

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 833 418**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.07.2016 E 16180524 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.09.2020 EP 3124787**

54 Título: **Control y procedimiento de control para una instalación de energía eólica**

30 Prioridad:

30.07.2015 DE 102015009704

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

15.06.2021

73 Titular/es:

**SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY
SERVICE GMBH (100.0%)
Überseering 10
22297 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

WORTMANN, SVENJA

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 833 418 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

Control y procedimiento de control para una instalación de energía eólica

La invención se refiere a un control para una instalación de energía eólica. El control está diseñado para procesar valores de medida y/o especificaciones externas con el fin de determinar especificaciones de control para una variación cíclica del paso en la instalación de energía eólica.

Mediante la variación cíclica del paso se puede influir en los esfuerzos experimentados por una instalación de energía eólica, documento US 7.281.891 B1. Se pueden utilizar valores de viento medidos, basados en LIDAR, para obtener información acerca de un campo de vientos que va a incidir en breve sobre la instalación de energía eólica, documentos DE 10 2012 019 663 A1, WO 2015 001 301 A1 y WO 2010 086 631 A2. No es fácil establecer la relación correcta entre los valores eólicos medidos y la variación cíclica del paso. En el artículo científico "Active Load Reduction Using Individual Pitch, Based on Local Blade Flow Measurements" (Reducción activa de carga haciendo uso del paso individual, sobre la base de mediciones locales de flujo en la pala), de Larsen *et al.*, también se da a conocer un método para reducir la carga.

La invención se basa en la misión de presentar un control y un procedimiento de control para una instalación de energía eólica con los cuales se reduzcan los esfuerzos experimentados por la instalación de energía eólica. Partiendo del estado de la técnica mencionado, la misión se logra con las características de las reivindicaciones independientes. En las reivindicaciones dependientes se indican formas de realización ventajosas. Según la invención, en el control está almacenada una curva característica de la amplitud de la variación cíclica del paso frente a un parámetro eólico. La curva característica presenta un punto extremo desde el cual la curva característica asciende o desciende en ambas direcciones. El control está diseñado para, a partir de un valor medido del parámetro eólico, determinar sobre la base de la curva característica una especificación de control para la amplitud de la variación cíclica del paso.

Se explicarán en primer lugar algunos términos y expresiones. "Variación cíclica del paso" se refiere a un proceso en el cual se modifica el ángulo de paso de una pala de rotor, al menos una vez en una primera dirección y al menos una vez en una segunda dirección, contraria a la anterior, durante una revolución completa del rotor. El ángulo de paso se puede modificar de la misma manera, o esencialmente de la misma manera, durante varias revoluciones sucesivas del rotor.

En la variación cíclica del paso existe una posición nula a partir de la cual comienza la variación del ángulo de paso. La "amplitud de la variación cíclica del paso" designa la máxima diferencia angular que se produce, durante la variación cíclica del paso, entre el ángulo real de paso y la posición nula. La diferencia angular entre el ángulo real de paso y la posición nula se cuenta siempre positivamente, es decir, no existe amplitud negativa.

La invención se basa en la constatación de que el cambio cíclico de carga al que está expuesta una instalación de energía eólica bajo la influencia de un campo de vientos complejo, durante una revolución del rotor, no se hace más intenso de manera simple con la velocidad del viento, como cabría sospechar, sino que existen situaciones en las cuales los cambios cíclicos de carga disminuyen a pesar de un incremento en la fuerza del viento. Con la curva característica, que desde un punto extremo asciende o desciende en ambas direcciones, este conocimiento se aprovecha para configurar la variación cíclica del paso de manera que se reduzcan las cargas que se producen.

Se ha evidenciado que el efecto según la invención se produce en particular cuando la instalación de energía eólica está expuesta a un flujo incidente oblicuo, es decir, la dirección del campo de vientos que incide sobre el rotor no es paralela al eje del rotor, sino que forma un ángulo con el eje del rotor. Por lo tanto, en una forma de realización preferida de la invención, la curva característica está asociada a un estado operacional o a varios estados operacionales de la instalación de energía eólica en los cuales la instalación de energía eólica está expuesta a un flujo incidente oblicuo. Si se supone que el flujo incidente oblicuo (es decir, el ángulo con el cual el viento incide sobre el rotor, o más precisamente con la dirección del eje del rotor) permanece constante mientras cambia la velocidad del viento, la instalación de energía eólica está sometida, con una velocidad media del viento, a los cambios cíclicos de carga menos intensos. A partir de esta velocidad media del viento, los cambios de carga cíclicos se intensifican con velocidades del viento tanto crecientes como decrecientes.

El solicitante explica este efecto de la siguiente manera: en el caso de un flujo incidente oblicuo, el perfil de la velocidad del viento resultante y del ángulo de incidencia del flujo o del coeficiente de sustentación discurren de manera contrapuesta a lo largo de una revolución. En el intervalo de carga nominal más bajo, con ángulos de incidencia del flujo positivos y carga intensa sobre las palas el coeficiente de sustentación varía solo escasamente durante la revolución. El perfil de la carga sobre las palas está dominado por el perfil de la velocidad del viento resultante. Cuando aumenta la velocidad del viento, el ángulo medio de incidencia del flujo y la carga sobre las palas decrecen. Los cambios en el ángulo de incidencia del flujo provocan ahora una variación en el coeficiente de sustentación más intensa que a bajas velocidades del viento. El perfil de la carga sobre las palas está entonces dominado por el perfil del coeficiente de sustentación.

Así pues, la curva característica puede estar configurada en particular de manera que, partiendo de una velocidad del viento baja, la amplitud disminuye hasta que la amplitud cae a un punto extremo con una velocidad del viento

intermedia, y la amplitud asciende de nuevo al continuar aumentando la velocidad del viento.

Puede ser un rasgo distintivo de la curva característica el que la curva característica caiga a cero en el punto extremo. Si la amplitud de la variación cíclica del paso es cero, no se produce variación cíclica del paso, sino que el ángulo de paso sigue durante toda la revolución del rotor la especificación del control operacional normal para la regulación de la potencia y la velocidad, lo que por regla general significa que el ángulo de paso permanece en la posición nula. Puede estar asociada una inversión de fase de la variación cíclica del paso con el hecho de sobrepasar el punto extremo. Preferiblemente, el control está establecido de manera que se toma esto en cuenta al establecer la especificación de control.

