

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 922 484**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.05.2011** **E 11164590 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.07.2022** **EP 2520795**

54 Título: **Método y disposición para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor de una turbina eólica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.09.2022

73 Titular/es:

**SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY A/S
(100.0%)
Borupvej 16
7330 Brande, DK**

72 Inventor/es:

**ESBENSEN, THOMAS y
HOEGH, GUSTAV**

74 Agente/Representante:

LOZANO GANDIA, José

ES 2 922 484 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 y disposición para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor de una turbina eólica

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método y a una disposición para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor o ángulos de cabeceo de palas de rotor de una turbina eólica.

10 **Antecedentes de la técnica**

Una turbina eólica puede comprender una torre de turbina eólica, una góndola montada en la parte superior de la torre de la turbina eólica, un árbol de rotación soportado de forma rotatoria dentro de la góndola, en el que el árbol de rotación tiene una o más palas de rotor conectadas al mismo. El viento que impacta puede transferir energía cinética a las palas de rotor, lo que hace que el árbol de rotación rote. El árbol de rotación puede estar conectado mecánicamente a un generador que produce energía eléctrica al rotar el árbol de rotación. La góndola puede montarse en la torre de la turbina eólica, de manera que la góndola pueda rotar alrededor de un eje vertical para dirigir el árbol del rotor y, por lo tanto, las palas en la dirección momentánea del viento, lo que puede denominarse guiñada.

Para ajustar una transferencia de energía cinética comprendida en el viento al árbol de rotación a través de las palas de rotor, las palas de rotor pueden rotar a lo largo de un eje longitudinal de las palas de rotor. La rotación de la pala de rotor alrededor de su eje longitudinal (que puede estar en un plano de rotación que es un plano perpendicular al eje de rotación o al árbol de rotación) también puede denominarse ajuste del ángulo de cabeceo de la pala de rotor. El ajuste del ángulo de cabeceo de la pala de rotor puede afectar a la eficiencia o al grado de transferencia de energía del viento a la pala de rotor y, por lo tanto, a la turbina eólica.

Dependiendo del equipo mecánico y/o electrónico o de los componentes de la turbina eólica, a la turbina eólica se le puede asignar una potencia de salida de régimen o una potencia de salida nominal. En condiciones en las que la velocidad del viento no es lo suficientemente alta como para que la turbina eólica alcance la potencia de salida nominal, la turbina eólica puede entregar menos potencia de salida que la potencia de salida nominal a una red eléctrica.

El documento de J.N. Sorensen *et al.*, Giorgos Leloudas "*Optimization of wind turbines with respect to noise*" [Optimización de turbinas eólicas con respecto al ruido], Proyecto de Tesis de Maestría, 1 de noviembre de 2006, divulga la optimización de turbinas eólicas con respecto al ruido, en el que se optimiza el rendimiento y el proyecto se concentra en buscar combinaciones de los ajustes que conducirían a una posible reducción del ruido manteniendo la producción de potencia en niveles altos. Se divulga un estudio de la dependencia del cabeceo del ruido de la turbina eólica.

Se ha observado que puede ser difícil ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor, en particular, en situaciones en las que la turbina eólica funciona por debajo de la potencia de régimen. En particular, una producción de potencia óptima de una turbina eólica por debajo de la potencia de régimen o por debajo de la potencia de salida nominal puede depender de la capacidad de aplicar un ángulo de cabeceo óptimo (el ángulo de cabeceo es el ángulo entre la línea de la cuerda de la pala y el plano de rotación del rotor que es perpendicular al árbol de rotación) y realizar un seguimiento de la relación óptima de velocidad de la punta de rotor (la relación entre la velocidad del árbol del rotor y la velocidad efectiva del viento) a una velocidad de rotación por debajo de la de régimen del árbol de rotación. En el presente documento, la velocidad de rotación de régimen del árbol de rotación también puede denominarse velocidad de rotación de régimen del árbol de rotación o velocidad nominal o velocidad de régimen de la turbina eólica.

Puede existir la necesidad de un método para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor de una turbina eólica y de una disposición para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor de una turbina eólica, en los que se reducen al menos algunos de los problemas antes mencionados.

Sumario de la invención

Esta necesidad puede ser satisfecha por el objeto según las reivindicaciones independientes. Realizaciones ventajosas de la presente invención se describen mediante las reivindicaciones dependientes.

Según la presente invención, se proporciona un método para ajustar un ángulo de cabeceo (una posición angular de la pala de rotor, en el que un eje longitudinal de la pala de rotor representa un eje de rotación de la pala de rotor para ajustar la posición angular) de una pala de rotor (una estructura mecánica que comprende un perfil aerodinámico para capturar el viento o transferir la energía mecánica contenida en el viento a energía cinética o energía de rotación de la pala de rotor) conectada a un árbol de rotación (en particular, que tiene un eje de rotación orientado horizontalmente, en el que un plano perpendicular al eje de rotación puede definir un plano de rotación) de una turbina eólica. Por lo tanto, el método comprende obtener (tal como a través de un terminal o una línea de entrada, en particular, eléctrica) una primera señal de velocidad máxima o referencia de velocidad (en particular, una señal eléctrica, una señal óptica o similar) indicativa de una primera velocidad de rotación máxima deseada (que define una velocidad de rotación que

no debe excederse durante el funcionamiento de la turbina eólica en un modo de funcionamiento particular, tal como un primer modo de funcionamiento) del árbol de rotación; y derivar (que comprende, en particular, realizar un cálculo, consultar una tabla de consulta, leer valores de referencia o de calibración, evaluar una función matemática, derivar numéricamente un valor a partir de uno o más valores de entrada y/o similares) una señal de ajuste (en particular, una señal eléctrica, una señal óptica o similar) del primer ángulo de cabeceo a base de la primera señal de velocidad máxima. Además, el método comprende ajustar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor a un primer ángulo de cabeceo a base de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo. Entonces, el procedimiento comprende obtener (en particular, a través de un terminal o de una línea de entrada, en particular, eléctrica, en particular, la misma línea de entrada a través de la cual se ha obtenido la primera señal de velocidad máxima) una segunda señal de velocidad máxima (en particular, una señal eléctrica o una señal óptica) indicativa de una segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación diferente de, en particular menor que, la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación; y derivar (que comprende, en particular, realizar un cálculo, consultar una tabla de consulta, leer uno o más valores, tal como valores de calibración o valores de referencia de un almacenamiento, tal como una base de datos, resolver numérica y/o analíticamente una ecuación o similar) una señal de ajuste (en particular, una señal eléctrica o una señal óptica) del segundo ángulo de cabeceo a base de la segunda señal de velocidad máxima, en el que la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo es diferente de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo.

El método comprende además ajustar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor a un segundo ángulo de cabeceo a base de la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo, en el que la segunda velocidad de rotación máxima deseada es menor que la primera velocidad de rotación máxima deseada, en el que el segundo ángulo de cabeceo es mayor que el primer ángulo de cabeceo, en el que el primer ángulo de cabeceo y el segundo ángulo de cabeceo son constantes para la potencia de salida por debajo de un umbral, en el que el primer ángulo de cabeceo es el ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación, en el que el segundo ángulo de cabeceo es el ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece a la segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación. El método comprende además obtener una señal de potencia indicativa de una potencia de salida, en el que la obtención de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo se basa además en la señal de potencia, en el que la derivación de la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo se basa además en la señal de potencia.

La señal de ajuste del primer/segundo ángulo de cabeceo puede ser cualquier señal (eléctrica, mecánica y/u óptica) de la que depende el primer/segundo ángulo de cabeceo ajustado o a base de la cual puede derivarse el primer/segundo ángulo de cabeceo ajustado. Pueden aplicarse diferentes unidades (tal como voltios, metros, grados) para definir la señal de ajuste del primer/segundo ángulo de cabeceo. En particular, la señal de ajuste del primer/segundo ángulo de cabeceo puede derivarse y suministrarse desde el controlador de turbina eólica al sistema de cabeceo.

Además, la señal de ajuste del primer/segundo ángulo de cabeceo puede referirse a señales de control internas en el sistema de cabeceo, que pueden suministrarse al accionador de cabeceo, en el que el sistema de cabeceo puede consistir en accionadores y, en particular, también en un controlador interno para traducir las señales de ángulo de cabeceo recibidas a una posición de cabeceo real. Un sistema de cabeceo hidráulico (o un sistema de cabeceo eléctrico) puede mover el accionador de cabeceo (o el motor eléctrico conectado a un engranaje) según la señal de ajuste del primer/segundo ángulo de cabeceo para cambiar el/los ángulo(s) de cabeceo de la pala.

Internamente, en o bien el sistema de cabeceo hidráulico o bien el sistema de cabeceo eléctrico, pueden usarse varias unidades, tal como grados, metros (longitud del pistón) y/o voltios, para definir la señal de ajuste del primer/segundo ángulo de cabeceo.

En particular, se deriva una señal para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor a base de o teniendo en cuenta una señal de velocidad máxima del árbol de rotación. En particular, puede ser necesario establecer una velocidad de rotación máxima deseada en diferentes valores según normas, necesidades, modos de funcionamiento particulares, o similares.

