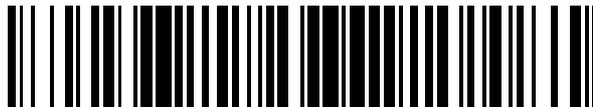


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 998**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.04.2016 PCT/VN2016/000002**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.04.2017 WO17063003**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.04.2016 E 16721340 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2019 EP 3359809**

54 Título: **Método para determinar y controlar el ángulo de ataque de pala de aerogenerador de velocidad fija**

30 Prioridad:

**09.10.2015 VN 201503779**  
**11.12.2015 VN 201504745**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**17.02.2020**

73 Titular/es:

**LAI, AT BA (100.0%)**  
**No. 32/24 Phan Van Truong Street**  
**Cau Giay District**  
**Ha Noi City, VN**

72 Inventor/es:

**LAI, AT BA**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 742 998 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 para determinar y controlar el ángulo de ataque de pala de aerogenerador de velocidad fija

**Campo de la invención**

La invención presenta la fabricación de palas de aerogenerador de velocidad fija para aprovechar energía eólica.

**5 Antecedentes de la invención**

Actualmente la extracción de energía del viento se basa totalmente en aerogeneradores de velocidad variable. Los aerogeneradores de velocidad fija únicamente se han realizado como fase de prueba y aún no están disponibles para uso comercial debido a su limitada salida y la velocidad de viento muy alta requerida para que funcionen bien. Además, conforme la velocidad de viento se reduce a un nivel bajo, estas turbinas consumen tanta energía de la red eléctrica que podría llevar incluso a parada de la red de energía eléctrica.

Las patentes GB 191916385 de fecha 6 de abril de 1911 y GB 191028025 de fecha 3 de agosto de 1911 así como la patente US 2012242084 publicada el 27 de septiembre de 2012 presentaban la fabricación de palas de aerogeneradores soportadas en bastidor cuya superficie es una placa delgada que se puede enrollar o desenrollar así como el lado posterior delgado de la pala que permite un aprovechamiento eficaz de energía eólica. Sin embargo, las patentes no señalan cómo se debe distribuir el ángulo de ataque a lo largo de la longitud de pala así como cómo ajustar el ángulo de ataque en respuesta a velocidades de viento por debajo de la velocidad nominal.

Dado el hecho de que la patente US 2012242084 describe que cada pala es rotada en su eje longitudinal de 2 a 10 grados, tampoco señala reglas para ajustar el ángulo de ataque. Emplear estas invenciones en la fabricación de palas de aerogenerador de velocidad fija por lo tanto significa que los aerogeneradores se quedan cortos de indicadores económicos y tecnológicos dado que no hay manera de controlar la pala de turbina a velocidades de viento por debajo de la nominal. Sería problemático si, por ejemplo, el aerogenerador está funcionando a una velocidad fija y el ángulo de ataque no se aumenta cuando la velocidad de viento cae por debajo de la nominal.

Una confusa invención en el campo de mecánica eólica fue en 1919 cuando Albert Betz publicó su ecuación para

calcular la potencia de aerogenerador de palas como: 
$$P_{TB} = \frac{1}{2} \rho A_0 v^3 C_p$$
 donde  $\rho$  es la densidad del aire;  $A_0$  el área de barrido de la pala;  $v$  es la velocidad de viento y;  $C_p$  es el coeficiente de potencia. La ecuación ha llevado a la tecnología de aerogeneradores en la dirección de aumentar el área de barrido  $A_0$  de la pala (es decir, aumentar la longitud de pala) mientras se han pasado por alto otros factores físicos importantes de la pala tales como ángulo de ataque, área de pala y forma así como la velocidad rotacional del aerogenerador. En consecuencia, las palas de aerogeneradores se han visto ampliamente como objetos que vuelan en el viento, lo que lleva al hecho de que las palas de turbina se diseñan todas con un perfil aerodinámico que soporta el movimiento de las palas. El autor de esta invención se ha dado cuenta de que la ecuación se debía a la aplicación que hizo Albert Betz de la segunda ley de Newton para calcular la fuerza de aerogenerador que actúa sobre el viento:  $F = ma$ , donde  $m$  es la masa del viento y  $a$  es la aceleración del viento. Realmente, es imposible ejercer una fuerza en una masa de aire, y, lo que es más importante, la segunda ley de Newton es de dinámica de partículas. El documento relacionado con este descubrimiento se ha compartido públicamente en Youtube en: <https://youtu.be/HTaAJQPkrp0> en idioma tanto en inglés como vietnamita.