También se ha puesto de manifiesto que el efecto según la invención puede aparecer cuando la instalación de energía eólica está expuesta a un cizallamiento. En contraste con un campo de vientos idealizado, el campo de vientos complejo real no tiene la misma velocidad del viento en toda el área barrida por el rotor. A las velocidades del viento que divergen dentro del campo de vientos se las denomina cizallamiento. En el contexto de la invención, la expresión "velocidad del viento" designa la velocidad media del viento en el campo de vientos. La curva característica conforme a la invención puede referirse a un estado en el cual la instalación de energía eólica está expuesta a un cizallamiento.

Dependiendo en cada caso de la dirección y la magnitud, los efectos del cizallamiento y del flujo incidente oblicuo pueden reforzarse o atenuarse mutuamente. En una forma de realización preferida se toman en cuenta tanto el cizallamiento como el flujo incidente oblicuo, estando asociada la curva característica a un estado en el cual la instalación de energía eólica está expuesta tanto a un cizallamiento como a un flujo incidente oblicuo.

En el contexto de la invención, la expresión "parámetros eólicos" designa en general a las magnitudes que caracterizan el campo de vientos que incide sobre la instalación de energía eólica. Los parámetros eólicos incluyen la fuerza del viento, el flujo incidente oblicuo y el cizallamiento.

A su vez, el cizallamiento y el flujo incidente oblicuo se caracterizan en cada caso por dos parámetros que son necesarios para representar el cizallamiento y el flujo incidente oblicuo en un sistema de coordenadas. Los parámetros concretos dependen de la elección del sistema de coordenadas. Por ejemplo, es posible dividir en cada caso el flujo incidente oblicuo y el cizallamiento en un componente horizontal y uno vertical, de manera que se originan un flujo incidente oblicuo horizontal, un flujo incidente oblicuo vertical y también un cizallamiento horizontal y un cizallamiento vertical. Cada una de estas magnitudes se puede definir, por ejemplo, como un ángulo con respecto al eje del rotor. Son posibles otras formas de representación, por ejemplo, el cizallamiento se puede definir también de manera lineal como el cambio en la velocidad del viento con respecto a la distancia a un plano de referencia. Como alternativa, también sería posible representar el cizallamiento y el flujo incidente oblicuo en un sistema de coordenadas polares bidimensional especificando una dirección y un ángulo en cada caso. Con ello, independientemente de la elección del sistema de coordenadas, hay cinco parámetros eólicos que caracterizan el campo de vientos, en concreto, la fuerza del viento y dos parámetros en cada caso para el flujo incidente oblicuo y para el cizallamiento.

En el contexto de la invención es posible que, aparte de estos cinco parámetros eólicos, no se empleen otros parámetros eólicos para caracterizar el campo de vientos. Precisamente el flujo incidente oblicuo y el cizallamiento, en cada caso dependiendo de la velocidad del viento, son en concreto los parámetros que generan un cambio de carga para las palas de rotor en cada revolución del rotor y que, por tanto, pueden ser contrarrestados mediante la variación cíclica del paso.

Un campo de vientos típico ya tiene un cizallamiento natural, puesto que la velocidad del viento cerca del suelo es generalmente algo más baja que a una altura mayor. Para representar el cizallamiento se utiliza preferiblemente un sistema de coordenadas que presenta una simetría con respecto al cizallamiento natural. Por ejemplo, los ejes del sistema de coordenadas pueden estar inclinados de manera que se apliquen sobre ambos ejes tanto una proporción del cizallamiento horizontal como una proporción del cizallamiento vertical. Con esta forma de representación se facilita la identificación de cizallamientos adicionales (estocásticos).

En una forma de realización de la invención, en la curva característica está representada la amplitud de la variación cíclica del paso frente a la velocidad del viento, siendo la curva característica creciente en ambas direcciones a partir del punto extremo. Tomando en cuenta esta curva característica, el control puede crear una especificación de control según la cual la amplitud de la variación cíclica del paso sea menor con una velocidad del viento intermedia que con una velocidad del viento mayor o menor.

En una forma de realización preferida de la invención, la curva característica está dibujada de modo que se suponen constantes aquellos otros parámetros eólicos a los cuales la curva característica no relaciona con la amplitud de la variación cíclica del paso. En el ejemplo mencionado, la curva característica cambia si cambia el ángulo del flujo incidente oblicuo o el ángulo del cizallamiento. En un modelo simplificado es posible suponer una relación lineal entre el ángulo del flujo incidente oblicuo y/o el ángulo de cizallamiento, y también la amplitud de la variación cíclica del paso. Con esta suposición, es posible adaptar por transformación lineal la curva característica, utilizando valores medidos del flujo incidente oblicuo o del cizallamiento.

También es posible prever una curva característica alternativa para la amplitud de la variación cíclica del paso, en el caso de otros valores de los restantes parámetros eólicos. Así, dependiendo del valor de los otros parámetros eólicos, pueden estar almacenadas en el control varias curvas características para la amplitud de la variación cíclica del paso. Para la mayoría de las curvas características son posibles diferentes modos de representación. Por ejemplo, la mayoría de las curvas características pueden representarse en forma de un campo característico bidimensional o en forma de un espacio característico multidimensional. La dimensión del espacio característico puede corresponder al número de parámetros eólicos a los que se ha recurrido para caracterizar el campo de vientos. Además de las curvas características según la invención, el espacio característico también puede comprender curvas características que no tengan ningún punto extremo en el sentido de la invención. Es posible que solamente tengan un punto extremo en el sentido de la invención aquellas curvas características en las cuales el flujo incidente oblicuo sea distinto de cero. También es posible que solamente tengan un punto extremo en el sentido de la invención aquellas curvas características en las cuales el flujo incidente oblicuo horizontal sea distinto de cero.

Dado que los parámetros eólicos están todos relacionados entre sí, existen otras curvas características en las que se refleja el conocimiento según la invención. En tales curvas características alternativas, la amplitud de la variación cíclica del paso puede estar representada frente a un parámetro eólico que no es la fuerza del viento. Partiendo del punto extremo, la curva característica puede ascender o descender en ambas direcciones.

