significar que el paso cambia en no más de una pequeña cantidad, por ejemplo 2°, 5° o 10°.

35 La señal de referencia de potencia puede cambiarse una cantidad que se determina, al menos en parte, según un límite de par de carga de modo que el par de carga aplicado al rotor no supera el límite de par de carga.

La señal de referencia de potencia puede cambiarse después de determinar que la velocidad del rotor se ha reducido por debajo del umbral, para reducir la potencia eléctrica generada. Por ejemplo, la señal de referencia de potencia puede reducirse para hacer que la potencia eléctrica se reduzca hasta cero.

40 Determinar que se requiere un apagado puede comprender identificar una condición de error. La condición de error puede ser una condición de error de guiñada. El umbral puede determinarse basándose en la condición de error. Dicho de otro modo, el umbral puede establecerse basándose en lo que está provocando que tenga lugar el apagado.

El umbral puede ser un porcentaje de una velocidad inicial, por ejemplo una velocidad del rotor en el momento de cambiar la señal de referencia de potencia. Alternativamente, el umbral puede ser una velocidad absoluta.

45 Cambiar el paso de las palas puede ralentizar el rotor hasta pararse. Alternativamente, cambiar el paso de las palas puede ralentizar el rotor hasta una velocidad al ralentí.

El cambio del paso de las palas para ralentizar adicionalmente el rotor puede cambiar el paso en más de 30°, más

de 50° o más de 70°.

Un aspecto adicional de la invención proporciona una turbina eólica según la reivindicación 11.

El sistema de control puede estar configurado además para: después de haberse cambiado la señal de referencia de potencia, determinar que se ha superado un tiempo máximo (por ejemplo, midiéndose el tiempo máximo con respecto al momento en el que se ha cambiado la señal de referencia de potencia, o con respecto al momento de determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica); y en respuesta a la determinación de que se ha superado el tiempo máximo, cambiar un paso de las palas para ralentizar el rotor.

El sistema de control puede estar configurado además para: monitorizar la velocidad del rotor después de haberse cambiado la señal de referencia de potencia para identificar un comportamiento anómalo (por ejemplo, la velocidad está aumentando en vez de disminuir); y en respuesta a una identificación de comportamiento anómalo, cambiar el paso de las palas para ralentizar el rotor.

Un aspecto adicional de la invención proporciona un medio de almacenamiento legible por ordenador que tiene código de programa legible por ordenador implementado con el mismo según la reivindicación 14.

Un aspecto adicional proporciona un método de apagado de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor con una pluralidad de palas; y un sistema de generador acoplado al rotor, comprendiendo el método: hacer funcionar el sistema de generador para generar potencia eléctrica y aplicar un par de carga al rotor; controlar la potencia eléctrica generada con una señal de referencia de potencia; determinar que se requiere un apagado de la turbina eólica; en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, cambiar la señal de referencia de potencia para aumentar la potencia eléctrica generada; y después de haberse cambiado la señal de referencia de potencia, determinar que se ha superado un tiempo máximo; y en respuesta a la determinación de que se ha superado el tiempo máximo, cambiar un paso de las palas para ralentizar el rotor.

Un aspecto adicional proporciona un método de apagado de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor con una pluralidad de palas; y un sistema de generador acoplado al rotor, comprendiendo el método: hacer funcionar el sistema de generador para generar potencia eléctrica y aplicar un par de carga al rotor; controlar la potencia eléctrica generada con una señal de referencia de potencia; determinar que se requiere un apagado de la turbina eólica; en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, cambiar la señal de referencia de potencia para aumentar la potencia eléctrica generada; monitorizar la velocidad del rotor después de haberse cambiado la señal de referencia de potencia para identificar un comportamiento anómalo; y en respuesta a una identificación de comportamiento anómalo, cambiar el paso de las palas para ralentizar el rotor.

30 Breve descripción de los dibujos

Ahora se describirán realizaciones de la invención con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una representación esquemática de una turbina eólica;

la figura 2 es una representación esquemática de un sistema de control de la turbina eólica; y

la figura 3 ilustra diversos parámetros de turbina durante un apagado.

35 Descripción detallada de realización/realizaciones

La figura 1 ilustra, en una vista en perspectiva esquemática, un ejemplo de una turbina eólica 1. La turbina eólica 1 incluye una torre 2, una góndola 3 en el vértice de la torre, y un rotor 4 operativamente acoplado a un generador alojado dentro de la góndola 3. Además del generador, la góndola aloja diversos componentes requeridos para convertir energía eólica en energía eléctrica y diversos componentes necesarios para hacer funcionar, controlar, y optimizar el rendimiento de la turbina eólica 1. El rotor 4 incluye un buje central 5 y una pluralidad de palas 6 que sobresalen hacia fuera desde el buje central 5. En la realización ilustrada, el rotor 4 incluye tres palas 6, pero el número puede variar, por ejemplo el rotor puede tener dos o cuatro palas. Además, la turbina eólica comprende un sistema de control. El sistema de control puede estar colocado dentro de la góndola o distribuido en varias ubicaciones dentro de la turbina y conectado en comunicación.

