

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 811 599**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.03.2014 PCT/EP2014/000578**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.09.2014 WO14146756**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.03.2014 E 14709191 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.05.2020 EP 2976524**

54 Título: **Pala del rotor de una planta de energía eólica, planta de energía eólica y método para operar una planta de energía eólica**

30 Prioridad:

20.03.2013 DE 102013204879

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

12.03.2021

73 Titular/es:

**SENVION DEUTSCHLAND GMBH (100.0%)
Überseering 10
22297 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

ERBSLÖH, SASCHA

74 Agente/Representante:

SÁNCHEZ SILVA, Jesús Eladio

ES 2 811 599 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

Pala del rotor de una planta de energía eólica, planta de energía eólica y método para operar una planta de energía eólica

5

La invención se refiere a una pala del rotor de una planta de energía eólica con una extensión longitudinal que se extiende desde la raíz de la pala del rotor hasta la punta de la pala del rotor, en donde la pala del rotor tiene un perfil transversal aerodinámico al menos en un área de su extensión longitudinal, que tiene un borde delantero del perfil y un borde trasero del perfil, que están conectados por un lado de succión y un lado de presión del perfil transversal. La invención además se refiere a un método para operar una planta de energía eólica con al menos una pala del rotor correspondiente, un sistema de gestión operativa de una planta de energía eólica y una planta de energía eólica con al menos una pala del rotor correspondiente.

10

Las plantas de energía eólica modernas con dos o más palas del rotor funcionan en el rango de velocidades del viento más altas para limitar la carga, con ángulos de inclinación de las palas, también llamados ángulos de posicionamiento, variables. Al aumentar el tamaño de la operación

15

El ángulo de inclinación de la pala, el ángulo de ataque aerodinámico se reduce a velocidades del viento más altas para reducir la elevación y la cantidad de potencia extraída. El ángulo de ataque es el ángulo entre la dirección del viento y la cuerda, es decir, la línea de conexión entre el borde delantero y el borde trasero del perfil aerodinámico de las palas del rotor. En el marco de la teoría técnica actual, la relación entre el ángulo de inclinación de las palas del rotor y el ángulo de ataque se define, como es habitual, de manera que un aumento del ángulo de inclinación de las palas conduce a una reducción del ángulo de ataque. El ángulo de ataque también puede ser negativo.

20

Las palas del rotor de las plantas de energía eólica también presentan una llamada torsión, es decir, se tuercen a lo largo de su extensión longitudinal de manera que la cuerda, es decir, la línea de conexión entre el borde delantero y el borde trasero del perfil, se gira desde la raíz de la pala del rotor hasta la punta de la pala del rotor a lo largo de la extensión longitudinal de la pala del rotor. La superficie estirada por la cuerda a lo largo de la extensión longitudinal de la pala del rotor forma así una especie de superficie helicoidal distorsionada de manera que el ángulo de ataque aerodinámico en la punta de la pala es menor que en la raíz de la pala. Esto asegura que, a velocidades del viento bajas y medias, en las que aún no se realiza ningún ajuste de la pala, la pala del rotor funciona con la punta de la pala en el medio con un ángulo de ataque óptimo, y aquí se logra la mayor potencia. Las partes internas de la pala del rotor en relación con la superficie del rotor, es decir, las áreas cercanas a la raíz de la pala, contribuyen menos a esto. En este modo de funcionamiento el ángulo de inclinación de la pala es de 0° por definición. Además, la pala del rotor se puede hacer girar en una posición de reposo orientada hacia el viento, la llamada posición de embanderado, que corresponde aproximadamente a una posición de 90° del ángulo de inclinación de la pala de acuerdo con la definición actual.

25

30

35

Para aumentar el rendimiento energético anual de las plantas de energía eólica, las palas del rotor modernas se fabrican cada vez más grandes. Para las operaciones en el mar, también es factible desde el punto de vista económico una alta velocidad de desconexión. Esta combinación, especialmente con una baja carga de las alas del rotor, lleva a que la planta de energía eólica deba funcionar a altas velocidades del viento y a ángulos de inclinación positiva muy altos, por ejemplo, superiores a 30°. Con ángulos de inclinación positivos tan altos, el ángulo de ataque en el área de la punta de la pala del rotor ya está muy dentro del rango negativo, de modo que la energía se extrae cada vez más solo del viento en el área interior del rotor. Los ángulos de inclinación cada vez más negativos en el área de la punta de la pala del rotor pueden caer por debajo del ángulo de sustentación negativo α_{sn} . En este caso, el flujo de aire se separa del lado de la presión del perfil y el coeficiente de resistencia C_D aumenta abruptamente. El alto gradiente negativo $dC_D/d\alpha$ va acompañado de una repentina reducción de la amortiguación en la dirección del borde y es una carga extrema de borde negativa dimensional, es decir, restrictiva.

40

45

50

En ocasiones, durante la operación, varios factores conducen a cambios rápidos y extremos del ángulo de ataque. Además de los procesos de ajuste del ángulo de inclinación, se trata principalmente de ráfagas de viento y de turbulencias en el campo de viento, así como, por ejemplo, el efecto de atasco de las torres. Estas variaciones también se deben tener en cuenta al diseñar las palas del rotor. Para evitar daños estructurales, actualmente solo se puede reforzar la estructura de la pala o reducir la velocidad de desconexión. Por un lado, esto lleva a un mayor costo de la pala y por otro lado a una reducción del rendimiento.

55

La patente de los Estados Unidos núm. US 2003/0091436 A1 se refiere a un dispositivo para regular el flujo de aire alrededor de una pala de una planta de energía eólica con un alerón dispuesto en el lado de succión de la pala del rotor en conexión con otra unidad de regulación de flujo, que está equipada con una cavidad.

60

La patente de los Estados Unidos núm. US 5,088,665 A describe una estructura dentada en un borde trasero del perfil agudo con cuerpos planos, lo que reduce la resistencia de una estructura aerodinámica.