Aunque la curva característica individual se base en el supuesto de que determinados parámetros eólicos permanecen constantes, esto no se aplica sin más a un campo de vientos real. Antes bien, se debe asumir que todos los parámetros eólicos cambian continuamente en un campo de vientos real. Para el control según la invención, ello significa que existe un cambio continuo de ida y vuelta entre distintas curvas características. Es posible que el cambio de ida y vuelta entre distintas curvas características se produzca varias veces durante una revolución del rotor. Por esta razón es posible que, dentro de la variación cíclica del paso, la curva real relativa al paso presente un perfil complejo aunque la curva relativa al paso, derivada de la curva característica individual, sea una curva sinusoidal simple.

La especificación de control para la variación cíclica del paso puede estar configurada de manera que, comenzando desde una posición nula del ángulo de paso, a lo largo de una revolución del rotor se haga variar el ángulo de paso tanto en un sentido como en el otro. La variación en un sentido puede ser simétrica a la variación en el otro sentido. Puede consistir en una especificación de control en la cual se hace variar el ángulo de paso de manera continua, lo que significa que la diferencia angular máxima con respecto a la posición nula (= amplitud de la variación cíclica del paso) se produce solo durante un breve instante. También son posibles especificaciones de control en las cuales la diferencia angular máxima se mantiene durante un corto plazo de tiempo. En una forma de realización preferida, la variación cíclica del paso tiene un perfil sinusoidal, donde el período de la curva sinusoidal corresponde a una revolución completa del rotor. Tal curva sinusoidal puede definirse sin ambigüedad por la amplitud y la fase. En el sentido de la invención, la definición inequívoca de la curva relativa al paso viene dada por la amplitud de la variación cíclica del paso y por la posición angular del rotor en la cual se alcanza dicha amplitud. La invención no se limita a curvas tan simples. En principio, puede definirse cualquier curva en la que estén representados valores deseados para el ángulo de paso, frente a la posición angular de las palas de rotor.

Preferiblemente, la variación cíclica del paso está configurada de manera que varias palas de rotor de una instalación de energía eólica reciben cada una su propia especificación de control para la variación cíclica del paso. Las especificaciones de control pueden ser tales que, referidas al sistema de coordenadas de la góndola, con respecto al cual gira el rotor, todas las curvas relativas al paso sean idénticas.

Si, partiendo de la posición nula, se hace variar el ángulo de paso una vez en un sentido y una vez en el otro sentido durante una revolución completa del rotor, entonces se producen dos cruces por cero. Los cruces por cero pueden tener lugar en una posición angular del rotor que esté definida con respecto a la dirección del flujo incidente oblicuo y/o a la dirección del cizallamiento.

La curva relativa al paso, dentro de la variación cíclica del paso, puede ser una superposición lineal de una curva parcial asociada al flujo incidente oblicuo y una curva parcial asociada al cizallamiento. La curva parcial correspondiente al flujo incidente oblicuo puede ser simétrica con respecto a la dirección del flujo incidente oblicuo. La curva parcial correspondiente al cizallamiento puede ser simétrica con respecto a la dirección del cizallamiento. Si se elige para el flujo incidente oblicuo y para el cizallamiento una forma de representación con una descomposición en un componente horizontal y un componente vertical, la curva relativa al paso puede emerger como superposición de cuatro curvas parciales.

En particular, en la curva parcial correspondiente al flujo incidente oblicuo, los dos cruces por cero de la curva relativa al paso pueden tener lugar en las posiciones angulares del rotor en las cuales la pala de rotor en cuestión cruza la dirección del flujo incidente oblicuo. Por ejemplo, si el flujo incidente oblicuo es un flujo incidente oblicuo puramente horizontal, el cruce por cero se produce cuando la pala de rotor está dirigida horizontalmente. Resulta así que esta forma de la curva parcial correspondiente al flujo incidente oblicuo es particularmente adecuada para reducir los esfuerzos que actúan sobre la instalación de energía eólica cuando dicha instalación de energía eólica está expuesta a una elevada velocidad del viento, por ejemplo a una velocidad del viento superior a 20 m/s. Con velocidades del viento menores, por ejemplo inferiores a 15 m/s, puede resultar ventajoso que el cruce por cero de la

curva parcial correspondiente al flujo incidente oblicuo se desplace ligeramente hacia atrás en términos de tiempo o en términos de posición de fase. Por ejemplo, el rotor puede haber continuado su giro en una cuantía entre 10° y 30° antes de que tenga lugar el cruce por cero de la variación cíclica del paso.

5 Los valores medidos de los parámetros eólicos que son procesados en el control según la invención se pueden obtener de distintas formas. Por ejemplo, en la instalación de energía eólica pueden estar dispuestos sensores que capturen los valores medidos del viento. Los sensores pueden estar colocados en la góndola y/o en el rotor de la instalación de energía eólica. La expresión "instalación de energía eólica" designa un dispositivo en el cual un generador es impulsado por un rotor, con el fin de generar energía eléctrica. También es posible situar sensores en un dispositivo adyacente a la instalación de energía eólica. Preferiblemente, los sensores están dispuestos
10 esencialmente a la misma altura que el rotor de la instalación de energía eólica. La información sobre el campo de vientos también se puede deducir de valores medidos que se han obtenido en una instalación de energía eólica vecina.

15 Preferiblemente, los valores de medida se captan de manera que se pueda deducir información sobre cada uno de los parámetros eólicos mencionados. Los valores medidos proporcionan información acerca de la velocidad media del viento, así como acerca del flujo incidente oblicuo y del cizallamiento, en cada caso en dos dimensiones. Preferiblemente, en el control se procesan todos los parámetros eólicos.

20 Los sensores pueden estar diseñados de manera que atañen al estado real del campo de vientos, es decir, el campo de vientos que actúa en ese momento sobre el rotor. Además, o como alternativa a esto, también es posible captar con anticipación los valores de medida, al objeto de determinar parámetros eólicos a los cuales estará expuesta en breve la instalación de energía eólica. La captación de valores de medida anticipados se puede lograr, por ejemplo, mediante sensores LIDAR y/o SODAR. El término LIDAR está formado por las siglas de la expresión inglesa "Light
25 Detection and Ranging" (detección y localización por luz), y describe un procedimiento de medida en el cual se emiten impulsos luminosos y se detecta la luz retrodispersada por la atmósfera. Los parámetros eólicos buscados se pueden deducir de dicha luz retrodispersada. SODAR es un procedimiento de medida análogo en el cual se emiten ondas de sonido en lugar de pulsos de luz y se detectan las señales sonoras reflejadas por la atmósfera.

