

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 612 132**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.11.2011 E 11009007 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.11.2016 EP 2463518**

54 Título: **Procedimiento para hacer funcionar un aerogenerador con regulación de paso**

30 Prioridad:

**10.12.2010 DE 102010054013**

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

**12.05.2017**

73 Titular/es:

**NORDEX ENERGY GMBH (100.0%)  
Langenhorner Chaussee 600  
22419 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

**KABATZKE, WOLFGANG y  
ROCHHOLZ, HERMANN**

74 Agente/Representante:

**ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María**

**ES 2 612 132 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

Procedimiento para hacer funcionar un aerogenerador con regulación de paso

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para hacer funcionar un aerogenerador con regulación de paso, en el que dependiendo de una velocidad de giro del generador o rotor se establece un valor teórico para un momento de generador. La norma de asignación para el valor teórico del momento de generador dependiendo de la velocidad de giro posee un punto de transición, en el que se realiza una transición desde un funcionamiento de carga parcial a un funcionamiento de carga nominal. En el funcionamiento de carga nominal se efectúa prioritariamente una regulación de la velocidad de giro mediante un desplazamiento del ángulo de ajuste de inclinación de pala para al menos una pala de rotor.

Habitualmente en el desarrollo de aerogeneradores se parte de una densidad del aire estándar definida, de por ejemplo  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ .

15 Por el documento DE 101 09 553 B4 se conoce un procedimiento para controlar un aerogenerador con un generador eléctrico utilizando datos de densidad del aire en el emplazamiento del aerogenerador. En el procedimiento, mediante un dispositivo de control, que procesa los datos de densidad del aire se controla el generador del aerogenerador, y dependiendo de la densidad del aire, se ajustan datos de potencia del generador. En el procedimiento conocido se tiene en cuenta la altitud del lugar de erección del aerogenerador por encima del nivel del mar, considerándose la densidad del aire más baja en la curva característica de potencia. Por ello la potencia que ha de generarse por aerogenerador, asociada a una velocidad de giro del rotor y con ello a un parámetro  $\lambda$  determinado, puede adaptarse, es decir rebajarse, de manera que el momento de generador como consecuencia de una potencia de excitador alimentada a través del dispositivo de control no sobrepase el momento de torsión facilitado por el generador. En total se pretende mantener el rendimiento establecido por la curva característica de potencia y extraer del viento la máxima energía.

Por el documento EP 1 939 445 A2 se conoce un procedimiento para calcular una curva de potencia para emplazamientos elevados. A este respecto, partiendo de una relación entre el coeficiente de potencia  $C_P$  y el parámetro  $\lambda$  se calcula una relación entre la potencia inicial  $P$  eléctrica y la velocidad del viento.

Por el documento EP 1 918 581 A2 se conoce un aerogenerador en el que la potencia inicial se reduce cuando la temperatura del aire ambiente baja por debajo de un nivel umbral predeterminado. El trasfondo para la reducción de potencia es que en el caso de temperaturas por debajo de  $-20^\circ \text{ C}$  el funcionamiento del aerogenerador puede exigir otros cálculos de carga.

Por el documento EP 2 177 754 A2 se conoce un procedimiento y un dispositivo para ajustar el ángulo de ajuste de inclinación de pala de forma óptima. Para ello se define un ángulo de paso mínimo para una pala de rotor.

40 En caso de repercusiones de la densidad del aire en el rendimiento del aerogenerador ha de considerarse el hecho de que, en el caso de aerogeneradores regulados por cambio del ángulo de paso al variar las condiciones del aire puede llegarse a efectos de pérdida (*stall*) aerodinámicos con una entrada en pérdida no deseada.

La invención se basa en el objetivo de facilitar un procedimiento mejorado para hacer funcionar un aerogenerador con regulación de paso en el que se cambie de manera estable al funcionamiento de plena carga y al mismo tiempo se eviten efectos de pérdida no deseados en la pala de rotor.