En particular, tener en cuenta la señal de velocidad máxima del árbol de rotación para derivar la señal de ajuste del ángulo de cabeceo (a base de la cual se ajustará el ángulo de cabeceo) puede mejorar, en particular, aumentar, la potencia de salida de la turbina eólica y puede reducir cargas estructurales y/o ruido acústico. En particular, para capturar la mayor cantidad posible de energía a partir del viento, puede ser importante que la referencia de ángulo de cabeceo y la referencia de potencia (o par) se adapten a las condiciones operativas actuales. En particular, los inventores encontraron que el ajuste de cabeceo óptimo puede verse fuertemente afectado por la velocidad de rotación máxima para el modo de funcionamiento particular. Por lo tanto, explotar este hallazgo al establecer la referencia de cabeceo para garantizar un funcionamiento óptimo de la turbina puede mejorar la producción de potencia.

Puede haber varias razones para hacer funcionar la turbina eólica en diferentes modos de funcionamiento que difieren con respecto a la velocidad de rotación máxima. En particular, durante un primer modo de funcionamiento, la turbina eólica puede hacerse funcionar a la velocidad de diseño original (que puede, por ejemplo, definirse a base de un funcionamiento óptimo de la turbina eólica según sus propiedades mecánicas y/o electrónicas). Durante un segundo

modo de funcionamiento, a la turbina eólica se le puede asignar una segunda velocidad de rotación máxima deseada que puede ser más lenta o menor que la velocidad de diseño original o una primera velocidad de rotación máxima deseada debido, por ejemplo, a requerimientos de reducción de emisiones de ruido acústico, estelas y/o cargas estructurales.

Los inventores descubrieron que, si la referencia de cabeceo no se compensa, al reducir la velocidad de rotación máxima, entonces la eficiencia global de la turbina puede reducirse significativamente y la carga estructural de la turbina puede aumentar. La eficiencia del rotor se ve afectada cuando la turbina eólica no puede mantener la relación punta-velocidad óptima (la relación entre la velocidad de rotación de la punta de una pala y la velocidad real del viento) para un funcionamiento a velocidad reducida.

Por lo tanto, determinar la señal de ajuste del ángulo de cabeceo (es decir, la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo, así como la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo) teniendo en cuenta la velocidad de rotación máxima en el modo de funcionamiento particular (es decir, la primera velocidad de rotación máxima deseada y la segunda velocidad de rotación máxima deseada, respectivamente) puede mejorar la eficiencia de la turbina eólica, en particular, durante la producción de potencia por debajo de la potencia de salida nominal debido a una velocidad del viento relativamente baja.

A continuación, el primer ángulo de cabeceo también se denomina ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación. De manera similar, el segundo ángulo de cabeceo también se denomina ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación. Además, en particular, la primera señal de velocidad máxima, así como la segunda señal de velocidad máxima, son además una función de la potencia y pueden ser una función adicional del par, la velocidad del viento, la velocidad de rotación o cualquier otro parámetro de funcionamiento que defina el punto de funcionamiento actual o modo de funcionamiento de la turbina eólica.

La velocidad de rotación máxima del árbol de rotación también puede conocerse como o denominarse la referencia de velocidad del controlador de turbina eólica. La importancia de corregir la referencia de cabeceo puede aumentar con el nivel de reducción de la velocidad de rotación máxima en comparación con la velocidad de rotación de diseño/nominal de la turbina eólica. Solo recientemente, el problema puede haberse convertido en un problema grave, debido al mayor enfoque en la restricción para reducir las emisiones de ruido acústico, las cargas estructurales, etc. En particular, las realizaciones de la presente invención permiten el funcionamiento de la turbina eólica de una manera mejorada a velocidades de rotación reducidas.

En particular, la primera señal de ángulo de cabeceo y la segunda señal de ángulo de cabeceo pueden referirse a una pluralidad de instancias de puntos de señal de ángulo de cabeceo (que forman una curva de señal del ángulo de cabeceo) que pueden depender de (o variar según) un parámetro tal como la potencia de salida, el par del generador, la velocidad del viento, la velocidad de rotación, etc. Lo mismo vale para el primer ángulo de cabeceo y el segundo ángulo de cabeceo, que también pueden referirse a las curvas correspondientes.

Cuando se escribe ángulo de cabeceo, puede referirse a un solo punto de ángulo de cabeceo asociado con la curva de ángulo de cabeceo mencionada o a la curva de ángulo de cabeceo asociada que comprende una pluralidad de puntos de ángulo de cabeceo.

Según la invención, el método comprende además obtener una señal de potencia o señal de par (tal como potencia eléctrica de salida, par en el generador o similar) indicativa de una potencia de salida o par de la turbina eólica o indicativa de una velocidad del viento (en particular, una potencia eléctrica de salida de la turbina eólica), en el que la derivación de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo se basa además en la señal de potencia (de modo que la señal de potencia se tiene en cuenta para derivar la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo), en el que la derivación de la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo también se basa además en la señal de potencia.

En particular, la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo puede cambiar cuando cambia la señal de potencia. Además, la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo puede cambiar cuando cambia la señal de potencia. Tener en cuenta también la potencia de salida de la turbina eólica para derivar las señales de ajuste del ángulo de cabeceo (y eventualmente ajustar los ángulos de cabeceo) puede mejorar aún más la eficiencia de la turbina eólica. En otras realizaciones, pueden tenerse en cuenta otros parámetros o parámetros adicionales que definen la condición de funcionamiento o el modo de funcionamiento de la turbina eólica, para derivar las señales de ajuste del ángulo de cabeceo, tal como la velocidad del viento, la temperatura, el área de barrido del rotor, la densidad del aire, la velocidad efectiva del viento en el rotor, y similares. La señal de ajuste del primer/segundo ángulo de cabeceo puede establecerse en función de la velocidad del viento medida, la velocidad del viento estimada o la velocidad de rotación en lugar de la potencia/par.

Según la invención, la señal de potencia indica que la potencia de salida de la turbina eólica es menor que la potencia de salida nominal de la turbina eólica. En particular, la potencia de salida nominal puede definirse para representar la

potencia de salida máxima de la turbina para un funcionamiento continuo, donde la carga mecánica y/o electrónica sobre los componentes de la turbina eólica están en un intervalo aceptable. Además, la potencia de salida nominal de la turbina eólica puede definirse mediante un controlador de parque para hacerse funcionar apropiadamente un parque eólico que comprende una pluralidad de turbinas eólicas. La potencia de salida nominal puede definir una potencia de salida activa particular y una potencia de salida reactiva particular. En particular, durante una condición de funcionamiento de la turbina eólica, mientras que la turbina eólica produce una potencia de salida por debajo de la potencia de salida nominal, el árbol del rotor puede hacerse rotar por debajo de la velocidad de rotación máxima deseada. En particular, cuando la turbina eólica funciona por debajo de la potencia de salida nominal, la producción de potencia puede ser muy sensible al ángulo de cabeceo ajustado de las palas de rotor.

Según la presente invención, se proporciona un método para ajustar el ángulo de cabeceo de una pala de rotor de una turbina eólica, en el que el método comprende determinar una señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo y una señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo para ajustar el ángulo de cabeceo de una pala de rotor conectada a un árbol de rotación de una turbina eólica según las etapas del método descritas anteriormente; ajustar (que comprende, en particular, suministrar la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo a una disposición de ajuste y/o a un accionador y hacer rotar o girar o bascular la pala de rotor alrededor de un eje longitudinal de la pala de rotor para establecer una posición angular particular) el ángulo de cabeceo (que puede definirse como un ángulo entre una línea de cuerda de la pala de rotor y un plano de rotación que es perpendicular al eje de rotación del árbol de rotación) de la pala de rotor a un primer ángulo de cabeceo a base de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo; y luego ajustar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor a un segundo ángulo de cabeceo a base de la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo.

En particular, las señales de ajuste del ángulo de cabeceo (por ejemplo, dadas en unidades de voltios, grados, metros) pueden ser proporcionales a los ángulos de cabeceo ajustados respectivos (por ejemplo, medidos en unidades de grados). En particular, las señales de ajuste del ángulo de cabeceo pueden ser señales eléctricas que pueden suministrarse a al menos un accionador que está dispuesto y adaptado para hacer rotar o girar la pala de rotor alrededor de su eje longitudinal.

En particular, la pala de rotor puede comprender un borde de aguas arriba o un borde de ataque y un borde de aguas abajo o un borde de salida, en la que el viento puede golpear o impactar la pala de rotor primero en el borde de ataque y luego puede fluir a lo largo de una cara frontal de la pala de rotor y una cara trasera de la pala de rotor (que puede tener, en particular, una trayectoria más larga o una superficie mayor que la cara delantera) y puede llegar entonces al borde de salida de la pala de rotor. Aumentar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor puede implicar girar el borde de ataque hacia el viento y girar el borde de salida alejándolo del viento. En particular, puede lograrse un ángulo de cabeceo de 0° colocando el borde de ataque así como el borde de salida (ambos comprendidos en una línea de cuerda de la pala de rotor) dentro del plano de rotación que es perpendicular al árbol de rotación.