65

La patente de los Estados Unidos núm. US 2011/0110777 A1 describe un dispositivo de control de flujo activo con generadores de vórtice móviles que pueden oscilar hacia adelante y hacia atrás. La patente de los Estados Unidos

núm. US 2011/0223033 A1 describe una planta de energía eólica, en la que los alerones se disponen en el lado de succión en el área media de la pala del rotor hasta la punta de la pala del rotor. Además, la patente de los Estados Unidos núm. US 2011 /0142595 A1 se refiere a una pala del rotor de una planta de energía eólica, en cuyo lado de succión también se disponen varios generadores de vórtice extensibles.

Por el contrario, la invención tiene como objetivo permitir el funcionamiento con carga reducida a altas velocidades del viento y un rendimiento constantemente alto.

Este objetivo se logra con una pala del rotor de una planta de energía eólica de acuerdo con la reivindicación 1.

El dispositivo de reducción de la elevación en el área cercana a la raíz de la pala en el lado de succión reduce la elevación y por tanto la inducción o la toma de potencia en la mitad interior de la pala del rotor. Ello permite reducir los grandes ángulos de inclinación de las palas resultantes y permite un funcionamiento con carga reducida a altas velocidades del viento, que ya no produce cargas de borde dimensionales.

El dispositivo de reducción de la elevación es móvil y puede mantenerse en una posición de elevación neutra durante el funcionamiento normal, es decir, cuando no se producen cargas de borde extremas, en las que no se perturba el flujo regular de aire y la pala del rotor tiene su aerodinámica de diseño habitual. En las condiciones extremas mencionadas, en las que normalmente sería necesario desconectar la alimentación para no sobrecargar las palas del rotor, especialmente en las puntas de las palas, el dispositivo de reducción de la elevación se coloca en la posición operativa de reducción de la elevación, en la que se interrumpe el flujo en el área del dispositivo de reducción de la elevación.

Idealmente, hay una separación del flujo del perfil del lado de la succión en el área cercana a la raíz de la pala del rotor. Esto reduce la elevación y por tanto la toma de potencia en el área cercana a la raíz de las palas. El ángulo de inclinación de la pala se puede reducir y así aumentar el ángulo de ataque. Esto también significa que, en el área de la punta de la pala del rotor, el ángulo de ataque se aleja del ángulo de sustentación negativo α_{sn} , de modo que la carga extrema del borde negativa ya no puede ocurrir. Al mismo tiempo, la toma de potencia se desplaza del área cercana a la raíz de la pala del rotor a un área más alejada. Esto también significa que ya no es necesario reforzar las palas del rotor en su estructura. Tampoco hay que reducir la velocidad de desconexión.

Preferentemente, el dispositivo de reducción de la elevación está diseñado como una aleta giratoria o extensible o como una serie de dos o más aletas giratorias o extensibles independientes entre sí, hechas fundamentalmente de materiales compuestos de fibra. Dicha aleta también se denomina "aleta de sustentación" en el contexto de la presente invención. Puede ser una pequeña aleta deflectora, que se monta en el lado de succión de los perfiles de la raíz y se hace ventajosamente de materiales compuestos de fibra. Esto representa una forma particularmente simple y ligera de ejecución de la invención. Si la aleta está dividida o tiene dos o más aletas giratorias o extensibles independientes entre sí, la reducción de la elevación se puede controlar con mucha precisión.

Resulta ventajoso que el dispositivo de reducción de la elevación esté pegado a una superficie del lado de succión mediante un eje de rotación con elementos guía, en donde el dispositivo de reducción de la elevación se mueve en particular a través del eje de rotación por medio de un actuador o un sistema mecánico que se dispone en particular en la raíz de la pala del rotor. Así, el dispositivo de reducción de la elevación, por ejemplo, en forma de aleta, se puede pegar a la superficie mediante un eje de rotación con elementos guía. El eje de rotación conduce entonces, a través de otros elementos guía, a la raíz de la pala, donde se coloca el actuador o el sistema mecánico correspondiente.

Una colocación particularmente favorable del dispositivo de reducción de la elevación resulta si el dispositivo de reducción de la elevación se extiende de 5 % a 65 %, en particular de 10 % a 50 %, en particular de 12 % a 30 %, del radio de la pala y/o se dispone en la dirección de la cuerda del perfil transversal medido desde el borde delantero entre 15 % y 100 %, en particular entre 15 % y 60 % o 50 % y 100 %, de la cuerda. En la dirección de las cuerdas, la posición del dispositivo de reducción de la elevación de 15 % a 60 % es particularmente ventajosa, pero también se puede preferir entre 50 % y 100 % por razones de implementación del sistema.

En una modalidad preferida, el dispositivo de reducción de la elevación se dispone detrás de, en particular una serie de, generadores de vórtice en la dirección del flujo, que en particular tienen la misma o una mayor extensión longitudinal en la pala del rotor que el dispositivo de reducción de la elevación. El posicionamiento del dispositivo de reducción de la elevación detrás de los generadores de vórtice es particularmente favorable. Esto evita posibles influencias aerodinámicas negativas del dispositivo de reducción de la elevación incluso en la posición de elevación neutra.

El perfil transversal aerodinámico, especialmente en el área del dispositivo de reducción de la elevación, tiene preferentemente un grosor relativo (t/c) de 29 % o más, especialmente de 32 % o más. Donde t ("grosor") y c ("cuerda") son las extensiones transversales a la cuerda y en la dirección de la cuerda entre el borde delantero y el borde trasero. Las dimensiones del dispositivo de reducción de la elevación descrito anteriormente también se refieren preferentemente a perfiles con un grosor relativo (t/c) de más de 29 % o más de 30 %.

El perfil aerodinámico transversal tiene un área con un borde trasero romo. El dispositivo de reducción de la elevación está al menos parcialmente situado en el área con el borde trasero romo.