Los aerogeneradores de palas fabricados basándose en la ley de Betz tienen sus palas con un perfil aerodinámico. La patente US 4339230 con fecha 13 de julio de 1982 detallaba un diseño de pala que tiene tanto una superficie superior con perfil aerodinámico y una superficie inferior con perfil aerodinámico, y de nuevo no hay reglas para el ángulo de ataque ni indicación de si la anchura de pala se tenía que reducir hacia la punta de pala para evitar la reducción de potencia. Además, como la velocidad rotacional del aerogenerador depende de la velocidad de viento, no es práctico producir un aerogenerador de velocidad fija cuya energía generada se pueda alimentar directamente a la red eléctrica.

Estos asuntos han puesto un límite en la salida de aerogeneradores y dado como resultado costes muy altos de fabricación de aerogeneradores y de generación de energía eólica, conduciendo la energía eólica lejos de convertirse en una fuente de energía principal para los humanos.

El punto de vista correcto sería entonces la visión de pala de aerogenerador como obstrucción del flujo de aire, y la superficie de pala de un segmento de pala muy corto se debe considerar plana. Aparte, se debe emplear un sistema de armazón para mejorar la fortaleza de la pala y minimizar los impactos en el viento. De hecho, una pala de aerogenerador es sometida a dos clases de fuerzas de viento, una de ellas es provocada por la colisión de partículas de aire en movimiento con la superficie de pala y la otra por la caída de presión en el lado posterior de la pala. Estas fuerzas dan como resultado dos componentes, una paralela al árbol de turbina que no hace rotar la turbina sino que sopla hacia abajo y la otra tangencial a la órbita de rotación de los segmentos de pala que es útil, ya que produce trabajo para hacer rotar la turbina. El autor de esta invención también ha inventado una función para cálculos de potencia de aerogenerador, que se expresa de la siguiente manera:

$$P_{TB} = \left\{ \left[ \frac{1}{2} (Cx + j) a \rho \sum_{i=1}^n S_{Ci} d_i \omega_i (k_i v - d_i \omega_i \cot \alpha_i)^2 \cos \alpha_i \sin^2 \alpha_i \right] - P_o \right\} C_p$$

Con la condición de que:  $0 < \alpha_i < 90^\circ$  y  $(k_i v - d_i \omega_i \cot \alpha_i) > 0$

5 Donde  $P_{TB}$  (w) es la potencia de aerogenerador;  $\rho$  es la densidad del aire;  $S_c$  es el área de segmento de pala  $i$ ;  $v$  (m/s) es la velocidad de el campo de viento;  $\alpha_i$  ( $0^\circ$ ) es el ángulo de inclinación entre la pala y la dirección del viento;  $k_i$  es el coeficiente de atenuación de la velocidad de viento antes de la colisión con el segmento de pala  $i$ ;  $d_i$  (m) es la distancia desde el segmento de pala  $i$  al árbol de turbina;  $\omega$  (rad/s) es la velocidad angular de turbina;  $\alpha$  es el número de palas de turbina;  $j$  es el coeficiente de absorción de las palas;  $C_x$  es el coeficiente dependiente de la forma del lado posterior de la pala, que, si es plano, tendrá el valor más alto de 1,32;  $P_o$  es la pérdida en la caja de engranajes, generador y fricción de la cojinetes;  $C_p$  es el coeficiente de potencia pérdida cuando se trasforma, que se ignorará si el generador está conectado directamente a la red eléctrica.

La invención también se ha compartido públicamente en Youtube en idioma tanto inglés como vietnamita en: <https://youtu.be/mWx1R1urAp0>.

15 La función para cálculos de potencia de aerogenerador permite cálculos relativamente precisos de la potencia de un aerogenerador que tiene superficie de pala en forma de placa delgada y segmentos de pala suficientemente cortos como para ser considerados planos, basándose en factores tales como velocidad de viento, velocidad rotacional de la turbina, área de pala y el correspondiente ángulo de ataque en cada posición de la superficie de pala. Como resultado, es factible diseñar palas de aerogeneradores con rasgos técnicos óptimos para el desarrollo de generación de energía eólica.

20 La patente PCT/VN2015/000007 (fecha de prioridad: 14 de julio de 2014, fecha de presentación: 10 de julio de 2015; fecha de publicación internacional: 21 de enero de 2016; número de patente WO: 2016/011462) detalla la fabricación de palas de aerogeneradores con estructura soportada en armazón y superficie retorcida, que está en línea con el punto de vista de una pala de aerogenerador como obstrucción de el flujo de aire en el proceso de aprovechar energía eólica. El diseño de pala de aerogenerador en la patente PCT/VN2015/000007 emplea la función para cálculos de potencia de aerogenerador para determinar el ángulo de ataque óptimo en cada posición de la superficie de pala a lo largo de la longitud de pala correspondiente a la velocidad de viento nominal y la velocidad rotacional más alta del aerogenerador. Se usa un conjunto de estos ángulos de ataque para definir el ángulo de ataque óptimo global para la pala de turbina, que es el ángulo a la velocidad de viento nominal.