45 La turbina eólica 1 puede estar incluida entre una colección de otras turbinas eólicas pertenecientes a una central de energía eólica, también denominada campo eólico o parque eólico, que sirve como central de generación de potencia conectada mediante líneas de transmisión con una red de distribución de potencia. La red de distribución de potencia consiste generalmente en una red de estaciones de potencia, circuitos de transmisión, y subestaciones acopladas mediante una red de líneas de transmisión que transmiten la potencia a cargas en forma de usuarios finales y otros clientes de servicios eléctricos.

50 La figura 2 ilustra esquemáticamente una realización de un sistema de control 20 junto con elementos de la turbina eólica. Las palas de rotor 6 están mecánicamente conectadas a un generador eléctrico 22 mediante una caja de engranajes 23 con un árbol de entrada y un árbol de salida 21. En sistemas de accionamiento directo, y otros sistemas, la caja de engranajes 23 puede no estar presente. La potencia eléctrica generada por el generador 22 se

inyecta en una red de distribución de potencia 24 mediante un convertidor eléctrico 25. El generador eléctrico 22 y el convertidor 25 pueden basarse en una arquitectura de convertidor a escala completa (FSC) o una arquitectura de generador de inducción de doble alimentación (DFIG), pero pueden usarse otros tipos.

5 El sistema de control 20 comprende varios elementos, incluyendo al menos un controlador principal 200 con un procesador y una memoria, de modo que el procesador puede ejecutar tareas de cálculo basándose en instrucciones almacenadas en la memoria. En general, el controlador de turbina eólica garantiza que, en funcionamiento, la turbina eólica genera un nivel de salida de potencia solicitado. Esto se obtiene ajustando el ángulo de paso y/o la extracción de potencia del convertidor 25. Para ello, el sistema de control comprende un sistema de ajuste de paso que incluye un controlador de paso 27 que usa una señal de referencia de paso 28, y un sistema de potencia que incluye un controlador de potencia 29 que usa una señal de referencia de potencia 26. El controlador de potencia 29 controla los diversos componentes electrónicos del sistema de convertidor de generador con el fin de suministrar la potencia solicitada, que a su vez controla el par del generador 22 que se necesita para extraer la potencia solicitada por el rotor a partir del viento.

10 15 El par del generador 22 (denominado a continuación par de generador) se aplica al árbol de salida 21 de la caja de engranajes 23.

20 Puede ajustarse el paso de las palas de rotor 6 mediante un mecanismo de control de paso. El rotor puede comprender un sistema de ajuste de paso común que ajusta todos los ángulos de paso en todas las palas de rotor al mismo tiempo, así como además un sistema de ajuste de paso individual que puede realizar un ajuste de paso individual de las palas de rotor. El sistema de control 20, o elementos del sistema de control 20, pueden colocarse en un controlador de central eléctrica (no mostrado) de modo que la turbina puede hacerse funcionar basándose en instrucciones proporcionadas de manera externa. En realizaciones de la presente invención, el paso se controla basándose en una referencia de paso común sobre la que se superpone la referencia de paso individual. En realizaciones, la ralentización del rotor puede obtenerse cambiando la referencia de paso común. Manteniendo también el paso de las palas constante puede equivaler a mantener la referencia de paso común constante.

25 30 Para garantizar que la señal de referencia de potencia 26 no daña el controlador de potencia 29 o el convertidor 25, se limita el tamaño de la señal de referencia de potencia 26 de modo que no puede superar un valor máximo predeterminado, tal como un valor de tensión máxima.

35 40 El rotor 4 experimenta par aerodinámico y par de carga que actúan en sentidos opuestos. El par aerodinámico es el resultado del viento que actúa sobre las palas de rotor 6. Cambiar el paso de las palas cambia el par aerodinámico, haciendo variar el ángulo de ataque y, por tanto, cambiando la sustentación aerodinámica. El par de carga actúa sobre el rotor contra el par aerodinámico. El par de carga tiene una componente que se origina a partir del par de generador aplicado al árbol de salida 21 de la caja de engranajes, y una componente provocada por fricción en la caja de engranajes 23 y cojinetes.

45 50 La diferencia entre el par aerodinámico y el par de carga es el par neto aplicado al rotor. Si el par neto es cero, es decir los pares aerodinámico y de carga son iguales, entonces la velocidad del rotor no cambiará. Si el par aerodinámico es mayor que el par de carga, el rotor se acelerará. Si el par de carga es mayor que el par aerodinámico, el rotor se ralentizará.