De acuerdo con la invención, al menos en un área del borde trasero romo se coloca un dispositivo de reducción de la resistencia a la presión, cuya longitud es sustancialmente igual a la mitad de la altura completa del borde trasero romo, en donde en una modalidad, el dispositivo de reducción de la resistencia a la presión está construido como placa, en particular como material de sándwich de espuma plástica reforzada con fibra de vidrio, que está conectado fijo, en particular a través de una pata en T, al borde trasero romo del perfil o se puede mover desde una posición neutra a una posición de activación.

Este dispositivo de reducción de la resistencia a la presión en el borde trasero romo, también llamado "placa divisora" o "placa de separación", asegura la reducción de la resistencia a la presión de los perfiles con un borde trasero romo, debido a que el flujo de aire en el borde trasero se aleja mejor del borde trasero. El tamaño del dispositivo de reducción de la resistencia a la presión es preferentemente igual al del borde trasero. La longitud de la placa divisora o del dispositivo de reducción de la resistencia a la presión es, por tanto, igual o similar a la altura del borde trasero, entre la mitad y todo el borde trasero. Esto también es consecuencia del hecho de que la altura del borde trasero es una función del radio, lo que también se aplica a la longitud del dispositivo de reducción de la resistencia a la presión.

El grosor del dispositivo de reducción de la resistencia a la presión no es importante desde el punto de vista aerodinámico, por lo que puede dimensionarse a partir de requerimientos puramente estructurales. Una construcción no metálica que consiste en un sándwich de espuma plástica reforzada con fibra de vidrio y una conexión pegada mediante una pata en T en el borde trasero del perfil es ventajosa. También se puede utilizar ventajosamente la movilidad para la gestión operativa de la planta de energía eólica.

Así pues, el concepto de la invención en su forma más sencillo consiste en simples piezas adicionales no metálicas que se pueden pegar a la estructura de la pala existente. Por supuesto, en este sentido también se pueden utilizar otras modalidades. Especialmente en combinación con los generadores de vórtices, el deterioro resultante de la superficie aerodinámica solo tiene un efecto relativamente pequeño. El dispositivo de reducción de la elevación se puede controlar en la raíz de la pala a través de un actuador, si fuera necesario un controlador correspondiente, o mediante un sistema puramente mecánico, que es una función del ángulo de inclinación de la pala. Por tanto, esa estructura no tiene efectos negativos, por ejemplo, en el sistema de protección contra rayos. Un posible deterioro del nivel de potencia sonora del rotor no suele ser crítico, dadas las altas velocidades del viento a las que se activa el dispositivo de reducción de la elevación.

El objetivo de la invención también se logra mediante un método para operar una planta de energía eólica con al menos una pala del rotor de acuerdo con la invención previamente descrita, en donde una reducción de la elevación en el área de la pala del rotor cerca de la raíz de la pala se realiza mediante el movimiento del dispositivo de reducción de la elevación a una posición operativa de reducción de la elevación a altas velocidades del viento y/o grandes ángulos de inclinación de la pala, en donde, además, el ángulo de inclinación de la pala se reduce en comparación con la operación de elevación neutra. Ello asegura que, a altas velocidades del viento y grandes ángulos de inclinación positivo de la pala, el dispositivo de reducción de la elevación, en particular una aleta de sustentación, se desvíe, causando así una reducción significativa de la elevación y la inducción, es decir, la toma de potencia, en el área de la raíz de la pala. Como resultado, se pueden establecer ángulos de inclinación más pequeños, ya que ahora se requiere una mayor inducción en el área de la punta de la pala y, por tanto, un mayor ángulo de ataque. Esto evita la sustentación negativa y reduce el dimensionamiento de las cargas extremas de los bordes.

Preferentemente, la reducción de la elevación se lleva a cabo antes de que la planta de energía eólica alcance un rango de funcionamiento con respecto a la velocidad del viento y/o al ángulo de inclinación de las palas del rotor, en el que se puede esperar una interrupción del flujo en el lado de la presión en un área de la punta de la pala del rotor. Esta interrupción del flujo conduce a las llamadas cargas extremas del borde y se puede simular, por ejemplo, en la fase de diseño de la pala del rotor.

Se puede lograr un control especialmente flexible, preferentemente, si el dispositivo de reducción de la elevación, en función de la velocidad del viento y/o del ángulo de inclinación de las palas del rotor, se coloca en posiciones intermedias escalonadas o continuas entre la posición de elevación neutra y una posición operativa con máxima reducción de la elevación y/o, partiendo del área más cercana a la raíz de la pala o a partir de una aleta más cercana a la raíz de la pala, el número de aletas, que se mueven a una posición operativa con reducción de la elevación, aumenta a medida que aumenta la velocidad del viento y/o se reduce el ángulo de ataque de forma escalonada o continua en una cantidad que depende de la velocidad del viento.

Si la velocidad del viento predominante continúa aumentando, es preferible prever que a velocidades del viento superiores a un valor límite máximo de velocidad del viento, en particular una velocidad de desconexión de la planta de energía eólica, el dispositivo de reducción de la elevación se desplace a la posición de elevación neutra, en donde en particular la pala del rotor se desplaza a una posición de embanderado. Esto asegura que no se produzcan daños en las palas del rotor incluso cuando la planta de energía eólica se detiene con las palas del rotor en posición de embanderado, ya que la posición de elevación neutra del dispositivo de reducción de la elevación ofrece la menor

superficie de ataque. Esto también permite mantener el rotor en una posición detenida deseada durante el funcionamiento en barrena.

El accionamiento del dispositivo de reducción de la elevación está acompañado preferentemente por el hecho de que en el borde trasero romo del perfil de las palas del rotor, el dispositivo de reducción de la resistencia a la presión se desplaza desde una posición neutra de resistencia a la presión a una posición operativa de reducción de la resistencia a la presión, cuando el dispositivo de reducción de la elevación se desplaza a una posición operativa de reducción de la elevación y/o se desplaza a la posición neutra de resistencia a la presión cuando el dispositivo de reducción de la elevación se desplaza a su posición de elevación neutra.