30 Cuando en el control según la invención se toman en cuenta los valores de medida anticipados, preferiblemente se considera el tiempo de tránsito entre el instante en que se han captado los valores de medida anticipados y el instante en el cual la instalación de energía eólica está efectivamente expuesta a los parámetros eólicos en cuestión. Preferiblemente, el control está establecido de manera que los valores de medida anticipados son incorporados en la especificación de control para la variación cíclica del paso en un instante que se sitúa poco antes del instante en el cual la instalación de energía eólica queda efectivamente expuesta a los parámetros eólicos correspondientes a los valores de medida anticipados. En particular, para elegir dicho instante se pueden tener en cuenta el tiempo de reacción de la instalación de energía eólica, el tiempo requerido para el procesamiento de datos y/o el retardo temporal por filtrado. No obstante, los valores de medida anticipados deben ser incorporados, a más tardar, tan pronto como los parámetros eólicos actúen realmente sobre la instalación de energía eólica o sobre los componentes de la instalación de energía eólica.
35

40 El sensor para captar los valores de medida anticipados puede estar dispuesto en la instalación de energía eólica. La instalación de energía eólica comprende un rotor que está conectado, a través de un árbol de rotor, a un generador. El generador está instalado dentro de una góndola que está montada de manera giratoria en una torre. El sensor para los valores de medida anticipados puede estar dispuesto en la góndola. El sensor puede estar dirigido de manera que capture valores de medida a barlovento, es decir, en la dirección de donde viene el viento. Si el sensor envía señales para la medición, estas se pueden enviar contra la dirección del viento. De esta forma se puede obtener información sobre el campo de vientos que va a actuar en breve sobre la instalación de energía eólica.

45 De manera adicional o como alternativa a ello, es posible agregar a una o varias palas de rotor sensores para valores de medida anticipados. Preferiblemente, una pala individual de rotor comprende una pluralidad de sensores que están distribuidos a lo largo de la pala. De esta manera, los sensores pueden cubrir una amplia área. También en este caso, los sensores están dirigidos preferiblemente de manera que captan los valores de medida a barlovento.

50 Una posibilidad adicional o alternativa para la obtención de valores de medida consiste en captar los valores reales en un componente de la instalación de energía eólica. Estos valores de medida se pueden utilizar para determinar una especificación de control para otro componente de la instalación de energía eólica que se encuentre en esa misma posición en un instante posterior. En particular, se puede captar un valor real en una pala de rotor y se puede utilizar el valor medido para determinar una especificación de control para una pala de rotor que va a estar en la misma posición en un instante posterior. El tiempo de tránsito que ha de transcurrir hasta que la pala de rotor se encuentre en la posición correspondiente se deduce de la velocidad de giro del rotor. Por ejemplo, si el rotor tiene tres palas de rotor, el tiempo de tránsito corresponde al giro en un ángulo de 120° o un múltiplo del mismo.
55

Otra posibilidad adicional o alternativa para obtener valores de medida anticipados consiste en captar valores reales en una ubicación que esté apartada de la instalación de energía eólica. Esta ubicación está dispuesta preferiblemente a barlovento, de modo que los valores de medida se captan en un campo de vientos que va a incidir

en breve sobre la instalación de energía eólica. Los valores de medida se pueden captar, por ejemplo, en un mástil erigido en una posición adecuada. También es posible utilizar como valores de medida anticipados valores de medida que han sido captados en una instalación de energía eólica vecina.

5 El control según la invención puede estar diseñado de manera que también sea responsable del control operacional del ángulo de paso. En el control operacional se establecen especificaciones de control conforme a las cuales se ajustará el ángulo de paso para captar del viento la cantidad correcta de potencia. En el control operacional, todas las palas de rotor del rotor reciben habitualmente la misma especificación de control relativa al ángulo de paso. Por ejemplo, en esta especificación de control operacional se integran el nivel de potencia que puede aceptar el generador o el nivel de potencia que se puede transferir a la red. En particular, la curva característica según la
10 invención es aplicable en el espectro de funcionamiento dentro del cual la instalación de energía eólica funciona a su potencia nominal. A la potencia nominal, la modificación del ángulo de paso de las palas de rotor tiene por finalidad mantener constante la potencia y limitar la velocidad de giro del rotor. Las turbinas eólicas de hoy en día están diseñadas a menudo de manera que pueden funcionar a la potencia nominal con velocidades del viento entre aproximadamente 12 m/s y 24 m/s.

15 El control puede estar diseñado de manera que la especificación de control según la invención para la variación cíclica del paso se superponga linealmente a la especificación de control operacional. Si, por ejemplo, partiendo de una posición angular de 0° en la cual la pala de rotor apunta verticalmente hacia arriba, la deflexión máxima (= la amplitud) de la variación cíclica del paso tiene lugar en una posición angular de la pala de rotor de 30°, la especificación de control para esta posición angular de la pala de rotor puede indicar que se debe ajustar en +3° el
20 ángulo de inclinación. En consecuencia, para una posición angular de la pala de rotor de 210° puede realizarse un ajuste del ángulo de paso en -3°. Si la variación cíclica del paso tiene una evolución sinusoidal, la curva de la variación cíclica del paso ya está definida sin ambigüedad por esos datos. Si la variación cíclica del paso se debe efectuar sobre la base de un perfil de curva distinto, también es posible crear una especificación correspondiente para el ajuste linealmente superpuesto del ángulo de paso para cada posición angular de la pala de rotor.

25 Es posible que la especificación de control para la variación cíclica del paso sea la misma para todas las palas de rotor de la instalación de energía eólica. En el ejemplo mencionado, esto significa que en cada una de las palas de rotor se ajusta el ángulo de paso en +3° en una posición angular de 30° y en -3° en una posición angular de 210°. En un desarrollo de la invención se puede prever que las palas de rotor reciban para la variación cíclica del paso especificaciones de control diferentes. Esto puede servir, por ejemplo, para compensar un desequilibrio en el rotor.
30 Los desequilibrios pueden deberse, entre otras causas, a la acumulación de hielo en una pala de rotor o a un defecto en la fabricación de la pala de rotor. Esta corrección se puede llevar a cabo mediante una superposición lineal adicional en la especificación de control para la variación cíclica del paso.