55 60 Tal como se explicó anteriormente, el par de generador produce la mayor parte del par de carga aplicado al rotor. Por tanto, solicitar más potencia a partir del generador 22 da como resultado que se experimenta un mayor par de carga por el rotor 4. La relación entre par y potencia es: $P = \omega \times T$, donde P es la potencia generada, T es el par de carga y ω es la velocidad de rotación del rotor.

Durante el funcionamiento normal de la turbina eólica, la velocidad del rotor se controla usando el ángulo de paso de las palas y/o el par de carga, que se controlan mediante la señal de referencia de paso 28 y la señal de referencia de potencia 26 respectivamente.

65 70 75 En una región de funcionamiento a baja velocidad del viento, la señal de referencia de paso 28 puede mantenerse constante, y la señal de referencia de potencia 26 y la velocidad del rotor aumentarse a medida que aumenta la velocidad del viento. En una región de funcionamiento con mucho viento, la señal de referencia de potencia 26 y la velocidad del rotor pueden mantenerse constantes (a una potencia nominal y una velocidad nominal respectivamente), y la señal de referencia de paso 28 ajustarse para responder al cambio de velocidad del viento.

80 85 90 En una situación de emergencia, la turbina eólica puede apagarse de manera convencional ajustando el paso de las palas. Sin embargo, ajustar el paso de las palas da como resultado una gran variación en la distribución de la carga experimentada a través de la superficie de la pala. Esto se debe a que diferentes porciones a lo largo de la longitud de la pala experimentan diferentes perfiles de coeficiente de sustentación a medida que la pala completa una revolución. Cuando el ángulo de ataque se cambia durante una acción de ajuste de paso, el perfil de coeficiente de sustentación para cada porción de la pala cambia de manera diferente, lo que significa que a través de toda la superficie de la pala, el cambio en el coeficiente de sustentación experimentado no es uniforme. Por tanto, puede experimentarse una gran variación en la distribución de carga a través de la superficie de la pala. Esto no es deseable porque puede provocar daño o fatiga a diversas partes de la turbina eólica tales como cojinetes, etc.

- La invención evita o mitiga estos problemas determinando que se requiere un apagado de la turbina eólica; entonces, en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, cambiando la señal de referencia de potencia 26 para aumentar la potencia eléctrica generada ralentizando de ese modo el rotor; determinando que una velocidad del rotor se ha reducido por debajo de un umbral de velocidad; y en respuesta a la determinación de que la velocidad del rotor se ha reducido por debajo del umbral, cambiando un paso de las palas (aumentando la señal de referencia de paso 28) para ralentizar adicionalmente el rotor.
- El aumento en la señal de referencia de potencia disminuye la velocidad de rotor usando los principios descritos anteriormente, es decir aumentar la potencia generada lo que a su vez aumenta el par de carga aplicado al rotor. El par aerodinámico no cambia porque la velocidad del viento no varía mucho, y el paso de pala no cambia. Por tanto, el par neto hace que rotor se ralentice.
- Puede usarse un sensor de dirección del viento 30 (tal como una veleta) para determinar que se requiere un apagado de la turbina eólica debido a un alto error de guiñada. El sensor de dirección del viento 30 determina el ángulo del viento con respecto a la góndola. Si la magnitud del ángulo aumenta por encima de un ángulo umbral, entonces se determina que hay un alto error de guiñada que desencadena un apagado.
- Otros posibles motivos para determinar que se requiere un apagado de la turbina eólica incluyen; acontecimientos de viento extremo; fallo de un sensor, accionador o componente; o pérdida de conexión con la red de distribución.
- La figura 3 ilustra esta técnica, mostrando un ejemplo de parámetros de sistema cuando se emplea la invención.
- El funcionamiento normal de la turbina eólica tiene lugar hasta el tiempo t0. Durante este periodo de funcionamiento normal antes del tiempo t0, la potencia eléctrica generada se controla tal como se describió anteriormente usando la señal de referencia de potencia 26 y/o la señal de referencia de paso 28.
- En el tiempo t0, cambia una condición. Por ejemplo, esta condición puede ser que la dirección del viento cambia de modo que el viento ya no está alineado con el rotor, y en vez de eso el viento llega a la turbina lateralmente. Por tanto, en el tiempo t0 la señal de error de guiñada comienza a aumentar tal como se muestra en 40.
- A medida que aumenta el error de guiñada, la señal de referencia de potencia 26, la potencia, la señal de referencia de paso 28 y el par de carga disminuyen todos ellos tal como se muestra en 41, 42, 43 y 44 respectivamente. La velocidad de generador disminuye y después se recupera tal como se muestra en 45.
- En el tiempo t1, se realiza una determinación por el controlador 200 de que se requiere un apagado de la turbina eólica, dado que la señal de error de guiñada ha cruzado un umbral 50. En respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, se aumenta la señal de referencia de potencia 26 (tal como se muestra en 51) para aumentar la potencia eléctrica generada (tal como se muestra en 52). La velocidad del viento no varía mucho, y el paso de las palas no cambia (tal como se muestra en 54 mediante la señal de referencia de paso constante), por tanto el par aerodinámico no cambia. El requisito de potencia aumentado hace que el par de carga aumente (tal como se muestra en 55). Dado que el par aerodinámico no ha cambiado, ahora hay un par neto que está aplicándose, lo que hace que el rotor se ralentice (tal como se muestra en 53).
- La señal de referencia de potencia 26 se aumenta hasta que alcanza un nivel de desviación de potencia 60 en el tiempo t2. El nivel de desviación de potencia 60 puede determinarse de una variedad de maneras.
- En un ejemplo, la señal de referencia de potencia 26 puede cambiarse una cantidad fija y predeterminada (por ejemplo, 1 MW).
- En otro ejemplo, la señal de referencia de potencia 26 puede cambiarse un porcentaje fijo (por ejemplo el 50 %, el 100 % o el 200 %).
- En otros ejemplos, la señal de referencia de potencia 26 puede cambiarse una cantidad que se determina basándose en una variedad de parámetros tales como par de carga, paso de pala y potencia.
- Opcionalmente, la señal de referencia de potencia 26 puede cambiarse una cantidad que se determina, al menos en parte, según un límite de par de carga de modo que el par de carga aplicado al rotor no supera el límite de par de carga a medida que la velocidad se vuelve baja (par=potencia/velocidad). Por tanto, por ejemplo, si aumentar 1 MW la señal de referencia de potencia 26 hará que el par de carga supere el límite de par de carga, entonces la señal de referencia de potencia 26 se aumenta una cantidad menor que mantiene el par de carga por debajo del límite de par de carga.
- Opcionalmente, la señal de referencia de potencia 26 puede cambiarse mediante un controlador proporcional-integral (PI) intentando alcanzar una velocidad de referencia (por ejemplo, el umbral de velocidad 70 mencionado a continuación) usando potencia con un límite de par de carga y protección frente a aumento de viento de integrador relevante.
- Alternativamente, el controlador 200 puede consultar la velocidad de generador, oscilaciones de torre, cargas de pala, etc., y controlar la señal de referencia de potencia 26 en consecuencia.