El objetivo de la invención también se logra con un sistema de gestión operativa de una planta de energía eólica con al menos una pala del rotor de acuerdo con la invención, en donde el sistema de gestión operativa se construye y configura, en particular mediante un programa informático con medios de código de programa almacenado y/o cargado en el sistema de gestión operativa, para llevar a cabo un método de acuerdo con la invención descrito anteriormente.

Por último, el objetivo de la invención también se logra mediante una planta de energía eólica con al menos una pala del rotor de acuerdo con la invención y un sistema de gestión operativa de acuerdo con la invención descritos anteriormente.

Las características, propiedades y ventajas mencionadas para los objetos de la invención mencionados, es decir, la pala del rotor, el método, el sistema de gestión operativa y la planta de energía eólica, también se aplican sin restricción a los demás objetos de la invención relacionados entre sí.

Otras características de la invención se desprenden de la descripción de las modalidades de acuerdo con la invención junto con las reivindicaciones y los dibujos acompañantes. Las modalidades de acuerdo con la invención pueden cumplir con características únicas o con una combinación de varias características.

A continuación, se describe la invención sin limitación de la idea general de la invención sobre la base de ejemplos de modalidades tomando como referencia los dibujos, en donde en los dibujos se hace referencia explícita a todos los detalles de acuerdo con la invención no explicados más detalladamente en el texto. Se muestran:

En la Figura 1, una vista en perspectiva de una pala del rotor,

En la Figura 2 a), b), diagramas del coeficiente ascensional y del coeficiente de resistencia de un perfil de pala del rotor en función del ángulo de ataque

En la Figura 3, una vista en perspectiva de una pala del rotor de acuerdo con la invención,

En la Figura 4, una sección transversal del perfil de la pala del rotor de acuerdo con la invención,

En la Figura 5, una sección transversal de otro perfil de la pala del rotor de acuerdo con la invención,

En la Figura 6 a), b), representaciones esquemáticas del patrón del flujo alrededor del perfil de una pala del rotor de acuerdo con la invención en dos estados operativos diferentes y

En la Figura 7, una función de control de un dispositivo de reducción de la elevación de acuerdo con la invención.

En los dibujos, los elementos y/o partes iguales o similares tienen los mismos números de referencia, de modo que no haya necesidad de explicarlos de nuevo.

En la Figura 1 se muestra una vista en perspectiva esquemática de la pala 2 de una planta de energía eólica. La pala del rotor 2 tiene una extensión longitudinal desde la raíz de la pala del rotor 4 con una sección transversal redonda hasta la punta de la pala del rotor 6. Su perfil tiene en su extensión longitudinal una multitud de perfiles aerodinámicos transversales 8, 9, algunos de los cuales se muestran como formas transversales. Por ejemplo, en el área central se dibuja un perfil aerodinámico transversal 8, que se extiende desde un borde delantero 10 hasta un borde trasero 12 y tiene un lado de succión 14 y un lado de presión 16.

En un área más cercana a la raíz, el borde trasero 12 se corta y se fusiona en un borde trasero romo 13, que se ensancha más hacia la raíz de la pala 4 y finalmente se fusiona en la sección transversal redonda de la raíz de la pala del rotor 4. En el área del borde trasero romo 13 se muestra un perfil transversal aerodinámico 9, que tiene un mayor grosor relativo que el perfil transversal aerodinámico 8 en el área central de la pala del rotor. Además, las cuerdas no mostradas, es decir, las líneas de conexión entre el borde delantero del perfil 10 y el borde trasero del perfil 12 en el área cercana a la raíz de la pala se disponen en un plano que está torcido en relación con el plano de las cuerdas en el área cercana a la punta de la pala.

En la Figura 2 a), la dependencia del coeficiente ascensional C_L se muestra como la curva 40 en función del ángulo de ataque α . Con un ángulo de ataque de 0° , se obtiene un coeficiente ascensional ligeramente positivo. La pendiente de la curva 40 es positiva, de modo que cuando el ángulo de ataque α aumenta, el coeficiente ascensional C_L también aumenta y cuando el ángulo de ataque α es negativo, el coeficiente ascensional C_L disminuye y se vuelve negativo.

Con un valor α_{sp} , el llamado ángulo de sustentación positivo, el flujo en el lado de succión se interrumpe y el coeficiente ascensional C_L disminuye de nuevo. Durante el funcionamiento nominal, la pala del rotor funciona con un ángulo de ataque positivo α por debajo del ángulo de sustentación positivo. Con ángulos de ataque negativos por debajo de un

ángulo de sustentación negativo α_{sn} el flujo de aire en el lado de la presión se interrumpe (la llamada sustentación negativa) y el coeficiente ascensional C_L disminuye de nuevo. De esta manera surge un área útil 54 entre el ángulo de sustentación negativo α_{sn} y el ángulo de sustentación positivo α_{sp} , en la cual se puede operar la pala del rotor 2.

5 En la Figura 2 b), el patrón del coeficiente de resistencia C_D se representa igualmente como la curva 50 contra el ángulo de ataque α . Este coeficiente es pequeño en un área amplia del área útil 54 del ángulo de ataque α , pero aumenta considerablemente más allá de los ángulos de sustentación α_{sp} y α_{sn} . En particular, si el valor cae por debajo del ángulo de sustentación negativo α_{sn} se produce un gradiente negativo extremo ($dC_D/d\alpha$), que conduce a cargas extremas de borde. Ello debe tenerse en cuenta particularmente al dimensionar las palas del rotor.