De acuerdo con la invención el objetivo se resuelve mediante un procedimiento con las características de la reivindicación 1. Las configuraciones ventajosas forman el objeto de las reivindicaciones dependientes.

50 En el procedimiento de acuerdo con la invención se efectúa un funcionamiento de un aerogenerador con regulación de paso, en el que dependiendo de una velocidad de giro  $n$  del generador o del rotor, se establece un valor teórico  $M$  para el momento de generador. Con el fin de establecer el valor teórico del momento de generador está previsto un punto de transición ( $n_3$ ,  $M_3$ ) en el que, partiendo del funcionamiento de carga parcial, se cambia al funcionamiento de plena carga. En general, en el funcionamiento del aerogenerador ha de diferenciarse entre un funcionamiento de carga parcial y un funcionamiento de plena carga, al que ocasionalmente también se le llama funcionamiento de carga nominal. En el funcionamiento de carga parcial con velocidad de giro creciente se aumenta el valor teórico para el momento de generador. En el funcionamiento de plena carga se efectúa una regulación de la velocidad de giro del generador mediante un desplazamiento del ángulo de ajuste de inclinación de pala (ángulo de paso) para al menos una pala de rotor. La transición partiendo del funcionamiento de carga parcial al funcionamiento de plena carga se efectúa en un punto de transición, que está definido por un valor para la velocidad de giro  $n_3$  y un valor teórico para el momento de generador  $M_3$ . De acuerdo con la invención se calcula un valor para la densidad del aire. Además el procedimiento de acuerdo con la invención prevé ajustar un ángulo de paso previo para al menos una pala de rotor a partir de una velocidad de giro de ajuste de paso previo, siendo la velocidad de giro de ajuste de paso previo inferior a la velocidad de giro  $n_3$  en el punto de transición. Con ángulo de paso previo se designa en este caso un ángulo de ajuste de inclinación de pala que ya se presenta en el funcionamiento de carga parcial del

aerogenerador, y puede prolongarse hasta el funcionamiento de carga nominal del aerogenerador, hasta que se introduce una regulación regular en el funcionamiento de carga nominal. Mediante el ajuste del ángulo de paso previo el aerogenerador en el punto de transición tiene ya un ángulo de ajuste de inclinación de pala diferente a cero. De acuerdo con la invención, el valor del ángulo de paso previo depende del valor calculado para la densidad del aire, estando definida la dependencia de tal manera que, en caso de una densidad del aire más baja, se ajusta un ángulo de paso previo mayor que en caso de una densidad del aire mayor. A diferencia de una solución en la que el ángulo de paso previo es una constante para el punto de transición, en el procedimiento de acuerdo con la invención mediante un ángulo de paso previo, que depende de la densidad del aire, se evita que en el caso de una densidad del aire alta se elija un ángulo de paso previo demasiado grande. La invención se basa en la conclusión de que, en el caso de alta densidad del aire en su mayor parte un ángulo de paso previo grande es innecesario y perjudicial para el rendimiento del aerogenerador.

En una configuración preferida del procedimiento de acuerdo con la invención el ángulo de paso, a partir de una velocidad de giro mínima es constante hasta alcanzar la velocidad de giro de ajuste de paso previo, preferiblemente se establece con un valor de cero grados. La velocidad de giro de ajuste de paso previo es una primera velocidad de giro, en la que comienza el ajuste previo de la inclinación de pala. En esta configuración del procedimiento de acuerdo con la invención para el intervalo de velocidad de giro, entre la velocidad de giro mínima y la velocidad de giro de ajuste de paso previo, se establece un ángulo de ajuste de inclinación de pala constante.

En una configuración preferida, el ángulo de paso, a partir de la velocidad de giro de ajuste de paso previo aumenta hasta alcanzar una velocidad de giro de ajuste de paso previo máxima, siendo la velocidad de giro de ajuste de paso previo mayor o igual que la velocidad de giro en el punto de transición. El aumento puede efectuarse linealmente, linealmente por secciones o en otra forma. En esta configuración del procedimiento queda garantizado que el ángulo de paso aumenta comenzando con la consecución de la velocidad de giro de ajuste de paso previo hasta que se alcanza el punto de transición. Preferiblemente el aumento del ángulo de paso se efectúa completamente o linealmente por secciones.