Entre el tiempo t2 y el tiempo t3, la señal de referencia de potencia 26 se mantiene constante (tal como se muestra en 61) de modo que la potencia también se mantiene constante (tal como se muestra en 62). Dado que la señal de referencia de paso 28 también se mantiene constante durante esta fase (tal como se muestra en 63) el par de carga comienza a reducirse ligeramente (tal como se muestra en 64).

- 5 En el tiempo t3, el controlador 200 determina que la velocidad del rotor se ha reducido por debajo de un umbral de velocidad 70. Esta determinación puede realizarse monitorizando la velocidad del rotor o el generador con uno o más sensores.

La determinación de que la velocidad del rotor 4 se ha reducido por debajo del umbral de velocidad 70 desencadena la señal de referencia de paso para aumentarla (tal como se muestra mediante la rampa 71) de modo que el paso de las palas se aumenta hasta que alcanza 90°. Esto reduce el par aerodinámico para ralentizar adicionalmente el rotor tal como se muestra en 72. En este caso, el rotor se ralentiza hasta pararse completamente. En otros casos, el rotor puede ralentizarse hasta una velocidad al ralentí.

10 El umbral de velocidad 70 puede ser un porcentaje de una velocidad inicial del rotor en el tiempo t1, o puede ser un valor absoluto. La velocidad de umbral 70 puede estar predeterminada o puede determinarse por el controlador 200 durante el procedimiento de apagado anteriormente mencionado.

15 Obsérvese que la señal de referencia de paso 28 se ilustra como constante entre los tiempos t1 y t3. Por tanto, el paso de las palas se mantiene sustancialmente constante a medida que la señal de referencia de potencia 26 cambia entre el tiempo t1 y el tiempo t2, y también se mantiene sustancialmente constante desde el momento de determinación de que se requiere el apagado de la turbina eólica (tiempo t1) hasta que se ha reducido la velocidad del rotor por debajo del umbral (tiempo t3).

20 Obsérvese, sin embargo, que las señales de paso individuales para cada pala pueden variar ligeramente (por ejemplo, en unos pocos grados) durante este periodo de tiempo entre el tiempo t1 y el tiempo t3, mientras que al ángulo de paso colectivo puede variar una cantidad menor. Por otro lado, el cambio de ángulo de paso provocado por la rampa 71 es mucho mayor (por ejemplo, puede ser de más de 40° o más de 60°). Por tanto, el término "sustancialmente constante" tal como se usó anteriormente puede significar que el paso cambia en no más de una pequeña cantidad, por ejemplo 2°, 5° o 10°.