10 En la Figura 3 se muestra una vista en perspectiva esquemática de una pala del rotor 2 de acuerdo con la invención. En comparación con la pala del rotor 2 de la Figura 1, el área con un borde trasero romo en la Figura 3 está algo más extendida. Se trata de una pala del rotor comparativamente larga, especialmente para las plantas de energía eólica en altamar.

15 En la mitad cercana a la raíz de la pala, es decir, en un área próxima a la raíz de la pala, se coloca un dispositivo de reducción de la elevación 20 en forma de tres aletas 22.1 - 22.3, las llamadas "aletas de sustentación", que están conectadas mediante un eje de rotación 24 a un actuador 28, que se dispone en la raíz de la pala del rotor 4. El eje de rotación 24 está montado de manera giratoria y anclado en el lado de succión de la pala del rotor 2 por medio de dos elementos guía 26, 26'.

20 El dispositivo de reducción de la elevación 20 está precedido por una serie de generadores de vórtice 29, que aseguran el arremolinamiento del flujo de aire antes de llegar a las aletas 22.1 - 22.3 del dispositivo de reducción de la elevación 20, de modo que no tengan un impacto negativo en las propiedades aerodinámicas de la pala del rotor 2 durante el funcionamiento normal. En lugar de tres aletas 22.1 - 22.3 se puede usar una sola aleta.

25 En el borde trasero romo 13 también hay un dispositivo de reducción de la resistencia a la presión 30 en forma de placa divisora, cuya longitud es igual a la altura del borde trasero romo 13. Esto también significa que la longitud del dispositivo de reducción de la resistencia a la presión 30 disminuye en la dirección de la raíz de la pala 4 hacia la punta de la pala 6.

30 El dispositivo de reducción de la resistencia a la presión 30 se dispone ligeramente más hacia la punta de la pala del rotor 6 que el dispositivo de reducción de la elevación 20. Esto se debe a que mediante el accionamiento del dispositivo de reducción de la elevación 20 y la posterior reducción del ángulo de inclinación de las palas del rotor, así como el aumento asociado del ángulo de inclinación, el área de la pala del rotor 2 que extrae la energía del campo de viento entrante se desplaza de la raíz de la pala del rotor 4 hacia la punta de la pala del rotor 6. Así pues, el área en la que se encuentra el dispositivo de reducción de la resistencia a la presión 30 es la que está particularmente involucrada en la toma de potencia y cuyo perfil aerodinámico transversal es, por tanto, particularmente importante.

35 La figura 4 muestra una vista transversal esquemática de un perfil transversal aerodinámico 9 en un punto de la pala del rotor 2 cercano a la raíz de la pala, donde el perfil 9 tiene un borde trasero romo 13. El perfil transversal 9 mostrado en la Figura 4 corresponde a la sección A-A de la Figura 3. Dentro del perfil 9, se muestran esquemáticamente en sección transversal dos cuerdas 17, 17' y dos almas 18, 18', que ayudan a la pala del rotor 2 a ganar estabilidad y desviar los momentos de flexión, que actúan sobre la pala del rotor durante el funcionamiento, hacia la raíz de la pala del rotor 4 y el cubo del rotor.

40 La Figura 4 también muestra la longitud c de la cuerda de la pala no mostrada y el grosor t del perfil transversal 9. Además, en el área del borde delantero del perfil 10 se muestra la definición del ángulo de ataque α , en donde la línea discontinua que delimita el ángulo α corresponde a la dirección de las cuerdas y la flecha muestra la dirección de la entrada del viento. En el lado de succión 14 del perfil transversal aerodinámico 9 mostrado arriba, también se muestran los generadores de vórtice 29 y, en la dirección del flujo, directamente detrás de ellos una aleta 22 del dispositivo de reducción de la elevación, en una posición plegada de elevación neutra.

45 La Figura 5 muestra esquemáticamente la sección transversal de acuerdo con la sección B-B de la Figura 3, en donde también en este caso se trata de un perfil transversal 9 con un borde trasero romo 13. Sin embargo, como esta sección está situada más hacia la punta de la pala del rotor 6, el perfil 9 se mantiene más delgado que el perfil 9 de la Figura 4. Por razones de claridad, tampoco se muestran las estructuras internas de la pala del rotor. Las aletas mostradas en la Figuras 4 y 5 correspondientes a las secciones A-A y B-B son la primera aleta 22.1 de la Figura 4 y la tercera aleta 22.3 de la Figura 5.

50 En la Figura 5, en el borde trasero romo 13 se muestra también un dispositivo de reducción de la resistencia a la presión 30, la llamada "placa divisora", cuya longitud se corresponde aproximadamente con la altura del borde trasero romo 30.

55 Las Figuras 6 a) y b) muestran un perfil transversal aerodinámico 9 de acuerdo con las Figuras 3 a 5 anteriores, en donde el dispositivo de reducción de la elevación de la Figura 6 a) se encuentra en posición de elevación neutra 20' y

en la figura 6 b) en posición operativa de reducción de la elevación 20^{II}, en la que el dispositivo de reducción de la elevación o la aleta de sustentación están desviados en 90°.

5 También se muestra esquemáticamente el patrón del flujo, a saber, en la Figura 6 a) un patrón del flujo 34 completamente adyacente que envuelve el perfil transversal 9 y en la Figura 6 b) un patrón 36 con separación forzada del flujo en el lado de succión con la aleta de sustentación extendida. En este caso, se producen fuertes turbulencias en el lado de succión y aguas abajo del perfil transversal 9.

10 Finalmente, la Figura 7 muestra un diagrama del patrón del ángulo de desviación ϑ_{aleta} en función del ángulo de inclinación de la pala $\vartheta_{inclinación}$. Esto muestra que, por ejemplo, la aleta de sustentación de la figura 6, que se puede desviar en un rango de 0° a 90°, se extiende para desplegar ángulos de inclinación de la pala entre aproximadamente 25° y 50°. A partir de unos 25° o ligeramente por debajo, la pala del rotor se encuentra en un rango de funcionamiento, en el que se deben evitar las cargas extremas de borde negativas, de modo que en este caso el control de la aleta de sustentación se acciona en la posición operativa de reducción de la elevación a 90°. Por encima de 50°, la planta de energía eólica se detiene. Para ello, la aleta de sustentación se mueve de nuevo a la posición aerodinámicamente neutra de 0°.