30 La determinación de la velocidad de viento nominal en la patente PCT/VN2015/000007 para definir el ángulo de ataque para la pala de turbina es únicamente aplicable a aerogeneradores de velocidad variable. Conforme se reduce gradualmente la velocidad de viento, lo hará la velocidad rotacional de la turbina, y el ángulo de ataque apropiado de las palas permitirá a la turbina lograr una salida que es comparable a su salida máxima gracias al ángulo de ataque determinado en esa velocidad de viento. Para aerogenerador de velocidad fija, cuanto menor es la velocidad de viento, menos es la salida de turbina comparada con su salida máxima gracias al ángulo de ataque determinado en esa velocidad de viento. Por lo tanto, la velocidad de arranque y la velocidad más baja a la que la turbina es forzada a detenerse serían relativamente altas, y la salida de turbina a velocidades de viento medias y bajas se reduciría en gran medida. Basándose en cálculos a la velocidad más baja a la que la turbina es forzada a detenerse, la salida de aerogenerador está en el 30-40 % de la salida máxima gracias al ángulo de ataque determinado a esa velocidad de viento. Cuando la velocidad de viento está justo por debajo del valor nominal, la reducción en la salida de turbina es insignificante. Lo que es más importante, como la salida de aerogenerador en ese punto ya es muy alta, incluso una reducción adicional no presenta impacto significativo en la salida de la red eléctrica.

45 El control del ángulo de ataque de palas de aerogenerador de velocidad fija en la patente PCT/VN2015/000007, sin embargo, no ha sido suficientemente claro ni específico. Que el ángulo de ataque en la punta de pala se ajuste a aproximadamente  $89^\circ$  no sería satisfactorio en casos de baja velocidad en la punta de pala. Por otra parte, la determinación de parámetros básicos para aerogeneradores de velocidad fija no se ha detallado para facilitar el proceso de diseño.

### Compendio de la invención

50 La invención llamada Método para determinar y controlar el ángulo de ataque de pala de aerogenerador de velocidad fija, que se aplica para una pala de aerogenerador que tiene una placa delgada como su superficie y compuesta de segmentos de pala suficientemente cortos para ser considerados planos, pretende establecer un ángulo de ataque apropiado de palas de aerogeneradores para aprovechar eficazmente energía eólica a velocidad de viento baja y media, si el intervalo de velocidad desde la velocidad más baja a la que la turbina es forzada a detenerse a la velocidad nominal se divide en baja, media y alta. El ángulo de ataque diseñado de pala de turbina es fijo; sin embargo, siempre existe el mejor ángulo de ataque para cada velocidad de viento específica, a la que la turbina logra su salida máxima. Como es imposible cambiar o ajustar el ángulo de ataque para lograr la salida máxima a cualquier velocidad de viento,

5 es por lo tanto necesario controlar el ángulo de ataque para producir una salida óptima a velocidades de viento bajas y medias. Una vez se diseña la pala con un ángulo de ataque que corresponde a velocidades de viento de bajas a medias, su ángulo de ataque no será demasiado diferente del ángulo óptimo, dando como resultado una salida que únicamente es ligeramente menor que la salida máxima. Esto permitiría la fabricación de aerogeneradores de velocidad fija que logra una salida óptima a velocidades de viento bajas y medias mientras que se puede detener y volver a arrancar a velocidades de viento bajas. Aunque la salida de turbina a velocidades de viento altas cae significativamente desde la salida máxima, la salida en tal punto todavía es muy alta no presentando así un impacto notable en la red de energía eléctrica.

10 Para lograr las intenciones anteriores, la invención "Método para determinar y controlar el ángulo de ataque de pala de aerogenerador de velocidad fija" detalla tres etapas para hacer una pala con un ángulo de ataque óptimo para mejor extracción de energía eólica a velocidades de viento bajas y medias.

La primera etapa es definir parámetros básicos del aerogenerador, que incluyen la longitud de pala, la anchura de pala, la velocidad fija de la turbina, la velocidad de viento nominal, la velocidad de arranque y la velocidad más baja a la que la turbina es forzada a detenerse así como la relación con la potencia desperdiciada.