En el tiempo t3, la señal de referencia de potencia 26 y la potencia se reducen (tal como se muestra en 72, 73 respectivamente) y el par de carga se reduce (tal como se muestra en 74). A medida que disminuye la velocidad de generador, el generador no puede generar tanta potencia debido a la relación $P = \omega \times T$.

25 30 A medida que la señal de referencia de potencia 26 empieza a aumentar en el tiempo t1, la velocidad debe disminuir de manera bastante rápida (tal como se muestra en 53). Si la velocidad no se reduce tal como se esperaba, entonces puede ser deseable cambiar el paso de las palas para apagar el rotor aunque la velocidad no se haya reducido por debajo del umbral de velocidad 70. Esto puede abordarse de varias maneras.

35 35 En un primer ejemplo, el controlador 200 puede estar configurado para determinar que se ha superado un tiempo máximo; y en respuesta a la determinación de que se ha superado el tiempo máximo, cambiar un paso de las palas para ralentizar el rotor. Por ejemplo, el tiempo máximo puede medirse con respecto al tiempo t1 que se ha aumentado la señal de referencia de potencia, que en este caso también es el tiempo t1 de determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica.

40 40 En un segundo ejemplo, el controlador 200 puede estar configurado para monitorizar la velocidad del rotor después de haber aumentado la señal de referencia de potencia 26 en el tiempo t1, para identificar un comportamiento anómalo. Por ejemplo, la velocidad puede estar aumentando en vez de disminuir. En respuesta a una identificación de tal comportamiento anómalo, puede cambiarse inmediatamente el paso de las palas para ralentizar el rotor, en vez de esperar a que la velocidad disminuya por debajo del umbral de velocidad 70.

45 45 El procedimiento descrito anteriormente tiene la ventaja de limitar las fuerzas mecánicas que actúan sobre la turbina eólica. Después de haber aumentado la señal de referencia de potencia en t1 los valores absolutos tanto del momento de inclinación como del momento de guiñada en el cojinete principal disminuyen significativamente, reduciendo las cargas mecánicas sobre la turbina eólica.

50 50 Otros beneficios incluyen: reducir el pico de empuje negativo conduciendo a cargas de torre inferiores y cargas de alerón de pala negativas inferiores; y una reducción de la tasa de ajuste de paso máxima requerida (es decir, la tasa de cambio del ángulo de paso provocada por la rampa 71) conduciendo a cargas inferiores sobre el sistema de control de ajuste de paso.

Aunque anteriormente se ha descrito la invención con referencia a una o más realizaciones preferidas, se apreciará que pueden realizarse diversos cambios o modificaciones sin alejarse del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método de apagado de una turbina eólica (1), comprendiendo la turbina eólica un rotor (4) con una pluralidad de palas (6); y un sistema de generador (22) acoplado al rotor, comprendiendo el método:
 hacer funcionar el sistema de generador para generar potencia eléctrica y aplicar un par de carga al rotor;
 5 controlar la potencia eléctrica generada con una señal de referencia de potencia (26);
 determinar que se requiere un apagado de la turbina eólica;
 en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, ralentizar el rotor;
 10 determinar que una velocidad del rotor se ha reducido por debajo de un umbral (70); y en respuesta a la determinación de que la velocidad del rotor se ha reducido por debajo del umbral, cambiar un paso de las palas para ralentizar adicionalmente el rotor;
 caracterizado porque el método comprende que, en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, se cambia la señal de referencia de potencia para aumentar la potencia eléctrica generada y de ese modo ralentizar el rotor y en el que el paso de las palas se mantiene sustancialmente constante a medida que cambia la señal de referencia de potencia.
- 15 2. Método según la reivindicación 1, en el que el paso de las palas se mantiene sustancialmente constante desde el momento de determinación de que se requiere el apagado de la turbina eólica hasta que se ha reducido la velocidad del rotor por debajo del umbral.
3. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que determinar que se requiere un apagado comprende identificar una condición de error.
- 20 4. Método según la reivindicación 3, en el que la condición de error es una condición de error de guiñada.
5. Método según la reivindicación 3 ó 4, en el que el umbral se determina basándose en la condición de error.
6. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que el umbral es un porcentaje de una velocidad inicial del rotor.
7. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que el umbral es una velocidad absoluta.
- 25 8. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que cambiar el paso de las palas ralentiza el rotor hasta pararse.
9. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que la señal de referencia de potencia se cambia una cantidad que se determina, al menos en parte, según un límite de par de carga de modo que el par de carga aplicado al rotor no supera el límite de par de carga.
- 30 10. Método según cualquier reivindicación anterior, que comprende además cambiar la señal de referencia de potencia después de determinar que la velocidad del rotor se ha reducido por debajo del umbral, para reducir la potencia eléctrica generada.
11. Turbina eólica (1) que comprende:
 un rotor (4) con una pluralidad de palas (6);
 35 un sistema de generador (22) acoplado al rotor; y
 un sistema de control (20), en la que el sistema de control está configurado para:
 hacer funcionar el sistema de generador para generar potencia eléctrica y aplicar un par de carga al rotor;
 controlar la potencia eléctrica generada y el par de carga con una señal de referencia de potencia (26);
 40 determinar que se requiere un apagado de la turbina eólica;
 en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, ralentizar el rotor;
 determinar que una velocidad del rotor se ha reducido por debajo de un umbral; y
 en respuesta a la determinación de que la velocidad del rotor se ha reducido por debajo del umbral, cambiar un paso de las palas para ralentizar adicionalmente el rotor