20 Todas las características mencionadas, incluidas las que se pueden ver en los dibujos por sí solas, así como las características individuales que se describen en combinación con otras características, se consideran esenciales para la invención, tanto por sí solas como en combinación. Las modalidades de acuerdo con la invención pueden cumplir con características individuales o con una combinación de varias características.

Lista de referencia de los dibujos:

- 25 2 Pala del rotor
4 Raíz de la pala del rotor
6 Punta de la pala del rotor
8, 9 Perfil transversal aerodinámico
10 Borde delantero del perfil
30 12 Borde trasero del perfil
13 Borde trasero romo
14 Lado de succión
16 Lado de presión
17, 17' Cinturón
35 18, 18' Alma
20 Dispositivo de reducción de la elevación
20' Posición de elevación neutra
20^{II} Posición operativa de reducción de la elevación
22 Aleta
40 22.1-22.3 Aletas
24 Eje de rotación
26, 26' Elemento guía
28 Actuador
29 Generadores de vórtice
45 30 Dispositivo de reducción de la resistencia a la presión
34 Patrón de flujo normal
36 Separación forzada del flujo
40 Patrón del coeficiente ascensional C_L
50 Patrón del coeficiente de resistencia C_D
52 Gradiente negativo más alto
54 Área útil del ángulo de ataque α
 C_L Coeficiente ascensional
 C_D Coeficiente de resistencia
 α Ángulo de ataque
55 α_{sn} Ángulo de sustentación negativo
 α_{sp} Ángulo de sustentación positivo
 ϑ_{aleta} Ángulo de desviación del dispositivo de reducción de la elevación
 $\vartheta_{inclinación}$ Ángulo de inclinación de la pala

REIVINDICACIONES

1. Una pala del rotor (2) de una planta de energía eólica con una extensión longitudinal que se extiende desde la raíz de la pala del rotor (4) hasta la punta de la pala del rotor (6), en donde la pala del rotor (2) tiene un perfil transversal aerodinámico (8, 9) en al menos un área de su extensión longitudinal, que tiene un borde delantero del perfil (10) y un borde trasero del perfil (12), que se conectan a través de un lado de succión (14) y un lado de presión (16) del perfil transversal, en donde el perfil transversal aerodinámico (8, 9) tiene un área con un borde trasero romo (13), en donde, en un área cercana a la raíz de la pala, al menos parcialmente en el área con el borde trasero romo (13), se dispone un dispositivo de reducción de la elevación (20) en el lado de succión (14), que se puede mover entre una posición de elevación neutra (20I), sin reducción de la elevación, y una posición operativa de reducción de la elevación (20II), en donde se dispone, al menos en un área del borde trasero romo (13), un dispositivo de reducción de la resistencia a la presión (30), cuya longitud es sustancialmente igual a la mitad de la altura hasta la altura completa del borde trasero romo (13).
2. La pala del rotor (2) de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizada porque el dispositivo de reducción de la resistencia a la presión (20) está construido como una aleta giratoria o extensible o como una serie de dos o más aletas (22.1 - 22.3) que son giratorias o extensibles independientemente una de la otra y que se hacen, en particular, de materiales compuestos de fibras.
3. La pala del rotor (2) de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, caracterizada porque el dispositivo de reducción de la elevación (20) está pegado a una superficie del lado de succión (14) por medio de elementos guía (26, 26') a través de un eje de rotación (24), en donde el dispositivo de reducción de la elevación (20) se puede mover, en particular sobre el eje de rotación (24), por medio de un actuador (28) o un sistema mecánico, dispuestos en particular en la raíz (4) de la pala del rotor.
4. La pala del rotor (2) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizada porque el dispositivo de reducción de la elevación (20) se extiende de 5 % a 65 %, en particular de 10 % a 50 %, en particular de 12 % a 30 %, del radio de la pala y/o se dispone en dirección de la cuerda del perfil transversal (8, 9), medido desde el borde frontal (10), entre 15 % y 100 %, en particular entre 15 % y 60 % o entre 50 % y 100 %, de la cuerda.
5. La pala del rotor (2) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizada porque el dispositivo de reducción de la elevación (20) se dispone, en dirección del flujo, detrás de una serie de generadores de vórtices (29), que tienen, en particular, una extensión longitudinal en la pala del rotor (2) igual o mayor que el dispositivo de reducción de la elevación (20).
6. La pala del rotor (2) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizada porque tiene un perfil transversal aerodinámico (8, 9) con un grosor relativo (t/c) de 29 % o más, en particular de 32 % o más.
7. La pala del rotor (2) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizada porque el dispositivo de reducción de la resistencia a la presión (30) está construido en forma de placa, en particular de un material sándwich de espuma plástica reforzada con fibra de vidrio.
8. La pala del rotor (2) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizada porque la placa está conectada de forma fija al borde trasero romo (13) del perfil (9) a través de una pata en T o se puede mover desde una posición neutra a una posición de accionamiento.
9. Un método para operar una planta de energía eólica con al menos una pala del rotor (2) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque una reducción de la elevación en el área de la pala del rotor (2) cerca de la raíz de la pala se realiza mediante el movimiento del dispositivo de reducción de la elevación (20) a una posición operativa de reducción de la elevación (20II) a altas velocidades del viento y/o grandes ángulos de inclinación de la pala, en donde, además, el ángulo de inclinación de la pala se reduce en comparación con la operación de elevación neutra.
10. El método de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado porque la reducción de la elevación se lleva a cabo antes de que la planta de energía eólica alcance un rango de funcionamiento con respecto a la velocidad del viento y/o al ángulo de inclinación de las palas del rotor, en el que se puede esperar una interrupción del flujo en el lado de la presión en un área de la punta de la pala del rotor (6).
11. El método de acuerdo con la reivindicación 9 o 10, caracterizado porque el dispositivo de reducción de la elevación (20), en función de la velocidad del viento y/o del ángulo de inclinación de las palas del rotor, se coloca en posiciones intermedias escalonadas o continuas entre la posición de elevación neutra (20I) y una posición operativa con máxima reducción de la elevación (20II) y/o, partiendo del área más cercana a la raíz de la pala o a partir de una aleta (22.1) más cercana a la raíz de la pala, el número de aletas (22.1 - 22.3), que se mueven a una posición operativa con reducción de la elevación (20I), aumenta a medida que aumenta la velocidad del viento y/o se reduce el ángulo de ataque de forma escalonada o continua en una cantidad que depende de la velocidad del viento.