15 La segunda etapa es elegir una velocidad de viento para determinar el ángulo de ataque, basándose en la misma se puede calcular un conjunto de ángulos de ataque para formar un ángulo de ataque óptimo global de la pala.

La tercera etapa es controlar las palas, que es ajustar el ángulo de ataque en respuesta a velocidades de viento entre bajas a medias.

20 El ángulo de ataque apropiado de la pala y un método para controlar el ángulo de ataque en respuesta a diferentes velocidades de viento ayuda al aerogenerador a lograr una salida óptima a velocidades de viento bajas y medias. Como resultado, es posible producir aerogeneradores de velocidad fija a costes bajos para producción de energía eólica así como transformar aerogeneradores de velocidad variable en velocidad fija para mejores prestaciones, salida más alta y menores costes de energía eólica.

#### Breve descripción de los dibujos

25 La figura 1 muestra una vista global de un aerogenerador de velocidad fija con seis palas retorcidas y soportadas en armazón, tres de las cuales son más cortas que las otras. Las palas tienen superficie retráctil y están a aproximadamente 15 metros por encima del suelo desde la punta de pala.

#### Descripción detallada de la invención

30 El método para determinar y controlar el ángulo de ataque de pala de aerogenerador de velocidad fija, que se aplica para una pala de aerogenerador que tiene una placa delgada como su superficie y compuesta de segmentos de pala suficientemente cortos para ser considerados planos, pretende establecer un ángulo de ataque apropiado de palas de aerogeneradores para aprovechar eficazmente energía eólica a velocidad de viento baja y media, si el intervalo de velocidad desde la velocidad más baja a la que la turbina es forzada a detenerse a la velocidad nominal se divide en baja, media y alta. Esto permitiría la fabricación de aerogeneradores de velocidad fija que logra una salida óptima a velocidades de viento bajas y medias mientras que se puede detener y volver a arrancar a velocidades de viento bajas. La invención detalla tres etapas de la siguiente manera:

35 La primera etapa es para definir parámetros básicos de la turbina, que incluyen la opción de velocidad lineal en la punta de pala entre 100 y 200 km/h. Este tipo de velocidad lineal alta pretende una reducción de ruido y mejor control del ángulo de ataque de pala. Puede ser posible una velocidad lineal de hasta 300 km/h; sin embargo, el ruido generado por la turbina podría ser entonces crítico, incluso a velocidades de viento bajas, y el control del ángulo de ataque de pala sería ineficaz. También se debe definir una velocidad fija de la turbina, basándose en la misma y en la velocidad lineal en la punta de pala se calcularía la longitud de pala. De otro modo, una longitud de pala se debe elegir de modo que la velocidad fija de la turbina se pueda calcular basándose en ella y en la velocidad lineal en la punta de pala. En este caso, la velocidad rotacional fija es inversamente proporcional a la longitud de pala. La anchura de pala debe ser menos del 10 % de la longitud de pala y no debe superar 6 m para minimizar la atenuación de velocidad de viento antes de colisionar con la superficie de pala. Palas de menos de 6 m de ancho facilitarían la fabricación y la instalación del aerogenerador, dado que pueden ir fácilmente con chapas de metal usadas para hacer puertas enrollables comerciales. Definir la velocidad más baja a la que la turbina es forzada a detenerse como la que la turbina produce una salida que es un 20 % más alta que la potencia desperdiciada, es decir, la cantidad de energía consumida debido a fricción de la caja de engranajes, el generador y el arrastre conforme giran las palas. Esto es para asegurar que la turbina no consuma energía de la red eléctrica antes de ser forzada a detenerse. La velocidad de arranque se debe definir como la que la salida de turbina es de tres a cuatro veces mayor que la potencia desperdiciada. Esto significa que la velocidad de arranque y la velocidad más baja a la que la turbina es forzada a detenerse están separadas únicamente 1-1,5 m/s, previniendo así que el aerogenerador tenga que volver a arrancar demasiado a menudo a velocidades de viento ligeramente por debajo de la velocidad de arranque. La velocidad nominal se debe definir como la velocidad de viento mínima a la que la turbina alcanza su salida máxima o nominal. La velocidad de viento nominal convencional es aproximadamente 16 m/s, porque en regiones donde el viento es fuerte, las velocidades de viento están usualmente entre la 5ª y 6ª escala en la escala de Beaufort, es decir, de 8 a 13,8 m/s

medidas en 10 m por encima del suelo. Esto significa que a 40 m por encima del suelo las velocidades de viento serán de 11 a 18 m/s, lo que asegura salidas de aerogeneradores frecuentemente altas.