En particular, el árbol de rotación puede estar orientado al menos aproximadamente a lo largo de la dirección del viento. Ajustar los ángulos de cabeceo al primer ángulo de cabeceo y al segundo ángulo de cabeceo, respectivamente, mientras la velocidad de rotación máxima se establece en la primera velocidad de rotación máxima deseada y la segunda velocidad de rotación máxima deseada, respectivamente, puede mejorar la eficiencia de la turbina eólica con respecto a la potencia de salida.

Según una realización de la presente invención, el primer ángulo de cabeceo y/o el segundo ángulo de cabeceo aumenta o disminuye o es al menos aproximadamente constante para un aumento de potencia de salida de la turbina eólica y/o para un aumento de velocidad del viento. Típicamente, el primer ángulo de cabeceo y/o el segundo ángulo de cabeceo pueden aumentar para un aumento de potencia de salida de la turbina eólica, para reducir el ruido y/o las cargas. Además, puede mejorarse la eficiencia de la turbina eólica con respecto a su potencia de salida.

Según la presente invención, la segunda velocidad de rotación máxima deseada es menor que la primera velocidad de rotación máxima deseada, en la que el segundo ángulo de cabeceo es mayor que el primer ángulo de cabeceo. Establecer el segundo ángulo de cabeceo mayor que el primer ángulo de cabeceo puede mejorar la producción de potencia, al mismo tiempo que se asegura que no se exceda la segunda velocidad de rotación máxima deseada. De ese modo, en particular, también puede lograrse el control con respecto a las emisiones de ruido y/o la reducción de la carga, mientras se mejora la producción de potencia.

Según una realización de la presente invención, el segundo ángulo de cabeceo es, en particular, para una potencia de salida y/o una velocidad del viento dadas, tanto mayor que el primer ángulo de cabeceo cuanto menor es la segunda velocidad de rotación máxima deseada en comparación con la primera velocidad de rotación máxima deseada. En particular, una diferencia o una relación del segundo ángulo de cabeceo y el primer ángulo de cabeceo puede ser mayor cuanto mayor sea la diferencia o la relación entre la primera velocidad de rotación máxima deseada y la segunda velocidad de rotación máxima deseada. De este modo, puede mejorarse adicionalmente la eficiencia de la turbina eólica.

Según una realización de la presente invención, el segundo ángulo de cabeceo (en particular, la segunda curva de ángulo de cabeceo) aumenta de manera más marcada (en particular, tiene una pendiente más pronunciada cuando

se representa en función de la potencia de salida) para un aumento de potencia de salida y/o un aumento de velocidad del viento que el primer ángulo de cabeceo (en particular, la primera curva de ángulo de cabeceo).

5 En particular, una pendiente o una magnitud de una pendiente puede aumentar, cuando aumenta la diferencia o la relación entre la primera velocidad de rotación máxima deseada y la segunda velocidad de rotación máxima deseada. De ese modo, la potencia de salida de la turbina eólica puede incrementarse aún más.

10 Según una realización de la presente invención, la segunda velocidad de rotación máxima deseada se encuentra entre el 0% y por debajo del 100%, en particular, entre el 10% y el 95%, además en particular entre el 50% y el 90% de la primera velocidad de rotación máxima deseada. De ese modo, en particular, pueden cumplirse las normas relativas a la emisión de ruidos.

15 Según la presente invención, el primer ángulo de cabeceo y el segundo ángulo de cabeceo son (al menos aproximadamente, en particular, en un intervalo de $\pm 3^\circ$ alrededor de una posición central) constantes para la potencia de salida por debajo de un umbral. En particular, el umbral puede ser inferior a la potencia de salida nominal. En particular, el umbral puede estar relacionado con la situación, cuando la velocidad de rotación del árbol de rotación alcanza la velocidad de rotación máxima deseada. En particular, mantener constante el primer ángulo de cabeceo y/o el segundo ángulo de cabeceo para la potencia de salida por debajo del umbral puede simplificar el método para ajustar el ángulo de cabeceo.

20 En particular, por debajo de un umbral, el primer ángulo de cabeceo y/o el segundo ángulo de cabeceo pueden no ser constantes, sino que pueden ser iguales a la trayectoria de cabeceo nominal utilizada convencionalmente que puede variar para variar la potencia de salida.

25 Según una realización de la presente invención, el primer ángulo de cabeceo es (al menos aproximadamente) constante para una velocidad de rotación por debajo de la primera velocidad de rotación deseada y/o el segundo ángulo de cabeceo es (al menos aproximadamente) constante para una velocidad de rotación por debajo de la segunda velocidad de rotación deseada.

30 En particular, el primer ángulo de cabeceo es (al menos aproximadamente) igual a una curva de ángulo de cabeceo nominal para una velocidad de rotación por debajo de la primera velocidad de rotación deseada y/o el segundo ángulo de cabeceo es (al menos aproximadamente) igual a la curva de ángulo de cabeceo nominal para una velocidad de rotación por debajo de la segunda velocidad de rotación deseada. Por lo tanto, la curva de ángulo de cabeceo nominal (también denominada "trayectoria de cabeceo nominal") puede o no ser constante para un aumento de potencia de salida. En particular, el primer ángulo de cabeceo y los segundos ángulos de cabeceo pueden ser iguales por debajo de la segunda velocidad de rotación deseada.

35 De ese modo, el método puede simplificarse, manteniendo al mismo tiempo una potencia de salida óptima. Según otras realizaciones, incluso por debajo de la respectiva velocidad de rotación deseada, el ángulo de cabeceo varía para condiciones de viento variables u otros parámetros variables que definen el punto de funcionamiento de la turbina eólica.

40 Según una realización de la presente invención, el primer ángulo de cabeceo es (al menos aproximadamente) igual al segundo ángulo de cabeceo para una velocidad de rotación por debajo de la segunda velocidad de rotación deseada y/o el segundo ángulo de cabeceo es (al menos aproximadamente) igual al primer ángulo de cabeceo por debajo de la segunda velocidad de rotación. De ese modo, el método puede simplificarse, manteniendo al mismo tiempo una potencia de salida óptima.

45 Según una realización, cuando se desea la segunda velocidad de rotación deseada como la velocidad de rotación del árbol de rotación, el ajuste del ángulo de cabeceo al segundo ángulo de cabeceo da como resultado una mayor potencia de salida de la turbina eólica que el ajuste del ángulo de cabeceo al primer ángulo de cabeceo. De este modo, puede aumentarse la potencia de salida de la turbina eólica.

50 Debe entenderse que las características (individualmente o en cualquier combinación) divulgadas, descritas, explicadas y/o aplicadas a un método para ajustar un ángulo de cabeceo también pueden aplicarse, usarse o proporcionarse (individualmente o en cualquier combinación) a una disposición para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor de una turbina eólica según una realización de la presente invención, y viceversa.

55 Según la presente invención, se proporciona una disposición para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor de una turbina eólica mientras la potencia de salida de la turbina eólica es menor que la potencia de salida nominal. La disposición comprende un módulo informático para determinar señales de ajuste de ángulo de cabeceo para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor conectada a un árbol de rotación de una turbina eólica, en la que el módulo informático está adaptado para: obtener una primera señal de velocidad máxima indicativa de una primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación, en particular, una velocidad de rotación nominal; derivar una señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo a base de la primera señal de velocidad máxima; obtener una segunda señal de velocidad máxima indicativa de una segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación diferente

de, en particular, menor que, la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación; derivar una señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo a base de la segunda señal de velocidad máxima, en la que la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo es diferente de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo, en la que la disposición para ajustar un ángulo de cabeceo comprende además: una disposición de ajuste adaptada: para ajustar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor a un primer ángulo de cabeceo a base de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo; y después para ajustar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor a un segundo ángulo de cabeceo a base de la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo, en la que la segunda velocidad de rotación máxima deseada es menor que la primera velocidad de rotación máxima deseada, en la que el segundo ángulo de cabeceo es mayor que el primer ángulo de cabeceo, en la que el primer ángulo de cabeceo y el segundo ángulo de cabeceo son constantes para la potencia de salida por debajo de un umbral, en la que el primer ángulo de cabeceo es el ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación, en la que el segundo ángulo de cabeceo es el ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación, en la que la disposición está configurada además para obtener una señal de potencia indicativa de una potencia de salida, para derivar la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo además a base de la señal de potencia, para derivar la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo se basa en la señal de potencia.