- 5 12. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, caracterizado porque a velocidades del viento superiores a un valor límite máximo de velocidad del viento, en particular una velocidad de desconexión de la planta de energía eólica, el dispositivo de reducción de la elevación (20) se desplaza a la posición de elevación neutra (20I), en donde en particular la pala del rotor (2) se desplaza a una posición de embanderado.
- 10 13. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, caracterizado porque en el borde trasero romo (13) del perfil de las palas del rotor (9), el dispositivo de reducción de la resistencia a la presión (30) se desplaza desde una posición neutra de resistencia a la presión a una posición operativa de reducción de la resistencia a la presión, cuando el dispositivo de reducción de la elevación (20) se desplaza a una posición operativa de reducción de la elevación (20II) y/o se desplaza a la posición neutra de resistencia a la presión cuando el dispositivo de reducción de la elevación (20) se desplaza a su posición de elevación neutra (20I).
- 15 14. Un sistema de gestión operativa de una planta de energía eólica con al menos una pala del rotor (2) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde el sistema de gestión operativa se construye y configura, en particular mediante un programa informático con medios de código de programa almacenado y/o cargado en el sistema de gestión operativa, para llevar a cabo un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13.
- 20 15. Una planta de energía eólica con al menos una pala del rotor (2) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 y un sistema de gestión operativa de acuerdo con la reivindicación 14.

Fig.1

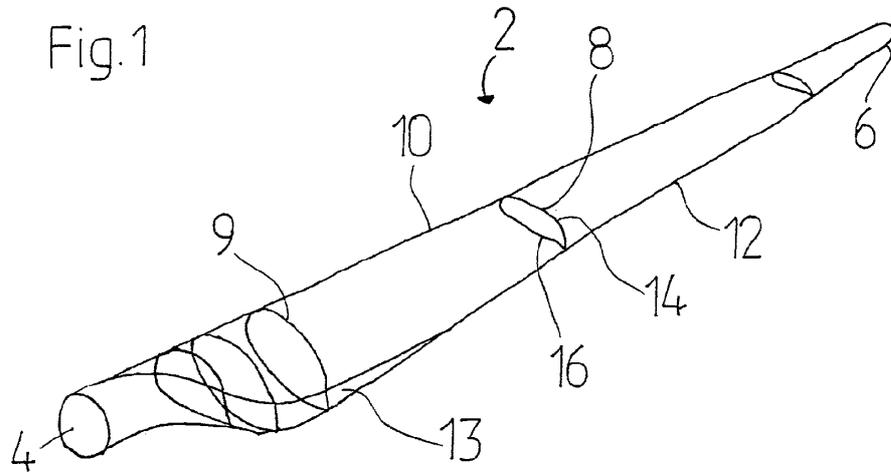
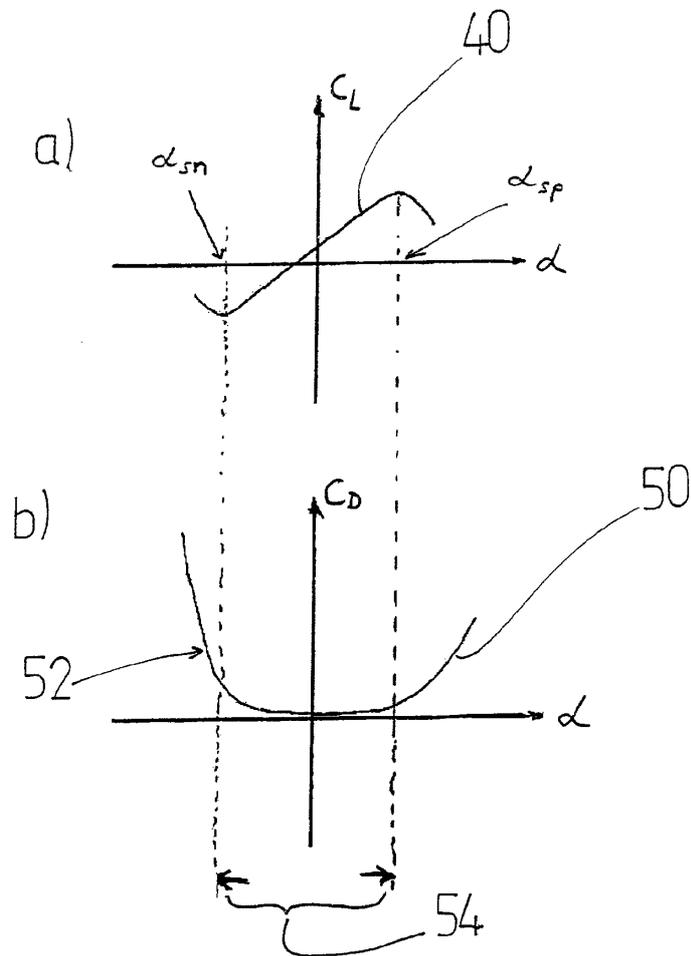