5 La segunda etapa es definir la velocidad de viento  $v$  para determinar el ángulo de ataque de las palas. Esta velocidad de viento debe ir de baja a media, basándose en qué función para cálculos de potencia de aerogenerador se podría aplicar para determinar un conjunto de ángulos de ataque óptimos  $\alpha_i$  de la pala en cada posición  $i$  a lo largo de la pala, a una distancia  $d_i$  del centro de rotación y a la velocidad rotacional fija  $\omega_i$  de la turbina. Este tipo de conjunto de ángulos  $\alpha_i$  se usa para determinar el ángulo de ataque óptimo global de la pala. El ángulo de ataque en la punta de pala se llama  $\alpha_c$ . La velocidad de viento para determinar el ángulo de ataque de pala, si se elige aleatoriamente, puede influir negativamente en el control de las palas y reducir la salida de energía.

10 La tercera etapa es para controlar las palas. Específicamente, conforme la velocidad de viento se reduce en una unidad, desde la velocidad de viento para determinar el ángulo de ataque de pala  $v_c = a$  m/s (km/h hoac mgh) a la

velocidad a la que la turbina es forzada a detenerse, el ángulo de ataque aumenta en un valor de  $\frac{90^{\circ}00' - \alpha_c}{a}$ . Conforme la velocidad de viento aumenta en una unidad, desde la velocidad a la que la turbina es forzada a detenerse

a la nominal, el ángulo de ataque cae un valor de  $a$ . Conforme la velocidad de viento cae una unidad,

15 desde la velocidad nominal a la velocidad  $v_c$ , el ángulo de ataque aumenta un valor de  $\frac{90^{\circ}00' - \alpha_c}{a}$ .

Preparar una tabla que ilustra potencia de aerogenerador a diferentes velocidades de viento a fin de determinar la velocidad a la que la turbina es forzada a detenerse y la velocidad de arranque en relación a la potencia desperdiciada. También se puede determinar salida nominal a la velocidad de viento nominal.

20 Una vez se emplea el método de control anterior y la velocidad de viento para determinar el ángulo de ataque de pala  $\alpha_c$  es entre baja y media, la desviación entre el ángulo de ataque de las palas a tal velocidad de viento y el ángulo de ataque óptimo para salida máxima es insignificante. Cálculos aplicados a un aerogenerador que tiene longitud de pala de 66 m y una velocidad rotacional de 6 rpm muestran que la desviación entre el ángulo de ataque de pala y el ángulo óptimo en la raíz de pala es aproximadamente  $1^{\circ}$ . Sin embargo, en la punta de pala la desviación entre el ángulo de ataque y el óptimo es insignificante, es decir, únicamente varios minutos. Por lo tanto, la salida de turbina únicamente se reduce ligeramente comparada con su valor máximo. Esto se puede examinar fácilmente usando la curva de potencia de turbina. Aunque la salida de turbina a velocidades de viento altas cae notablemente, esto no es un problema, dado que la salida de todo el sistema ya es alta, y ciertamente, esto juega un papel activo para reducir la potencia pico de la red eléctrica.

30 Cuando la velocidad de viento es menor que la velocidad más baja a la que la turbina es forzada a detenerse, el generador se desconecta de la red eléctrica para impedir que la turbina consuma energía de la red eléctrica. El ángulo de ataque de pala se reduce entonces de manera que el ángulo de ataque en el medio de la pala baja a  $0^{\circ}$  en los que la turbina se ralentizaría hasta detenerse gracias al sistema de frenado. La turbina vuelve a arrancar tan pronto como la velocidad de viento es igual o supera la velocidad de arranque. En este punto, el ángulo de ataque se ajusta de nuevo de modo que el ángulo de ataque en el medio de la pala llega a  $55^{\circ}$ , permitiendo que la pala obtenga el par máximo. El sistema de frenado se desacopla ahora y las palas de turbina rotan a velocidades cada vez más altas con un ángulo de ataque que aumenta gradualmente. Tan pronto como la velocidad rotacional iguala la velocidad fija, el generador se reconecta a la red eléctrica y el ángulo de ataque se ajusta a su valor diseñado correspondiente a la velocidad de viento en este punto.

40 Cuando la velocidad de viento supera la nominal, el ángulo de ataque se reduce en la medida justa para estabilizar suficientemente la salida de turbina en el valor nominal. A velocidad de viento de aproximadamente 25 m/s la turbina deja de trabajar; el ángulo de ataque cae a  $0^{\circ}$ , o la superficie de pala se enrollaría si el aerogenerador se construye con este rasgo. El generador también se desconecta de la red eléctrica, y el sistema de frenado actúa para mantener la turbina estable. El aerogenerador puede funcionar automáticamente mediante sensores o manualmente.