El módulo informático para determinar señales de ajuste del ángulo de cabeceo para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor conectada a un árbol de rotación de una turbina eólica está adaptado para obtener (en particular, que comprende suministrar una señal óptica o eléctrica) una primera señal de velocidad máxima (tal como una señal óptica o una señal eléctrica) indicativa de una primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación (al que está conectada la pala de rotor); para derivar una señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo (en particular, una señal óptica o una señal eléctrica) a base de la primera señal de velocidad máxima; para obtener (en particular, a través de un terminal de entrada, en particular, un terminal de entrada eléctrica) una segunda señal de velocidad máxima (en particular, una señal óptica o una señal eléctrica) indicativa de una segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación diferente de, en particular menor que, la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación; y para derivar (en particular, mediante la ejecución de un programa en un procesador, la realización de un cálculo numérico y/o analítico, la lectura de uno o más datos de referencia o de calibración de un almacenamiento de datos) una señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo (en particular, una señal óptica o una señal eléctrica) a base de la segunda señal de velocidad máxima, en el que la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo es diferente de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo.

El módulo informático puede implementarse en hardware y/o en software. El módulo informático puede ser un circuito integrado de aplicación específica (ASIC) y/o puede representarse como un código de software legible por máquina. El módulo informático puede comprender uno o más terminales de entrada y uno o más terminales de salida. En particular, el módulo informático puede estar comprendido en un controlador de turbina eólica. El controlador de la turbina eólica puede controlar el funcionamiento de la turbina eólica, tal como controlar la velocidad de rotación del árbol de rotación ajustando los ángulos de cabeceo de las palas de rotor, ajustando la potencia de salida (o par) de un convertidor conectado al generador, etc. Por lo tanto, en particular, el módulo informático puede adaptarse para realizar un método para determinar las señales de ajuste del ángulo de cabeceo según una realización como se explicó anteriormente.

La disposición de ajuste puede comprender, en particular, un accionador, tal como un motor eléctrico o un sistema hidráulico, que está adaptado para hacer rotar la pala de rotor alrededor de su eje longitudinal (que es, en particular, perpendicular al árbol de rotación).

Debe señalarse que se han descrito realizaciones de la invención con referencia a diferentes objetos. En particular, algunas realizaciones se han descrito con referencia a reivindicaciones de tipo método, mientras que otras realizaciones se han descrito con referencia a reivindicaciones de tipo aparato. Sin embargo, un experto en la técnica deducirá de la descripción anterior y a continuación que, a menos que se indique lo contrario, además de cualquier combinación de características pertenecientes a un tipo de objeto, también cualquier combinación entre características relacionadas con diferentes objetos, en particular entre las características de las reivindicaciones de tipo método y las características de las reivindicaciones de tipo aparato, se considera que se divulga con este documento.

Los aspectos definidos anteriormente y aspectos adicionales de la presente invención son evidentes a partir de los ejemplos de realización que se describirán a continuación y se explican con referencia a los ejemplos de realización. La invención se describirá con más detalle a continuación con referencia a ejemplos de realización, pero a los que la invención no se limita.

Breve descripción de los dibujos

Se describen ahora realizaciones de la presente invención con referencia a los dibujos adjuntos. La invención no se limita a las realizaciones ilustradas o descritas. En los dibujos, los mismos números de referencia pueden indicar elementos similares en estructura y/o función. Por lo tanto, los números de referencia de elementos similares pueden diferir solo en el primer dígito.

La figura 1 y la figura 2 ilustran gráficos considerados durante un método según una realización de la presente invención;

- 5 La figura 3 y la figura 4 ilustran gráficos para explicar los modos de funcionamiento de una turbina eólica considerada en un método según una realización de la presente invención;

La figura 5 ilustra un gráfico a partir del cual pueden derivarse señales o ángulos de cabeceo y que pueden considerarse en un método según una realización de la presente invención;

- 10 La figura 6 ilustra esquemáticamente una disposición para ajustar un ángulo de cabeceo según una realización de la presente invención, que comprende un módulo informático para determinar las señales de ajuste del ángulo de cabeceo según una realización de la presente invención; y

- 15 La figura 7 ilustra esquemáticamente una vista en sección transversal de una pala de rotor para definir, en particular, un ángulo de cabeceo de la pala de rotor y otras propiedades de la pala de rotor relacionadas con métodos según realizaciones de la presente invención.

Descripción detallada

- 20 Las ilustraciones en los dibujos son de forma esquemática. Se observa que, en figuras diferentes, elementos similares o idénticos están provistos de los mismos signos de referencia o con signos de referencia que son diferentes de los signos de referencia correspondientes solo en el primer dígito.

- 25 La figura 1 ilustra un gráfico 100 que muestra en una ordenada el ángulo de cabeceo óptimo β y en una abscisa una velocidad de rotación máxima normalizada (como una relación con respecto a una velocidad de rotación máxima de diseño), en el que una curva 103 indica el ángulo de cabeceo óptimo β en función de la velocidad de rotación máxima normalizada.

- 30 Un punto 105 en las coordenadas (1, -2°) puede corresponder a una situación en la que la turbina eólica funciona a la velocidad de rotación de diseño del árbol de rotación. Según las normas o una demanda por parte del controlador de un parque eólico, la velocidad de rotación máxima puede establecerse por encima o por debajo de la velocidad de rotación máxima de diseño.

- 35 El gráfico 100 ilustrado en la figura 1 se refiere a una condición externa, en la que la velocidad del viento asciende a 9 m/s. Como puede deducirse del gráfico 100 de la figura 1, el ángulo de cabeceo óptimo β varía en un intervalo entre alrededor de 13° y -2° . En particular, a una velocidad de rotación máxima normalizada de 0,3, el ángulo de cabeceo óptimo asciende a alrededor de 13° y luego disminuye hasta la velocidad de rotación máxima normalizada de 0,9 a un valor de aproximadamente -2° . A partir de la velocidad de rotación máxima normalizada de 0,9, el ángulo de cabeceo óptimo β (curva 103) aumenta desde alrededor de -2° hasta alrededor de 0° a la velocidad de rotación máxima normalizada de 1,2. En particular, a una velocidad del viento de 9 m/s, la turbina eólica puede producir una potencia eléctrica por debajo de la potencia eléctrica de régimen o de la potencia de salida nominal.

- 45 El gráfico 101 ilustrado en la figura 2 muestra en su abscisa la velocidad de rotación máxima normalizada y en su ordenada el aumento de potencia para la referencia de cabeceo corregida por la velocidad de rotación, es decir, el aumento de la potencia de salida, cuando el ángulo de cabeceo se establece según la curva 103 en el gráfico 100 ilustrado en la figura 1. En particular, la curva 107 en el gráfico 101 de la figura 2 ilustra el aumento de potencia en porcentaje en relación con el caso en el que el ángulo de cabeceo se establece en $-2,0^\circ$ correspondiente al valor del ángulo de cabeceo a la máxima velocidad de rotación de diseño (punto 105 en el gráfico 100 de la figura 1). Como puede deducirse del gráfico 101 de la figura 2, el aumento de potencia de salida asciende a aproximadamente el 100% a la velocidad de rotación máxima normalizada de 0,3 y luego disminuye para aumentar la velocidad de rotación máxima normalizada a aproximadamente el 0% a la velocidad de rotación máxima normalizada de alrededor de 0,65. Por lo tanto, establecer el ángulo de cabeceo según la curva 103 ilustrada en el gráfico 100 de la figura 1 mejorará, en particular la potencia de salida en la región por debajo de 0,65 (en particular, entre 0,3 y 0,65) de la velocidad de rotación máxima normalizada, en particular, al bajar la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación por debajo de la velocidad de rotación de diseño (correspondiente al valor de abscisa 1,0 en los gráficos 100 y 101).

- 55 En particular, la figura 3 y la figura 4 muestran lo que puede llamarse la "trayectoria de funcionamiento nominal de la velocidad de rotación y la potencia eléctrica de salida", respectivamente. En promedio, la velocidad de rotación y la potencia pueden ser como se muestra en la figura 3 y en la figura 4 en función de la velocidad del viento.

- 60 La figura 3 ilustra un gráfico 209 que ilustra en su abscisa la velocidad del viento en m/s y en su ordenada la velocidad del generador o la velocidad de rotación del árbol de rotación en rpm. En particular, una curva 211 ilustra la dependencia de la velocidad de rotación de la velocidad del viento cuando la velocidad de rotación máxima se establece en una primera velocidad de rotación máxima ms1 deseada que corresponde a aproximadamente 1500 rpm.

Otra curva 213 ilustra la dependencia de la velocidad de rotación del árbol de rotación cuando la velocidad de rotación máxima se establece en una segunda velocidad de rotación máxima $ms2$ deseada que corresponde aproximadamente a 1100 rpm. Según una realización, la velocidad de rotación máxima $ms1$ puede considerarse como una primera velocidad de rotación máxima deseada y $ms2$ puede considerarse como una segunda velocidad de rotación máxima deseada. Según una realización, la primera velocidad de rotación máxima deseada puede ser la velocidad de rotación máxima de diseño. Cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en el valor $ms2$, la velocidad de rotación aumenta en una región 215 desde aproximadamente 500 rpm (signo de referencia 217) hasta el valor $ms2$ y la velocidad de rotación permanece constante en una región 219 y más allá de la región 219. Cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en el valor $ms1$, la velocidad de rotación aumenta en una región 221 desde aproximadamente 500 rpm (signo de referencia 217) hasta el valor $ms1$ y la velocidad de rotación permanece constante en una región 223 y más allá de la región 223.