Fig. 2



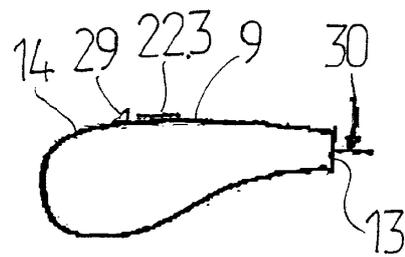
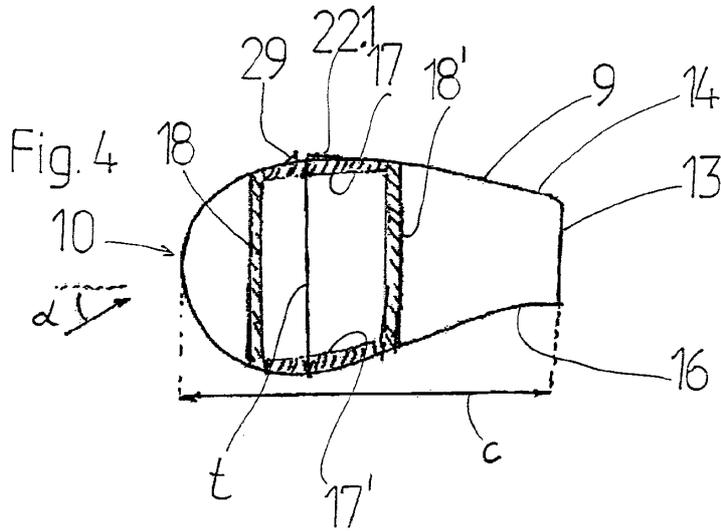
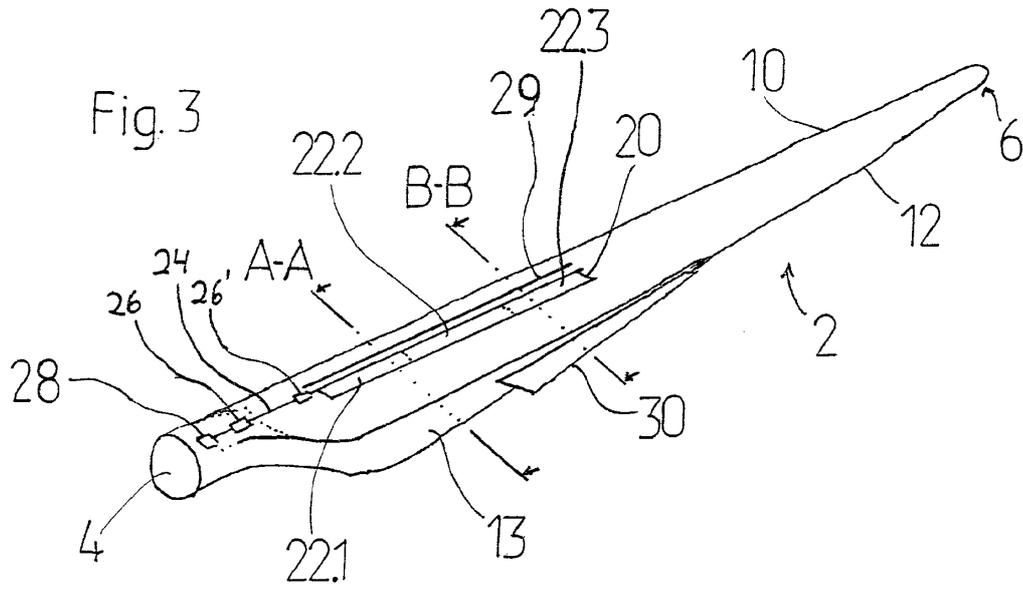


Fig. 5

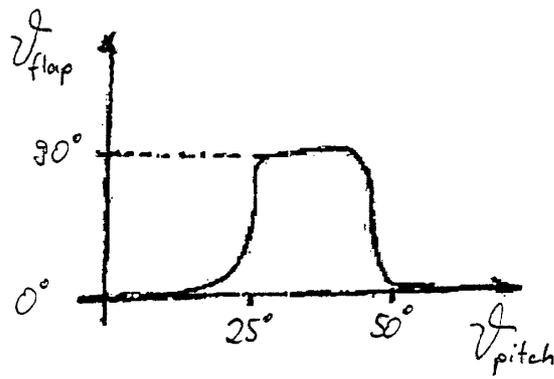
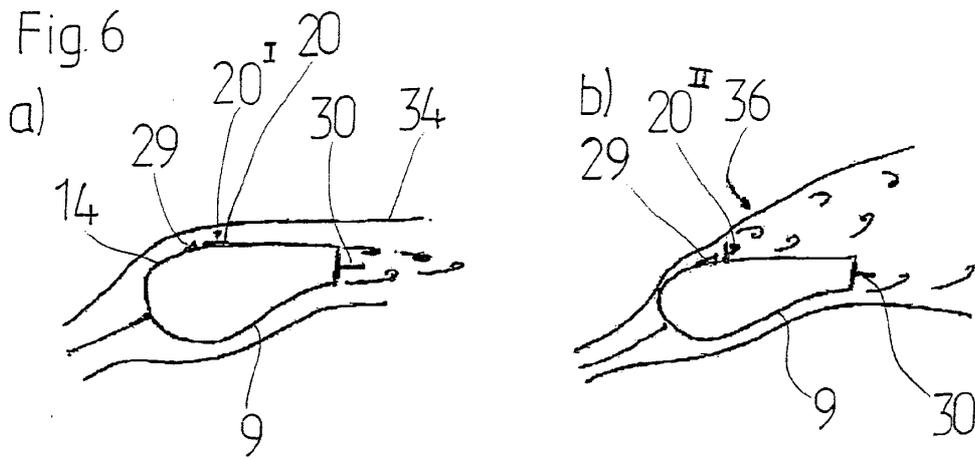


Fig. 7