La invención se refiere además a un procedimiento de control para una instalación de energía eólica, en el cual se procesan valores de medida y/o especificaciones externas con el fin de determinar especificaciones de control para una variación cíclica del paso en la instalación de energía eólica. Según la invención, sobre la base de una curva característica de la amplitud de la variación cíclica del paso con respecto a un parámetro eólico se determina una especificación de control para la amplitud de la variación cíclica del paso mediante el procesamiento de un valor medido del parámetro eólico. La curva característica presenta un punto extremo desde el cual la curva característica asciende o desciende en ambas direcciones.
35

40 El procedimiento de control se puede perfeccionar con características adicionales que se describen en relación con el control según la invención. El control se puede perfeccionar con características adicionales que se describen en el marco del procedimiento de control según la invención.

A continuación se describe la invención de manera ilustrativa por medio de formas de realización ventajosas, haciendo referencia a los dibujos adjuntos. En estos:

45 la Figura 1: muestra una instalación de energía eólica equipada con un sistema LIDAR;

la Figura 2: muestra una representación esquemática de diversos parámetros eólicos;

la Figura 3: muestra un control según la invención;

la Figura 4: muestra una curva característica según la invención; y

la Figura 5: muestra una representación gráfica de la variación cíclica del paso.

50 Una instalación 14 de energía eólica mostrada en la Figura 1 comprende un rotor 15 que impulsa un generador dispuesto en el interior de una góndola 16. La energía eléctrica producida por el generador es alimentada a una red eléctrica a través de una conexión 17. La góndola 16 puede girar con respecto a la torre de la instalación 14 de energía eólica, de modo que el rotor 15 puede alinearse con respecto al viento. Cuando la instalación 14 de energía eólica está en funcionamiento, la góndola 16 está dirigida de manera que el rotor 15 apunta en la dirección del
55 viento, es decir, hacia barlovento.

La instalación 14 de energía eólica está equipada con un dispositivo LIDAR 18 que emite pulsos 19 de luz para obtener información acerca de un campo 20 de vientos que se mueve en dirección al rotor 15. El dispositivo LIDAR evalúa las señales luminosas retrodispersadas por la atmósfera, con el fin de obtener la información deseada acerca del campo 20 de viento.

5 De acuerdo con la Figura 2, entre los parámetros eólicos que se determinan con el dispositivo LIDAR se encuentran el cizallamiento vertical 21 (Figura 2A), el cizallamiento horizontal 22 (Figura 2B), el flujo incidente oblicuo horizontal 23 (Figura 2C) y el flujo incidente oblicuo vertical 24 (Figura 2D). Tanto el cizallamiento 21, 22 como el flujo incidente oblicuo 23, 24 provocan un cambio de carga periódico en el rotor 15, ocurriendo el cambio de carga una vez en cada revolución del rotor. Cada una de estas magnitudes constituye un parámetro eólico en el sentido de la invención.
10 Contando también la velocidad media del viento en el campo 20 de vientos, que asimismo se determina con el módulo LIDAR 18, en el procedimiento de control se toman en cuenta cinco parámetros eólicos.

El control 25 de la instalación 14 de energía eólica se explica por medio de la Figura 3. El control 25 comprende una unidad 26 de control a la que se aportan desde el exterior valores 27 de medida a través de una primera entrada y especificaciones 28 a través de una segunda entrada. Los valores de medida se pueden referir, por ejemplo, al estado del sistema eléctrico de la instalación 14 de energía eólica, al estado de la red eléctrica o a la fuerza del viento que soporta en ese momento la instalación 14 de energía eólica. Las especificaciones externas pueden provenir, por ejemplo, de una central de la red de transmisión y referirse a la tensión eléctrica con la que se debe alimentar la red. La unidad 26 de control procesa los valores de medida y las especificaciones provenientes del exterior, y a partir de ello determina especificaciones 29 de control que son enviadas a los elementos de ajuste pertinentes de la instalación 14 de energía eólica para que la instalación 14 de energía eólica pueda ajustar su funcionamiento de acuerdo con las especificaciones 29 de control. El objeto de la especificación de control puede ser, por ejemplo, un ajuste del generador o del convertidor con el cual se influya en la fracción de potencia reactiva. Además, las especificaciones 29 de control incluyen una especificación para el ángulo de paso de las palas de rotor. De este modo, la unidad 26 de control asume el control operacional de la instalación 14 de energía eólica.
15 Preferiblemente, el control 25 funciona como un bucle de control cerrado en el que se miden las variaciones originadas por las especificaciones 29 de control y se las utiliza para determinar nuevas especificaciones 29 de control.
20
25

El control 25 está conectado al dispositivo LIDAR 18 a través de una línea 30 y recibe desde el dispositivo LIDAR 18 valores de medida anticipados, para los parámetros eólicos del campo 20 de vientos. La instalación 14 de energía eólica no está expuesta en ese momento al campo 20 de vientos, sino que el campo 20 de vientos todavía está a una distancia de, por ejemplo, algunos centenares de metros de la instalación 14 de energía eólica y se mueve en dirección a la instalación 14 de energía eólica. Es decir, el campo 20 de vientos va a incidir en breve sobre el rotor 15. A diferencia de los valores de medida que son aportados al control 25 a través de la entrada 27, los valores de medida anticipados provenientes de la unidad LIDAR no se refieren al estado operacional actual de la instalación 14 de energía eólica, sino a un estado operacional futuro.
30
35

Los valores de medida anticipados son procesados en una unidad 31 de cálculo, al objeto de determinar una especificación de control relativa a la variación cíclica del paso. Para ello, en primer lugar se calculan los parámetros eólicos a partir de los datos de medida LIDAR puros y luego se determina la especificación de control para la variación cíclica del paso. La variación cíclica del paso tiene como finalidad reducir los esfuerzos originados por los cambios de carga cíclicos que resultan del flujo incidente oblicuo y del cizallamiento. Por lo tanto, se modifica el ángulo de paso de una pala de rotor durante la revolución del rotor, de manera que se contrarrestan los cambios cíclicos de carga.
40