En particular, la velocidad de rotación máxima $ms2$ deseada se alcanza para una velocidad del viento más baja que la velocidad de rotación máxima $ms1$ deseada.

Cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en el valor $ms1$, la velocidad de rotación aumenta desde el valor de 500 rpm (signo de referencia 217) en una región (región de velocidad del viento) 221 de forma lineal hasta la primera velocidad de rotación máxima $ms1$ deseada. En una región 223 y más allá de la región 223, la velocidad de rotación se mantiene en el valor $ms1$. Según realizaciones de la presente invención, el ajuste del ángulo de cabeceo de una pala de rotor se realiza en las regiones 215, 219 (o solo en la región 219), cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en la segunda velocidad máxima $ms2$ deseada. Además, según una realización, el ángulo de cabeceo se ajusta en las regiones 221, 223 (o solo en la región 223), cuando la primera velocidad de rotación máxima $ms1$ deseada se establece como la velocidad de rotación máxima deseada.

El gráfico 225 de la figura 4 ilustra en su abscisa la velocidad del viento en m/s y en su abscisa la potencia de salida P de la turbina eólica en kW. De ese modo, una curva 227 representa la potencia de salida P de la turbina eólica en función de la velocidad del viento. Como puede verse en la unión de las regiones 215 y 219 o la unión de las regiones 221 y 223, respectivamente, la potencia de salida aumenta desde un valor ligeramente superior a 0 kW hasta un valor de unos 2200 kW. Más allá de la velocidad del viento de alrededor de 12 m/s (signo de referencia 229), la potencia de salida permanece en la potencia de salida nominal np . Así, las regiones 215, 219 ó 221, 223, respectivamente, corresponden a las condiciones de funcionamiento de la turbina eólica, en las que la turbina eólica funciona por debajo de la potencia nominal np o potencia de salida de régimen de la turbina eólica.

En particular, cuando se utiliza la velocidad máxima $ms2$ reducida, puede ser necesario reducir también la potencia, si ha de mantenerse el mismo par del generador (es decir, si no ha de aumentarse el par nominal del generador). Debe tenerse en cuenta que potencia = velocidad * par, por lo que cuando se reduce la velocidad máxima, puede ser necesario reducir también la potencia para no sobrecargar los componentes mecánicos, por ejemplo, el tren de transmisión. Del mismo modo, esto también puede ser necesario para no sobrecargar la electrónica de potencia o los componentes eléctricos, por ejemplo, causado por corrientes demasiado altas.

En particular, el ajuste del ángulo de cabeceo óptimo según la curva 103 en el gráfico 100 de la figura 1 se realiza especialmente en las regiones 215, 219 ó 221 y 223, respectivamente. En particular, el ajuste del ángulo de cabeceo óptimo según la curva 103 en el gráfico 100 de la figura 1 puede aplicarse en situaciones en las que la turbina eólica funciona por debajo de la potencia de régimen o nominal, pero donde la velocidad del viento es lo suficientemente grande como para que la velocidad de rotación del árbol de rotación pueda exceder la velocidad de rotación máxima deseada.

Según una realización, la referencia de ángulo de cabeceo puede basarse en la velocidad de rotación máxima. La potencia captada por una turbina eólica puede expresarse como:

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot v^3$$

dónde P es la potencia captada por la turbina eólica [W], ρ es la densidad del aire [kg/m^3], A es el área de barrido del rotor [m^2], C_p es el coeficiente de potencia de la turbina, v es la velocidad efectiva del viento del rotor [m/s].

Por lo tanto, el coeficiente de potencia C_p puede ser una función del ángulo de cabeceo β y de la relación de la velocidad de punta (la relación entre la velocidad de la punta de pala y la velocidad del viento). Esto significa que la eficiencia de la turbina puede maximizarse para un cierto ángulo de cabeceo β y para una relación de velocidad de la punta dada.

Si la referencia de cabeceo no se compensa según la curva 103 representada en el gráfico 100 de la figura 1, puede obtenerse un punto de funcionamiento subóptimo. Sin embargo, si el ángulo de cabeceo β se establece a base de la velocidad de rotación máxima actual, es decir, la primera velocidad máxima $ms1$ deseada o la segunda velocidad de rotación máxima $ms2$ deseada, respectivamente, puede ser posible maximizar la producción de potencia P de la turbina eólica.

Típicamente, el ángulo de cabeceo óptimo puede fijarse para funcionar por debajo de la velocidad de rotación de régimen (también conocida como velocidad nominal). La curva 103 ilustrada en el gráfico 100 de la figura 1 ilustra de qué manera el ángulo de cabeceo β óptimo depende de la velocidad de rotación máxima. Del gráfico 101 de la figura 2 puede concluirse que puede lograrse una ganancia de potencia significativa ajustando el ángulo de cabeceo β según la curva 103 ilustrada en el gráfico 100 de la figura 1.

El ángulo de cabeceo óptimo (como se ilustra con la curva 103 en el gráfico 100 de la figura 1) puede cambiar con diferentes velocidades del viento. Típicamente, la velocidad del viento puede mapearse en un valor de potencia usando una curva de potencia (tal como una curva 227 como se muestra en el gráfico 225 de la figura 4) y la referencia de cabeceo puede establecerse luego usando la referencia de potencia o de par actual. La curva de potencia 227 en el gráfico 225 de la figura 4 puede especificar la producción de potencia esperada en función de la velocidad del viento. Alternativamente, la referencia de cabeceo para un funcionamiento por debajo de la velocidad de régimen puede establecerse como una función de la velocidad de rotación o la velocidad del viento. En particular, la velocidad de rotación también puede expresarse como una frecuencia de rotación del árbol de rotación.

La figura 5 ilustra un gráfico que muestra en su abscisa la potencia p por unidad (es decir, en unidades como una relación de la potencia de salida nominal) y mostrando en su ordenada la referencia de cabeceo óptima o el ángulo de cabeceo β óptimo en grados. Una curva 331 ilustra la dependencia del ángulo de cabeceo β cuando el 100% de la velocidad de diseño se establece como la velocidad de rotación máxima deseada. Como puede verse, el ángulo de cabeceo β óptimo según la curva 331 es constante (valor β_0) para un aumento de potencia de salida en un intervalo de 0 a 1, es decir, 0 kW a la potencia de salida nominal, tal como, por ejemplo, por encima de 2000 kW. Alternativamente, el ángulo de cabeceo β óptimo también puede no ser constante para un aumento de potencia de salida dependiendo de las propiedades aerodinámicas del rotor. En particular, puede ser necesario cambiar (por ejemplo, aumentar) el ángulo de cabeceo típicamente en la parte de la región 219 en la figura 3 y la figura 4 donde la velocidad de rotación es constante.

La curva 333 ilustra el caso, cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en el 70% de la velocidad de diseño, en el que la velocidad de diseño puede ser, en particular, la velocidad de rotación máxima nominal según lo establecido por las propiedades mecánicas y/o electrónicas de la turbina eólica teniendo en cuenta donde las configuraciones relacionadas y/o los requisitos o consideraciones relacionadas con la carga. Como puede verse, el ángulo de cabeceo β óptimo según la curva 333 aumenta aproximadamente de manera lineal para una potencia de salida por encima de aproximadamente 0,55 (umbral th_3) hasta una potencia de salida de 0,7. El punto final de la porción continua de la curva 333 puede corresponder a un par nominal. El ángulo de cabeceo puede ajustarse según las porciones discontinuas de las curvas 333, 335, 337, 339, que pueden corresponder a un par mayor que un par nominal, si se pretende que la turbina eólica funcione (temporalmente) por encima del par de régimen o nominal.

Reducir la velocidad de rotación máxima a menudo puede dar como resultado una reducción igual (o proporcional) de la potencia de salida máxima para evitar aumentar el par en el generador y, en particular, en la caja de engranajes (si la hay). También las corrientes eléctricas en la electrónica de potencia (convertidor, generador) aumentarán si aumenta el par. Por lo tanto, la turbina a menudo habrá alcanzado una región más allá de las regiones 219, 223 en la figura 3 y la figura 4, donde puede controlarse la velocidad mediante cabeceo (aplicar un ángulo de cabeceo no óptimo para reducir el valor c_p , que es el coeficiente de potencia del rotor).

La curva 335 en la figura 5 ilustra el caso, cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en el 60% de la velocidad de diseño. Como puede verse en la figura 5, el ángulo de cabeceo óptimo según la curva 335 es mayor que el ángulo de cabeceo para la curva 333 y mayor que el ángulo de cabeceo según la curva 331. En particular, el ángulo de cabeceo según la situación, cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en el 60% de la velocidad de diseño (curva 335) aumenta de forma aproximadamente lineal para una potencia superior a aproximadamente 0,33 (umbral th_5) a una potencia de aproximadamente 0,6 por unidad.