En una configuración preferida el valor del ángulo de paso previo en una velocidad de giro, por ejemplo, la velocidad de giro en el punto de transición se establece mediante la siguiente fórmula:

$$\varphi_{pre} = \max\left(\varphi_{lim}, \varphi_b + \Delta\varphi \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{norm}}\right)\right),$$

siendo  $\varphi_{lim}$ ,  $\varphi_b$  y  $\Delta\varphi$  constantes para los ángulos de ajuste de paso y designando  $\rho_{norm}$  una densidad del aire predominante en condiciones normales.  $\varphi_{lim}$  es una constante específica para la pala de rotor que depende del parámetro lambda. La relación anterior entre ángulo de paso previo  $\varphi_{pre}$  y densidad del aire  $\rho$  garantiza que con una densidad del aire baja se elija un ángulo de paso previo mayor que con una densidad del aire alta. La densidad del aire  $\rho$  calculada entra en la expresión para el ángulo de paso previo. Si el aerogenerador funciona con una densidad del aire que corresponde a la densidad del aire  $\rho_{norm}$  predominante en condiciones normales entonces resulta el ángulo de paso previo  $\varphi_b$ . Si la densidad del aire es claramente inferior a la densidad del aire predominante en condiciones normales, entonces el ángulo de paso previo  $\varphi_{pre}$  aumenta en una fracción de  $\Delta\varphi$ . La función "max(.../...)" elige el mayor de los dos valores argumentales y evita de esta manera ángulos de ajuste de paso previo tan negativos. El valor de  $\varphi_b$  se sitúa en el orden de magnitud de "1°",  $\Delta\varphi$  se sitúa en el orden de magnitud de "10°".

En el procedimiento de acuerdo con la invención la densidad del aire se determina dependiendo de una temperatura del aire T medida y una presión del aire p medida, así como un valor para la humedad del aire  $\psi$ . Los valores para la temperatura del aire y la presión del aire se miden a este respecto preferentemente directamente en el aerogenerador. El valor  $\psi$  para la humedad del aire puede establecerse dependiendo del momento del día y/o de la estación del año. En esta especificación se establece de manera correspondiente un valor  $\psi$  obtenido de valores empíricos para la humedad del aire. Alternativamente también es posible medir la humedad del aire  $\psi$  directamente.

La invención se explica con más detalle a continuación en un ejemplo de realización. Muestran:

Fig. 1 un curso del valor teórico para el momento de generador por encima de la velocidad de giro y

Fig. 2 la variación del ángulo de paso dependiendo de la velocidad de giro.

La Fig. 1 muestra el valor teórico para el momento de generador M por encima de la velocidad de giro del generador n. Para el curso del valor teórico para el momento de generador pueden diferenciarse en total cuatro secciones. En una primera sección 10 se efectúa una subida lineal del valor teórico para el momento de generador con velocidad de giro creciente.

En una segunda sección 12 el valor teórico para el momento de generador sigue a la curva característica ideal del rotor. El valor teórico del momento de generador se calcula a través de una función para la potencia óptima  $P_{opt}$  que se refleja a continuación:

$$P_{opt}(n) = \left( 2 * \pi * R * \frac{n}{i_G} * \frac{1}{60 * \lambda_{opt}} \right)^3 * \pi * R^2 * \frac{\rho}{2} * C_{p,opt} ,$$

5 designando R el radio de la pala de rotor, n la velocidad de giro del generador,  $i_G$  la relación de transmisión del engranaje,  $\lambda_{opt}$  el parámetro lambda óptimo de la pala de rotor,  $\rho$  la densidad del aire y  $C_{p, opt}$  el coeficiente de potencia óptimo. A lo largo de la sección 12 el valor teórico para el momento de generador se calcula analíticamente según la fórmula anterior, convirtiéndose el rendimiento a través de la frecuencia angular del generador  $\omega = 2 \pi n$  según  $M = P/\omega$  en el valor teórico M para el momento de generador.