45 Las velocidades de viento son altas y estables a alturas de 40 m y por encima pero se reducen a alturas por debajo de 40 m. Sin embargo, a partir de 10 m por encima del suelo las velocidades de viento no se reducen notablemente, así las palas de aerogeneradores que están 10 m por encima del suelo son satisfactorias en áreas airosas.

50 Los aerogeneradores se pueden hacer con múltiples palas (figura 1) para aumentar el área de contacto con el viento, y para aerogeneradores que tienen palas de más de 40 m de largo, el número no se limita a tres palas. Sin embargo, las palas deben estar apartadas suficientemente para asegurar una atenuación mínima de la velocidad de viento. Como resultado, la raíz de pala se debe hacer sin una superficie, y en palas alternas debe comprender un área uniforme más grande sin una superficie para acomodar este requisito.

### Aplicabilidad industrial

5 El método para determinar y controlar el ángulo de ataque de pala de aerogenerador de velocidad fija, que se aplica para una pala de aerogenerador que tiene una placa delgada como su superficie y compuesta de segmentos de pala suficientemente cortos para ser considerados plano, se usa en la fabricación y funcionamiento de aerogeneradores de velocidad fija. Las palas de turbina son soportadas en armazón y se hacen de una placa delgada que se puede enrollar para proteger la turbina en vientos fuerte. Esto permite un aumento en el área de pala al aumentar la longitud y la anchura de pala así como el número de palas. Para aerogeneradores con longitud de pala de más de 40 m, seis palas sería apropiado. Aerogeneradores de velocidad fija conectados directamente a la red de energía eléctrica tienen las ventajas de salida más alta, generador de coste bajo, no es necesario inversor y permiten hacer las palas de metal relativamente pesadas y fabricarse por separado, lo que facilita el transporte en contenedores. Por lo tanto se reducirían enormemente los costes de energía eólica, y la energía eólica se convertiría en la fuente de energía más barata para muchos países, cumpliendo la demanda del desarrollo económico y la lucha contra el cambio climático.

10 El método para determinar y controlar el ángulo de ataque de pala de aerogenerador de velocidad fija también es aplicable a la transformación de aerogeneradores de velocidad variable en velocidad fija. Tal transformación se hace posible al conservar la altura de la torre, expandir la anchura de pala, que se extiende la longitud de pala 1,5 veces, eliminar el uso de un inversor, sustituir el generador por uno de velocidad fija, y conectar directamente la turbina a la red eléctrica. La cuestión más fundamental es si la caja de engranajes es compatible o no. Si la sustitución de la caja de engranajes es obligatoria, la transformación todavía es beneficiosa porque con el aumento de número de palas a 6 y mayor salida de turbina, el aerogenerador puede producir una salida que es comparable a la de un nuevo aerogenerador de velocidad fija.

### Demostración

Definir los parámetros físicos básicos para un aerogenerador de velocidad fija con palas soportadas en armazón cuya superficie es una placa delgada que se puede enrollar o desenrollar de la siguiente manera:

- Parámetros básicos predeterminados

25 Torre: 80 m de alto, 6-8 m de diámetro.

Potencia desperdiciada anticipada: 6,5 kW

Velocidad lineal en la punta de pala: 150 km/h

Pala: 5 m de ancho y 66 m de largo

Velocidad rotacional fija: 6 rpm

30 Tres de las palas de turbina se hacen con una superficie de 60 m de largo desde la punta de pala.

Las otras tres palas se hacen con una superficie de 46 m de largo desde la punta de pala.

La superficie de pala se puede enrollar y desenrollar, como se ilustra en la figura 1.

Velocidad de viento nominal: 16 m/s

Velocidad de corte a la que la turbina deja de funcionar y la superficie de pala se enrolla: 25 m/s

35 Elegir los siguientes parámetros:  $k = 1$ ;  $j = 1$ ;  $C_x = 1,32$  cuando se aplica la función para cálculos de potencia de aerogenerador.

## ES 2 742 998 T3

Un conjunto de ángulos de ataque en diferentes posiciones en la pala determinadas a velocidad de viento de 8 m/s se presenta de la siguiente manera:

Distancia al árbol de turbina d (m)	Ángulo de inclinación $\alpha$	Distancia al árbol de turbina d (m)	Ángulo de inclinación $\alpha$
5	65°28'	37	84°6'
7	68°54'	39	84°23'
9	71°25'	41	84°39'
11	73°37'	43	84°53'
13	75°25'	45	85°6'
15	76°55'	47	85°18'
17	78°9'	49	85°30'
19	79°12'	51	85°40'
21	80°5'	53	85°50'
23	80°51'	55	85°58'
25	81°30'	57	86°7'
27	82°4'	59	86°14'
29	82°35'	61	86°22'
31	83°2'	63	86°28'
33	83°25'	65	86°35'
35	83°47'		

- Parámetros para cálculo:

5 Máximo ángulo de ataque en la punta de pala:  $\alpha_d = 88^\circ 48'$ .

Conforme la velocidad de viento se reduce en 1 m/s, este ángulo de ataque aumenta 26'.