La curva 337 ilustra el ángulo de cabeceo β óptimo en el caso de que la velocidad de rotación máxima deseada se establezca en una primera velocidad de rotación máxima deseada, en el ejemplo ilustrado, el 50% de la velocidad de diseño. Además, la curva 339 ilustra el ángulo de cabeceo β óptimo en el caso, cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en una segunda velocidad de rotación máxima deseada, en el ejemplo ilustrado, el 40% de la velocidad de diseño.

A modo de ilustración y explicación, el ángulo de cabeceo β para los dos casos ahora se compararán a una potencia de salida normalizada p de 0,2 a modo de ilustración. Cuando la velocidad de rotación máxima deseada se establece en la primera velocidad de rotación máxima deseada (tal como ms_1 , como se ilustra en el gráfico 209 de la figura 3), el ángulo de cabeceo β óptimo equivale a β_1 . Por el contrario, cuando la segunda velocidad de rotación máxima deseada se establece como la velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación (es decir, ms_2 como se indica en el gráfico 209 en la figura 3), el ángulo de cabeceo β óptimo asciende a β_2 , que es por una cantidad $\Delta\beta$ mayor que el primer ángulo de cabeceo β_1 . Esta diferencia asciende a unos 8° en el ejemplo ilustrado. Además, las pendientes de las curvas 337 y 339 son diferentes. En particular, la pendiente de la curva 337 en el punto (p, β_1)

asciende a $\Delta\beta_1/\Delta p$ que es menor que la pendiente de la curva 339 que asciende al mismo valor de abscisa p a $\Delta\beta_2/\Delta p$.

Según una realización, un método para ajustar el ángulo de cabeceo de una pala puede comprender las siguientes etapas:

1. Determinar la referencia de potencia (referencia de par, velocidad del viento o velocidad de rotación)
2. Determinar la velocidad máxima actual (es decir, definir la velocidad de rotación máxima deseada) que puede ser una reducción de la velocidad de diseño (o velocidad nominal).
3. Ajustar la referencia de cabeceo en consecuencia (es decir, ajustar el ángulo de cabeceo). Esto puede hacerse calculando la referencia de cabeceo óptima o el ángulo de cabeceo o la señal de ajuste de cabeceo como una función de la velocidad máxima actual (la velocidad máxima deseada) a base de ecuaciones o tablas de consulta que capturan las relaciones ilustradas en las figuras 1, 2 y/o 3. Según una realización, el ángulo de cabeceo se optimiza con respecto a las cargas estructurales, las emisiones de ruido acústico y, al mismo tiempo, se optimiza la eficiencia energética.

La figura 6 ilustra esquemáticamente una disposición 440 para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala 441 de rotor según una realización de la presente invención, que comprende un módulo 443 informático según una realización de la presente invención. A través de una línea 445 de entrada, el módulo 443 informático recibe una primera señal de velocidad máxima ms_1 o una segunda señal de velocidad máxima ms_2 que indican una primera velocidad de rotación máxima ms_1 deseada y una segunda velocidad de rotación máxima ms_2 deseada, respectivamente. Además, el módulo 443 informático recibe a través de una línea 447 de entrada una señal indicativa de una potencia de salida p (o P) de la turbina eólica o par o velocidad del viento. Por lo tanto, p indica una potencia de salida normalizada (con respecto a una potencia de salida nominal) y P indica la potencia de salida absoluta.

Además, el módulo 443 informático tiene acceso a un dispositivo 449 de almacenamiento que puede almacenar datos o coeficientes para una función que representa al menos una curva de los gráficos ilustrados en las figuras 1, 2 y/o 3. En particular, la curva 103 del gráfico 100 ilustrado en la figura 1 y las curvas 331, 333, 335, 337, 339 ilustradas en la figura 5 pueden representarse en alguna estructura de datos almacenada en el dispositivo 449 de almacenamiento y siendo accesible por el módulo 443 informático. En particular, el dispositivo 449 de almacenamiento puede proporcionar datos de calibración o datos de referencia al módulo 443 informático.

A base de la señal de velocidad máxima suministrada a través de la línea 445 y la señal de potencia suministrada por la línea 447, el módulo 443 informático determina una señal de ajuste del ángulo de cabeceo (a base de una primera señal de velocidad máxima o una segunda señal de velocidad máxima) y suministra la respectiva señal de ajuste del ángulo de cabeceo $s\beta_1$, $s\beta_2$, respectivamente, a través de una línea 451 de señal a un accionador 453. El accionador 453, por ejemplo, un motor eléctrico o un sistema hidráulico, está conectado mecánicamente a la pala 441 de rotor y hace rotar mecánicamente la pala de rotor alrededor de su eje 455 longitudinal para ajustar el ángulo de cabeceo β según la señal de ajuste del ángulo de cabeceo derivada.

La figura 7 ilustra esquemáticamente una vista en sección transversal (perfil aerodinámico) de una pala 541 de rotor vista a lo largo de un eje 555 longitudinal de la pala de rotor. El eje 557 vertical representa el eje de rotor del rotor 559 y el eje 561 horizontal se encuentra dentro del plano de rotación en el que rota la pala 541 de rotor.

La pala 541 de rotor comprende una superficie 563 superior y una superficie 565 inferior, donde la superficie 565 inferior está orientada hacia el viento que se propaga en una dirección 567 del viento. Puede definirse una llamada línea 569 de cuerda que representa la línea recta que conecta los bordes delantero y trasero del perfil aerodinámico de la pala. La línea 569 de cuerda se encuentra en un plano 571. Un ángulo β entre el plano 561 de rotación y el plano 571 de cuerda define el ángulo de cabeceo de la pala 541 de rotor. Cuando el plano 571 de cuerda coincide con el plano 561 de rotación, el ángulo de cabeceo de la pala es de cero grados, cuando el plano 571 de cuerda rota en el sentido de las agujas del reloj, el ángulo de cabeceo de la pala aumenta desde cero hasta valores positivos. En particular, el aumento del ángulo de cabeceo da como resultado un cabeceo hacia la posición de bandera, mientras que la disminución del ángulo de cabeceo da como resultado un cabeceo hacia la pérdida.

Debe indicarse que el término "que comprende" no excluye otros elementos o etapas, y "un" o "una" no excluye una pluralidad. Además, pueden combinarse elementos descritos en asociación con diferentes realizaciones. Debe tenerse en cuenta también que los signos de referencia en las reivindicaciones no deben interpretarse como una limitación del alcance de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Método para ajustar un ángulo de cabeceo de una pala de rotor conectada a un árbol de rotación de una turbina eólica, comprendiendo el método, mientras que una potencia de salida de la turbina eólica es menor que una potencia de salida nominal:
 - obtener una primera señal de velocidad máxima (ms_1) indicativa de la primera velocidad de rotación máxima (ms_1) deseada del árbol de rotación;
 - derivar una señal de ajuste ($s\beta_1$) del primer ángulo de cabeceo (β_1) a base de la primera señal de velocidad máxima;
 - ajustar el ángulo de cabeceo (β) de la pala de rotor a un primer ángulo de cabeceo (β_1) a base de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo; después
 - obtener una segunda señal de velocidad máxima indicativa de una segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación diferente de la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación;
 - derivar una señal de ajuste ($s\beta_2$) del segundo ángulo de cabeceo (β_2) a base de la segunda señal de velocidad máxima, en el que la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo es diferente de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo; y
 - ajustar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor a un segundo ángulo de cabeceo (β_2) a base de la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo,
 - en el que la segunda velocidad de rotación máxima (ms_2) deseada es menor que la primera velocidad de rotación máxima (ms_1) deseada, en el que el segundo ángulo de cabeceo (β_2) es mayor que el primer ángulo de cabeceo (β_1),
 - en el que el primer ángulo de cabeceo (β_1) y el segundo ángulo de cabeceo (β_2) son constantes para la potencia de salida por debajo de un umbral (th_3 , th_5 , th_7 , th_9),
 - en el que el primer ángulo de cabeceo es el ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación,
 - en el que el segundo ángulo de cabeceo es el ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación,
 - comprendiendo el método además:
 - obtener una señal de potencia (p) indicativa de una potencia de salida,
 - en el que la derivación de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo se basa además en la señal de potencia,
 - en el que la derivación de la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo se basa además en la señal de potencia.
2. Método según la reivindicación 1, en el que la señal de potencia (p) es indicativa de una velocidad del viento.
3. Método según la reivindicación 1 ó 2, en el que la señal de potencia indica que la potencia de salida de la turbina eólica es menor que la potencia de salida nominal (np) de la turbina.
4. Método según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el segundo ángulo de cabeceo es tanto mayor que el primer ángulo de cabeceo cuanto menor es la segunda velocidad de rotación máxima deseada en comparación con la primera velocidad de rotación máxima deseada.
5. Método según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el segundo ángulo de cabeceo aumenta de manera más marcada que el primer ángulo de cabeceo para un aumento de potencia de salida.
6. Método según una de las reivindicaciones 1 a 5, en el que el segundo ángulo de cabeceo aumenta de manera más marcada que el primer ángulo de cabeceo para un aumento de velocidad del viento.