caracterizada porque, en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, se cambia la señal de referencia de potencia para aumentar la potencia eléctrica generada y de ese modo ralentizar el rotor y en la que el paso de las palas se mantiene sustancialmente constante a medida que cambia la señal de referencia de potencia.

- 5 12. Turbina eólica según la reivindicación 11, en la que el sistema de control está configurado además para:
después de haberse cambiado la señal de referencia de potencia, determinar que se ha superado un tiempo máximo; y
en respuesta a la determinación de que se ha superado el tiempo máximo, cambiar un paso de las palas para ralentizar el rotor.
- 10 13. Turbina eólica según la reivindicación 11 ó 12, en la que el sistema de control está configurado además para:
monitorizar la velocidad del rotor después de haberse cambiado la señal de referencia de potencia para identificar un comportamiento anómalo; y
en respuesta a una identificación de comportamiento anómalo, cambiar el paso de las palas para ralentizar el rotor.
- 15 14. Medio de almacenamiento legible por ordenador que tiene código de programa legible por ordenador implementado con el mismo, pudiendo ejecutarse el código de programa legible por ordenador por uno o más procesadores informáticos para realizar una operación para una turbina eólica (1), comprendiendo la turbina eólica un rotor (4) con una pluralidad de palas (6); y un sistema de generador (22) acoplado al rotor, en el que la operación comprende:
hacer funcionar el sistema de generador para generar potencia eléctrica y aplicar un par de carga a un rotor;
controlar la potencia eléctrica generada y el par de carga con una señal de referencia de potencia (26);
determinar que se requiere un apagado de la turbina eólica;
en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, ralentizar el rotor;
determinar que una velocidad del rotor se ha reducido por debajo de un umbral (70); y
en respuesta a la determinación de que la velocidad del rotor se ha reducido por debajo del umbral, cambiar un paso de las palas para ralentizar adicionalmente el rotor
- 20 30. caracterizado porque la operación comprende que, en respuesta a la determinación de que se requiere un apagado de la turbina eólica, se cambia la señal de referencia de potencia para aumentar la potencia eléctrica generada y el par de carga y el par de carga aumentado ralentizando de ese modo el rotor.