Conforme la velocidad de viento se aumenta en 1 m/s, este ángulo de ataque disminuye 26'.

El ángulo de ataque seguirá disminuyendo conforme la velocidad de viento supere la nominal de modo que la salida de aerogenerador se estabiliza en el nivel nominal.

10 Velocidad de arranque: 4 m/s

Velocidad más baja de viento a la que aerogenerador es forzado a detenerse: 3 m/s

Potencia de aerogenerador en velocidad de viento nominal:

P16 = 1254 kW.

Capacidad de generador: 1500 kW

15

## ES 2 742 998 T3

La siguiente tabla muestra potencia de aerogenerador a diferentes velocidades de viento:

Velocidad de viento v (m/s)	Potencia P (kW)	Velocidad de viento v (m/s)	Potencia P (kW)
2,8	6,1	10	330
3	7,9	11	467
4	21	12	555
5	42	13	698
6	75	14	860
7	117	15	1046
8	174	16	1245
9	244		

Par de arranque a velocidad de arranque de 4 m/s y con un ángulo de ataque en el medio de la pala de 55°: 547 KNm

Máximo empuje axial a velocidad de viento nominal de 16 m/s: 323 KN.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para determinar y controlar un ángulo de ataque de una pala de aerogenerador de velocidad fija de un aerogenerador a fin de establecer un ángulo de ataque apropiado de la pala de aerogenerador para aprovechar eficazmente energía eólica a velocidades de viento bajas y medias y habilitar la parada y volver a arrancar con poco viento, en donde la pala de aerogenerador de velocidad fija que tiene una placa delgada como su superficie y compuesta de segmentos de pala sustancialmente planos, y en donde un intervalo de velocidades desde la velocidad más baja a la que el aerogenerador es forzado a detenerse a una velocidad nominal se divide a velocidades de viento baja, media y alta; que comprende las etapas de:

- en primer lugar, definir parámetros básicos del aerogenerador mediante:

(a) elegir una velocidad lineal en una punta de la pala de aerogenerador de velocidad fija entre 100-200 km/h; y

(a1) elegir una velocidad rotacional fija que permite definir una longitud de la pala de aerogenerador de velocidad fija sobre la base de la velocidad rotacional fija elegida y la velocidad lineal elegida; o

(a2) elegir una longitud de la pala de aerogenerador de velocidad fija que permite calcular una velocidad fija sobre la base de la velocidad lineal elegida y la longitud elegida de la pala de aerogenerador de velocidad fija;

en donde una anchura de la pala de aerogenerador de velocidad fija es menor del 10 % de la longitud de la velocidad fija pala de aerogenerador y no más de 6 m;

(b) definir la velocidad de viento más baja a la que el aerogenerador es forzado a detenerse como la velocidad de viento a la que la salida de turbina es un 20 % más alta que la potencia desperdiciada;

(c) definir la velocidad de arranque como la velocidad de viento a la que la salida de turbina es 3-4 veces mayor que la potencia desperdiciada;

(d) definir la velocidad de viento nominal como la velocidad de viento a la que la turbina es forzada a detenerse; y

(e) definir una velocidad de corte como la velocidad más alta a la que la turbina es forzada a detenerse;

- en segundo lugar, definir una velocidad de viento  $v_c$  que va de baja a media para ser usada con una función para cálculos de potencia de aerogenerador para computar el conjunto de ángulos de ataque por potencia máxima  $\alpha$  de la pala de aerogenerador de velocidad fija en cada posición  $i$  a lo largo de la pala, a una distancia  $d_i$  desde un centro de rotación, y a una velocidad rotacional fija  $\omega$ , del aerogenerador; y usar un conjunto de ángulos de ataque  $\alpha_i$  para determinar un ángulo de ataque óptimo global  $\alpha_c$  de la pala de aerogenerador de velocidad fija; al ángulo de ataque en la punta de pala se le hace referencia as  $\alpha_c$ ;