7. Método según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la segunda velocidad de rotación máxima (ms2) deseada se encuentra entre el 20% y por debajo del 100%, en particular, entre el 30% y por debajo del 100%, además, en particular, entre el 50% y el 90%, de la primera velocidad de rotación máxima (ms1) deseada.
8. Método según una de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el primer ángulo de cabeceo es constante (β_0) para una velocidad de rotación por debajo de la primera velocidad de rotación (ms1) deseada.
9. Método según una de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el segundo ángulo de cabeceo es constante (β_0) para una velocidad de rotación inferior a la segunda velocidad de rotación (ms2) deseada.
10. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que cuando la segunda velocidad de rotación deseada se desea como la velocidad de rotación del árbol de rotación, el ajuste del ángulo de cabeceo al segundo ángulo de cabeceo (β_2) da como resultado una mayor potencia de salida de la turbina eólica que el ajuste del ángulo de cabeceo al primer ángulo de cabeceo (β_1).
11. Disposición (440) para ajustar un ángulo de cabeceo (β) de una pala (441) de rotor de una turbina eólica mientras que la potencia de salida de la turbina eólica es menor que la potencia de salida nominal, comprendiendo la disposición:
- un módulo (443) informático para determinar las señales de ajuste ($s\beta_1$, $s\beta_2$) del ángulo de cabeceo para ajustar un ángulo de cabeceo (β) de una pala (441) de rotor conectada a un árbol (559) de rotación de una turbina eólica, en la que el módulo informático está adaptado para:
- obtener una primera señal de velocidad máxima (ms1) indicativa de una primera velocidad de rotación máxima (ms1) deseada del árbol de rotación, en particular, una velocidad de rotación nominal;
- derivar una señal de ajuste ($s\beta_1$) del primer ángulo de cabeceo a base de la primera señal de velocidad máxima;
- obtener una segunda señal de velocidad máxima (ms2) indicativa de una segunda velocidad de rotación máxima (ms2) deseada del árbol de rotación diferente de, en particular, menor que, la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación;
- derivar una señal de ajuste ($s\beta_2$) del segundo ángulo de cabeceo a base de la segunda señal de velocidad máxima, en la que la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo es diferente ($\Delta\beta$) de la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo,
- en la que la disposición (440) para ajustar un ángulo de cabeceo comprende además:
- una disposición de ajuste adaptada:
- para ajustar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor a un primer ángulo de cabeceo (β_1) a base de la señal de ajuste ($s\beta_1$) del primer ángulo de cabeceo; y después
- para ajustar el ángulo de cabeceo de la pala de rotor a un segundo ángulo de cabeceo (β_2) a base de la señal de ajuste ($s\beta_2$) del segundo ángulo de cabeceo,
- en la que la segunda velocidad de rotación máxima (ms2) deseada es menor que la primera velocidad de rotación máxima (ms1) deseada, en la que el segundo ángulo de cabeceo (β_2) es mayor que el primer ángulo de cabeceo (β_1),
- en la que el primer ángulo de cabeceo (β_1) y el segundo ángulo de cabeceo (β_2) son constantes para la potencia de salida por debajo de un umbral (th3, th5, th7, th9),
- en la que el primer ángulo de cabeceo es el ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la primera velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación,
- en la que el segundo ángulo de cabeceo es el ángulo de cabeceo óptimo para maximizar la producción de potencia, cuando la velocidad de rotación máxima del árbol de rotación se establece en la segunda velocidad de rotación máxima deseada del árbol de rotación, en la que la disposición está configurada además
- para obtener una señal de potencia (p) indicativa de una potencia de salida,

para derivar la señal de ajuste del primer ángulo de cabeceo adicionalmente a base de la señal de potencia,
para derivar la señal de ajuste del segundo ángulo de cabeceo se basa en la señal de potencia.