Para ello, el ordenador 31 de control determina una primera curva parcial que está destinada a contrarrestar el cizallamiento vertical 21. El ordenador 31 de control determina una segunda curva parcial que está destinada a contrarrestar el cizallamiento horizontal 22. El ordenador 31 de control determina una tercera curva parcial que está destinada a contrarrestar el flujo incidente oblicuo horizontal 23. El ordenador 31 de control determina una cuarta curva parcial que está destinada a contrarrestar el flujo incidente oblicuo vertical 24. Cada curva parcial define un perfil para el ángulo de paso durante una revolución del rotor. La curva relativa al paso dentro de la variación cíclica del paso se obtiene a partir de las cuatro curvas parciales por superposición lineal. La curva relativa al paso está relacionada con el estado del campo de vientos en ese momento. Cuando los valores de medida eólicos cambian, se puede originar una curva relativa al paso modificada, lo que en la práctica puede significar que la curva relativa al paso esté siendo adaptada continuamente.
45
50

En este ejemplo de realización, las curvas son sinusoidales. Comienzan por tanto con una determinada posición angular de la pala de rotor en una posición nula de la variación cíclica del paso. La posición nula corresponde a la especificación 29 de control para el ángulo de paso que ha sido determinada por la unidad 26 de control en el marco del control operacional normal, en particular de la regulación de la potencia y de la velocidad, sobre la base de los valores 27 de medida y de las especificaciones 28. De acuerdo con la curva sinusoidal, durante una revolución del rotor el ángulo de paso cambia inicialmente en un sentido, luego pasa por la posición nula y cambia en el otro sentido hasta que el ángulo de paso vuelve de nuevo al punto de partida después de una revolución completa del rotor. La superposición de las cuatro curvas parciales genera una curva conjunta para la variación cíclica del paso que reduce en el mayor grado posible tanto los esfuerzos debidos al cizallamiento como los esfuerzos debidos al
55
60

flujo incidente oblicuo.

La curva conjunta es enviada a un módulo 32 de tiempo de tránsito. El módulo 32 de tiempo de tránsito procesa el valor de medida recibido desde la unidad LIDAR 18 referente a la velocidad media del viento del campo 20 de vientos, y establece a partir del mismo el instante en el que es probable que el campo 20 de vientos incida sobre el rotor 15. Teniendo en cuenta el tiempo de reacción de la instalación 14 de energía eólica, así como el tiempo requerido para el procesamiento de datos y el tiempo de retraso debido al necesario filtrado, el módulo 32 de tiempo de tránsito envía la curva conjunta a la unidad 26 de control poco antes de la llegada del campo 20 de vientos. La unidad 26 de control superpone la curva conjunta, en calidad de control previo, sobre la especificación de control normal para el ángulo de paso. Esta especificación de control es implementada por la instalación 14 de energía eólica justo en el momento en que el campo 20 de vientos incide sobre el rotor 15.

A continuación se explica la determinación de las curvas parciales para la variación cíclica del paso, con el ejemplo del flujo incidente oblicuo horizontal. El ordenador 31 de control utiliza una curva característica 33 tal como la mostrada a modo de ejemplo en la Figura 4. En el eje horizontal está representada la velocidad V del viento en metros por segundo. En el eje vertical está representada la amplitud de la variación cíclica del paso, es decir, la deflexión máxima del ángulo de paso con respecto a la posición central, a la que llega el ángulo de paso durante la variación cíclica del paso. La amplitud cae a cero para una velocidad V del viento de aproximadamente 16 m/s. Por ello, la curva característica 33 presenta un extremo 39 en el sentido de la invención. La curva característica 33 está asociada a un cierto ángulo del flujo incidente oblicuo horizontal. Si el rotor 15 recibe el flujo incidente con un ángulo distinto, el ordenador 31 de control utiliza una curva característica alternativa. La curva característica alternativa puede resultar, en su caso, del supuesto de que se asume una relación lineal entre la amplitud y el parámetro eólico, y se recalcula en consecuencia la curva característica. La Figura 4 muestra solo el perfil de la curva característica para un ejemplo seleccionado. Dependiendo de la elección del sistema de coordenadas, de las escalas de los ejes y de la convención de signos, el perfil de la curva característica puede ser significativamente distinto, por ejemplo presentando un máximo en lugar de un mínimo en la parte media de la curva característica. La abanico de curvas características se puede extender también a velocidades del viento significativamente más bajas (funcionamiento con carga parcial inferior) o a velocidades del viento significativamente más altas (funcionamiento con carga parcial superior).

Sobre la base del valor de medida anticipado, referido al flujo incidente oblicuo horizontal 23, que ha recibido desde el dispositivo LIDAR 18, el ordenador 31 de control selecciona la curva característica 33 adecuada de entre un gran número de curvas características archivadas en su memoria, o bien el ordenador 31 de control determina por cálculo una curva característica adecuada a partir de una curva característica archivada en la memoria. Utilizando el valor de medida anticipado concerniente a la velocidad media V del viento se puede extraer, de la curva característica 33, un valor para la amplitud de la variación cíclica del paso. La fase de la variación cíclica del paso se determina con relación a la dirección del flujo incidente oblicuo horizontal 23. Después de eso, el cruce por cero del paso cíclico tiene lugar allí donde la pala de rotor cruza la dirección del flujo incidente oblicuo, es decir, allí donde la pala de rotor también está dirigida horizontalmente.

La curva de la variación cíclica del paso es una curva sinusoidal que ya está determinada en gran medida por los dos parámetros de amplitud y fase. La única información que falta es la dirección en la que se desvía el ángulo de inclinación a partir del pertinente cruce por cero. Para ello, en la memoria del ordenador 31 de control está almacenada la información adicional de que a una velocidad V del viento de 16 m/s se produce una inversión de fase. A velocidades V del viento inferiores a 16 m/s, el ángulo de inclinación se desvía en una dirección a partir del cruce por cero pertinente. A velocidades V del viento superiores a 16 m/s, el ángulo de inclinación se desvía en la otra dirección a partir del cruce por cero pertinente. La curva sinusoidal para el flujo incidente oblicuo horizontal 23 queda así determinada sin ambigüedad.

Se determinan curvas correspondientes para la variación cíclica del paso frente al flujo incidente oblicuo vertical 24, frente al cizallamiento vertical 21 y frente al cizallamiento horizontal 22. Una superposición lineal de las cuatro curvas genera una curva conjunta para la variación cíclica del paso. Eventualmente se pueden superponer, de manera lineal o no lineal, más curvas para la variación cíclica del paso, por ejemplo una funcionalidad concerniente a la amortiguación de las vibraciones transversales laterales de la torre.