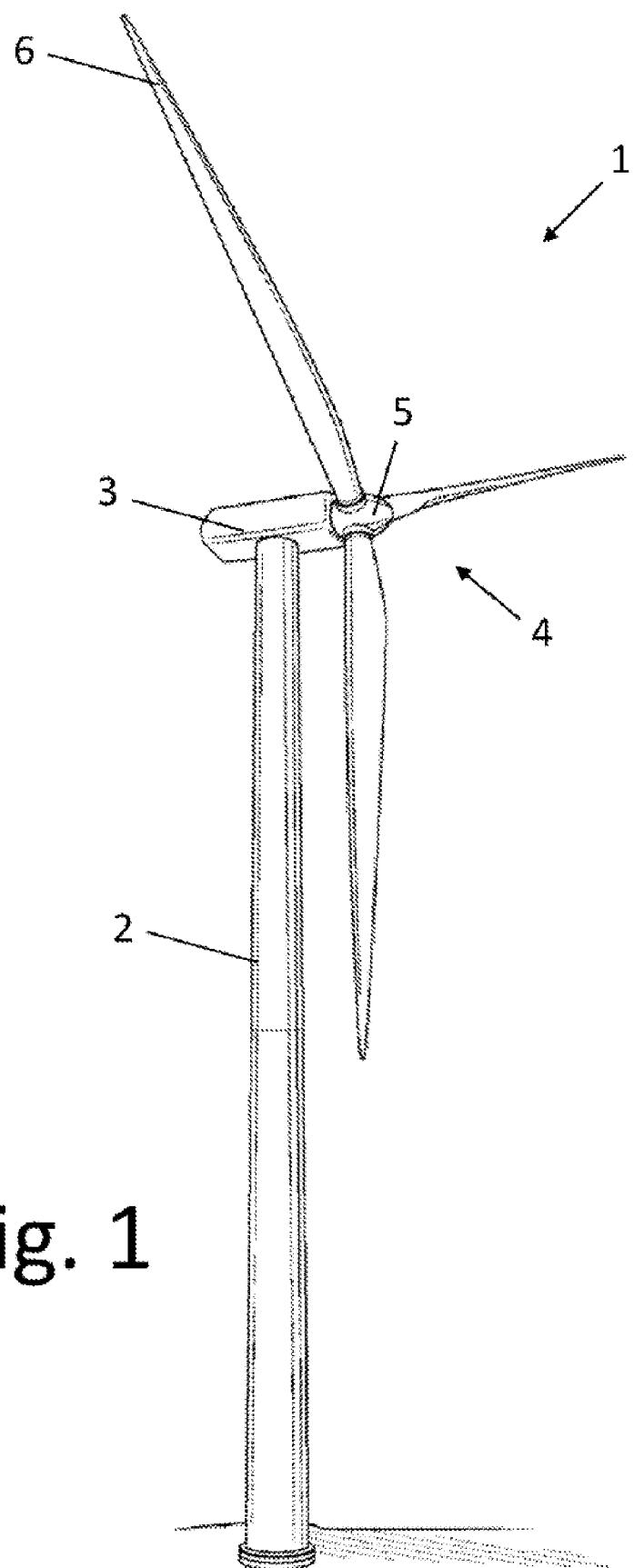


Fig. 1

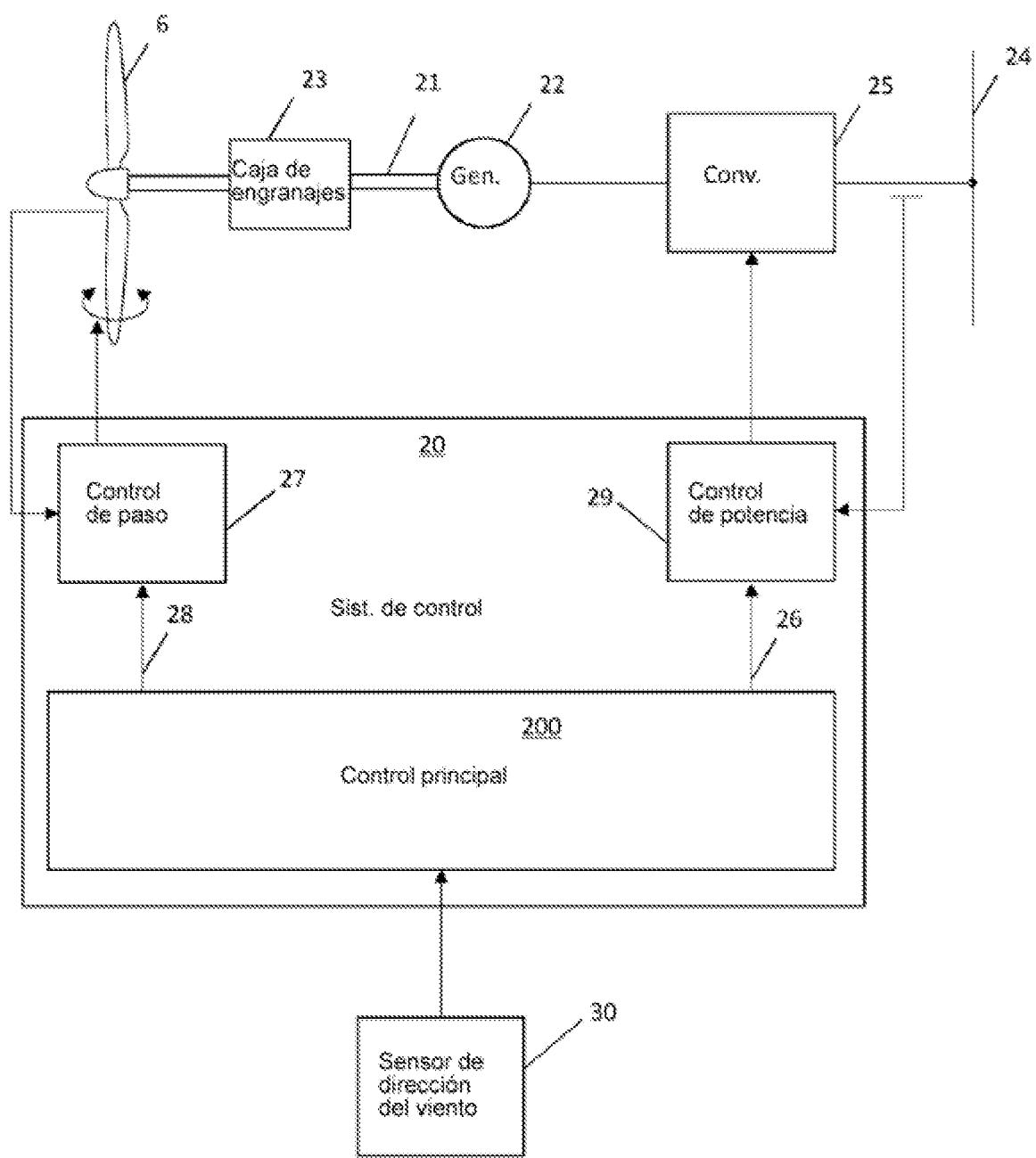