- en tercer lugar, controlar el aerogenerador mediante:

conforme la velocidad de viento se reduce en una unidad, desde la velocidad de viento  $v_c$  para determinar el ángulo de ataque de pala ( $v_c = \text{un m/s (km/h o mph)}$ ) a la velocidad más baja a la que el aerogenerador es forzado a detenerse, aumentar el ángulo de ataque en un valor de

$$\frac{90^{\circ}00' - \alpha_c}{a} ;$$

conforme la velocidad de viento aumenta en una unidad, desde la velocidad a la que la turbina es forzada a detenerse a la velocidad de viento nominal, disminuir el ángulo de ataque en un valor de

$$\frac{90^{\circ}00' - \alpha_c}{a} ; y$$

conforme la velocidad de viento cae en una unidad, desde la velocidad de viento nominal a la velocidad de viento  $v_c$ , aumentar el ángulo de ataque en un valor de

$$\frac{90^{\circ}00' - \alpha_c}{a} .$$

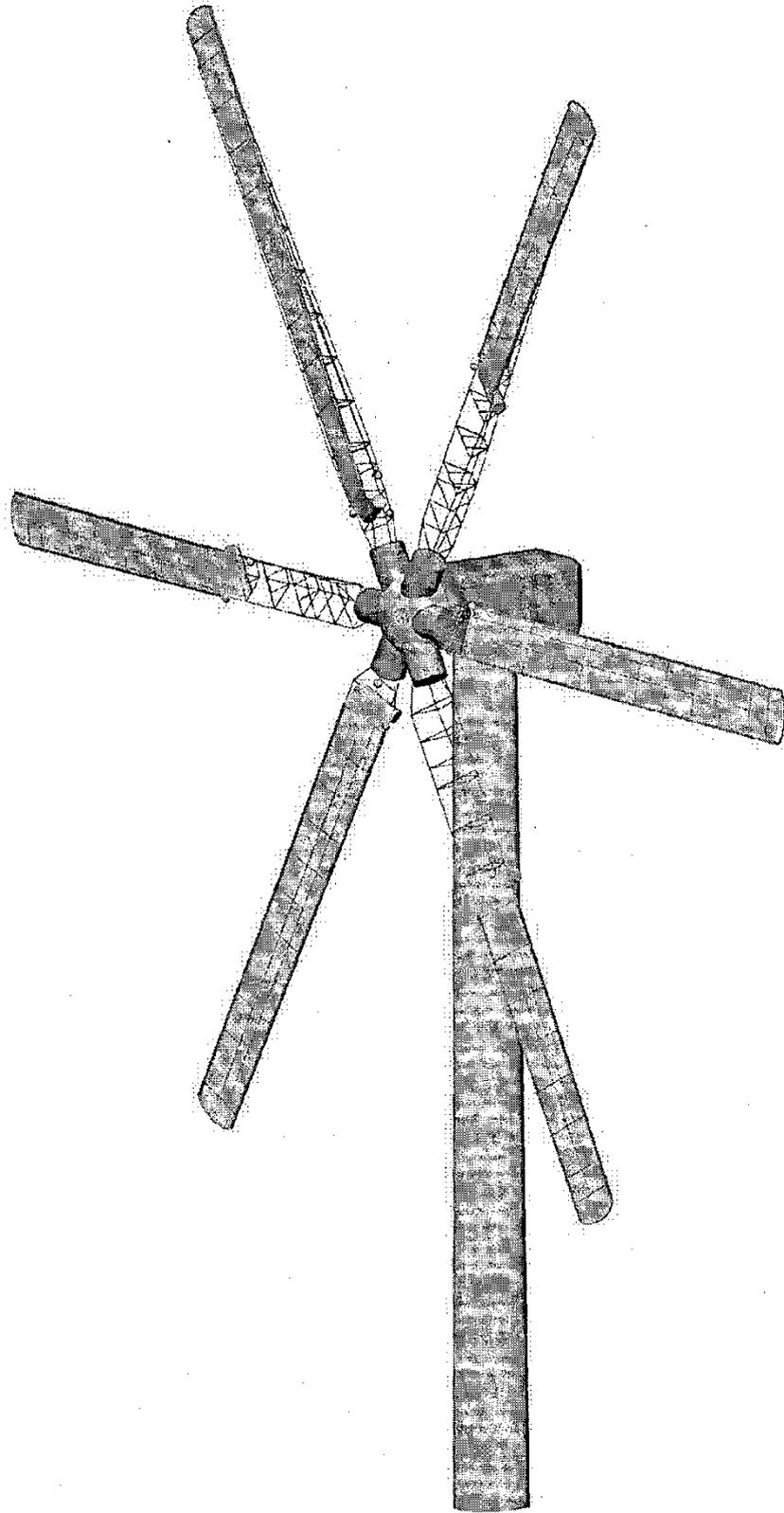


Figura 01