La curva característica de la Figura 4 cubre esencialmente el espectro de fuerza V del viento en el cual la instalación 14 de energía eólica puede funcionar con su potencia nominal. De la curva característica 33 mostrada en la Figura 4 se desprende que, a la velocidad V del viento relativamente baja de 12 m/s, la amplitud de la variación cíclica del paso es grande. A una velocidad V del viento de aproximadamente 16 m/s, la amplitud de la variación cíclica del paso cae a cero. El ángulo de paso permanece entonces fijo en su posición nula predeterminada por el control operacional. Al aumentar aún más la velocidad V del viento, la amplitud de la variación cíclica del paso aumenta de nuevo, siendo ahora la posición de fase precisamente la inversa, es decir, desplazada en 180° .

En la Figura 5 se muestran diversas posibilidades de curvas relativas al paso que el ordenador 31 de control determina de esta manera. En el eje horizontal está representada la posición angular de la pala de rotor, donde para 0° la pala de rotor apunta verticalmente hacia arriba. En el eje vertical está representada la deflexión del ángulo de paso con respecto a la posición nula 38 del ángulo de paso. La curva 34 relativa al paso se refiere a una velocidad V

del viento de 12 m/s, la curva 35 relativa al paso se refiere a una velocidad V del viento de 16 m/s, la curva 36 relativa al paso se refiere a una velocidad V del viento de 20 m/s y la curva 37 relativa al paso se refiere a una velocidad V del viento de 24 m/s.

5 En el ejemplo de la curva 37 relativa al paso se apreciará que el cruce por cero de la variación cíclica del paso ocurre en una posición angular de la pala de rotor de 90° . Por tanto, en el cruce por cero la pala de rotor está dirigida horizontalmente. La deflexión máxima (= amplitud) del ángulo de paso se alcanza a 0° y a 180° . Las curvas 34 a 37 relativas al paso ilustran además las distintas amplitudes en función de la velocidad V del viento, así como la inversión de fase para una velocidad V del viento de aproximadamente 16 m/s.

10 De la Figura 5 se desprende también el aspecto adicional de la invención de que la curva 34 relativa al paso tiene una posición de fase algo desplazada. El cruce por cero de la curva 34 relativa al paso no se produce en una posición angular de la pala de rotor de 90° , sino con un ligero retraso en aproximadamente 110° . Se ha encontrado que esta posición de fase de la variación cíclica del paso desplazada algo hacia atrás, para una velocidad del viento de 12 m/s, es la más adecuada con el fin de mantener en un nivel bajo los esfuerzos que actúan sobre la instalación 14 de energía eólica.

15

REIVINDICACIONES

- 5 1. Control para una instalación (14) de energía eólica, donde el control (25) está diseñado para procesar valores (27) de medida y/o especificaciones externas (28) con el fin de determinar especificaciones (29) de control para una variación cíclica del paso en la instalación (14) de energía eólica, caracterizado por que en el control (25) está almacenada una curva característica (33) de la amplitud de la variación cíclica del paso frente a un parámetro eólico (V, 21, 22, 23, 24), donde la curva característica (33) presenta un punto extremo (39) desde el cual la curva característica (33) asciende o desciende en ambas direcciones, y por que el control (25) está diseñado para determinar una especificación (29) de control para la amplitud de la variación cíclica del paso a partir de un valor de medida del parámetro eólico (V, 21, 22, 23, 24), sobre la base de la curva característica (33).
- 10 2. Control según la reivindicación 1, caracterizado por que la curva característica (33) está asociada a un estado operacional o a varios estados operacionales en los cuales la instalación (14) de energía eólica está expuesta a un flujo incidente oblicuo (23, 24).
3. Control según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que en la curva característica (33) está representada la amplitud de la variación cíclica del paso frente a la velocidad (V) del viento.
- 15 4. Control según la reivindicación 3, caracterizado por que, comenzando por una velocidad (V) del viento baja, la curva característica (33) decrece hasta que la curva característica (33) cae a un punto extremo (39) con una velocidad (V) del viento intermedia, y por que la curva característica (33) asciende de nuevo al continuar aumentando la velocidad (V) del viento.
- 20 5. Control según la reivindicación 4, caracterizado por que en el punto extremo (39) la curva característica (33) cae a cero.
6. Control según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que la fase de la variación cíclica del paso se invierte al sobrepasar el punto extremo (39).
7. Control según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que la curva característica (33) está asociada a un estado operacional o a varios estados operacionales en los cuales la instalación (14) de energía eólica está expuesta a un cizallamiento.
- 25 8. Control según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que está establecido para procesar valores de medida concernientes a la velocidad (V) del viento, valores de medida concernientes al flujo incidente oblicuo (23, 24) y/o valores de medida concernientes al cizallamiento (21, 22), con el fin de determinar la especificación (29) de control para la variación cíclica del paso en la instalación (14) de energía eólica.
- 30 9. Control según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que la curva relativa al paso, dentro de la variación cíclica del paso, es una superposición lineal de una primera curva parcial y una segunda curva parcial, donde la primera curva parcial está asociada al flujo incidente oblicuo (23, 24) y donde la segunda curva parcial está asociada al cizallamiento (21, 22).
- 35 10. Control según la reivindicación 9, caracterizado por que la posición angular del rotor en la cual se produce el cruce por cero de la primera curva parcial está definida con relación a la dirección del flujo incidente oblicuo (23, 24).
11. Control según la reivindicación 10, caracterizado por que, con una velocidad del viento superior, el cruce por cero de la primera curva parcial se produce esencialmente en una posición angular del rotor (15) en la cual la pala de rotor intercepta la dirección del flujo incidente oblicuo (23, 24) y por que, con una velocidad del viento inferior, el cruce por cero se produce en un instante posterior.
- 40 12. Control según una de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado por que se procesan valores de medida anticipados de los parámetros eólicos (V, 21, 22, 23, 24).
13. Control según la reivindicación 12, caracterizado por que un valor de medida de un parámetro eólico (V, 21, 22, 23, 24), captado en una pala de rotor de un rotor, se utiliza como valor de medida anticipado para otra pala de rotor del rotor.
- 45 14. Control según una de las reivindicaciones 1 a 13, caracterizado por que el control es responsable del control operacional del ángulo de paso, y por que se superpone linealmente la especificación de control para la variación cíclica del paso a la especificación de control del control operacional.
- 50 15. Procedimiento de control para una instalación (14) de energía eólica, en el cual se procesan valores (27) de medida y/o especificaciones externas (28) con el fin de determinar especificaciones (29) de control para una variación cíclica del paso en la instalación (14) de energía eólica, caracterizado por que, sobre la base de una curva característica (33) de la amplitud de la variación cíclica del paso frente a un parámetro eólico (V, 21, 22, 23, 24), se determina una especificación (29) de control para la amplitud de la variación cíclica del paso procesando un valor de medida del parámetro eólico (V, 21, 22, 23, 24), donde la curva característica (33) presenta un punto extremo (39) desde el cual la curva característica (33) asciende o desciende en ambas direcciones.