Fig. 2

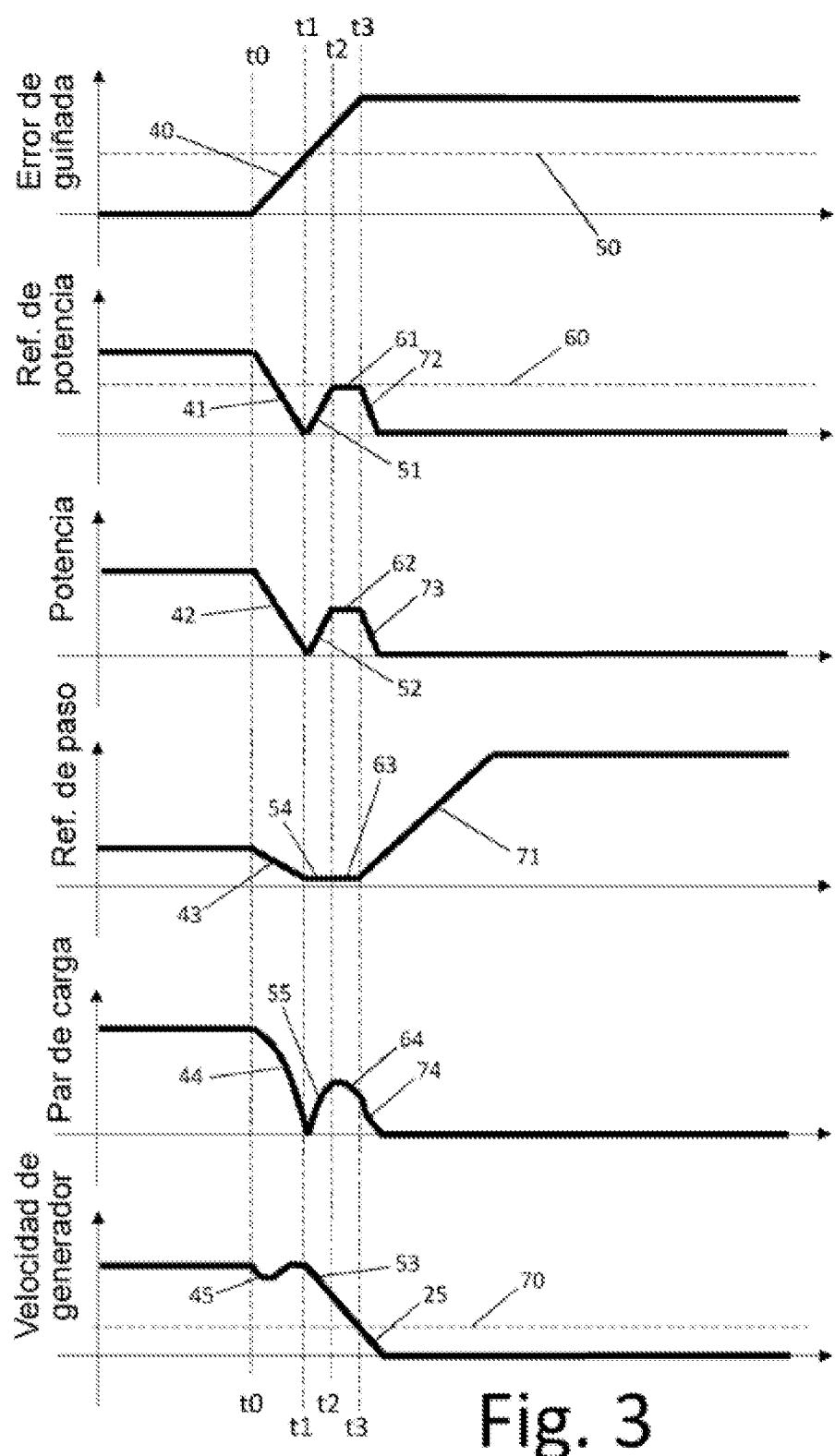


Fig. 3