FIG 1

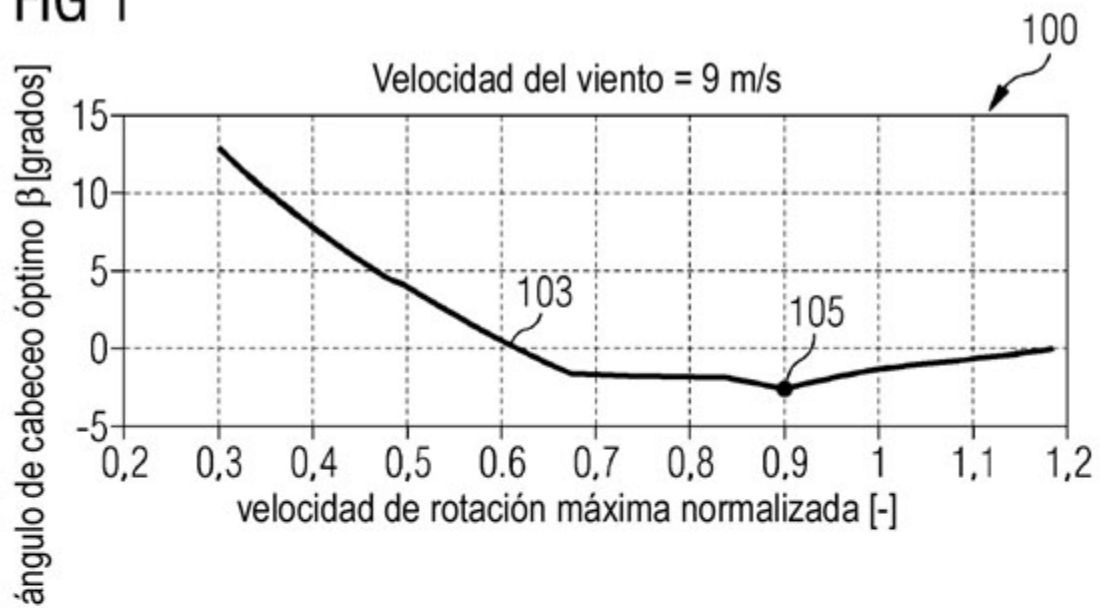


FIG 2

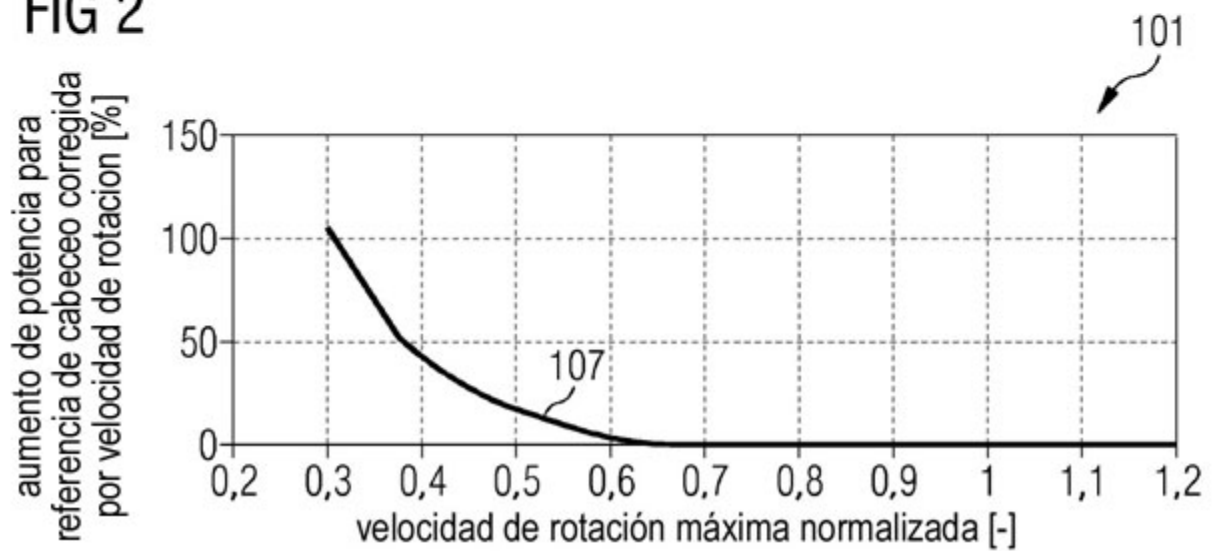


FIG 3

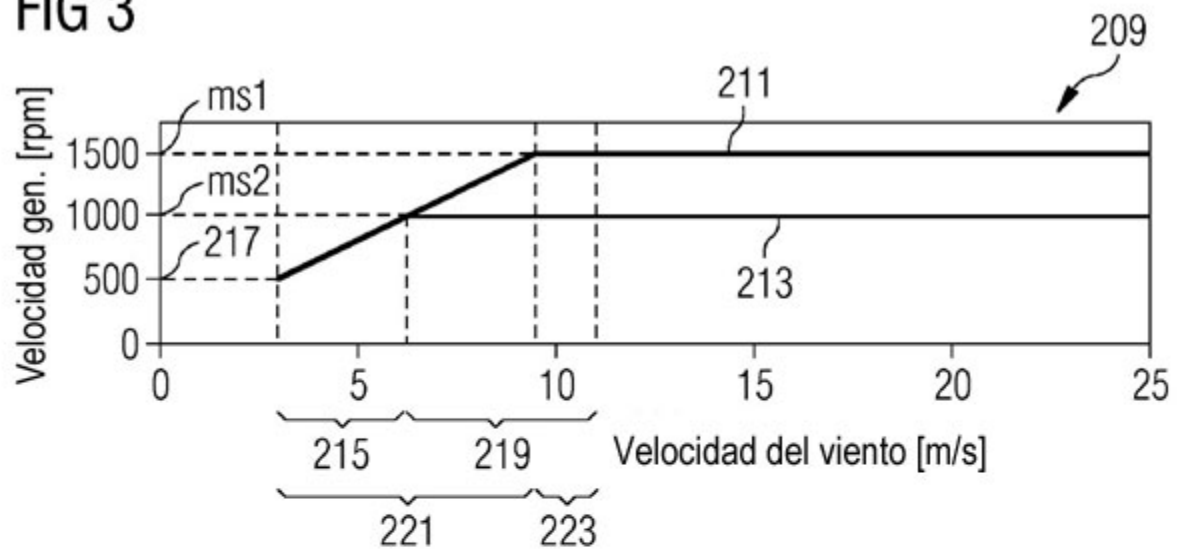


FIG 4

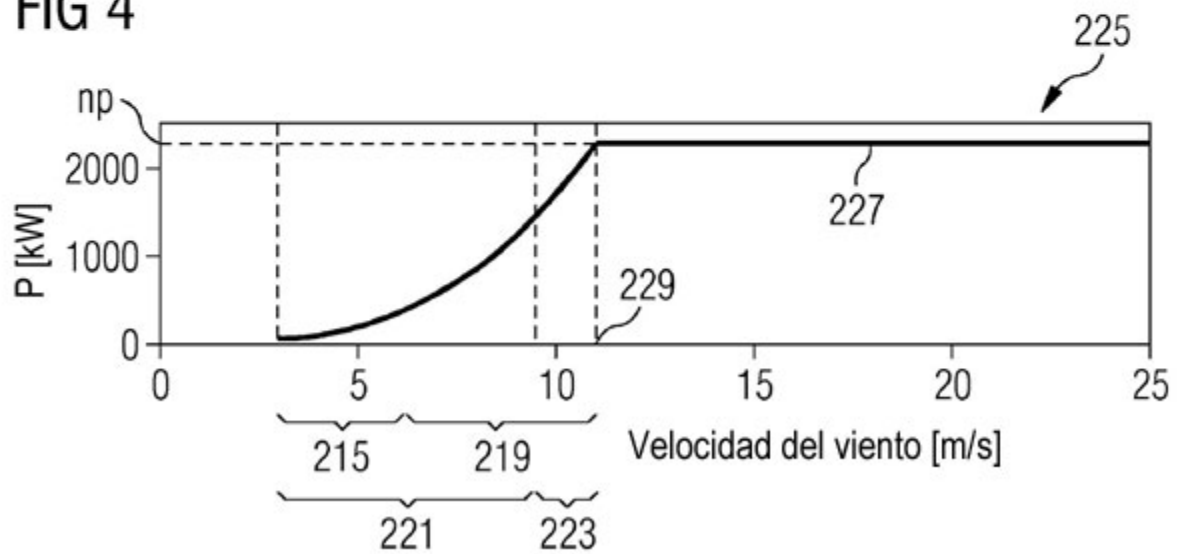


FIG 5

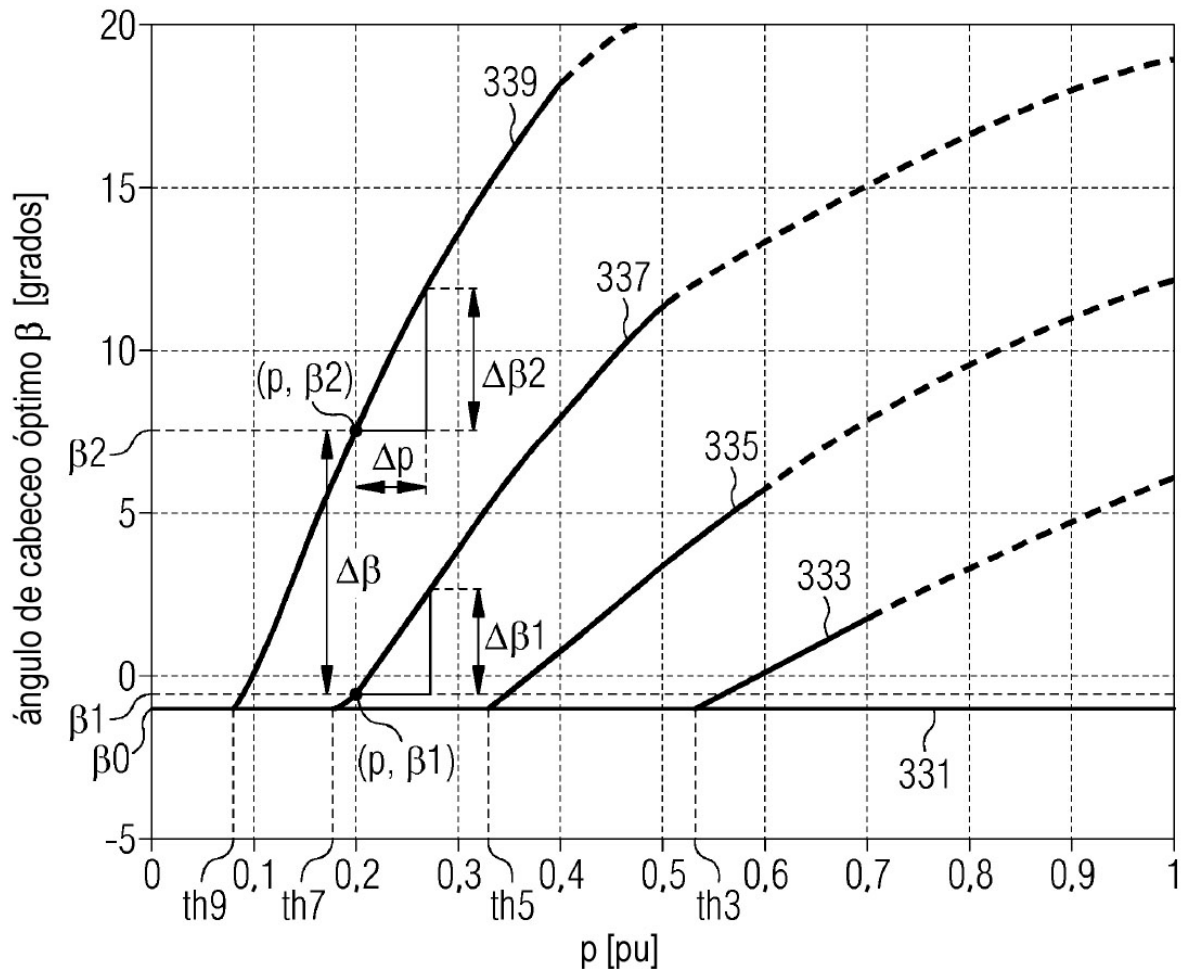


FIG 6

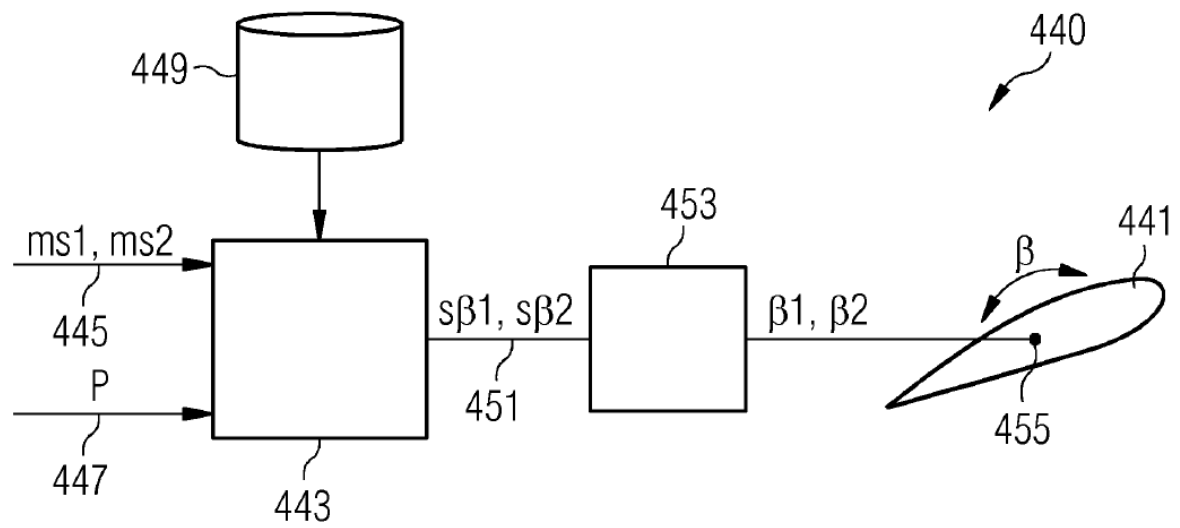


FIG 7