Fig. 1

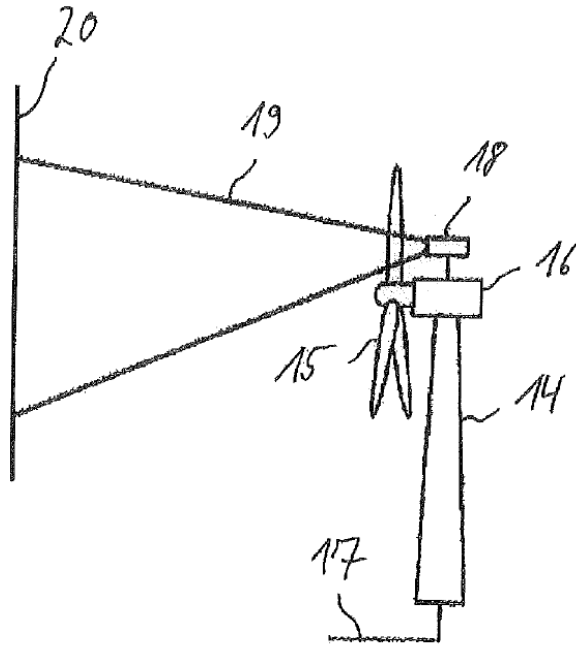


Fig. 2

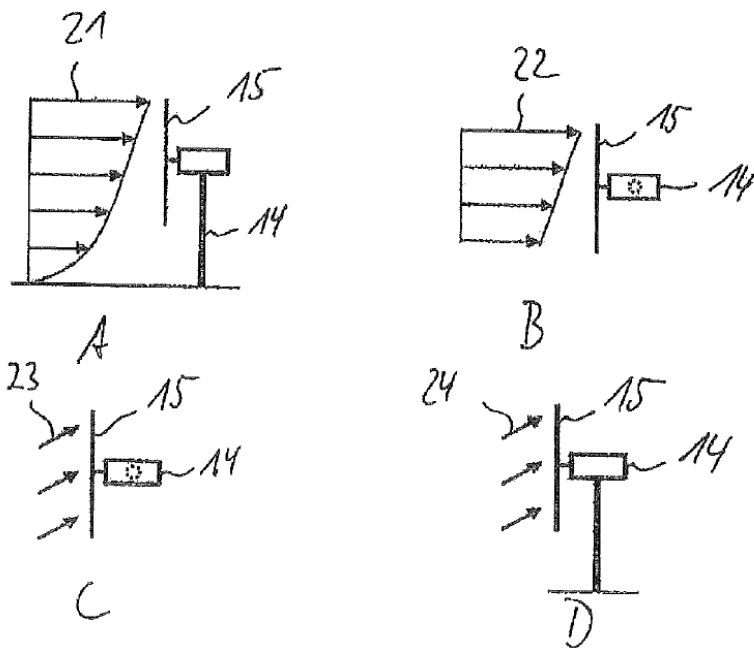


Fig. 3

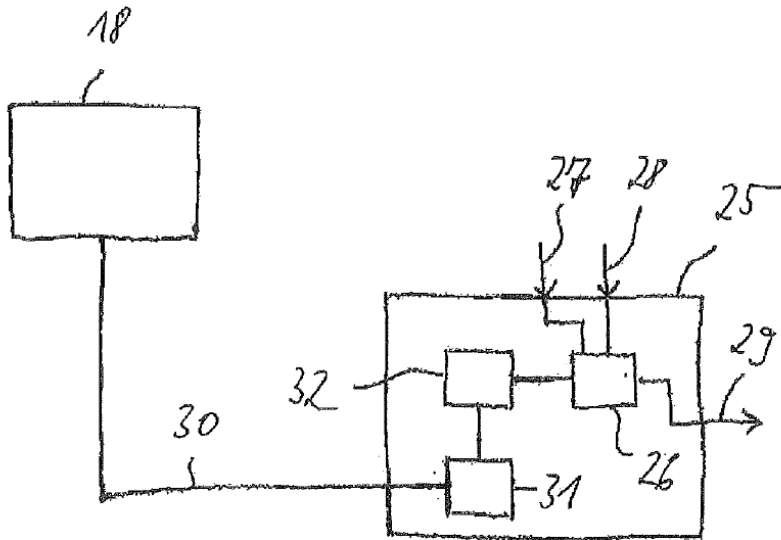


Fig. 4

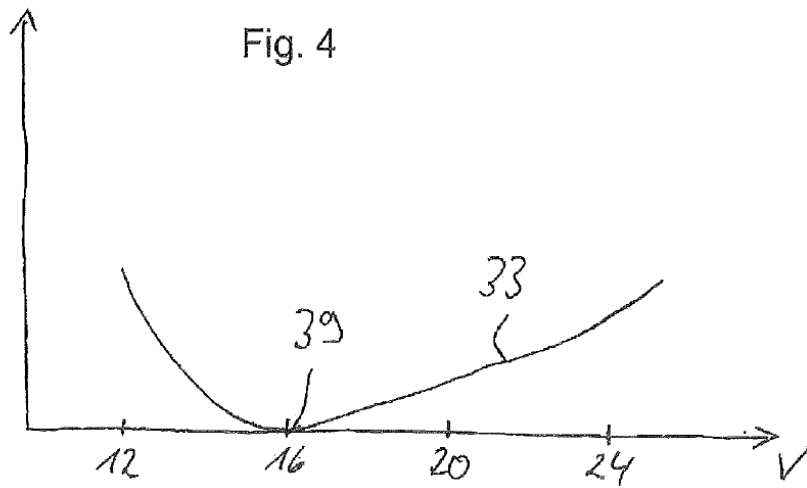


Fig. 5