10 En el punto 14 se presenta un punto de inflexión entre la segunda sección 12 y una tercera sección 16. Con la tercera sección 16, para alcanzar un rendimiento energético óptimo se abandonará la curva característica 12 ideal y el valor teórico se aumenta más intensamente para el momento de generador con velocidad de giro creciente del generador. En el ejemplo de realización representado la tercera sección 16 está representada como una sección de ascensión lineal. Otras formas no lineales de la subida, entre el punto de inflexión 14 y un punto de transición 18 son igualmente posibles.

15 En el punto de transición 18 el aerogenerador pasa a su funcionamiento de plena carga 20. En esta región se aplica que la potencia del aerogenerador ha de mantenerse constante, siendo la potencia P proporcional a la velocidad de giro y al momento de torsión del generador:  $P = M * \omega$ ,

$$P = M * \omega ,$$

20 siendo  $\omega = 2 \pi n$  la frecuencia angular del generador.

25 En el procedimiento de acuerdo con la invención en la tercera sección 16 se comienza a establecer un ángulo de paso que depende de la densidad del aire. La Fig. 2 muestra el curso del ángulo de paso  $\varphi$  dependiendo de la velocidad de giro. Para velocidades de giro inferiores a  $n_1$ , a las que se eleva el aerogenerador el ángulo de paso disminuye inicialmente a lo largo de la curva 22 hasta que se haya alcanzado la velocidad de giro  $n_1$ .

30 En el ejemplo de realización representado en la Fig. 2 el ángulo de paso permanece inicialmente en  $0^\circ$  en la sección 24 de la curva característica. Comenzando con una velocidad de giro de ajuste de paso previo  $n_4$ , el ángulo de paso se aumenta hasta alcanzar la velocidad de giro  $n_5$ . Tal como está representado en la Fig. 2, el ángulo de paso  $\varphi$  en el intervalo de velocidad de giro previsto para el ajuste previo de la inclinación de pala, comenzando con la velocidad de giro  $n_4$  aumenta hasta la velocidad de giro  $n_5$ , en la que ya se presenta un funcionamiento de plena carga del aerogenerador, a lo largo de las secciones 26, 28 por secciones preferiblemente de manera lineal. Si se constata una densidad del aire más baja que la densidad del aire que se presenta en condiciones normales entonces en el intervalo de velocidad de giro el ángulo de paso previo aumenta. El ángulo de paso previo discurre entonces, por ejemplo, linealmente por secciones, a lo largo de las líneas 30 y 32. Si se presenta una densidad del aire más alta, entonces se elige un ángulo de paso más bajo, que discurre por ejemplo linealmente a lo largo de las líneas 34 y 36.

35 Para determinar el ángulo de paso previo dependiente de la densidad del aire, en el intervalo de velocidad de giro previsto para el ajuste previo de la inclinación de pala se elige una velocidad de giro y el ángulo de paso previo para la velocidad de giro elegida de acuerdo con la fórmula anterior para  $\varphi_{pre}$  dependiendo de la densidad del aire. En el ejemplo representado se eligió del intervalo de velocidad de giro la velocidad de giro  $n_3$  como velocidad de giro. Podría haberse elegido también del intervalo de velocidad de giro cualquier otra velocidad de giro.

40 El curso exacto del ángulo de paso previo resulta entonces al interpolarse entre un ángulo de paso previo de cero a la velocidad de giro  $n_4$  al valor dependiente de la densidad del aire a la velocidad de giro  $n_3$ . El curso adicional del ángulo de paso previo resulta entonces al interpolar partiendo del valor dependiente de la densidad del aire para la velocidad de giro  $n_3$  a un valor predeterminado para los ángulos de ajuste de paso con la máxima velocidad de giro de ajuste de paso previo  $n_5$ . Este valor predeterminado del ángulo de paso previo a la máxima velocidad de giro de ajuste de paso previo  $n_5$  corresponde a un ángulo de paso habitual en el funcionamiento de carga nominal para la velocidad de giro  $n_5$ . De esta manera el valor del ángulo de paso previo en el intervalo  $n_4$  a  $n_5$  mediante la presente invención depende de la densidad del aire y a la velocidad de giro  $n_5$  se añade a la regulación del ángulo de paso en el funcionamiento de carga nominal.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para hacer funcionar un aerogenerador con regulación de paso con al menos una pala de rotor que puede desplazarse alrededor de su eje longitudinal y un generador, en el que dependiendo de una velocidad de giro (n) del generador o del rotor se establece un valor teórico para el momento de generador (M), estando previsto un punto de transición (n<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>), en el que se cambia de un funcionamiento de carga parcial a un funcionamiento de plena carga,  
**caracterizado por** las etapas de
- 10 - calcular un valor para una densidad del aire (ρ),  
 - ajustar un ángulo de ajuste de inclinación de pala para el funcionamiento de carga parcial como ángulo de paso previo (φ<sub>pre</sub>) a partir de una velocidad de giro de ajuste de paso previo (n<sub>4</sub>), que es menor que la velocidad de giro (n<sub>3</sub>) en el punto de transición,  
 - dependiendo el valor del ángulo de paso previo (φ<sub>pre</sub>) del valor calculado de la densidad del aire (ρ), de tal manera que en caso de una densidad del aire (ρ) más baja se ajusta un ángulo de paso previo (φ<sub>pre</sub>) mayor que en caso de una densidad del aire mayor (ρ).
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** el ángulo de ajuste de inclinación de pala (ángulo de paso) es constante a partir de una velocidad de giro mínima (n<sub>1</sub>) hasta alcanzar la velocidad de giro de ajuste de paso previo (n<sub>4</sub>).
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, **caracterizado por que** el valor constante del ángulo de ajuste de inclinación de pala (ángulo de paso) es cero.
4. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado por que** el ángulo de ajuste de inclinación de pala (ángulo de paso) aumenta a partir de la velocidad de giro de ajuste de paso previo (n<sub>4</sub>) hasta alcanzar una velocidad de giro de ajuste de paso previo máxima (n<sub>5</sub>), siendo la velocidad de giro de ajuste de paso previo máxima (n<sub>5</sub>) mayor o igual a la velocidad de giro (n<sub>3</sub>) en el punto de transición.
5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, **caracterizado por que** el ángulo de ajuste de inclinación de pala (ángulo de paso) se aumenta linealmente.
6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado por que** el valor del ángulo de paso previo (φ<sub>pre</sub>), a una velocidad de giro predeterminada, se obtiene como:

$$\varphi_{pre} = \max\left(\varphi_{lim}, \varphi_b + \Delta\varphi \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{norm}}\right)\right),$$

- designando (φ<sub>lim</sub>), (φ<sub>b</sub>) y (Δφ) ángulos de ajuste de inclinación de pala (ángulos de ajuste de paso) constantes, (ρ<sub>norm</sub>) una densidad del aire predominante en condiciones normales y (ρ) la densidad del aire calculada.
7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 6, **caracterizado por que** se determina el ángulo de paso previo (φ<sub>pre</sub>) para la velocidad de giro (n<sub>3</sub>) en el punto de transición.
8. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado por que** la densidad del aire (ρ) se determina dependiendo de una temperatura del aire (T) medida, una presión del aire (p) medida y un valor para la humedad del aire (ψ).
9. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 8, **caracterizado por que** el valor para la humedad del aire (ψ) se establece dependiendo del momento del día y/o de la estación del año.
10. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, **caracterizado por que** se mide el valor para la humedad del aire (ψ).

